

21121
8



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

“ACATLAN”

“MÉTODO DE RECIMENTACIÓN Y MEJORAMIENTO DEL
SUELO DE CIMENTACIÓN POR MEDIO DEL USO
DE MICROPILOTES”

TESIS DE LICENCIATURA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

PRESENTA

CARLOS ROMÁN FIGUEROA MANDUJANO

ASESOR

ING. CELSO BARRERA CHÁVEZ



JUNIO 2003.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

"TODO LO PUEDO EN CRISTO QUE ME FORTALECE"

FILIPENSES 4:13

Doy Gracias a aquel que hizo posible que mi sueño se cumpliera,
El que Fue, Es, y Será por los Siglos de los Siglos,
Mi Dios Amado y Salvador.

A mi Madre, que con su Amor, Apoyo, Constancia y Esfuerzo,
me permitió la realización de esta obra, te amo y te amaré siempre preciosa.

A mis hermanos Alfonso y Ricardo, por sus grandes consejos
y el amor que me han demostrado.

Y a todos aquellos que hicieron posible que este trabajo quedara concluido,
Mi familia, maestros, amigos y compañeros.

Gracias Quetz, por estar aquí.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la
UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el
contenido de mi trabajo académico.

NOMBRE: Carlos Rama

Esperanza Claudia Jasso

FECHA: 4 Julio 2005

FIRMA: [Firma]

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Índice

INTRODUCCIÓN. 1

CAPÍTULO 1.

CAUSAS PRINCIPALES DE LAS FALLAS QUE SE PRESENTAN EN LAS CIMENTACIONES Y EN EL SUELO DE CIMENTACIÓN.

Objetivo específico.	3
Generalidades.	3
1.1 Causas derivadas por defectos del proyecto.	6
1.2 Causas originadas por defectos de la ejecución.	8
1.3 Causas derivadas por variaciones en el entorno de la estructura.	11
1.4 Causas generadas por modificaciones extraordinarias al proyecto original.	14
1.5 Causas derivadas del estudio del suelo de cimentación.	14

CAPÍTULO 2.

MÉTODOS MÁS COMUNES DE RECIMENTACIÓN Y DE REFUERZO DEL SUELO DE CIMENTACIÓN.

Objetivo específico.	17
2.1 Métodos de recimentación.	17
2.1.1 Introducción.	17
2.1.2 Investigaciones preliminares.	20
2.1.3 Apuntalamiento y anclajes.	20
2.1.4 Recimentación con zapatas corridas.	22
2.1.5 Recimentación con pilas o bases.	24
2.1.6 Recimentación con pilotes.	25
2.1.6.1 Pilotes hincados con gatos hidráulicos.	25
2.1.6.2 Pilotes perforados y colados en sitio.	28
2.1.6.2.1 Micropilotes.	30
2.2 Métodos para el refuerzo del suelo de cimentación.	31
2.2.1 Inyecciones al suelo de cimentación con lechada de cemento.	32
2.2.2 Inyecciones al suelo de cimentación con productos químicos.	33
2.2.3 Congelamiento del suelo de cimentación.	35

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO 3.

MÉTODO DE RECIMENTACIÓN POR MEDIO DEL USO DE MICROPILOTES.

Objetivo específico.	38
3.1 Generalidades.	38
3.2 Clasificación.	42
3.2.1 En base a su comportamiento.	49
3.2.2 Por el método de inyección.	51
3.3 Aplicaciones.	56
3.3.1 Para soporte estructural.	56
3.3.2 Para refuerzo en sitio.	62

CAPÍTULO 4.

MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN DE LOS MICROPILOTES.

Objetivo específico.	65
4.1 Criterios de selección.	65
4.1.1 Análisis socio-económico.	65
4.1.2 Análisis geotécnico.	66
4.2 Procedimientos de construcción de los micropilotes.	66
4.3 Perforación.	67
4.3.1 Circulación positiva o perforación con extracción interna.	67
4.3.2 Doble perforación.	67
4.3.3 Perforación doble con percusión excéntrica rotativa.	68
4.4 Inyección.	68
4.4.1 Inyección con tubo tremie.	68
4.4.2 Inyección de la lechada con presión.	69
4.4.3 Post-inyección de lechada.	69
4.5 Lechada de cemento.	69
4.5.1 Inyección de cemento compactado.	69
4.5.2 Factores que afectan la inyección de cemento compactado.	71
4.5.2.1 Fluidez de la lechada de cemento.	71
4.5.2.2 Bomba de inyección.	71

CAPITULO 5.

MÉTODOS DE DISEÑO DE LOS MICROPILOTES.

Objetivo específico.	73
5.1 Introducción.	73
5.2 Efectos de grupo.	73
5.3 Efecto de la cubierta permanente.	75
5.4 Conexión con la estructura.	75
5.5 Capacidad axial última de carga.	77

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.5.1 Resistencia estructural del eje.	78
5.5.2 Enlace del suelo inyección.	78
5.6 Métodos de cálculo para la obtención de la carga última de diseño.	81
5.6.1 Método empírico basado en la experiencia en el campo con los sistemas de anclaje.	81
5.6.2 Método de diseño empírico propuesto por Lizzi.	82
5.6.3 Método de diseño empírico basado en resultados de la prueba del piezómetro.	83
5.6.4 Método de diseño convencional para los micropilotes (Vesic).	90
5.6.5 Método de diseño para micropilotes inyectados bajo gravedad.	93
5.6.6 Método de diseño para micropilotes TITAN.	94
5.7 Pruebas de carga.	97
CONCLUSIONES	98
BIBLIOGRAFÍA	100

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Introducción

La cimentación es un sistema formado por la interacción del suelo con una estructura, su diseño en todo proyecto debe ser cuidadosamente vigilado por el ingeniero civil, ya que de carecer de los conocimientos necesarios para el buen desarrollo de ésta, puede generar una problemática que en ocasiones es irreparable, afortunadamente el ingeniero cuenta la mayoría de las veces con las suficientes herramientas (tecnología y metodología) para solucionar los desperfectos que se originen.

Las técnicas de cimentación fueron desarrolladas a través del tiempo por medios puramente empíricos dando lugar a la mecánica de suelos, los ingenieros civiles y los geotecnistas han trabajado en mejorar las cimentaciones para hacerlas cada vez mas seguras y aplicando la tecnología que también ha avanzado mucho para ayuda del ser humano.

Es importante considerar que dentro del diseño de la cimentación, el ingeniero debe basar sus investigaciones en normas y reglamentos vigentes, siempre respetando las consideraciones y sugerencias que le presentan, ya que si se sigue esto adecuadamente, difícilmente se van a presentar fallas, aunque desafortunadamente para el ingeniero civil, no es posible que se consideren todos los factores que perjudican la obra, hablando particularmente de la cimentación.

En el capítulo 1 se describen algunas de las fallas que se presentan en el diseño, en la construcción, la ejecución y las modificaciones extraordinarias al proyecto original, se consideran también otros factores que son importantes como los que se presentan por una mala interpretación de los estudios del suelo y el efecto de colindancia.

Existe una gran cantidad de técnicas de recimentación o de recalce, considerando que la cimentación se divide en dos partes, una, la correspondiente a la estructura de la cimentación y la otra el suelo, en el capítulo 2 se estudian algunas de las técnicas para reforzar la estructura como son la recimentación con pilotes ya sean hincados o perforados, dentro de éstos se considera a los micropilotes -motivo de este estudio-, las pilas o bases, la ampliación del área donde se apoya la cimentación y también las

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

utilizadas para reforzar el suelo de cimentación como es la inyección de lechada de cemento, la inyección de productos químicos y la congelación de suelo.

En el capítulo 3 se inicia el estudio de los micropilotes, partiendo de sus antecedentes históricos, posteriormente la clasificación dada por su comportamiento y también por la inyección de la lechada de cemento, los tipos de micropilotes patentados y su utilización.

En el capítulo 4 se observan los factores decisivos para la selección del método de recimentación, y posteriormente los procesos constructivos que se deben seguir para la ejecución de los micropilotes, considerando la perforación, la inyección, la lechada de cemento y los factores que afectan la inyección.

El capítulo 5 presenta los métodos más comunes para el diseño geotécnico de los micropilotes, dando algunos parámetros que deben considerarse para efectuarlo y proporciona las herramientas teóricas actuales para el cálculo de la capacidad de carga.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo

CAUSAS PRINCIPALES DE LAS FALLAS QUE SE PRESENTAN EN LAS CIMENTACIONES Y EN EL SUELO DE CIMENTACIÓN

OBJETIVO ESPECÍFICO

Estudiar las principales causas de falla en las cimentaciones generadas por defectos del proyecto, la ejecución y las variaciones externas, así mismo la falla que se puede presentar en el suelo de cimentación, por motivos de la interpretación del estudio de mecánica de suelos y reconocimiento del suelo de cimentación.

GENERALIDADES

Las primeras cimentaciones de las que se tienen registros son las que se efectuaban hincando pilotes de madera para la construcción de poblados lacustres, iniciando con la idea de capacidad de carga, en poblados de Asia, instalados en zonas pantanosas, consolidaban las áreas elegidas para sus viviendas por medio de cañas de bambú colocadas en capas superpuestas, realizando las primeras consolidaciones de suelos compresibles.

En ese tiempo, los únicos materiales con que disponían los hombres antiguos eran la piedra y la madera, siendo primero la madera en un orden cronológico, la cual es capaz de resistir a la tensión y la compresión, como aun no se conocía el concreto, las cimentaciones que se realizaban eran vertiendo en las excavaciones rocas, o formando pirámides de roca, dispuestas para que para que trabajaran a compresión y transmitieran al cimiento una carga repartida homogénea.

En la época romana, las cimentaciones tuvieron un adelanto con el ingeniero Vitruvio, quien resolvió la ejecución de difíciles cimentaciones de puentes y obras a través de ríos y de obras portuarias, con materiales y medios muy limitados. Cuando se hallaban

bajo la presencia de aguas freáticas, Vitruvio recomendaba que fuera construida previamente una ataguía envolviendo la cimentación, formada por una doble fila de pilotes de madera, rellenándose el espacio entre ellos con arcilla colocada en cestos de junco y bien comprimida en el sitio; luego se excavaba dentro de la ataguía, se limpiaba el fondo, se vertía mortero de cal, rellenándose finalmente con roca. Otras veces, Vitruvio empleaba cajones constituidos por pilotes enlazados por piezas de madera, las cuales eran hincadas a través de las capas freáticas.

En la Edad Media, se utilizaron más las rocas vertidas o colocadas; los pilotes de madera o la combinación de ambos materiales fueron las soluciones a las cimentaciones en este período. En el Renacimiento, con Leonardo da Vinci se desarrolla la mecánica y después Galileo estudia la resultante de fuerzas y define el momento. Como el costo de las cimentaciones a base de roca era elevado y en ese momento era posible determinar la repartición de cargas, los constructores recurrieron a pozos enlazados por arcos de descarga para aligerar las cimentaciones (Figura 1.1)

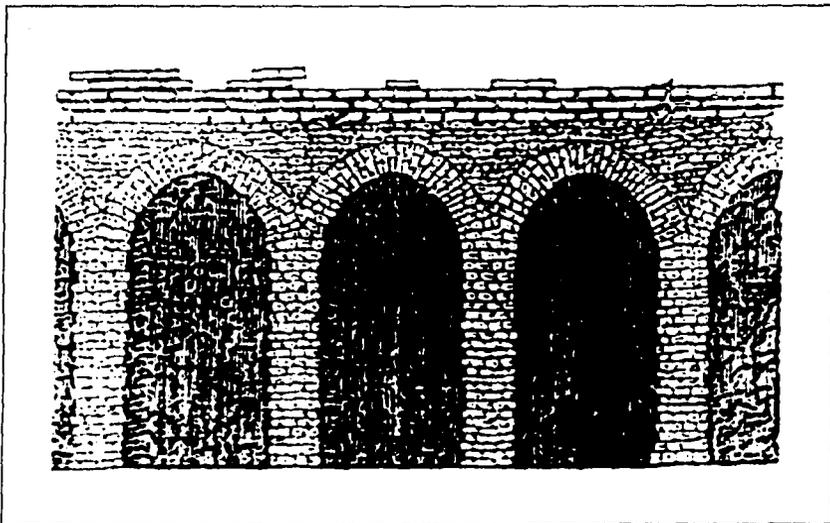


Figura 1.1 Construcciones aligeradas en el siglo XVI ⁽¹⁾

Las técnicas de Vitruvio se siguen utilizando en la actualidad, pero con grandes diferencias, como la magnitud de las obras, el tipo de material empleado, que como en el caso de los pilotes y las piezas de madera, ahora son pilotes y pantallas de concreto armado.

A partir del siglo XVIII se empiezan a considerar los suelos con un sentido técnico y los constructores comprenden la importancia sobre el empuje de tierra sobre los muros de contención. Es el ingeniero Bédidor quien, a inicios del siglo XVIII sugiere una teoría de rozamientos de tierra para la determinación de empuje en muros.

En 1750 Blondel, en Francia, publica un curso de arquitectura con una parte extensa dedicada a las cimentaciones, con reglas empíricas para el dimensionamiento y una descripción detallada del procedimiento de tabla-estacado de madera y de hincado de cajones (Figura 1.2). En 1773, Coulomb presenta la memoria sobre su teoría de equilibrio de tierras, definiendo el ángulo de fricción y la cohesión, es la ley que relaciona ambos parámetros con la resistencia tangencial, la cual actualmente es válida si se consideran las presiones efectivas.

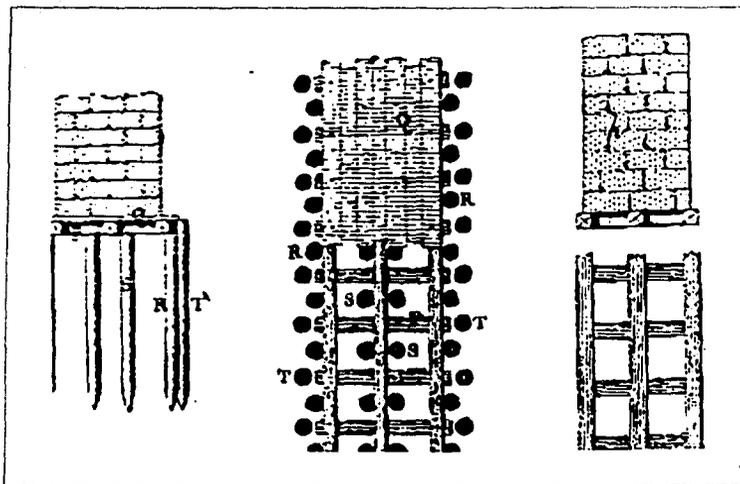


Figura 1.2 Diseño de una cimentación realizada por Blondel en el Siglo XVIII (Original) ⁽¹⁾

A principios del siglo XIX, Vicat inventa el cemento artificial, con lo cual comienza a desarrollarse el empleo del concreto, el cual estaba olvidado desde los romanos, se utilizan los elementos metálicos como material de construcción y en 1838, el inglés Mitchel aplica por primera vez pilotes metálicos de rosca que penetraban en el terreno por rotación. En 1841, Triger descubre las posibilidades del aire comprimido, en 1856, Darcy enuncia la ley que lleva su nombre, la cual explica la filtración en los

suelos y en ese mismo año Rankine aplica por primera vez las ecuaciones de equilibrio en suelos no homogéneos.

En los inicios del siglo XX el concreto armado revoluciona la construcción y en las cimentaciones también se denota un cambio en la construcción de zapatas aisladas o corridas, placas planas o con nervaduras, pilotes prefabricados, cajones por aire comprimido o por excavación y cajones con fondo. En Estados Unidos y Europa se dan las primeras patentes de pilotes moldeados "in situ" y en 1925 el Profesor Terzaghi publica su obra, en donde expone los conceptos fundamentales que sirven de base para la mecánica de suelos, la cual a partir de entonces toma forma de ciencia aplicada.

Hoy en día se dispone de maquinaria más potente, métodos geotécnicos más eficientes y más exactos, adicionalmente existen en el mercado nuevos materiales, debido a esto, la construcción de cimentaciones ha dejado a un lado su carácter empírico convirtiéndose en parte de una ciencia. ⁽¹⁾

1.1 CAUSAS DERIVADAS POR DEFECTOS DEL PROYECTO

Arthur Casagrande, solía decirles a sus alumnos la siguiente frase:

"Recimentar, es corregir lo que se hizo mal desde el principio"

Partiendo de esta pequeña introducción en adelante estudiaremos las diversas deficiencias que puede sufrir una cimentación. Ya que toda obra civil requiere para su construcción una planeación, la cual esta formada por las opiniones de diferentes especialistas en el ramo; este proceso ha sufrido modificaciones con el tiempo hasta llegar a lo que se realiza en la actualidad, pero antiguamente los conocimientos sobre la capacidad de carga del suelo y las fallas que pudiera generar un mal diseño de la cimentación de una estructura eran empíricos, ya que la experiencia que se tenía sobre materiales y estudios sobre suelos eran muy abstractos, pero no por ello despreciables, ya que de esa manera se fundaron las bases de la mecánica de suelos.

En nuestro país, hablando principalmente de la Cd. de México, la cual enfrenta varios problemas, entre ellos el tipo de suelo y una mala planeación de la ciudad y la extracción de agua del subsuelo, han provocado que las construcciones antiguas sufran deterioro por el comportamiento del suelo como hundimientos diferenciales, expansiones y desplomes, lo cual tiene como consecuencia que los métodos para cimentar que se utilizan en la Cd. de México tengan que ser llamados especiales, ya que combinan diferentes tipos de cimentaciones existentes, y a su vez aprovechan el ingenio característico de los ingenieros mexicanos.

El reglamento de construcciones vigente para el Distrito Federal, nos dice en el Artículo 56, fracción C, que para la solicitud de Licencia de Construcción se deben presentar:

"Dos tantos del proyecto estructural de la obra en planos debidamente acotados y especificados que contengan una descripción completa y detallada de las características de la estructura incluyendo su cimentación. Deberán especificarse en ellos los datos esenciales del diseño como las cargas vivas y los coeficientes sísmicos considerados, y las calidades de materiales. Deberán indicarse los procedimientos de construcción recomendados, cuando éstos difieran de los tradicionales. Deberán mostrarse en planos los detalles de conexiones, cambios de nivel y aberturas para ductos. En particular, para estructuras de concreto se indicarán mediante dibujos acotados los detalles de colocación y traslapes de refuerzo de las conexiones entre miembros estructurales...

...Estos planos serán acompañados de la memoria de cálculo en la cual se describirán, con el nivel de detalle suficiente para que puedan ser evaluados por un especialista externo al proyecto, los criterios de diseño estructural adoptados y los principales resultados del análisis y el dimensionamiento. Se incluirán los valores de las acciones de diseño, y los modelos y procedimientos empleados para el análisis estructural. Se incluirá una justificación del diseño de la cimentación y de los demás documentos especificados en el Título Sexto de este Reglamento".⁽²⁾

El Reglamento de Construcciones especifica en esta fracción que para la solicitud de licencia de construcción para obra nueva, es necesario cubrir los requisitos mencionados anteriormente. Haciendo un enfoque acerca de lo señalado sobre cimentaciones, podemos resaltar que el Reglamento de Construcciones nos menciona que es necesario presentar dentro de la memoria de diseño, una justificación de la cimentación para que ésta sea evaluada por un especialista externo al proyecto, el cual decidirá en base a lo que se le presenta, si la cimentación que se diseñó para el proyecto es la adecuada, mas adelante, el Reglamento de Construcciones en el Artículo 231, dice lo siguiente:

"La memoria de diseño incluirá una justificación del tipo de cimentación proyectado y de los procedimientos de edificación especificados, así como una descripción explícita de los métodos de análisis usados y del comportamiento previsto para cada uno de los estados límite indicados en los artículos 224, 228 y 229 de este Reglamento. Se anexarán los resultados de las exploraciones, sondeos, pruebas de laboratorio y otras determinaciones y análisis, así como las magnitudes de las acciones consideradas en el

diseño, la interacción considerada con las cimentaciones de los inmuebles colindantes y la distancia, en su caso, que se deje entre estas cimentaciones y la que se proyecta.

En el caso de edificios cimentados en terrenos con problemas especiales, y en particular los que se localicen en terrenos agrietados, sobre taludes, o donde existan rellenos o antiguas minas subterráneas, se agregará a la memoria una descripción de estas condiciones y cómo éstas se tomaron en cuenta para diseñar la cimentación."⁽²⁾

Los artículos del Reglamento de Construcciones mencionados, nos llevan a deducir que en una edificación, si se siguen estas reglas, difícilmente se deberían ejecutar trabajos de recimentación, pero se ha comprobado que en una fracción muy pequeña de las memorias de cálculo que se entregan, dedican un espacio para la justificación de las características resistentes del terreno de cimentación ⁽⁴⁾, sin embargo el Reglamento de Construcciones es muy específico en estas situaciones, como se aprecia en el Artículo 220:

"La investigación del subsuelo del sitio mediante exploración de campo y pruebas de laboratorio deberá ser suficiente para definir de manera confiable los parámetros de diseño de la cimentación, la variación de los mismos en la planta del predio y los procedimientos de edificación. Además, deberá ser tal que permita definir:

- I. En la zona I a que se refiere el artículo 219 del Reglamento, si existen en ubicaciones de interés materiales sueltos superficiales, grietas, oquedades naturales o galerías de minas, y en caso afirmativo su apropiado tratamiento, y
- II. En las zonas II y III del artículo mencionado en la fracción anterior, la existencia de restos arqueológicos, cimentaciones antiguas, grietas, variaciones fuertes de estratigrafía, historia de carga del predio o cualquier otro factor que pueda originar asentamientos diferenciales de importancia, de modo que todo ello pueda tomarse en cuenta en el diseño."⁽²⁾

Esta situación nos lleva a definir que las causas principales por las que es necesario recimentar por defectos en el proyecto, se debe a que no se tomaron las debidas precauciones, no se efectuó una buena exploración o un buen trabajo de laboratorio y diseño, o en algunos casos, no se aplicaron las disposiciones del Reglamento de Construcciones vigente para el Distrito Federal.

1.2 CAUSAS ORIGINADAS POR DEFECTOS DE LA EJECUCIÓN

Es difícil comprobar que una cimentación pueda fallar debido a su incorrecta ejecución, las causas de esta problemática surgen a raíz de diversas situaciones como

errores en el procedimiento constructivo y el uso de materiales inadecuados, es necesario que la obra cuente con procesos de control de calidad, pero es bien sabido que en algunos casos sujetos a procesos humanos, falta de experiencia y la contratación de empresas no especializadas, las obras pueden fallar.

Un ejemplo de falla en el proceso de cimentación es el que se tiene en la elaboración de pilotes perforados, ya que en su fabricación deben ser tomados en cuenta algunos factores como la inyección de lechada de concreto o de cemento según sea el caso, ya que una extracción rápida del tubo de soporte puede causar un estrangulamiento del pilote, esto significa una reducción en el diámetro de pilote y como consecuencia problemas en la capacidad de carga.

Otro problema que se puede presentar en los pilotes perforados, es el lavado del concreto inyectado, el cual se presenta cuando se tiene agua intersticial o el nivel de aguas freáticas no fue considerado.⁽⁷⁾

De la misma manera, la falta de control en la elaboración del concreto puede tener consecuencias graves en la construcción de cimentaciones que requieran este material como el de mayor importancia para trabajar adecuadamente, por ejemplo que no cumpla con las especificaciones de proyecto o sea de una resistencia menor, o que el material escogido para la cimentación no sea el adecuado, ya que la intemperización también puede causar problemas en la cimentación, tomando como ejemplo, los pilotes de madera, los cuales si se encuentran secos o mojados en su totalidad, pueden llegar a durar mucho tiempo, pero sufren deterioro cuando están parcialmente secos o parcialmente húmedos, también pueden sufrir daños debidos a hongos o bacterias, por no haber observado las recomendaciones de mecánica de suelos pertinentes.⁽⁶⁾

Dentro del marco legal, una vez que se presenta un daño en nuestra estructura, se debe notificar inmediatamente al Distrito Federal, tal como lo marca el Artículo 233, 234 235 y 236, en el Capítulo IX sobre "Construcciones Dañadas":

Artículo 233.

Todo propietario o poseedor de un inmueble tiene obligación de denunciar ante el Departamento los daños de que tenga conocimiento que se presenten en dicho inmueble, como los que pueden ser debidos a efectos del sismo, viento, explosión, incendio, hundimiento, peso propio de la edificación y de las cargas adicionales que obran sobre ellas, o a deterioro de los materiales e instalaciones.

Artículo 234.

Los propietarios o poseedores de Edificaciones que presenten daños, recabarán un dictamen de estabilidad y seguridad por parte de un Corresponsable en Seguridad Estructural, y del buen estado de las instalaciones, por parte de los Corresponsables respectivos. Si los dictámenes demuestran que no afectan la estabilidad y buen funcionamiento de las instalaciones de la edificación en su conjunto o de una parte significativa de la misma puede dejarse en su situación actual, o bien solo repararse o reforzarse localmente. De lo contrario, el propietario o poseedor de la edificación estará obligado a llevar a cabo las obras de refuerzo y renovación de las instalaciones que se especifiquen en el proyecto respectivo, según lo que se establece en el artículo siguiente.

Artículo 235.

El proyecto de refuerzo estructural y las renovaciones de las instalaciones de una edificación, con base en los dictámenes a que se refiere el artículo anterior, deberán cumplir con lo siguiente:

- I. Deberá proyectarse para que la edificación alcance cuando menos los niveles de seguridad establecidos para las edificaciones nuevas en este Reglamento;
- II. Deberá basarse en una inspección detallada de los elementos estructurales y de las instalaciones, en la que se retiren los acabados y recubrimientos que puedan ocultar daños estructurales, y de las instalaciones;
- III. Contendrá las consideraciones hechas sobre la participación de la estructura existente y de refuerzo en la seguridad del conjunto, así como detalles de liga entre ambas, y las modificaciones de las instalaciones;
- IV. Se basará en el diagnóstico del estado de: la estructura y las instalaciones dañadas, y en la eliminación de las causas de los daños que se hayan presentado;
- V. Deberá incluir una revisión detallada de la cimentación y de las instalaciones ante las condiciones que resulten de las modificaciones a la estructura, y
- VI. Será sometido al proceso de revisión que establezca el Departamento para la obtención de la licencia respectiva.



Artículo 236.

"Antes de iniciar las obras de refuerzo y reparación, deberá demostrarse que el edificio dañado cuenta con la capacidad de soportar las cargas verticales estimadas y 30 por ciento de las laterales que se obtendrían aplicando las presentes disposiciones con las cargas vivas previstas durante la ejecución de las obras. Para alcanzar dicha resistencia será necesario, en los casos que se requiera, recurrir al apuntalamiento o rigidización temporal de algunas partes de la estructura."⁽³⁾

De lo anterior podemos deducir que una vez que se presenta la falla de la cimentación es posible recurrir a un método geotécnico de refuerzo, siempre y cuando sea revisado por un especialista, el cual nos notificará acerca de la seguridad de la estructura dañada. Esto no quiere decir, entonces, que sea necesario proceder a la demolición, ni tampoco que todas las estructuras dañadas se pueden reforzar, es necesario tomar en cuenta la opinión del Corresponsable y proceder a realizar el proyecto para reparar y/o reforzar la estructura.

1.3 CAUSAS DERIVADAS POR VARIACIONES EN EL ENTORNO DE LA ESTRUCTURA

Las variaciones en el entorno de la estructura se dan principalmente por las modificaciones que se hacen posteriores a la construcción, ya sea por el establecimiento de obras aledañas o por la variación de las condiciones hidráulicas del suelo, la primera, se da cuando es construido un edificio cerca, debido a las cargas que presenta en el suelo de cimentación, altera de manera importante las edificaciones próximas si no se consideran algunos criterios de diseño, como ejemplo se puede considerar el siguiente caso (Figura 1.3):

Dos edificios situados en la colonia Doctores, uno es un inmueble de 7 niveles que esta cimentado con una losa de cimentación rigidizada con contra-trabes atrincheradas, el cual presenta un hundimiento total de 1.2 m y un diferencial de 0.26 m hacia el oriente; estos movimientos han generado en el edificio contiguo de tres pisos, un hundimiento diferencial de 0.31 m hacia el poniente. Conforme a una revisión realizada de acuerdo al Reglamento de Construcciones del Distrito Federal para los dos edificios, las cimentaciones cumplen con los requerimientos especificados para la estabilidad, por lo tanto se concluyó que el hundimiento que se tiene en el edificio de 3 niveles se da por el hundimiento del edificio de 7 niveles, razón por la cual se decidió recimentar el primero con pilotes de fricción, a su vez, requiere un enderezado del edificio.⁽⁴⁾

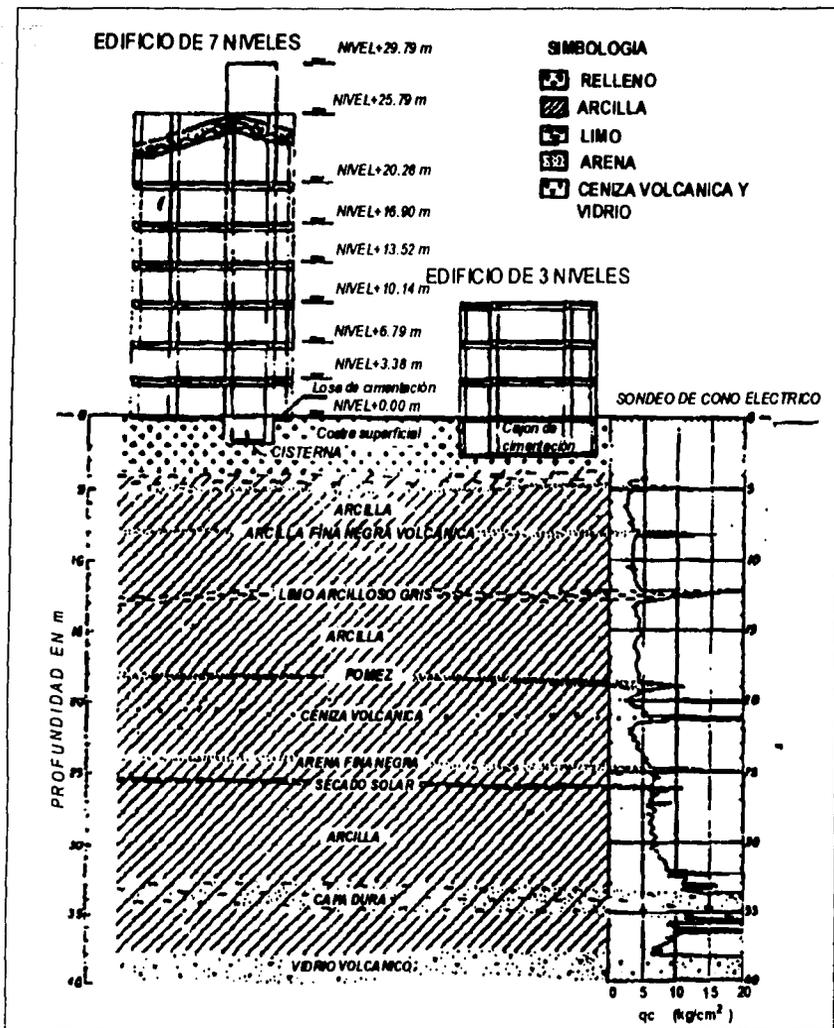


Figura 1.3 Corte estratigráfico en los edificios de 3 y 7 niveles donde se muestra los tipos de suelos que se encontraron.

Como se observa en el ejemplo mencionado, la causa del hundimiento en el edificio contiguo se debió principalmente a que el edificio de 7 niveles esta presentando los hundimientos que se tenían previstos conforme al diseño, pero, como aún no se habían presentado por completo, la construcción aladaña (el edificio de 3 niveles), sufrió en su estructura un asentamiento importante.

Este tipo de problemas los podemos encontrar en varias ocasiones, probablemente no se consideró la edificación cercana al momento de diseñar la cimentación, o viceversa, lo importante sería poder determinar cual de las dos estructuras es más antigua y tomar las consideraciones pertinentes; nuevamente, el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, en el Artículo 221, nos habla acerca de esta situación:

"Deberán investigarse el tipo y las condiciones de cimentación de las Edificaciones colindantes en materia de estabilidad, hundimientos, emersiones, agrietamientos del suelo y desplomes, y tomarse en cuenta en el diseño y edificación de la cimentación en proyecto.

Asimismo, se investigarán la localización y las características de las obras subterráneas cercanas, existentes o proyectadas, pertenecientes a la red de transporte colectivo, de drenaje y de otros servicios públicos, con objeto de verificar que la edificación no cause daños a tales instalaciones ni sea afectada por ellas"⁽⁷⁾

Otro problema que se puede presentar en las cimentaciones es el agua; la extracción de agua del subsuelo, puede causar que la consolidación de las arcillas se presente de manera precipitada, motivo por el cual los hundimientos se dan en menor tiempo, este caso se tiene en la Cd. de México, donde se había extraído agua durante un periodo de tiempo extenso, lo cual generó que muchas de las construcciones asentadas en el centro y exterior de la Cd. presentaran hundimientos diferenciales. En otros casos, podemos citar de ejemplo el monumento a la Independencia, situado en la Avenida Reforma, el cual esta cimentado con pilotes de punta y el suelo alrededor ha presentado consolidación al grado que provoca un efecto visual de elevación al disminuir el nivel del piso. Otro problema que se puede presentar es la presencia de arcillas expansivas, las cuales al entrar en contacto con el agua aumentan su volumen, provocando el levantamiento de la estructura o estructuras.

Es importante señalar también que algunos tipos de árboles requieren de bastante agua para su crecimiento y la toman del subsuelo, provocando la disminución del nivel establecido y causando cambios en la estructura del suelo.

1.4. CAUSAS GENERADAS POR MODIFICACIONES EXTRAORDINARIAS AL PROYECTO ORIGINAL

Dentro de esta problemática podemos establecer que las construcciones son diseñadas y calculadas de acuerdo al uso que originalmente se les designa, el Reglamento de Construcciones es muy específico en esto, como se describe en el artículo 281:

"Los inmuebles no podrán dedicarse a usos que modifiquen las cargas vivas, cargas muertas, o el funcionamiento estructural del proyecto aprobado. Cuando una edificación o un predio se utilice total o parcialmente para algún uso diferente del autorizado, sin haber obtenido previamente la licencia de cambio de uso establecida en el artículo 54 de este Reglamento, el Departamento ordenará, con base en el dictamen técnico, lo siguiente:

- I. La restitución de inmediato al uso aprobado, si esto puede hacerse sin la necesidad de efectuar obras; y
- II. La ejecución de obras, adaptaciones, instalaciones y otros trabajos que sean necesarios para el correcto funcionamiento del inmueble y restitución al uso aprobado, dentro del plazo que para ello se señale." ⁽²⁾

Es importante señalar que el Reglamento de Construcciones en el Distrito Federal no menciona que no se puede cambiar el uso que se le dio al proyecto desde el inicio, y en caso de que sea necesario, se deberá aprobar por el Departamento por medio de un Director Responsable de Obra, pero esto en nuestro país esto es ambiguo, con frecuencia no se considera por diversas razones, desde el desconocimiento de la legislación, hasta la justificación de los trámites en el Departamento.

1.5. CAUSAS DERIVADAS DEL ESTUDIO DEL SUELO DE CIMENTACIÓN

Los suelos pueden clasificarse en dos tipos en construcción, suelos finos y suelos gruesos, los suelos finos a su vez podemos encontrarlos en la naturaleza como arcillas, limos y suelos orgánicos, pero desde el punto de vista del Reglamento de Construcciones vigente para el Distrito Federal, los suelos orgánicos deben ser desechados, ya que por su consistencia regularmente heterogénea es difícil conocer sus propiedades físicas y mecánicas, tal y como lo marca en el artículo 218:

"Toda edificación se soportará por medio de una cimentación apropiada. Las edificaciones no podrán en ningún caso desplantarse sobre tierra vegetal, suelos o rellenos sueltos o desechos. Solo será aceptable cimentar sobre terreno natural

competente o rellenos artificiales que no incluyan materiales degradables y hayan sido adecuadamente compactados."⁽²⁾

Las Normas Técnicas Complementarias para el diseño de cimentaciones maneja en sus primeros apartados los estudios mínimos que se deben efectuar para conocer las características del suelo de cimentación en base a la zona donde se encuentre localizada nuestra obra.

Los suelos gruesos básicamente consisten en gravas y arenas. Podemos decir que hay suelos muy gruesos, como los pedregones y los guijarros, pero es más sencillo clasificarlos dentro de los suelos gruesos, prácticamente es imposible encontrar suelos completamente gruesos o completamente finos, por lo tanto, para su clasificación es fundamental exponer al suelo a diversas pruebas tanto en campo como en laboratorio para poder definirlo adecuadamente.

Cuando se dispone de los suficientes datos tanto de laboratorio como de campo, lo más práctico es utilizar la carta del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos o mejor conocida como SUCS.

Los suelos cohesivos presentan características importantes que deben ser analizadas en el proyecto de la cimentación, una de ellas es el proceso de consolidación, el cual se presenta en suelos cohesivos saturados, que al ser sometidos a una carga vertical, expulsan el agua de su interior, lo cual se ve reflejado en una disminución de volumen hasta que alcanza la presión interna de equilibrio; una reducción de la carga puede causar expansión cuando el suelo permanece saturado, este proceso puede durar mucho tiempo, en algunos casos, varios años. Existe una analogía entre la consolidación y la permeabilidad del suelo, de ahí la necesidad de realizar estudios en los suelos, es difícil seguir un razonamiento empírico para este proceso, tratando de acertar el grado de consolidación que se tiene en un suelo o la misma que se va a presentar una vez aplicada la carga.

Otro proceso que también esta presente en los suelos cohesivos y de igual manera en los suelos gruesos, es el asentamiento inmediato; este proceso ocurre al momento de ser aplicada la carga, el suelo presentará una deformación la cual no es excesiva. En el caso de las arcillas debido a que el agua no sale de ellas con rapidez solo se deformará por efecto del peso y la poca compresibilidad del agua, en los suelos gruesos, este proceso se da principalmente por el acomodo de sus partículas constitutivas, pero también se puede presentar por factores especiales con una continuación de la deformación, estos factores pueden deberse a:

-
- Vibraciones debidas al movimiento del tráfico.
 - Maquinaria pesada,
 - Ciertas operaciones de construcción como el hincado de pilotes.

Pero, definitivamente, una vez que el suelo ha alcanzado su grado máximo de acomodo, las deformaciones serán casi imperceptibles.

Esto no implica que se pueda deducir que un suelo presenta más ventajas que otro en la ingeniería, ya que definitivamente no es posible encontrar un suelo óptimo que no presente alguna deficiencia sin solución por medio de la aplicación de la mecánica de suelos, la cual proporcionará la solución más efectiva, por medio de varios métodos de cimentación.

En el diseño de la cimentación, mencionado en el Reglamento de Construcciones en el Artículo 224⁽²⁾ se deben considerar estados límite, además de los correspondientes a los miembros de la estructura:

1. De falla:
 - a) Flotación.
 - b) Desplazamiento plástico local.
 - c) Falla estructural de pilotes, pilas u otros elementos de la cimentación.
2. De servicio:
 - a) Movimiento vertical medio, asentamiento o emersión, con respecto al nivel del terreno circundante.
 - b) Inclinación media, y
 - c) Deformación diferencial.

CIMIENTOS EN ARENAS Y GRAVAS

En suelos de alta permeabilidad se pueden presentar rápidos cambios en el nivel de agua subterránea con efectos consecuentes sobre la densidad del suelo y las presiones de poro.

CIMIENTOS EN ARCILLAS Y LIMOS

La capacidad última de carga en suelos cohesivos con baja permeabilidad es más crítica inmediatamente después de la construcción, antes de que haya tenido tiempo de disiparse el exceso de presión de poro, es decir bajo condiciones sin drenado, en el transcurso del tiempo. A medida que se efectúa la consolidación la rigidez de suelo aumenta y también lo hace la resistencia al cortante.

Capítulo

MÉTODOS MÁS COMUNES DE RECIMENTACIÓN Y DE REFUERZO DEL SUELO DE CIMENTACIÓN

OBJETIVO ESPECÍFICO

Describir los métodos más comunes que se utilizan para la recimentación y el refuerzo del Suelo de Cimentación para dar solución a los problemas que se presentan después de colocada la cimentación.

2.1 MÉTODOS DE RECIMENTACIÓN

2.1.1 INTRODUCCIÓN

La recimentación de estructuras comprende varias técnicas que son tan antiguas como las mismas construcciones, el propósito de recimentar es incrementar el tamaño o la profundidad de la estructura de cimentación para aumentar la capacidad de soporte que se necesita para detener o disminuir las deformaciones, a esto se le llama *recimentación para corrección del mal comportamiento de la cimentación original*, si la cimentación es reforzada por las construcciones futuras o que se encuentran en etapa de construcción, recibe el nombre de *recimentación preventiva*.

Durante la edad media, las grandes construcciones presentaban muchas dificultades, en especial las catedrales, ya que eran construcciones largas y pesadas, uno de los ejemplos más considerables de hundimiento es la Torre de Pisa, con una altura de 55 metros, ahora con un desplome de 4.26 metros, la cual ha presentado hundimientos diferenciales desde hace aproximadamente 600 años, en 1932 se inyectaron en el subsuelo 1000 toneladas de lechada de cemento mediante perforaciones a través de la cimentación, en un esfuerzo por detener el hundimiento, pero esto no fue suficiente, y la inclinación continúa, actualmente los ingenieros italianos han retirado parte del

suelo de cimentación para que la torre nuevamente tome la posición que tenía hace tres siglos, con esto han logrado que tenga un enderezamiento de medio grado, el sistema consiste en taladrar bajo la torre con 41 taladros de 21 centímetros de diámetro, extrayendo la tierra, creando una cavidad la cual se comprime en cuestión de minutos al extraer el taladro por el peso de la torre, con esta técnica se prevé que se mantenga en pie por otros trescientos años más. (Figuras 2.1 y 2.2) ⁽²³⁾

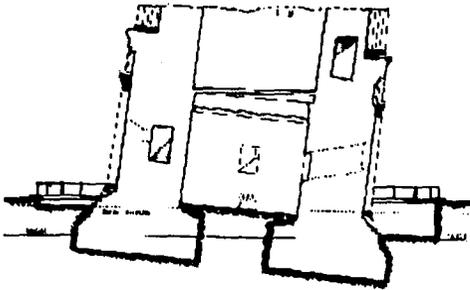


Figura 2.1 Cimentación de la Torre de Pisa donde se aprecia la inclinación que presenta.

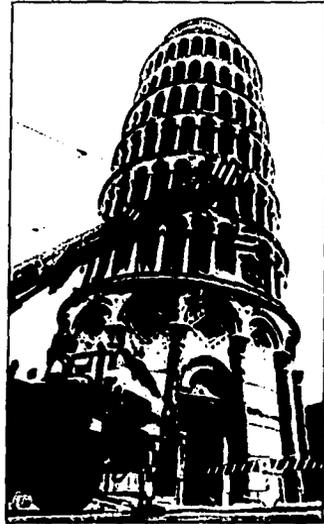


Figura 2.2 Trabajos de recimentación y enderezamiento por medio de cables en la Torre de Pisa.

En Estados Unidos, uno de los trabajos de recimentación más importantes que se llevó a cabo, fue el que se aplicó en el monumento localizado en Washington, el cual es uno de los primeros en ese país aplicando algunas de estas técnicas. Una de ellas fue aplicada como consecuencia de una mala cimentación, la construcción de este monumento se inició en 1848, y alcanzó una altura de 46.63 metros, pero fue interrumpida en 1861 a causa de la guerra civil. Durante el cese de la construcción, el monumento presentó hundimientos diferenciales perjudiciales, quizá debidos a la suspensión de los trabajos, la recimentación fue construida en 1880 y consistió en incrementar el área de cimentación de 24.38 metros a 38.40 metros por lado y los

169.16 metros de altura del monumento fueron completados en 1884, el plan original concebía una altura de 182.88 metros.(Figura 2.3)⁽¹⁰⁾

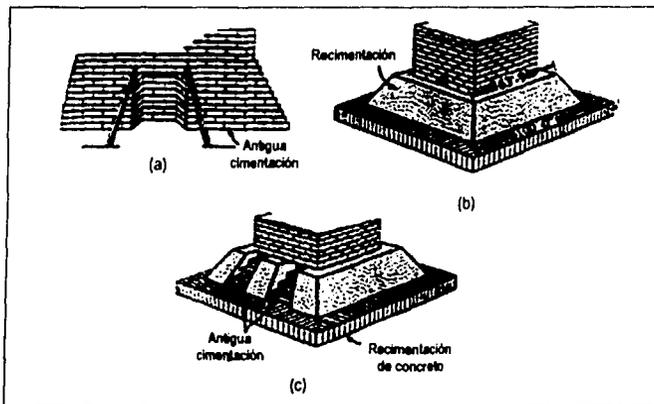


Figura 2.3 Recimentación en el monumento en Washington.

Otro de los trabajos importantes de recimentación es el que se lleva a cabo en el Palacio de Bellas Artes, en la Cd. de México, cabe hacer notar que la recimentación en México es una técnica común, pero es importante desde el punto de vista del patrimonio histórico, este edificio también presenta un problema por una inadecuada cimentación, la cual ha presentado un hundimiento de aproximadamente 3.05 metros desde su construcción en 1904, con un hundimiento de 12.7 centímetros por año. Se han intentado varias opciones para detener este problema, de 1910 a 1913, 70,000 sacos de cemento fueron inyectados en los estratos, pero no dio resultados satisfactorios; en 1915, se erigió una pared de placas de acero perimetralmente a la construcción, el objetivo de esto era confinar los estratos horizontalmente, pero el hundimiento era causado por la consolidación del suelo, este intento también fue insuficiente y el hundimiento continuó.

Estas dos técnicas de recimentación, -inyección y confinamiento del suelo por medio de placas de acero- han sido utilizadas en otras estructuras, pero raramente cumplen con su objetivo en las cimentaciones construidas en arcillas porque estas técnicas no funcionan en este tipo de suelo, en estos casos es necesario llevar la nueva cimentación hasta estratos de roca más firmes. Una propuesta para recimentar el palacio de Bellas Artes es instalar un sistema de anclaje que mantenga estable el nivel del Palacio, para prevenir los asentamientos.⁽¹⁰⁾

2.1.2 INVESTIGACIONES PRELIMINARES

Antes de iniciar cualquier tipo de método de cimentación existente, es necesario hacer un reconocimiento previo del tipo de suelo y las condiciones en las que este se encuentra, para hacer un análisis tanto para operaciones nuevas como para prevenir asentamientos futuros como resultado de sobrecarga en las cimentaciones existentes, la investigación se debe llevar a cabo por medio de los procedimientos geotécnicos más comunes como son perforaciones o pozos de exploración, con pruebas de laboratorio en muestras de suelo, para conocer las características físicas y mecánicas que nos permitan determinar las cargas permisibles para las nuevas cimentaciones.

Es importante tener en cuenta que para que las recimentaciones detengan el asentamiento se deben llevar a un suelo relativamente indeformable bajo la zona de hundimiento; en algunos casos, donde el suelo de cimentación está basado en arcilla compresible, es prácticamente inútil extender la cimentación por medio de recimentación poco profunda, esto solamente transmitirá las presiones hacia el mismo suelo compresible a un nivel más bajo, (figura 2.4a) y se repetirá el asentamiento nuevamente. La recimentación, se debe llevar hasta un estrato relativamente incompresible y profundo, ya sea por medio de uso de pilas o pilotes (figura 2.4b) o aumentando el área de cimentación para disminuir las presiones que causan la deformación o la falla, aunque en ocasiones es poco probable lograr el aumento.⁽⁶⁾

2.1.3 APUNTALAMIENTO Y ANCLAJES

Una vez que se ha determinado por medio de los estudios de geotecnia el tipo de suelo y las condiciones en las que se encuentra por medio del uso de métodos de exploración y de laboratorio, es necesario llevar a cabo algunos procesos inmediatos para evitar temporalmente los hundimientos y así mismo poder llevar a cabo los trabajos de recimentación de la estructura de una manera segura, por medio de apuntalamientos y anclajes en la edificación. Esto también recibe el nombre de soportes preliminares.

Es importante tomar en cuenta que los apuntalamientos y anclajes por medio de apoyos externos es únicamente requerido en relación del trabajo de recimentación, para estructuras que presentan desplome o para aquellas que son sensibles a efectos de pequeños asentamientos.

Existen diversas formas de apuntalar una edificación, entre las más comunes se encuentran los puntales inclinados, los puntales muertos y los puntales en cantil o voladores; existen diversas formas de anclar estos dispositivos a las estructuras, desde internarlos en los muros por medio de perforaciones y sujetarlos con ángulos de acero

en forma de Z (Figura 2.5) o enclavarlos por medio de tornillos sobre el muro y auxiliándose con pestañas o cuñas de madera o de acero.

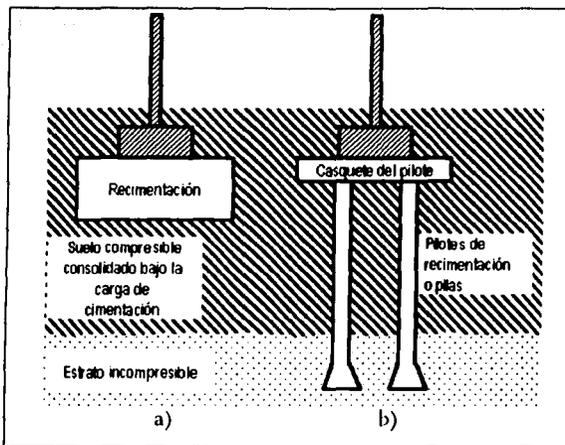


Figura 2.4 Recimentación para detener el asentamiento debido a la consolidación del suelo bajo la carga de la cimentación
 a) Método incorrecto b) Método correcto

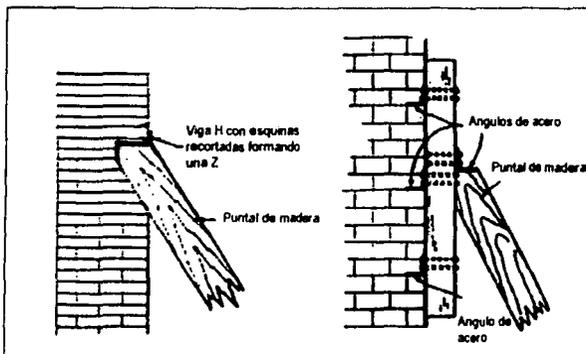


Figura 2.5

Los puntales inclinados regularmente son utilizados para proporcionar soporte externo, el ángulo que pueden presentar se encuentra en el rango de 60 a 75°, pueden ser de diversos materiales, como vigas de madera o vigas de acero, en algunos casos se

pueden llegar a utilizar gatos hidráulicos o de tornillo, en situaciones donde así se requiera, ya sea por el peso de la estructura, o para evitar vibraciones que afecten al soporte. (Figura 2.6)

Los puntales voladores o en cantil se utilizan cuando los inclinados obstaculizan los trabajos de recimentación, en estos casos, se acompañan de vigas de acero en forma H, para evitar deflexiones o pandeos, las cuales son colocadas en posición regularmente horizontal, se denominan agujas y tienen la función de soportar la estructura desde los extremos de diferentes maneras, una de ellas puede ser colocando en cada uno de los extremos de la aguja soportes de madera o de concreto y desplazarlas por debajo del muro de cimentación, la otra implica enclavar las vigas en alguna estructura aladaña y soportarla en madera o concreto. (Figura 2.7)

Los puntales muertos son vigas de madera o acero que se colocan en posición horizontal o paralelas al eje de los muros de cimentación, en sus extremos se colocan agujas o vigas de acero H, atravesando por completo el muro a través de perforaciones hechas con anticipación y selladas con mortero o concreto fino. (Figura 2.8)

Es importante señalar que cuando se llevan a cabo los trabajos de apuntalamiento y anclaje de las estructuras, debe tenerse cuidado en la colocación adecuada de cuñas de madera o de acero. En los anclajes en muros, utilizando los materiales adecuados; en las placas de soporte, de igual forma, usar gatos hidráulicos o de tornillo.

2.1.4 RECIMENTACIÓN CON ZAPATAS CORRIDAS

La recimentación con zapatas corridas es un método que permite mantener la cimentación existente; básicamente consiste en ampliar la cimentación que está establecida, sea ésta del tipo superficial, por zapatas aisladas, corridas o loza de cimentación. Es importante señalar que este tipo de recimentación se debe llevar a cabo en suelos cuya resistencia no se ve afectada. La recimentación se debe a que las solicitaciones de carga sobre el suelo de cimentación aumentaron y el cimiento ya no puede soportar las cargas adicionales que se le presentan. (Figura 2.9).

Uno de los principales problemas que se presentan en la utilización de este método es la unión del concreto nuevo con el concreto viejo. Para evitar este problema se le aplica presión a la lechada de cemento, ⁽⁶⁾ este proceso no es utilizado con frecuencia para muros ordinarios, pero sería de gran ventaja para cimentaciones anchas o de forma irregular donde se dificulta la unión entre el concreto y el muro de cimentación. La recimentación de concreto se debe llevar hasta arriba dentro de 50 - 100 mm de la

superficie inferior de la cimentación existente; para que fragüe y se encoja. (Figura 2.10) ⁽⁶⁾

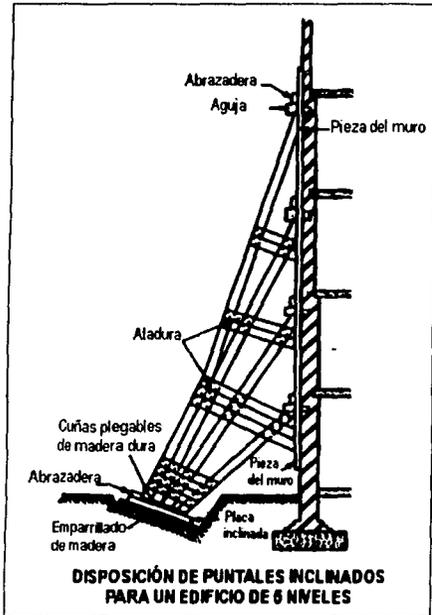


Figura 2.6 Puntales Inclinados

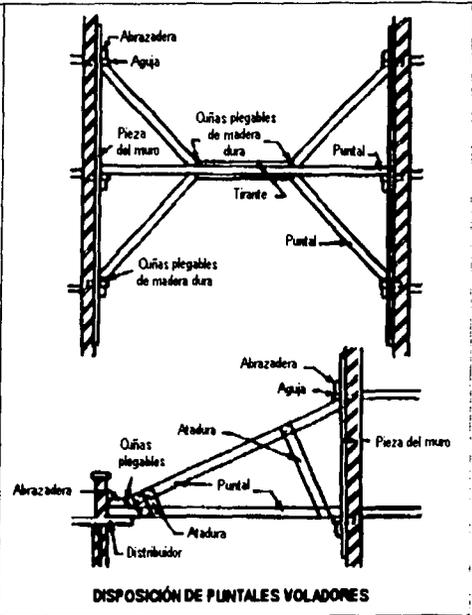


Figura 2.7 Puntales voladores o en cantil

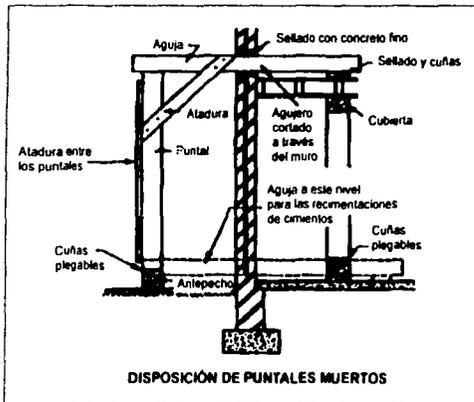


Figura 2.8 Puntales muertos

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

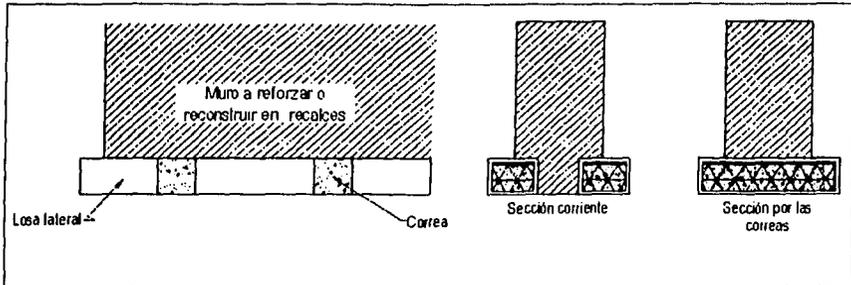


Figura 2.9 Recimentación con Zapatas Corridas

También es común la utilización de enladrillado para ampliar la cimentación existente, para la elaboración de este tipo de trabajos es necesario hacer uso de algunos métodos de anclaje y apuntalamiento para sostener la estructura durante el proceso de recimentación, la longitud máxima del muro que se puede dejar sin soporte sobre cada ampliación es de 1.2 a 1.5 m para los muros de ladrillo en una construcción normal.⁽⁷⁾

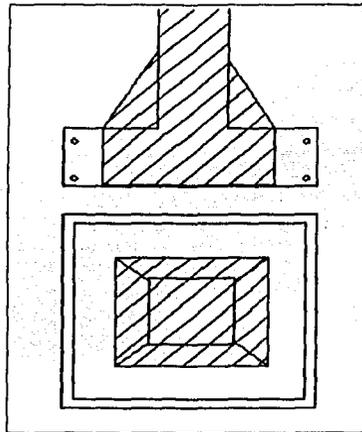


Figura 2.10 Ampliación de una zapata aislada con concreto

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.1.5 RECIMENTACIÓN CON PILAS O BASES

Consiste en colocar por debajo de la cimentación existente un grupo de pilotes o pilas, las cuales por definición tienen un mayor diámetro. Se sugiere que se utilice un medio

de apuntalamiento para realizar las perforaciones, este método se recomienda cuando se requiere realizar excavaciones profundas o el suelo es difícil, por ejemplo los suelos con carga de agua o los pedregosos. Este método debe ser considerado solamente cuando existe un estrato de buena capacidad de carga a una profundidad razonable, debido a que las cargas pesadas deben ser llevadas por las pilas, es necesario instalar una viga por debajo del muro para transferir la carga hacia las pilas. La viga puede ser construida de muchas maneras, algunas de ellas se aprecian a continuación:

- Apoyando el muro por medio de agujas hacia la longitud total entre los pilares e insertando vigas de concreto prefabricado o de acero.
- Insertando vigas de acero hacia las ranuras cortadas en ambos lados del muro de la cimentación.
- Insertando bloques o ménsulas de concreto prefabricado hasta los hoyos excavados bajo los muros; los bloques están provistos de agujeros longitudinales en línea para formar ductos continuos a lo largo de la viga, en ellos se introduce un cable de acero y se tensa para formar una viga de concreto extendida ente las pilas.

2.1.6 RECIMENTACIÓN CON PILOTES

2.1.6.1 PILOTES HINCADOS CON GATOS HIDRÁULICOS

La recimentación con pilotes hincados se puede realizar directamente debajo de la cimentación existente por medio del uso de gatos hidráulicos, cuando el peso de la edificación proporciona el peso necesario para el hincado, el sistema "Franki-Miga", emplea una forma de pilotes para hincarse mediante gatos hidráulicos que consiste en fracciones de pilote de concreto prefabricado de 305 x 305 x 762 mm de largo, con un agujero de un diámetro aproximado de 50 mm que corre hacia abajo a través del centro del pilote (Figura 2.11).

Los pilotes se instalan primero realizando una excavación debajo de la cimentación. La sección del fondo del pilote, la cual es de forma puntiaguda, se coloca en el agujero por medio de un gato hidráulico que tiene una placa de acero y secciones cortas de vigas igualmente de acero, las cuales se utilizan para repartir las cargas; se fuerza al hundimiento hasta alcanzar casi la superficie del terreno en el fondo de la excavación, se remueve el gato y se coloca la siguiente sección, este proceso se repite hasta que se alcanza la capacidad descada de carga del pilote. Las secciones adyacentes se unen por medio de una inyección de lechada a tramos cortos del tubo de acero hasta el agujero central en cada una de las etapas. Cuando el manómetro de presión del gato hidráulico indica que la capacidad requerida de soporte del pilote se ha alcanzado, las longitudes

cortas de la viga de acero o travesaño se hunden entre la cabeza del pilote y la cimentación existente. El gato es removido y se procede al colado de la cabeza del pilote, junto con los embalajes.

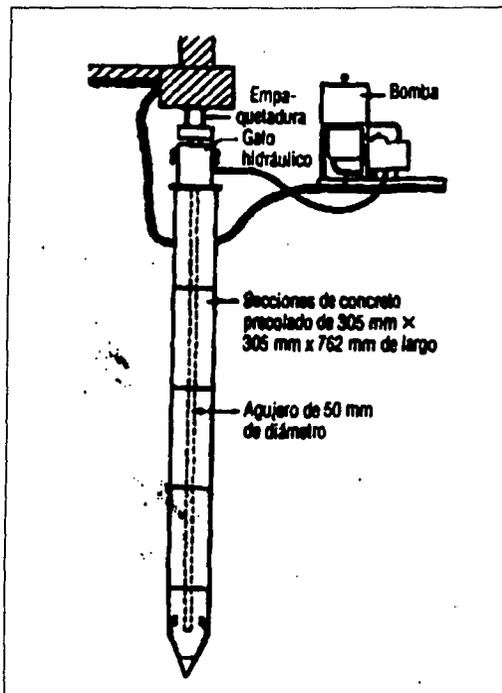


Figura 2.11 Recimentación con el Pilote Franki Miga⁽⁶⁾

En América es una práctica común hincar con gatos hidráulicos los pilotes de los tubos en secciones cortas, de manera muy similar a los pilotes "Franki-Miga", excepto que en lugar de uno, se utilizan dos gatos con sus respectivos empaques, (Figura 2.12) así mismo, los pilotes se instalan comúnmente con las puntas abiertas con la finalidad de facilitar el hincado, ya que si esta actividad no se realiza, en el fondo del pilote se va formando un tapón que dificulta el hincado de las secciones posteriores. Una vez alcanzado el nivel requerido por la fuerza del gato, el pilote se limpia y se vacía en el interior una lechada de concreto, el espacio entre la cabeza del tubo y la cimentación

existente se rellena con unas columnas cortas de acero y con placas de embalaje después de que los gatos son removidos.

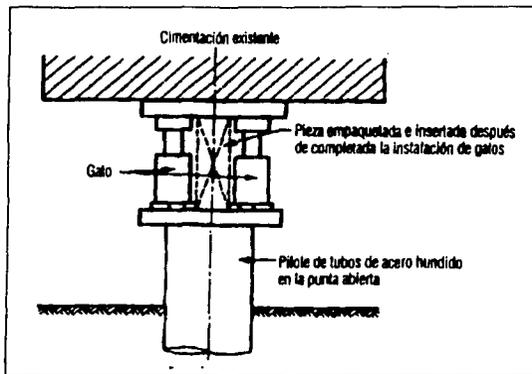


Figura 2.12 Recimentación con pilotes de tubos de acero ⁽⁶⁾

Para la instalación de los pilotes hincados mediante gatos lo más común es trabajar con un factor de seguridad de 1.5, es decir, la fuerza de hincado es igual a la carga calculada de trabajo más el 50%. La carga última de hincado se mantiene por un periodo de por lo menos 12 horas antes de que el embalaje sea insertado. Es importante insertar el embalaje entre el pilote y la estructura antes de liberar la carga en los gatos hidráulicos. De esta manera se previene el rebote elástico del pilote y se minimiza el asentamiento. ⁽⁶⁾

Otro tipo de pilotes prefabricados e hincados con gatos hidráulicos son los "Méga", los cuales siguen un proceso similar a los pilotes "Franki-Miga", solo que en este caso también es posible utilizar secciones cuadradas de 450 x 450 mm ó los tradicionales circulares con diámetros de 230 a 450 mm, también, este tipo está diseñado para efectuar reparaciones bajo obras y en el refuerzo de las cimentaciones, y para su colocación no es necesario más que un equipo reducido, el hundimiento se realiza por medio de un gato hidráulico y tiene la ventaja de ejecutarse sin vibraciones y en espacios limitados.

La capacidad de carga de los pilotes "Méga" es obtenida por medio de la lectura directa en el manómetro del gato hidráulico; el hincado de cada pilote es en realidad una prueba de carga la cual corresponde a un rechazo del suelo.

Las fases de ejecución de un pilote "Méga" se muestran en la figura 2.13. ⁽⁸⁾

Otro proceso para los pilotes hincados con gatos hidráulicos es el que se menciona en el libro "Manual de diseño y construcción de Pilas y Pilotes", editado por la Sociedad Mexicana de mecánica de suelos, en donde la principal diferencia con los pilotes "Franki-Miga" y "Méga", es que la punta esta fabricada independiente del pilote, es cónica y tiene ahogado un cable de acero en el interior del pilote prefabricado, el cual, de la misma forma que en los procesos anteriores, tiene una perforación en el centro de la sección. Una vez que se ha alcanzado la presión máxima de proyecto, se tensa el cable central de acero de refuerzo y se rellena de concreto.⁽⁹⁾

2.1.6.2 PILOTES PERFORADOS Y COLADOS EN SITIO

Para la colocación de los pilotes prefabricados, se requieren máquinas para el hincado, las cuales son molestas y producen ruido excesivo y a su vez, provocan vibraciones en las construcciones adedañas a la obra.

La construcción de pilotes perforados y colocados en sitio no presenta este tipo de inconvenientes, así mismo, ofrecen múltiples ventajas. Estos se diferencian de los prefabricados porque la perforación se realiza con extracción de tierra, y no hay desplazamiento de suelo.⁽⁶⁾

Los pilotes perforados y colados en sitio se pueden clasificar de diferentes maneras, una de ellas es por medio de la compactación del concreto, ya sea por aire, como los pilotes "Wolfsholz" o por medios mecánicos, como los "Strauss", para pilotes de diámetros pequeños, de 15 a 50 cm de diámetro⁽⁴⁾. Otra manera de clasificar los pilotes perforados y colados en sitio es por medio de la perforación, la cual se puede hacer con diferentes tipos de perforadoras, así mismo sí la perforación se realiza con ensanchamiento del fondo o "acampanado", cada uno de los procesos de fabricación de los pilotes perforados y colados en sitio tiene sus diferencias, dentro de las cuales deben hacerse estudios previos para su correcta elección.⁽⁶⁾

Es aconsejable, una inspección precisa de la base de los orificios de perforación, para tener la certeza de que se encuentran limpios y libres de material reblandecido y que los muros de las perforaciones se encuentren estables, para los pilotes que no tienen ademe o tubo, en ocasiones es posible utilizar bentonita para retener las paredes de las perforaciones, esto teniendo en cuenta el tipo de pilote que se va a utilizar.⁽⁶⁾

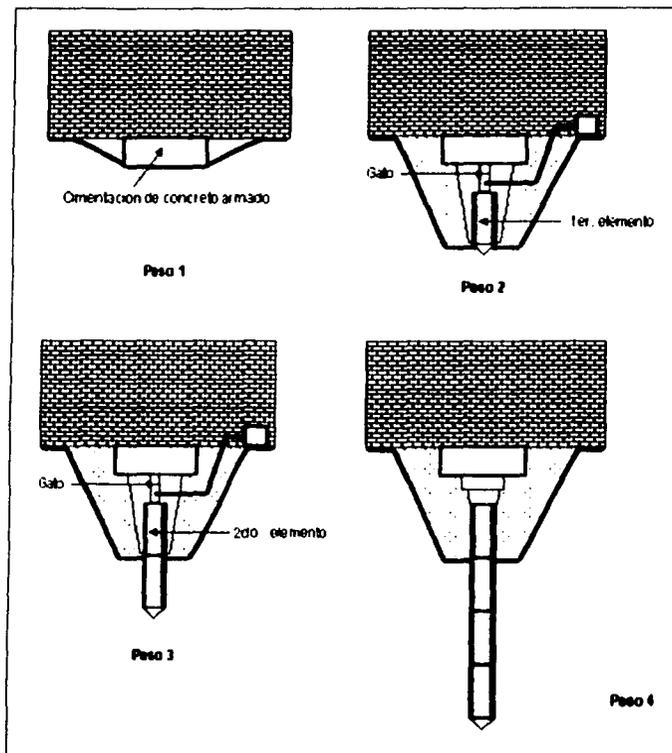


Figura 2.13 Fases de ejecución del Pilote Méga

Uno de los principales problemas que se tienen en la elaboración de pilotes perforados y colados en sitio es la presencia de aguas freáticas, de suelos permeables o la combinación de ambos en el interior de la perforación. Se presenta una problemática mayor cuando se va a utilizar acero de refuerzo para el pilote, la presencia de agua en el interior de la perforación tiene efectos debilitadores en la lechada de concreto, igualmente, disuelta en el agua se pueden tener arenas y arcillas que causan un efecto de desgaste en el concreto. Una solución para este problema, cuando no es posible la extracción del agua del interior de la perforación por ningún método, es el tubo tremie. También se pueden tener problemas cuando el agua subterránea está presente en estratos formados por rocas fisuradas, ya que el cemento es lavado fuera del concreto dentro de las perforaciones, la presencia de esta agua puede deberse a

operaciones de perforación en los pilotes adyacentes a los ya colados, si se tiene la sospecha de que este fenómeno se puede presentar, lo recomendable es detener las operaciones de perforación hasta que se haya completado el fraguado del concreto en los pilotes ya colados o la perforación de todos los pilotes de grupo se debe realizar antes de iniciar el colado. ⁽⁶⁾

Las ventajas que ofrecen los pilotes perforados y colados en sitio, con relación a otro tipo de pilotes son las siguientes: ⁽⁸⁾

- La perforación realizada nos permite conocer la naturaleza de los estratos del terreno, así mismo las propiedades de este como el peso volumétrico, el ángulo de fricción para casos de suelos no cohesivos y el coeficiente de cohesión para suelos cohesivos, para poder adaptar el pilote al terreno.
- La maquinaria que se utiliza para llevar a cabo las perforaciones no ocupa demasiado espacio dentro de las obras, lo cual permite trabajar en espacios reducidos y no es costosa.
- Se reducen las vibraciones que pueden afectar las edificaciones aledañas a la obra y evita el efecto de levantamientos del suelo debido al hincado de pilotes prefabricados, de igual manera, se elimina el ruido producido por los martillos de hincado.
- Tienen la posibilidad de alcanzar grandes profundidades (30 - 40 m).
- Se adaptan bien a las reparaciones bajo obra y al refuerzo de cimentaciones.

Las desventajas que tiene este método, son las siguientes: ⁽⁸⁾

- El proceso de elaboración de los pilotes tiene que ser muy minucioso, ya que existe el peligro de que el cemento del concreto sea lavado, debido a la presencia de aguas freáticas o agua subterránea.
- Pueden presentarse cortes en los pilotes, de igual forma, estrangulamientos del pilote, esto debido a una rápida extracción del tubo en el cual se cuela el concreto.

2.1.6.2.1 MICROPILOTES

Son pilotes perforados y colados en sitio con un diámetro de menos de 150 milímetros, aunque en algunos casos pueden llegar hasta los 250 milímetros, se instalan por medio de un taladro rotativo o de percusión, o una combinación de ambos. Después de realizar la perforación, se introduce el refuerzo seguido de la colocación de lechada de cemento o concreto a través de un tubo tremic. ⁽⁶⁾

En los trabajos de recimentación los micropilotes tienen la cualidad de que son un complemento a la cimentación existente y trabajan esencialmente como pilotes de fricción, a corto plazo los micropilotes no trabajan, toda la carga es soportada por la cimentación existente; conforme la estructura se asienta, la carga es aplicada directamente sobre el micropilote y a largo plazo pueden llegar a tomar toda la carga.⁽²²⁾

Es posible compararlos con las anclas de tensión o de fricción, de ahí que en algunos países se les conozca como anclajes verticales, ya que utilizan un refuerzo de acero como en la técnica alemana (la cual será explicada posteriormente junto con otras técnicas) y en otras se utiliza un tubo de acero con perforaciones laterales; el espacio entre la perforación y el tubo se rellena con una lechada de cemento tal y como se explicó con anterioridad, a este proceso se le denomina "vaina" del pilote.⁽²²⁾ (Figura 2.14)

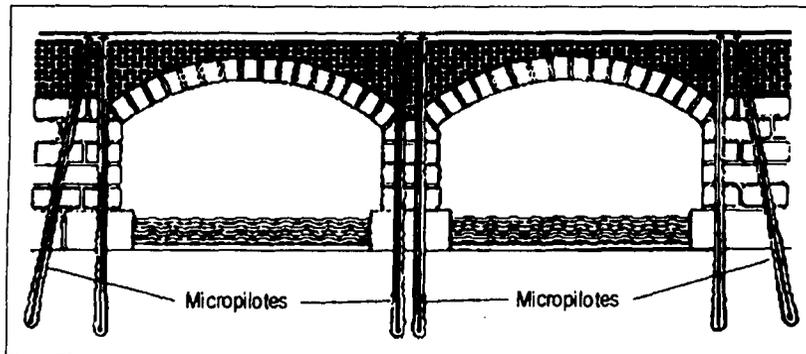


Figura 2.14 Sección donde se muestra una recimentación con micropilotes en un puente

2.2 MÉTODOS PARA EL REFUERZO DEL SUELO DE CIMENTACIÓN

Las técnicas de refuerzo del suelo ya sea con cementos, productos químicos o congelación, pueden ser de gran utilidad, ya que pueden cumplir la función de refuerzo temporal mientras se realizan las excavaciones para los pozos o agujeros que se van a utilizar para los trabajos de recimentación. En la figura 2.15 se muestran las diferentes técnicas que se pueden utilizar para el refuerzo del suelo, en ella se detallan las diferentes granulometrías de los suelos y la técnica mas aceptable.

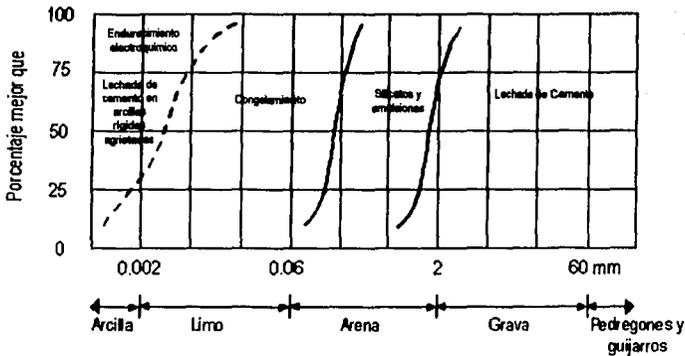


Figura 2.15 Rango del Tamaño de Partículas para varios procesos Geotécnicos

2.2.1 INYECCIONES AL SUELO DE CIMENTACIÓN CON LECHADA DE CEMENTO

Las inyecciones de lechada de cemento son aplicables para la consolidación de las cimentaciones y esta técnica consiste en introducir en el terreno una pasta de cemento que, conjuntamente con los elementos del suelo, forme una estructura de concreto. Este procedimiento es más aplicable a las gravas y a las arenas como se mostró en la figura 2.15 y a algunas arcillas endurecidas agrietadas.

La inyección de lechada de cemento es un recurso muy útil para el relleno de huecos o cavidades en el suelo bajo las cimentaciones, los cuales se han producido por el efecto de la erosión y de la vibración en los suelos granulares y sueltos. También es útil para refuerzo de muros viejos de cimentaciones de mampostería de piedra brasa, antes de realizar la excavación debajo de ellos para realizar las operaciones de recimentación, también la inyección de lechada nos puede servir como un muro de contención una vez que el fraguado se ha llevado a cabo.

La inyección se realiza con el auxilio de tubos especiales de 40 a 120 mm de diámetro bajo una presión que puede alcanzar los 150 kg/cm^2 , es importante que la lechada de cemento se adapte bien a la granulometría del suelo, de manera que no sea demasiado viscosa al grado que los huecos no sean llenados efectivamente, ni que sea excesivamente líquida, lo cual la puede llevar a esparcirse a una distancia muy grande. A menudo es necesaria la utilización de tabla-estacas o bien aislar con inyecciones previas a presión mayor, de lo contrario se tendría un lavado o dilución de la lechada en suelos con mantos acuíferos.

2.2.2 INYECCIONES AL SUELO DE CIMENTACIÓN CON PRODUCTOS QUÍMICOS

El incremento de la resistencia de un suelo por medio de productos químicos tiene diferentes opiniones por parte de los científicos que por muchos años han estudiado la aplicación de estos en el subsuelo, ya que cambian las características de los suelos particularmente, pero existen dos problemas principales, el volumen y la contaminación.

El primer problema es obvio, el tratamiento de suelos puede producir buenos resultados en pequeños ejemplares en laboratorio, pero en proyectos con un volumen considerablemente mayor, es difícil aplicar el costo que resulta, los costos asociados a proyectos largos requieren una gran cantidad de químicos y esto no es rentable.

El segundo problema, más significativo, es la contaminación del subsuelo, los tratamientos aplicados a menudo tienen contacto con el agua que se encuentra entre los estratos, desde ahí, los químicos pueden ser llevados a una distancia mayor que la de diseño, contaminando el agua en otros lugares; debido a esto, deben regirse por normas que regulen la aplicación de los mismos.

INYECCIONES DE CAL (HIDRÓXIDO DE CALCIO)

Puede ser aplicado en polvo en la superficie del suelo o también puede ser diluido en agua y aplicado con aspersores en la superficie, en otros casos, puede ser mezclado con el suelo con equipo especial.

La inyección de hidróxido de calcio al subsuelo se realiza por medio de tubos introducidos a una profundidad aproximada de 3 metros y se inyecta por medio de presión, el proceso puede manejarse en varias etapas dependiendo de las condiciones del suelo a tratar y la profundidad a la que se desea llegar.

La inyección de hidróxido de calcio es utilizada más frecuentemente para la estabilización de suelos arcillosos, este compuesto se une a las partículas de arcilla e inhibe la migración del agua en la arcilla. Esto minimiza la constante contracción y el abultamiento en las arcillas con los respectivos cambios en su humedad. ⁽¹⁰⁾

INYECCIONES DE SILICATOS

Consiste en precipitar silicatos alcalinos inestables mediante sal no alcalina, obteniéndose así un precipitado de sílice gelatinosa que fragua y endurece. Primero se inyecta una solución de silicato de sodio, que envuelve las partículas del suelo, con una

membrana delgada que toma eventualmente el lugar del agua subterránea, después se procede a la inyección de una solución salina que reacciona con el silicato dando formación a la sílice coloidal (gel) apareciendo al mismo tiempo una tensión superficial que une las partículas del terreno entre sí, formando una especie de gres (Arenisca) que es resistente al esfuerzo cortante, además el silicato se combina con hidróxido de calcio para dar lugar a una sal estable muy dura, lo que permite la impermeabilización de la obra.

La inyección de las soluciones se realiza aplicando una presión alta por medio de tubos metálicos de 25 mm de diámetro, que son introducidos a mano o con aire comprimido hasta una profundidad de 25 m, dando lugar a una inyección con un radio aproximado de 50-70 cm.

Debe tenerse cuidado con la presión de inyección, ya que de imprimirse una presión muy alta puede llegar a levantarse toda la masa de suelo situada por encima del nivel de inyección, particularmente si el suelo presenta grietas horizontales.

Una buena inyección es aquella que asegura a la solución una correcta difusión en el terreno, la cual no debe perturbar el equilibrio del subsuelo. Después del tratamiento, la resistencia varía de 10-40 kg/cm² en la arena y 40-100 kg/cm² en gravas, pudiendo alcanzar hasta 200 kg/cm² en arenas deslizantes.

Es posible simplificar el proceso original mediante la adición de reactivos basado en aluminato de sodio soluble en agua, de esta forma se retarda el fraguado del gel de sílice, lo que permite mezclar las soluciones para la inyección, espaciar los tubos y simplificar mucho la puesta en obra. ⁽¹¹⁾

Los productos químicos pueden clasificarse de la siguiente manera:

a) Gels de sílice

- Gels clásicos o blandos

Se forman por la reacción de silicato de sodio, bicarbonato o aluminato de sodio, la resistencia que se obtiene es muy débil y depende mucho de la presión de la inyección y del esfuerzo ambiental a que esté sometida.

- Gels de Sílice de reactivo equilibrado o semiduro

Se obtienen haciendo actuar sobre el silicato un reactivo orgánico (acetato de etilo o sus análogos) de esta forma es posible llegar a tener un contenido alto de sílice, de ahí

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

que la resistencia se mejore, pero el costo se incrementa de tres a cuatro veces más que en el clásico o blando.⁽¹¹⁾

b) Resinas Orgánicas

Actualmente se utilizan productos orgánicos polimerizables y otros productos en los que no intervienen las sílices, pero su costo es muy elevado a comparación de los métodos de gels de sílice tradicionales.

- Resinas polimerizables

Son las acrilamidas y las resinas de formol o formólicas en estos productos, la viscosidad es muy pequeña, pero se obtiene una excelente adherencia a los granos del terreno.

- Resinas especiales

Son utilizadas principalmente en los terrenos muy finos que imbrican las partículas de una verdadera red, la resistencia en los terrenos es graduable a voluntad, siendo posible que conserven una notable elasticidad, estos productos son mucho más económicos que las resinas polimerizables y además tienen la misma resistencia a las aguas agresivas y se conservan por mas tiempo que los gels clásicos.⁽¹¹⁾

2.2.3 CONGELAMIENTO DEL SUELO DE CIMENTACIÓN

La congelación del suelo de cimentación consiste en utilizar la refrigeración para convertir el agua de poro que se encuentra en el subsuelo en hielo, este se convierte en un cementante o pegamento, transformando las partículas del suelo en estado libre en bloques de roca, para incrementar el esfuerzo combinado y hacerlo más impermeable.

Básicamente, el método de congelación consiste en hundir un anillo o un rectángulo de perforaciones distribuidas a 1-1.5 m de distancia a centros alrededor de la excavación, las perforaciones son alineadas con 100-150 mm de un entubado de acero o plástico con fondos cerrados; un tubo interior de 38-75 mm de diámetro abierto hacia el fondo se inserta después (figura 2.16). Las paredes superiores de los tubos interiores se conectan a una tubería que lleva salmuera desde la planta de refrigeración. La salmuera se usa para congelar la tierra que es bombeada hacia abajo de los tubos interiores y levantada hacia el espacio anular entre los tubos y el entubado exterior; entonces regresa vía planta de refrigeración. Este método usualmente toma de seis semanas a cuatro meses para congelar el suelo. Se barrena una perforación alineada con tubos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

perforados cerca del centro del área tratada para que actúe como un indicador de lecturas. Mientras el muro de hielo se va formando al comprimir el agua de suelo en su interior. Cuando el agua alcanza el tubo de lectura y se hunde a nivel del suelo, el muro de hielo se cierra y la excavación puede comenzar.

Es posible obtener un ahorro considerable de tiempo para alcanzar el congelamiento, usando un alimentador líquido de nitrógeno directamente desde los receptáculos aislantes hacia los tubos hundidos en el terreno. El nitrógeno líquido es caro, pero los costos de instalación pueden ser considerablemente más bajos que los del método de salmuera y su uso, por lo tanto, es más económico que el de la instalación de salmuera donde se requiere un recurso de corto término para superar una porción localizada de suelo de mala calidad. El nitrógeno líquido puede congelar el suelo aproximadamente cinco veces más rápido que el enfriamiento por salmuera, permitiendo que se forme el muro de hielo en unos pocos días o aún en horas.

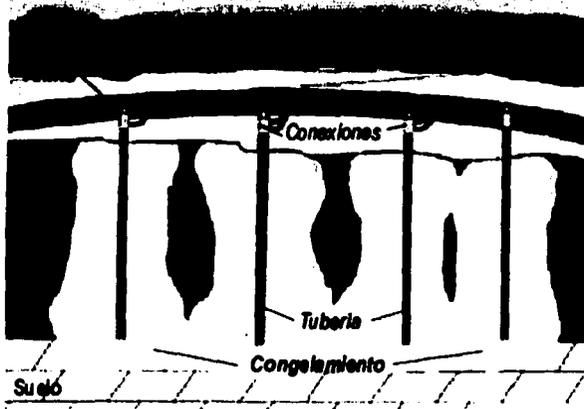


Figura 2.16 Instalación típica de la tubería para congelación del Suelo, donde se muestra la conexión con la planta congeladora y el espaciamiento que se debe tener. (Congelación con nitrógeno)^(11, 12)

Las aplicaciones del método de congelamiento del suelo son las siguientes: ⁽¹³⁾

- Recimentación temporal.
- Soporte temporal para las excavaciones.
- Prevenir que el agua del subsuelo se introduzca en el área de excavación.

TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN

-
- Soporte temporal de taludes.
 - Contenedor de productos tóxicos o contaminantes.

Las ventajas de la aplicación del método de congelación son las siguientes: ⁽¹³⁾

- En excavaciones muy profundas en pozos, donde la presión del agua es muy alta para permitir el trabajo de un hombre con aire comprimido.
- Donde las fisuras en las rocas son muy finas para la inyección.
- En sacar el agua de una excavación, ya que los métodos de inyección y lechada, o de disminución del manto freático, no son completamente efectivos debido a la variación de las condiciones del suelo.

Las desventajas de la aplicación del método de congelación son las siguientes: ⁽¹³⁾

- Alto costo de instalación.
- Las perforaciones se deben realizar con un alto grado de precisión en la verticalidad para evitar el riesgo de una abertura en el cercamiento del suelo congelado.
- Alto costo de mantenimiento.
- Varios meses para la barrenación de las perforaciones, instalación de la planta y congelación del suelo.
- Levantamientos en el suelo.
- Dificultad para manejar las herramientas de aire comprimido a las bajas temperaturas predominantes en la excavación.

Capítulo

MÉTODO DE RECIMENTACIÓN POR MEDIO DEL USO DE MICROPILOTES

OBJETIVO ESPECÍFICO

Identificar los antecedentes de los micropilotes, así como su clasificación y sus diversas aplicaciones como un método geotécnico para la solución de problemas de recimentación y refuerzo del suelo de cimentación.

3.1 GENERALIDADES

El método de recimentación con micropilotes tuvo su inicio en Italia en 1952, el constructor Fondedile, bajo la dirección del Ingeniero Fernando Lizzi, fabricaron pilotes con diámetros reducidos diferentes a los que en ese tiempo marcaban las normas. Originalmente este método recibió el nombre de *Pali Radice* lo cual significa pilote raíz, hoy en día, reciben el nombre de MICROPILOTES ó MINIPILOTES. Para ilustrar mejor este tipo de estructuras, se pueden observar las figuras 3.1, 3.2 y 3.3. ⁽⁷⁾

A mediados del siglo pasado, en Europa se tuvo la necesidad de recimentar construcciones históricas y monumentos; para este propósito, fue necesario buscar un sistema que:

- Proporcionara buen soporte estructural y aceptara cargas importantes con un mínimo de movimientos.
- Tuviera muy pocos efectos adversos con la estructura que se va a recimentar.
- Fuera instalado bajo condiciones y accesos restringidos.
- Pudiera ser construido bajo diferentes condiciones de suelo.

Los micropilotes inicialmente fueron construidos con diámetros de 100 mm y fueron probados con cargas mayores de 400 kN (40.799 ton), sin producir fallas en la interacción suelo-lechada de cemento; una de las mayores ventajas que se tiene cuando se utilizan los micropilotes para recimentación es que el sistema puede ser diseñado para presentar muy pocas deformaciones, es común que este tipo de pilotes desarrolle deformaciones horizontales del orden de unos cuantos milímetros o nulas bajo cargas de trabajo. Bajo estas condiciones, la capacidad de carga máxima en el micropilote no se alcanza en su totalidad.

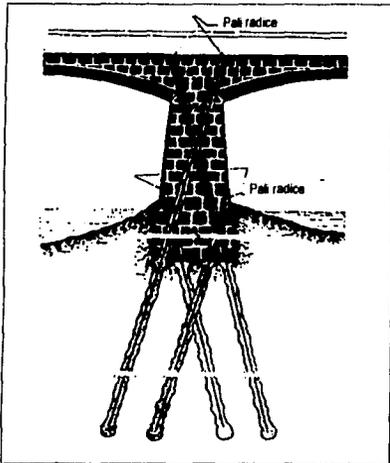


Figura 3.1 Recimentación del muro de un puente con Pali Radice (corte)

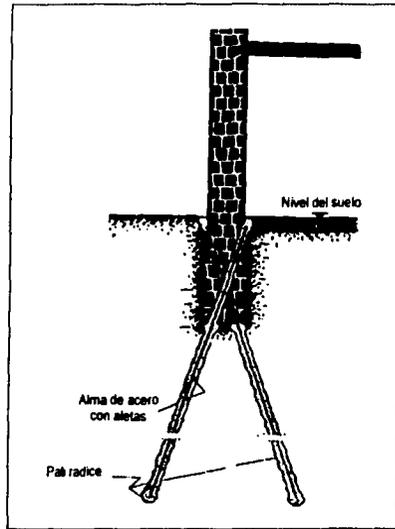


Figura 3.2 Recimentación de un muro con Pali Radice (corte)

Usando procedimientos de perforación e inyección de lechada de cemento para la construcción de los micropilotes, se inducen pocas vibraciones y se reducen los efectos adversos en la estructura, comparados con otras técnicas de construcción de pilotes. En la maquinaria para la perforación se utilizan secciones cortas de tubo las cuales pueden ser reutilizadas, los micropilotes pueden ser construidos en cuartos pequeños con una altura mínima de 1.5 metros.

En 1962, la empresa Fondedile introdujo los micropilotes en Inglaterra para la recimentación de construcciones históricas, en la misma década, sistemas similares fueron usados en Alemania para diseñar el soporte de vías subterráneas.

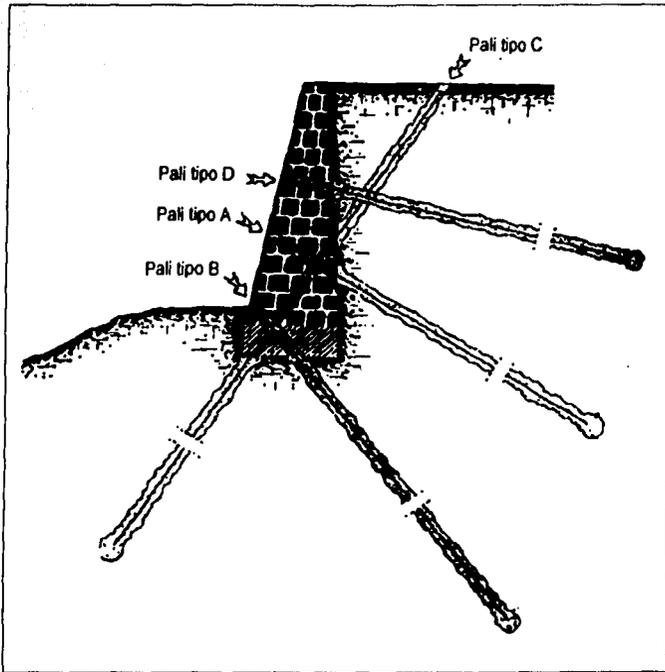


Figura 3.3 Recimentación de un muro de contención de tierras, en esta figura, los pilotes Tipo A y D funcionan como tirantes, B y C tienen la función de recalce.

Los micropilotes fueron usados en Estados Unidos por primera vez en 1973, cuando la empresa Fondedile efectuó varios trabajos de recimentación en Nueva Inglaterra. Después de esto, la técnica fue vista con escepticismo por varios años en ese país, por lo que se le desconoció rápidamente, hasta su reutilización en 1987; hoy en día son aceptados por los ingenieros en todo el mundo y es considerada como una alternativa de construcción viable, especialmente para la rehabilitación de cimentaciones o recimentación y para el refuerzo del suelo de cimentación.

Las características típicas de los micropilotes que son reportadas por diferentes autores se especifican en la tabla 3.1.

Diámetro de la Perforación:
100 a 250 mm (Bruce, et al. 1995a)
80 a 250 mm (Bustamante y Doix, 1985)
75 a 225 mm (Ellis, 1990)
76 a 280 mm (Ellis, 1985)
67 a 89 mm (NGES, Universidad del Noroeste; Evanston, Illinois)
Largo:
20 a 30 m (Bruce et al. 1995a)
10 a 20 m (Ellis, 1990)
4 a 4.9 m (NGES, Universidad del Noroeste; Evanston, Illinois)
Presión máxima de la inyección de lechada de cemento:
0.6 MPa (6 kg/cm ²) para los pilotes raíz (Mascardi, 1982)
1 a 2 MPa (10 – 20 kg/cm ²) para la repetición de inyección de lechada de cemento (Mascardi, 1982)
Arriba de 8 Mpa (80 kg/cm ²) dependiendo del tipo de micropilote (Bruce 1997)
0.5 a 1 MPa (5 – 10 kg/cm ²) para la primera inyección de lechada de cemento (Bruce, 1994)
Arriba de 4 MPa (40 kg/cm ²) para la pos-inyección de lechada de cemento (Bruce, 1994)
Arriba de 9 Mpa (90 kg/cm ²) para micropilotes con inyección de lechada de cemento compactado (NGES, Universidad del Noroeste; Evanston, Illinois)
Cargas de servicio:
300 a 1000 kN (30.6 – 101.99 ton)(Bruce et al. 1995a)
100 a 300 kN, (10.19 – 30.6 ton) up to 500 kN (50.99 ton) (Ellis, 1990)
100 a 1000 kN (10.19 – 101.99 ton) (Mascardi, 1982)

Tabla 3.1 ⁽¹⁵⁾

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.2 CLASIFICACIÓN

La principal característica que tienen los micropilotes es que el diámetro de la perforación es menor de 300 mm, en Francia los micropilotes están limitados a 250 mm.

A fin de poder clasificar los micropilotes se explicarán a continuación las diversas técnicas empleadas en algunos países que han desarrollado y mejorado sus propiedades.

TÉCNICAS ITALIANAS

Las empresas italianas han sido pioneras en el desarrollo de los micropilotes, como se ha explicado con anterioridad, los primeros en desarrollar esta técnica fueron ingenieros de ese país. Dentro de los micropilotes italianos se tienen los Palice Radice y los Micropilotes Trevi.

- Micropilote Palice Radice

Tienen en su interior una barra de acero como refuerzo, la inyección de la lechada de cemento se efectúa por medio de un tubo tremie con un revestimiento que se coloca en la perforación. A la inyección de cemento se le aplica una presión no mayor de 600 kPa (6 kg/cm²) y la parte superior del revestimiento se extrae del suelo, el refuerzo se coloca antes o después de la inyección, pero necesariamente antes de aplicarle presión a la inyección. Las variaciones de este micropilote se dan cuando en lugar de la barra de acero, se coloca un tubo y cuando el revestimiento permanece enterrado en la zona sin presión, estas variantes aumentan considerablemente su desempeño. (Figura 3.1, 3.2 y 3.3)

- Micropilote Trevi (Microtrevi)

Consiste básicamente en tramos de tuberías roscadas, en la punta de uno de los tubos se coloca una broca tipo drag desechable en cuya salida tiene un válvula unidireccional, el tubo tiene perforaciones que se obturan con válvulas circulares de neopreno, la tubería inicialmente funciona como perforadora empleando agua o lodo de perforación; una vez que alcanza la profundidad de diseño se llena el espacio entre la tubería y la perforación con lechada de cemento, una vez que la inyección ha fraguado, se introduce la tubería de inyección de doble empaque para inyectar cada una de las perforaciones en un proceso ascendente, terminada esa inyección se lava el interior de la tubería para, en caso de ser necesario hacer otra u otras etapas de inyección. La presión de la lechada debe ser capaz de romper o fracturar el mortero inicial y también

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

el suelo circundante, esto es llegar a la presión de fisuramiento del suelo, con la consecuente formación de un bulbo. Una vez que se han alcanzado las inyecciones programadas de diseño y la capacidad de carga requerida, se llena el interior de la tubería con mortero para evitar la corrosión.⁽²²⁾

El proceso del micropilote Trevi se puede apreciar en la figura 3.4

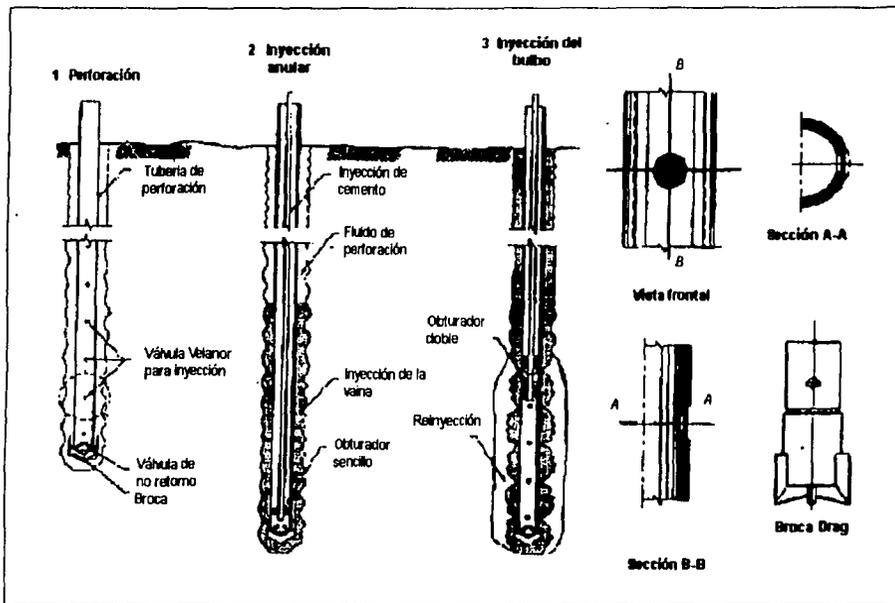


Figura 3.4 Micropilote Trevi proceso constructivo y detalle de la broca drag con su válvula Velanor de no retorno⁽²²⁾

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TÉCNICA ESPAÑOLA

En España también se ha desarrollado una técnica de micropilote denominado "Ropress" por la empresa Rodio, actualmente existe en el mercado la empresa denominada Nicholson-Rodio, ubicada en Estados Unidos, la cual ha desarrollado varias técnicas tanto de inyección como de perforación de los micropilotes.

- Micropilote Rodio "Ropress"

Consiste en una perforación de 10 a 20 cm de diámetro (4 a 8 pulg.); conforme la perforación avanza se introduce un ademe metálico. Una vez que se alcanza la perforación de diseño, se introduce el tubo con las perforaciones laterales y se procede al llenado de la vaina con lechada de concreto y debido a la presión originada se extrae el ademe metálico, una vez realizado esto, se inyecta lechada de cemento a presión para formar un bulbo, El ademe tiene la función de mejorar la calidad de la lechada con que esta formada la vaina, la perforación puede hacerse con lodo bentonítico y una vez que se instala el ademe, se sustituye con agua limpia.⁽²⁷⁾

El proceso constructivo del micropilote Rodio se esquematiza en la figura 3.5

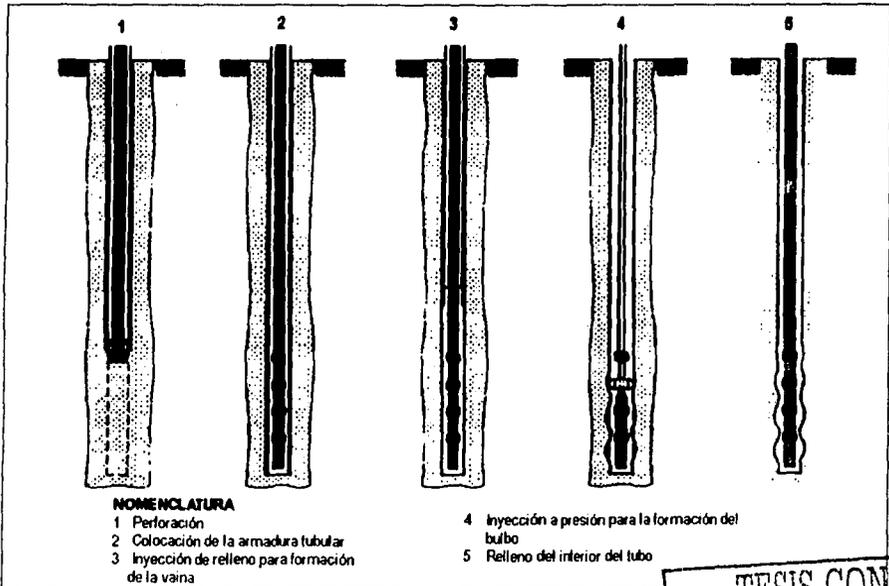


Figura 3.5 Micropilote Rodio "Ropress"⁽²⁷⁾

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

TÉCNICA FRANCESA

En el campo de la construcción de presas los ingenieros franceses desarrollaron la inyección de rocas y suelos con el "tube à manchettes" o comúnmente llamado tubo de

manguitos en la técnica de anclajes en rocas o suelos. Se trata de un tubo de acero o de PVC que presenta perforaciones laterales de un diámetro menor a 1 cm y como obturador se colocan unas fundas de hule flexible (manguito de neopreno). Una vez que se concluye la inyección, el tubo puede ser lavado para posteriores inyecciones; el tubo de manguitos puede quedar ahogado en la lechada o puede ser retirado, la lechada no retorna al tubo porque el manguito se lo impide. (Figura 3.6)

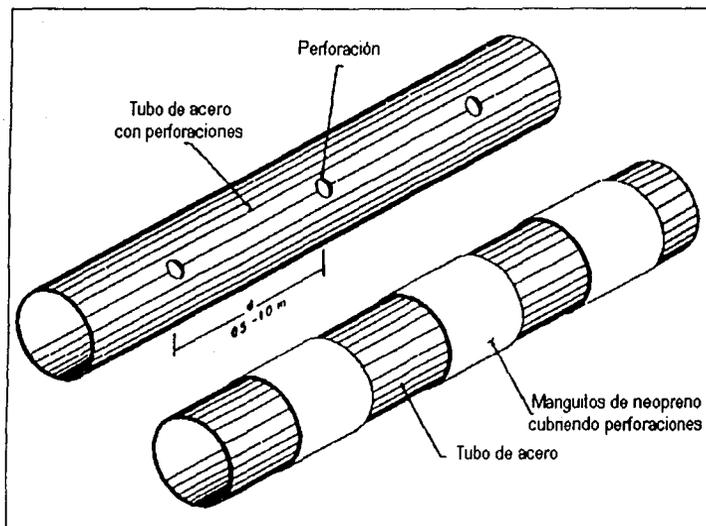


Figura 3.6 Tubo de Manguitos⁽²²⁾

Con técnicas similares a las descritas con anterioridad, los franceses recurren a la utilización de una funda de tela que envuelve el tubo de acero, para evitar que la lechada de cemento pueda contaminarse con el lodo de perforación.⁽²²⁾

- Micropilote TUBFIX

Este micropilote usa un solo tubo de acero para colocar el refuerzo y para la lechada de cemento, el tubo de acero está provisto de válvulas unidireccionales y con empaques internos para definir la zona de inyección de lechada. La inyección es aplicada en etapas repetitivas, primero se coloca una inyección de lechada para llenar la perforación, después la inyección es forzada con presión por las válvulas unidireccionales del tubo

de acero en zonas específicas definidas por los empaques internos, estas válvulas reciben el nombre de "manchettes" (manguitos). En Francia, este tipo de tubo de refuerzo es conocido como "tube à manchettes", la presión se puede aplicar varias veces para lograr la inyección deseada, el siguiente paso es rellenar el tubo de nuevo con lechada de concreto para inyectarlo una vez más.

TÉCNICA ALEMANA

- Micropilote GEWI

El Micropilote Gewi se desarrollo en Alemania, también utiliza un ademado metálico para la estabilización de la perforación; la inyección de la lechada de cemento se realiza en varias fases, y en este caso el refuerzo es de acero de alta resistencia. Se coloca con centradores y coples de cuerda izquierda; la inyección de lechada de cemento se aplica con tubos de plástico adheridos a la barra para una posterior inyección, una de las mangueras sirve como salida del aire atrapado dentro de la perforación y la otra para llevar la lechada dentro del ademe. Estos micropilotes guardan una similitud con las anclas de gran capacidad pero estos trabajan como pilotes y sobre todo sirven para arcillas blandas, en este caso se desaprovecha la capacidad del acero de alta resistencia.^(15, 19) (Figuras 3.7 y 3.8)

TÉCNICA NORTEAMERICANA

En Estados Unidos se han desarrollado una gran variedad de técnicas para la elaboración de micropilotes, existen en el mercado varias empresas que se dedican a la geotecnia y dentro de sus servicios se encuentran los micropilotes para recimentación o como cimentación nueva, se tienen los micropilotes Pinpiles de la empresa Nicholson-Rodio, los micropilotes Titan de la empresa Ischebeck entre otros.

- Micropilotes Pinpiles

Con estos micropilotes se han desarrollado varias técnicas de perforación y de inyectado de la lechada de cemento a presión; se coloca primero la lechada de cemento y posteriormente se introduce el acero de refuerzo; con esta técnica no se reinyecta al pilote y la formación del bulbo depende exclusivamente de la presión de inyección para la extracción del ademe metálico. (Figura 3.9)

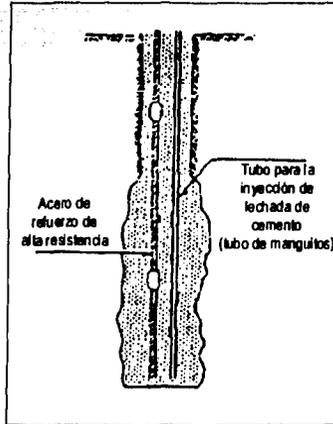


Figura 3.7 Micropilote GEWI

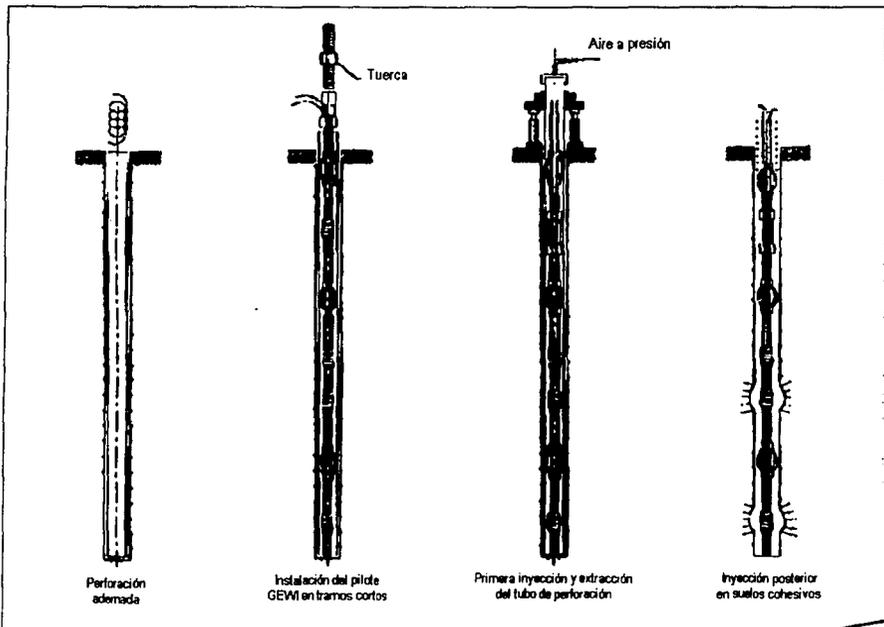


Figura 3.8 Micropilote Gawi (Dywidag) ⁽²⁷⁾

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

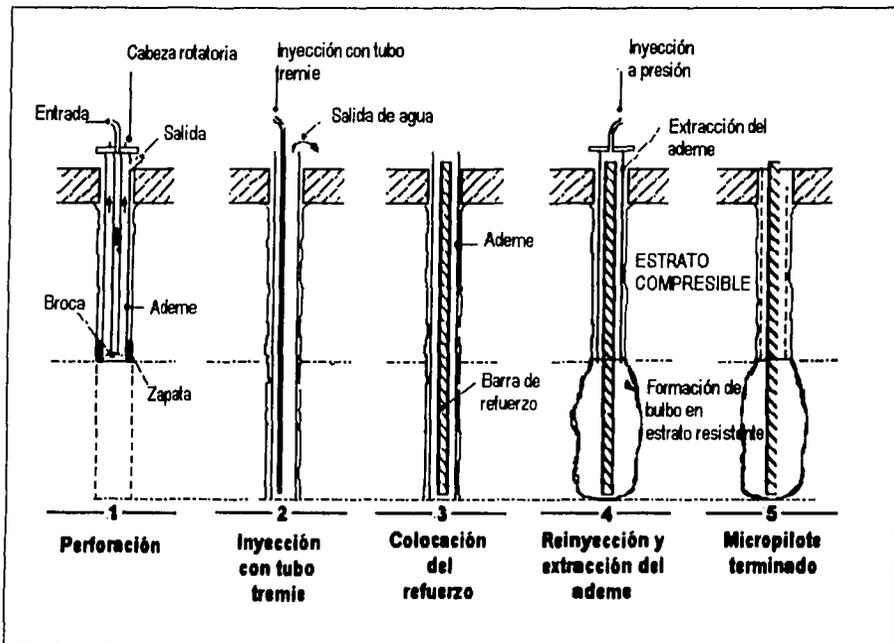


Figura 3.9 Micropilote Pinpile⁽⁴⁾

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- Micropilotes Titan

Siguen un proceso similar a los Trevi, el acero de refuerzo está hueco y en la parte interior corre el líquido de perforación, una vez que se ha alcanzado la profundidad de diseño, el interior de la barra se lava y el líquido de perforación es suplantado por la lechada de cemento inyectada a través de la misma barra. Este proceso no utiliza ademe metálico ya que las paredes de la perforación son sostenidas por el líquido de perforación; una vez terminado el proceso, el interior se rellena con mortero para protegerlo de la corrosión.

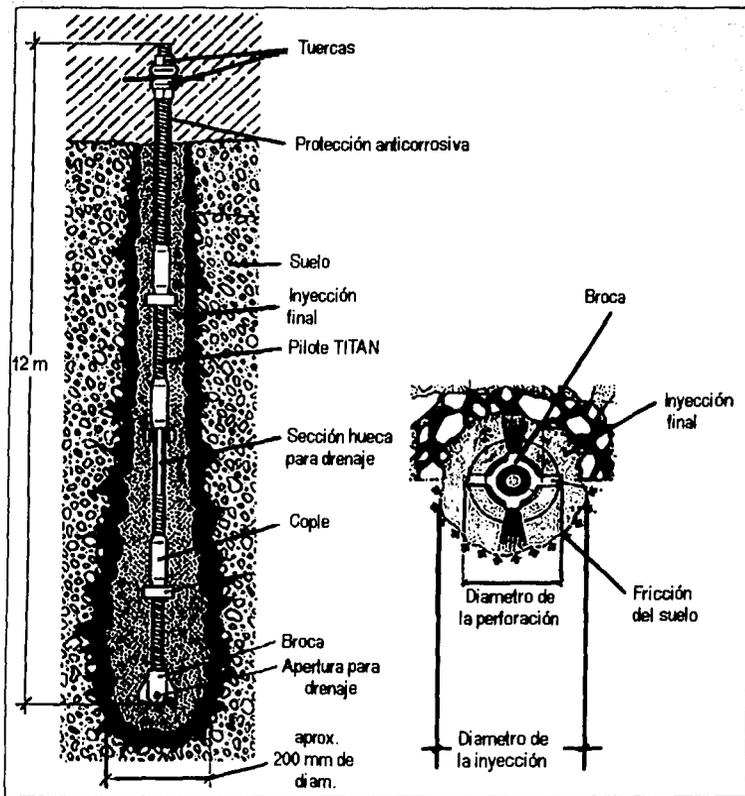


Figura 3.10 Micropilote TITAN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.2.1 EN BASE A SU COMPORTAMIENTO

CLASIFICACIÓN ACEPTADA POR LA ADMINISTRACIÓN FEDERAL DE AUTOPISTAS DE LOS ESTADOS UNIDOS

Esta clasificación es la que se acepta actualmente por ser la más reciente, se basa principalmente en dos criterios: la filosofía del comportamiento y el método de inyección de la lechada de cemento.

CASO 1

Los micropilotes soportan cargas axiales, la carga se transmite directamente hacia los micropilotes como en un sistema de pilotes convencionales. Son utilizados como refuerzo de cimentaciones, de la misma manera, en la estabilización de taludes donde toman cargas laterales, ya sea por cargas axiales o por laterales, este tipo de micropilotes es el que se utiliza con más frecuencia. (Figura 3.11)

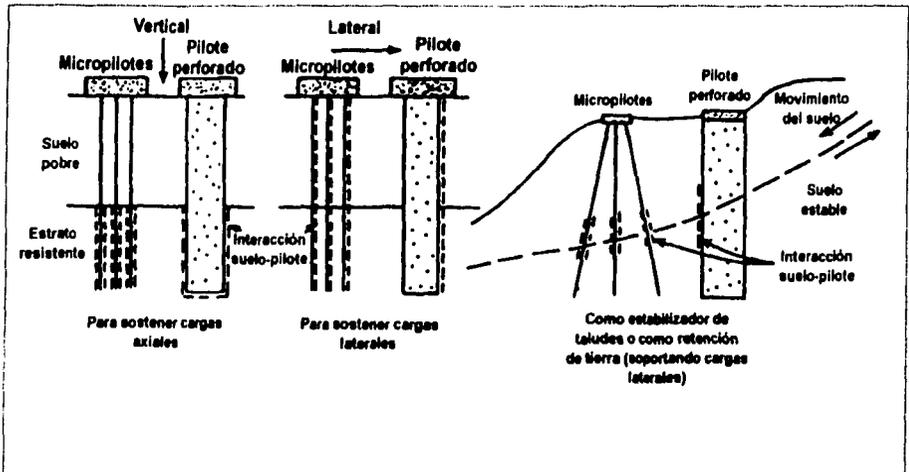


Figura 3.11 Caso 1

CASO 2

En este caso, los micropilotes no son cargados directamente, son construidos para formar una red tridimensional de pilotes reticulados, consecuentemente, estos trabajan en composición con el suelo, constituyendo una zona de refuerzo confinado de material. Este tipo de micropilotes recibe el nombre de micropilotes reticulados o micropilotes raíz, pueden ser utilizados también para recimentación, estabilización de taludes y para retención de tierra (Figura 3.12).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

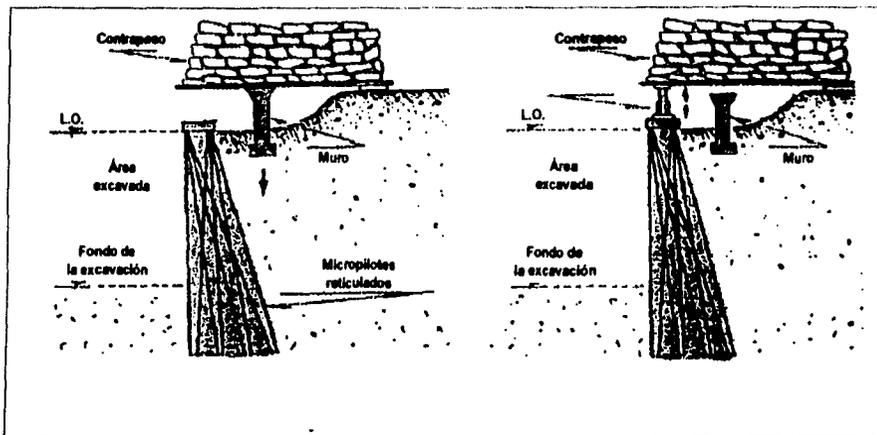


Figura 3.12 Caso 2

3.2.2 POR EL MÉTODO DE INYECCIÓN

CLASIFICACIÓN BASADA EN EL PROCEDIMIENTO DE INYECCIÓN

INYECCIÓN REPETITIVA Y SELECTIVA E INYECCIÓN GLOBAL UNITARIA

Bustamante y Doix ⁽¹⁵⁾ describieron un micropilote con refuerzo de acero que consistía en un tubo, una varilla o un grupo de varillas colocadas en el interior de una perforación de diámetro pequeño, las cuales eran sumergidas en el subsuelo con inyecciones de lechada de cemento bajo presiones relativamente altas. Esta definición excluye entonces a los micropilotes que no se realizan con presión, para los micropilotes inyectados bajo presión existían dos tipos que se utilizaban comúnmente en Francia "Injection Répétitive et Sélective" (Inyección repetitiva y selectiva) o IRS e "Injection Globale Unitaire" (Inyección global unitaria) o IGU.

- Inyección Repetitiva y Selectiva

Los micropilotes IRS incluyen a los micropilotes inyectados por medio de tubos con empaquetamiento doble, esta inyección puede ser aplicada en zonas específicas (selectiva) y es posible reinyectar otra vez en diferentes zonas (repetitiva), el tubo usado para estas inyecciones de lechada de cemento es llamado "tube à manchettes" Tubfix y Gewi entran en esta categoría.

- Inyección Global Unitaria

Los micropilotes IGU incluyen a los inyectados con un solo empaque ó cuando la presión aplicada a la cubierta permite su remoción, con este procedimiento la lechada de cemento es inyectada en un solo paso, los Pilotes Raíz entran en esta categoría, en estos pilotes la presión que se utiliza comúnmente es de 0.6 Mpa (6 kg/cm^2)

TIPO A Inyección por gravedad (gravity grouting)(Figura 3.13)

Es la técnica más simple y difundida, en particular para el cementado primario de micropilotes o anclajes que serán post-inyectados. En ningún momento la presión supera a la carga hidrostática del mismo cemento.

Se aplica generalmente a elementos que resisten a compresión por la punta, o donde la fricción no juega un rol importante. No existe diferencia de fricción a lo largo del bulbo o de la longitud de sellado.

Deben observarse ciertas reglas al colar un elemento esbelto:

- Cementar desde el fondo hacia la boca empleando un tubo tipo tremie o manguera de inyección.
- Continuar cementando hasta que el material salga libre de impurezas por la boca de la perforación.
- En caso de colar en una perforación llena de agua o lodo, evitar el mezclado del cemento con el lodo al iniciar el colado.

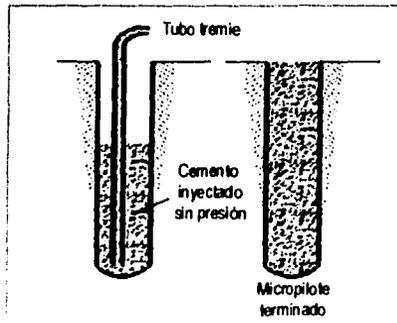


Figura 3.13 Micropilote tipo A , inyección por gravedad

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TIPO B (Figura 3.14)

Este sistema es aplicable sólo si se emplea un método de perforación encamisada o con interior hueco.

El objetivo principal es el de aumentar el diámetro efectivo de la zona fija (bulbo o zona de carga) del micropilote o anclaje.

El cementado del elemento puede realizarse con el sistema de inyección tipo A o directamente por la camisa en caso de utilizarse una tapa. Luego se continúa inyectando lechada a una presión P mayor que la atmosférica por dentro de la camisa o del alma del tubo hueco.

Existe un tramo, llamado longitud de sellado, que no será inyectado a mayor presión. La longitud de sellado dependerá del método de perforación y del tipo de suelo.

Es importante destacar que una vez que se libera la presión, el cemento fraguará a presión atmosférica por lo que la presión en cualquier punto de la interfase suelo-bulbo será igual a la carga hidrostática del cemento.

Los rangos comunes de presión son de 0.3 a 1 MPa, (3 - 10 kg/cm²) los Pilotes Raíz y los Micropilotes IGU se encuentran dentro de esta categoría.

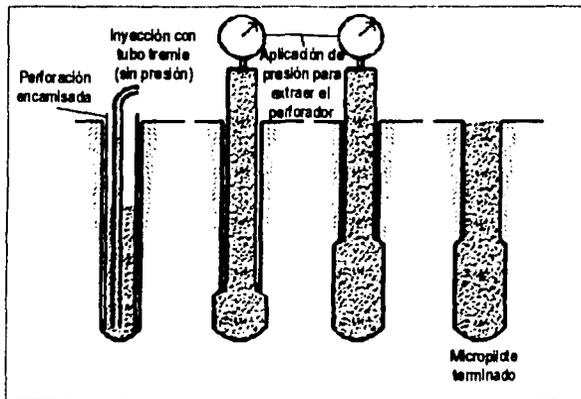


Figura 3.14 Micropilote tipo B

FALLA DE ORIGEN
TESIS CON

TIPO C (Figura 3.15)

Este método también es conocido como IGU: inyección global unitaria

Se procede al cementado del elemento por medio de los sistemas de inyección tipo A ó tipo B.

Pasadas 4 a 24 horas, una vez fraguado el cemento, se fractura el bulbo del micropilote o anclaje por medio de la inyección de un pequeño volumen de agua y a continuación se procede a inyectar cemento a presión. Para tal efecto se dispone junto a la armadura un tubo perdido de post-inyección equipado con válvulas unidireccionales, de esta forma se mantendrá una presión superior a la hidrostática; se utilizan presiones de 1 MPa (10 kg/cm²) o mayores, los Micropilotes IGU entran en esta categoría y su utilización se da más en Francia.

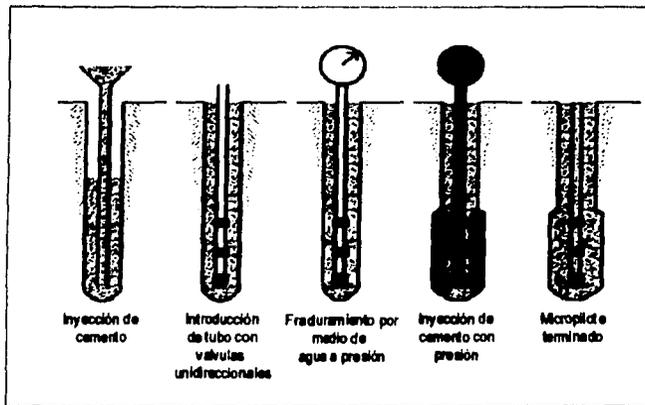


Figura 3.15 Micropilote tipo C, inyección global unitaria

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TIPO D (Figura 3.16)

Este método es similar al tipo C pero permite un mejor control de las post-inyecciones (inyecciones secundarias).

Se procede al cementado del elemento por medio de los sistemas de inyección tipo A ó tipo B; posteriormente se sigue el procedimiento de fractura con el tubo perdido de post-inyección como en el tipo C y se aplica cualquiera de las dos técnicas siguientes:

- **Inyección repetitiva**

En esta técnica en particular, el sistema prevé el enjuague de los tubos de post-inyección lo que permite reiterar las post-inyecciones tantas veces como sea necesario. Si se dispone de más de una línea de inyección, esta se puede controlar mejor a diferentes profundidades.

- **Inyección repetitiva y selectiva**

Para esta técnica, el tubo de post-inyección permite la introducción de un doble obturador. De esta forma se puede inyectar por cada válvula independientemente y tantas veces como sea necesario.

Las presiones varían de 2 a 8 MPa, (20 - 80 kg/cm²) Los Micropilotes Tubfix, Gewi e IRS entran en esta categoría y son utilizados en todo el mundo.

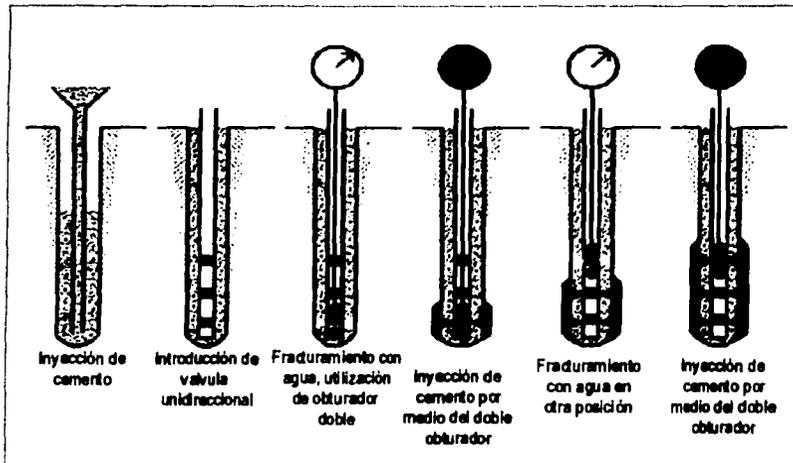


Figura 3.16 Micropilote tipo D, inyección repetitiva y selectiva

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.3 APLICACIONES

3.3.1 PARA SOPORTE ESTRUCTURAL

La aplicación de los micropilotes como soporte estructural se da cuando el suelo de cimentación falla por efectos del peso de la estructura, por una inadecuada cimentación o cuando esta se encuentra demasiado deteriorada y cuando la utilización de este método es lo mas viable económicamente, también cuando se presentan hundimientos diferenciales o cuando es necesario cimentar temporalmente y/o permanentemente una estructura.

También es posible la utilización de los micropilotes en cimentaciones de torres de alta tensión; en las siguientes fotografías y figuras se ejemplifica la utilización de los micropilotes en ingeniería como soporte de estructuras.

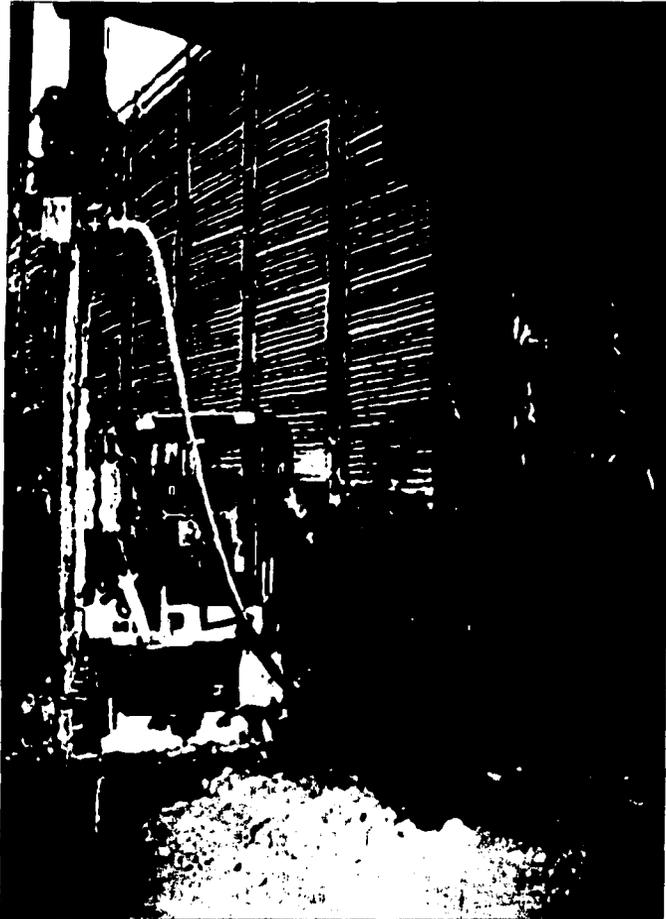


Fotografía 3.1 Recimentación de la zona arqueológica en el Museo de Louvre en ella se pueden apreciar los micropilotes que van a servir como cimentación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

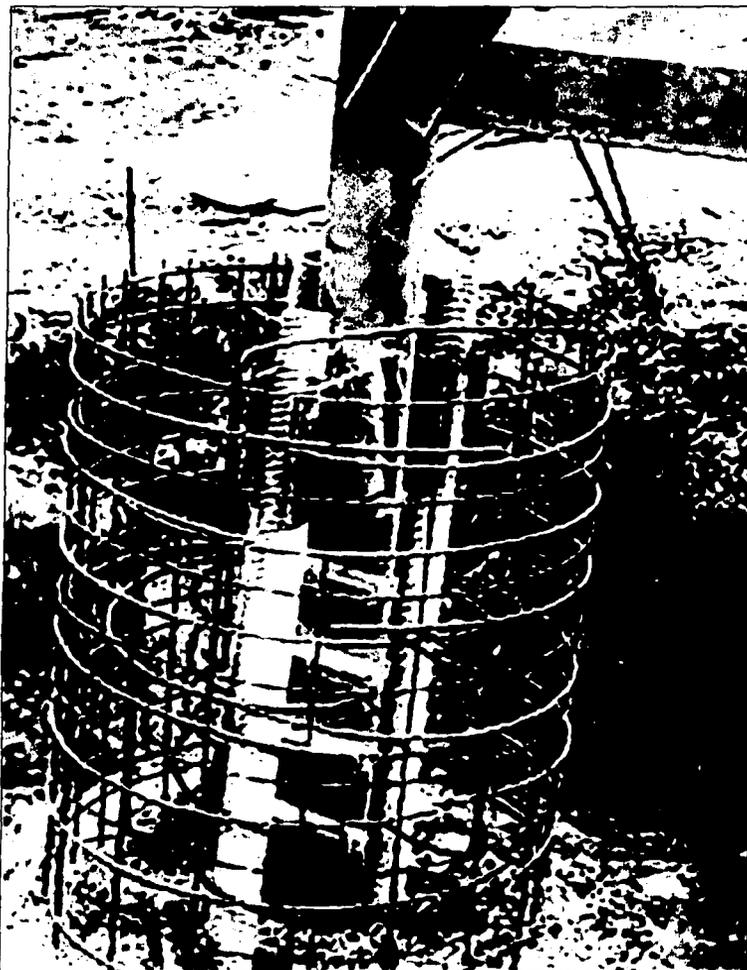


Fotografía 3.2 Recimentación en una industria metalúrgica donde se aprecia se que no es necesario detener la producción.



Fotografía 3.3 Recimentación de un puente, al fondo se puede apreciar un micropilote terminado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fotografía 3.4 Cimentación por medio de micropilotes para una torre de alta tensión.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

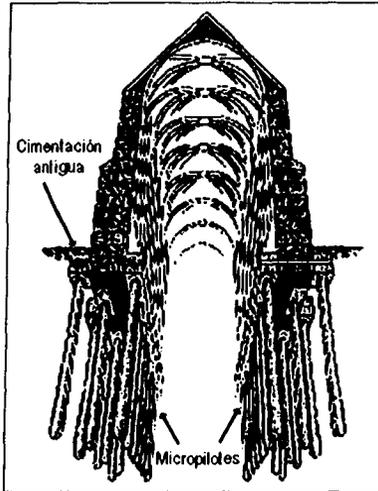


Figura 3.17 Recimentación de Estructuras antiguas.

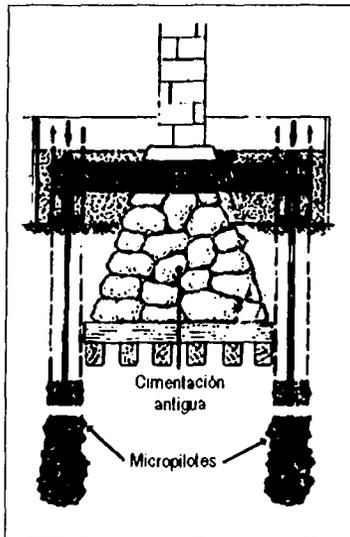


Figura 3.18 Recimentación de una cimentación de mampostería utilizando vigas de acero para transmitir la carga.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

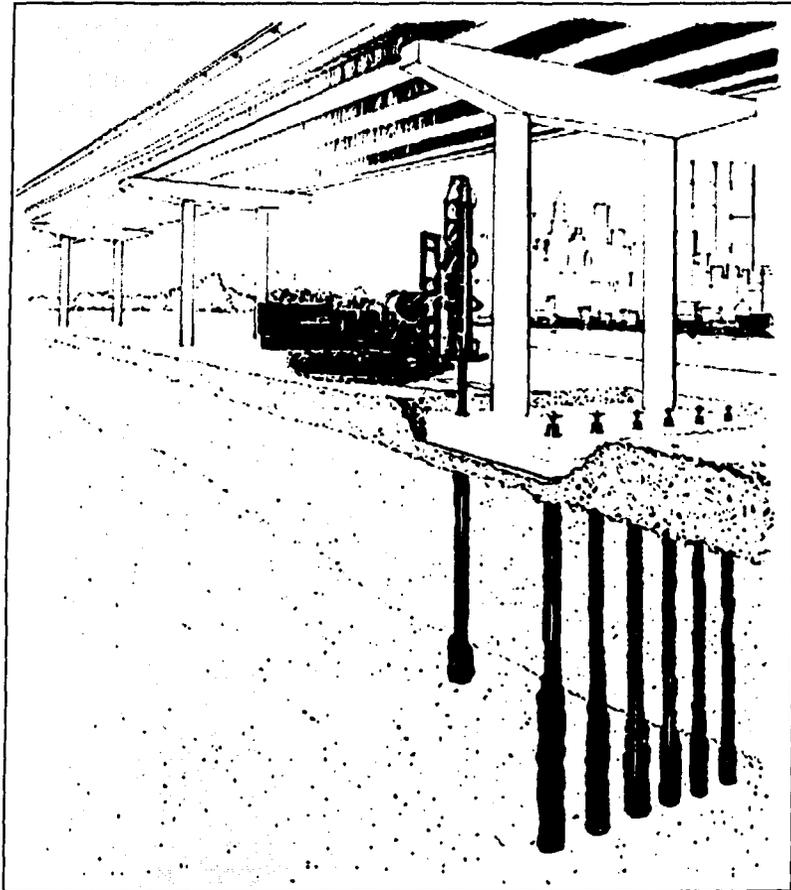


Figura 3.19 Esquema de la recimentación de un puente donde se muestra la perforadora y los micropilotes terminados con su transmisor de cargas.

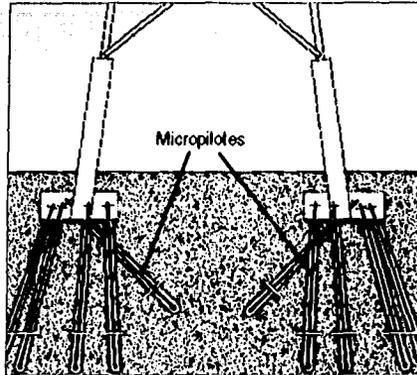


Figura 3.20 Cimentación para torres de alta tensión.

3.3.2.- PARA REFUERZO EN SITIO

La aplicación que se tiene en este caso es cuando es necesario darle estabilidad a un talud por medio de anclajes verticales (micropilotes), ya sea temporal o permanentemente, para reforzar muros de contención por medio de micropilotes reticulados y cuando se necesita sostener las paredes de una excavación, es útil en carreteras para la ampliación de carriles.



Fotografía 3.5 Soporte de una excavación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fotografía 3.6 Maquina perforando un talud para una carretera para introducir micropilotes.



Fotografía 3.7 Soporte de una excavación.

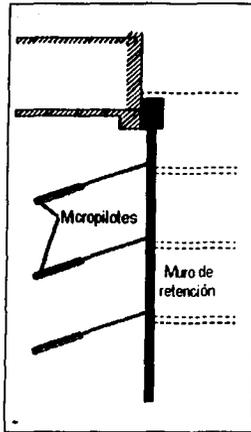


Figura 3.21 Soporte de un muro de retención de tierra.

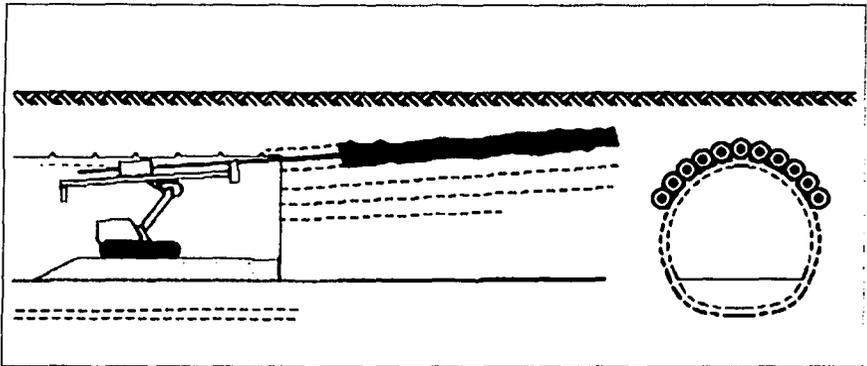


Figura 3.22 Soporte del techo de una excavación en suelo blando utilizando micropilotes, a esta técnica se le denomina paraguas de micropilotes.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo

MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN DE LOS MICROPILOTES

OBJETIVO ESPECÍFICO

Analizar el método que se sigue para la selección, construcción, perforación e inyección de la lechada de cemento para la correcta elaboración de los micropilotes.

4.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN

Los criterios que se deben seguir para la selección de los micropilotes son los siguientes:

4.1.1 ANÁLISIS SOCIO-ECONÓMICO

Es necesario observar la viabilidad del proyecto, la importancia que tiene para el cliente dentro de un marco constructivo, para definir su recimentación; es importante mencionar que la recimentación por medio de micropilotes en México es considerada como una opción para la remediación de construcciones gubernamentales, monumentos y edificios históricos ⁽²⁾ y como en el caso de la Catedral Metropolitana y el Palacio de Bellas Artes, en el Distrito Federal, se consideran otros factores como son la importancia que tiene para la población y su seguridad. Es necesario a su vez, contemplar los costos de los métodos de recimentación o de establecimiento de la cimentación de obra nueva, ya que en algunos casos el costo es muy elevado como el congelamiento del suelo como método de mejoramiento del suelo de cimentación y se tiene que decidir si es retirada la estructura, o recimentada.

También es necesario analizar el costo social que como obra civil tiene, ¿Qué beneficios presentará?, ¿Qué alternativas se tienen?, ¿Qué interés se busca cubrir?, éstas son algunas de las interrogantes que es necesario responder antes de tomar la

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

decisión del método de recimentación adecuado sea cual sea, y como interrogantes finales, ¿Es necesario desplazar a los habitantes de la obra, cumple con la seguridad establecida y no afecta directamente a la población la decisión?

El método de recimentación de micropilotes, como cualquier otro método diseñado en ingeniería, también presenta limitantes, pero está demostrado que intenta causar el menor daño al ambiente, no genera ruido excesivo como otros métodos de pilotaje, donde se utilizan martinets y grandes perforadoras, no utiliza un gran espacio para la perforación, ya que depende de un mínimo espacio de altura (2.3 m) sólo para que se coloque la perforadora, y dos o más trabajadores para controlar la perforación. En el caso de que el micropilote requiera algún medio de compresión, se considerará el espacio suficiente.

En cuanto al rendimiento para la elaboración de los micropilotes, para efectuar un análisis de tiempos, la productividad de instalación diaria es de 8 elementos con tres operarios. ⁽⁷⁰⁾

4.1.2 ANÁLISIS GEOTÉCNICO

La selección del método de recimentación adecuado depende de un correcto estudio de mecánica de suelos, como se observó en el capítulo 2 del presente trabajo, es necesario hacer una investigación preliminar que incluye estudios de laboratorio y en sitio para conocer las propiedades del suelo, la estratigrafía y formaciones rocosas. En caso de recimentación, el estado en que se encuentra la cimentación antigua o deteriorada, las causas que originaron su falla y la consolidación que se tiene en suelos arcillosos o limosos, el nivel de aguas freáticas y todas las consideraciones necesarias. Tal y como serían para el establecimiento de una nueva cimentación, es de vital importancia que se tengan estos estudios para decidir qué método será el adecuado, para el suelo analizado.

4.2 PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN DE LOS MICROPILOTES

Los micropilotes son pilotes perforados y colados in situ, los cuales trabajan por fricción combinados con una cimentación superficial anterior o con una nueva; como pilote perforado y colado in situ sigue la misma línea de proceso constructivo, perforación, inyección y colocación del acero de refuerzo. Los pasos de la inyección de la lechada de cemento y la colocación del acero de refuerzo son procesos que se pueden invertir. En algunos es necesario adicionar compresión a la lechada, después de haberla colocado y en otros sólo es necesaria la utilización de un tubo tremie, el cual

coloca la lechada de cemento por gravedad, los procesos constructivos para cada paso de la construcción de los micropilotes se describirán a continuación.

4.3 PERFORACIÓN

Al ser un pilote considerado de diámetro pequeño, el proceso de perforación es muy parecido al que se tiene para la obtención de muestras o pozos de prueba, y para las investigaciones de petróleo.

4.3.1 CIRCULACIÓN POSITIVA O PERFORACIÓN CON EXTRACCIÓN EXTERNA. ⁽¹⁴⁾

Este método involucra la rotación de un tubo o una perforadora con una cubierta dentro del suelo y al mismo tiempo es aplicada una carga vertical o presión. El suelo introducido dentro del tubo o cubierta es limpiado o lavado fuera con la utilización de un líquido para perforación, este es inyectado dentro de la cubierta de la cabeza de perforación y regresa hacia arriba por uno de los lados de la misma. El líquido que se utiliza más comúnmente es el agua, algunas veces se utiliza aire comprimido o lodo bentonítico. La perforación con extracción externa es la técnica más sencilla y la más económica para la instalación de micropilotes y se utiliza generalmente cuando el suelo no presenta obstrucciones y cuando las pérdidas de consistencia del suelo pueden ser toleradas.

4.3.2 DOBLE PERFORACIÓN ⁽¹⁴⁾

Este es un método progresivo y consta de dos cubiertas, se mantiene la limpieza fuera de la cubierta de perforación donde otra cubierta avanza simultáneamente junto con una varilla interior con una broca rotatoria. El agua es el líquido utilizado con más frecuencia para este método, puede usarse bentonita o aire comprimido también; el seleccionado circula por el interior por un espacio localizado entre la varilla de perforación y la cubierta, una de las mayores ventajas de la perforación doble es el íntimo contacto que se mantiene entre la cubierta de perforación externa y el suelo durante el proceso, esto es importante en situaciones cuando puede perder consistencia el suelo, o cuando el suelo presenta discontinuidades en su estructura; este retorno del líquido no es posible que se efectúe en la Perforación con Extracción Externa. La Doble Perforación es regularmente utilizada para penetrar obstrucciones o para mantener abierta la perforación en formaciones de roca fracturada, las desventajas de este método son que se requiere de una labor más extensiva y el costo es más elevado.

4.3.3 PERFORACIÓN DOBLE CON PERCUSIÓN EXCÉNTRICA ROTATIVA ⁽¹⁴⁾

Este método es similar al método doble, excepto que la broca perforadora en la varilla interna del taladro se substituye por un martillo perforador. La broca del martillo se fabrica en dos partes, un piloto y un extractor. El extractor mecánico se abre durante la perforación a un diámetro un poco más grande que el diámetro exterior de la cubierta de los taladros. Este extractor mecánico proporciona una perforación susceptible de mayor tamaño a través de obstrucciones o de roca y de esta manera permite que la cubierta la siga simultáneamente por la parte inferior. Se utiliza aire comprimido para conducir el martillo, también actúa como líquido para la perforación y para la extracción de los cortes. Este método se utiliza en los suelos que contienen cantidades grandes de obstrucciones tales como guijarros, cantos rodados o desperdicios de demolición y es también muy eficaz para avanzar la cubierta del taladro en zonas altamente fracturadas de roca tales como caliza karstica, o roca de resistencia variable como las formaciones de esquisto y de mica. La utilización de los taladros es más costosa que la requerida para la perforación doble o que la perforación con extracción externa, pero en muchas situaciones, el método es muy eficaz.

4.4 INYECCIÓN

Una vez realizada la perforación, se procede a la inyección de la lechada de cemento, por medio de las técnicas descritas anteriormente, ya sea por medio de la utilización de tubo de manguitos, a través de tubo de acero de refuerzo o a través de la intromisión de tuberías con válvulas unidireccionales de entrada y salida.

4.4.1 INYECCIÓN CON TUBO TREMIE ⁽¹⁴⁾

Este es un método usado para colocar lechada en un agujero humedecido. Un tubo con la lechada se baja al fondo de la cubierta de los taladros y/o a la perforación abierta de la roca o suelo. La lechada es bombeada a través del tubo mientras que se extrae lentamente del agujero. Mientras que la lechada rellena la cubierta o la perforación hecha por el taladro, se desplaza el líquido utilizado para la perforación. La inyección con tubo tremie se utiliza sobre todo donde la zona del enlace del micropilote es cimentada en roca o en condiciones ideales en suelos granulares. Al trabajar en roca altamente agrietada o fracturada o en oquedades, como en calizas karsticas, es posible que se presenten pérdidas de la lechada y se puede autorizar una prueba para sellar la zona de enlace. Cuando se hace esto es típico realizar ciertas pruebas para verificar la integridad de la lechada antes de la instalación final del refuerzo del micropilote. En algunas ocasiones, primero se coloca una inyección de lechada inicial, se reperfora y otra inyección de lechada se vuelve a colocar para garantizar la correcta construcción del micropilote.

4.4.2 INYECCIÓN DE LA LECHADA CON PRESIÓN ⁽¹⁴⁾

Este es un método utilizado para incrementar la capacidad de carga del micropilote en el suelo. Esta se realiza aplicando presión en la parte superior de la columna del fluido de la lechada a través de la cabeza de los taladros mientras que la cubierta de los taladros es retirada de la zona de enlace. La presión fuerza la lechada en el suelo circundante para crear un "bulbo". La capacidad de carga del micropilote se deriva de la fricción y del enlace desarrollados entre el suelo circundante y el bulbo de la lechada.

4.4.3 POST-INYECCIÓN DE LECHADA ⁽¹⁴⁾

Esta es una técnica que utiliza un tubo con perforaciones que se cubren con fundas de goma (válvulas unidireccionales) que permiten la introducción de cantidades controladas de lechada adicional con presiones que pueden exceder las tensiones laterales "in-situ". El tubo portuario envuelto se baja generalmente en el agujero con el refuerzo en la base, y algunas veces es parte del acero de refuerzo cuando se utilizan tubos envueltos de acero.

Después de que la lechada inicial se haya curado parcialmente, se utiliza a un embalador para colocar cantidades controladas de lechada a altas presiones a través de accesos individuales en la funda. Este proceso atraviesa la lechada inicial, permitiendo la colocación de la lechada adicional, dando como resultado tensiones laterales "in-situ" más altas alrededor de la zona de enlace provocando un agrandamiento en la misma.

Estos métodos complementan los que se explicaron en el capítulo 3 en la sección de Métodos de Inyección, cabe señalar que en resumen, estos métodos envuelven de manera generalizada los desarrollados históricamente tales como el IGU (Inyección Global Unitaria) y el IRS (Inyección Repetitiva y Selectiva), por tal motivo se omitió el desarrollo de estos para evitar ser repetitivos.

4.5 LECHADA DE CEMENTO

4.5.1 INYECCIÓN DE CEMENTO COMPACTADO.

La inyección de cemento compactado tuvo sus orígenes alrededor de 1950 en la costa oeste de los Estados Unidos, y por los siguientes 30 años fue utilizada solamente como una técnica remediadora. Después se utilizó por primera vez la inyección compactada como método de la mejora del sitio para una nueva construcción, su uso se difundió a través de los Estados Unidos. En julio de 1980 el Comité de Inyección de la Sociedad

Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) dio la siguiente definición a la Inyección Compactada:

"Inyección de lechada compactada: Inyección de lechada con menos de una pulgada de hundimiento. Normalmente un suelo-cemento con el suficiente tamaño de arcilla para proporcionar plasticidad, junto con suficientes tamaños de arena para desarrollar la fricción interna. La lechada no entra generalmente en los poros del suelo, pero el resto es una masa homogénea que permite controlar el desplazamiento a los suelos sueltos compactos, controla el desplazamiento de las estructuras superiores, o ambas."⁽¹⁵⁾

La inyección de cemento compactado se puede considerar como la combinación de dos tipos de técnicas, de densificación y de refuerzo del suelo de cimentación. Un diagrama esquemático de la operación del proceso de compactación se muestra en la figura 4.1. En Francia llaman a esta técnica "Densificación Estática Lateral" porque las deformaciones están sobre todo en el plano horizontal y las presiones se aplican lentamente.

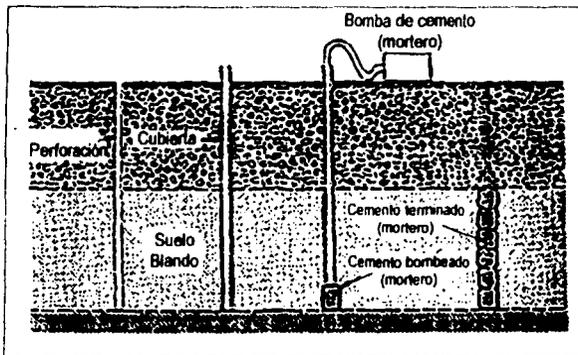


Figura 4.1 Inyección de cemento compactado (Gambin 1991)

A pesar del hecho de que la inyección de cemento compactado está definida como la que da lugar a una masa homogénea con un interfase definida con el suelo, hay una amplia divergencia de opiniones sobre los parámetros de la composición y la inyección de lechada que son necesarios para tener los resultados deseados.⁽¹⁵⁾

4.5.2 FACTORES QUE AFECTAN LA INYECCIÓN DE CEMENTO COMPACTADO

4.5.2.1 Fluidéz de la lechada de cemento

La fluidez influencia la eficacia del trabajo:

- Si la fluidez es demasiado pequeña, llega a ser muy difícil inyectar el material. Por esa razón, la lechada debe conservar sus características plásticas en la aplicación de presión y para la cantidad de tiempo requerida para la inyección. El problema es que la presión y el tiempo varían entre diversas inyecciones en el mismo proyecto. Consecuentemente, es necesario utilizar una lechada que pueda seguir siendo plástica por varias horas para las presiones comprendidas entre 36 a 57 kg/cm².
- Si la fluidez es demasiado alta, puede ocurrir un fracturamiento hidráulico del suelo, dando por resultado una pérdida de control, que origina la salida de la mezcla a la superficie o el levantamiento de la misma. Para prevenir esos problemas, la lechada debe tener fricción interna lo suficientemente alta para limitar su fluidez.
- La fluidez de la lechada esta limitada por la pérdida de agua, así que es importante que el agua no fluya fuera de ésta. La inclusión de arcilla o bentonita ayudaría para la retención del agua, pero aumentaría excesivamente la fluidez y la posibilidad de que se presente fracturamiento hidráulico. ⁽¹⁵⁾

La contracción de la lechada no tiene una relación directa con su fluidez; sin embargo, lo más aceptable es que tenga una contracción baja. Es necesario desarrollar una prueba en el suelo que nos relacione la fluidez. La investigación ha mostrado que los factores principales que afectan la contracción y la fluidez son:

- Proporcionamiento y graduación de la arena.
- Cantidad y naturaleza de la fracción fina de la arena.
- Inclusión de aditivos para lubricar y/o conservar el agua.

La figura 4.2 muestra el rango para la graduación de la arena que se utiliza a menudo en la elaboración de lechada de cemento.

4.5.2.2 Bomba de Inyección

La bomba utilizada para la inyección debe permitir la libre salida de la mezcla por medio de una válvula.

En la inyección de cemento compactado, donde se presentan altas presiones y el índice de inyección es bajo, incluso una pequeña fuga puede dar lugar a que una excesiva cantidad de agua sea expulsada de la lechada, dando por resultado un " bloque de arena". Para atenuar este problema, se agrega a veces bentonita o el contenido en agua de la lechada se aumenta, pero esto disminuye la calidad de la lechada de cemento. (8)

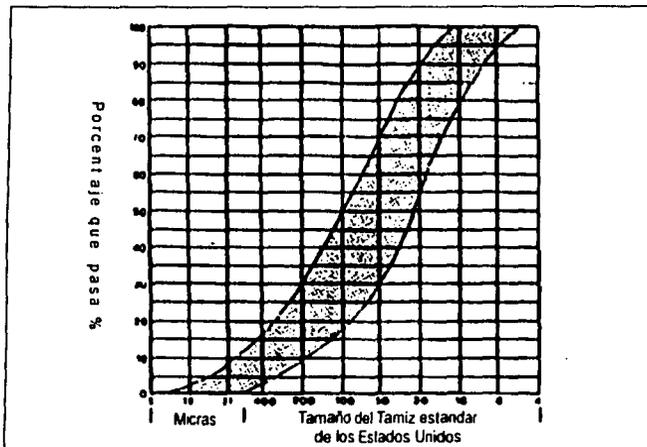


Figura 4.2 Gradación preferible de la arena para la inyección de lechada de cemento compactado

Capítulo

MÉTODOS DE DISEÑO DE LOS MICROPILOTES

OBJETIVO ESPECÍFICO

Estudiar algunos de los diferentes métodos para calcular la capacidad última de carga de los micropilotes, considerando las diferentes condiciones del suelo, los métodos de inyección y los factores que intervienen.

5.1 INTRODUCCIÓN

Al proporcionar el soporte necesario para recimentar, la carga total de la estructura se distribuye entre la antigua cimentación y la nueva. Es necesario determinar cuánto de la carga total puede ser tomada por la antigua cimentación para decidir lo que debe ser la carga de sustentación permisible del grupo de micropilotes. La cimentación original utilizará la carga hasta que ocurra el nuevo establecimiento y solamente en ese momento participan en la carga los micropilotes. El Reglamento de Construcción del Distrito Federal establece en las Normas Técnicas Complementarias para el diseño de pilotes de fricción que éstos deberán trabajar en conjunto con una cimentación superficial ya sea zapatas o losas, de esta forma, es justificable la utilización de micropilotes para una recimentación.

5.2 EFECTOS DE GRUPO

Después de determinar cuál es la carga que será resistida por el grupo de micropilotes, se debe decidir el número de micropilotes y la capacidad para cada uno. Para los micropilotes, el efecto del grupo es positivo, pero esto no se considera en la práctica. La figura 5.1 muestra este efecto positivo para micropilotes modelo probados en arena gruesa, tamizada. El grupo de 18 pilas tiene una capacidad axial seis veces mayor que el

del grupo de tres pilas; también se demuestra cómo cuando las pilas son reticuladas, el aumento en la capacidad del grupo de 18 pilas es incluso mayor. ⁽¹⁵⁾

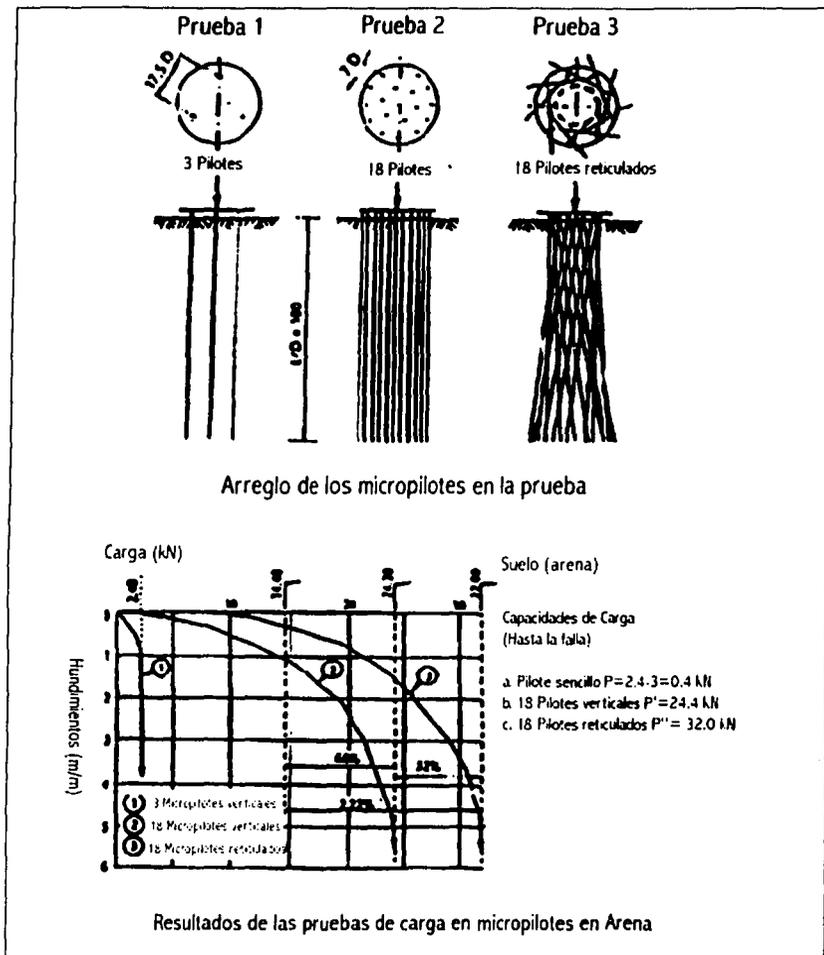


Figura 5.1 Efecto de Grupo en Micropilotes probados en Arena ⁽¹⁵⁾

5.3 EFECTO DE LA CUBIERTA PERMANENTE

Cuando la cubierta de acero se deja en el lugar en la zona en donde no se espera ninguna resistencia lateral, el funcionamiento del micropilote se mejora apreciablemente. La figura 5.2 (Bruce, 1994)⁽¹⁵⁾ muestra este efecto comparando el funcionamiento de la prueba de la carga entre dos micropilotes rellenos en las mismas condiciones. Había cuatro capas distintas en el sitio: limo, turba orgánica, arena gris, y arena marrón. Las arenas medianamente densas, finas que eran materiales portadores adecuados fueron encontradas a profundidades entre 3 a 7.6 m por debajo de la superficie. Los micropilotes mostrados en la figura eran de 10.6 m de largo diseñados para que una carga axial de 15 toneladas fuera resistida por el fondo en 3 m de los micropilotes.

Los micropilotes fueron perforados y encajonados con un tubo nominal de acero de diámetro de 16.82 cm ($6\frac{5}{8}$ pulgadas). Una barra fue colocada como refuerzo para la longitud completa. La cubierta fue retirada durante la inyección de lechada con la presión de la zona portadora. La lechada usada era una mezcla de cemento del tipo 1 con una relación agua-cemento de 0.5. La cubierta fue dejada en el lugar en la pila A/8 para los 7.6 m superiores, mientras que fue retirada totalmente para la pila A/9. Según lo mostrado en la figura 5.2, la pila A/8 resistió las cargas axiales dos veces más que las cargas incidentes para la pila A/9.⁽¹⁵⁾

5.4 CONEXIÓN CON LA ESTRUCTURA

Los micropilotes se pueden conectar con la estructura de dos maneras:

- Los micropilotes se pueden conectar directamente con la estructura (Figura 5.3). En este caso son necesarios varios micropilotes, y también la utilización de un factor de seguridad alto contra la falla de soporte debido a las restricciones causadas por asentamientos.
- Los micropilotes pueden ser preesforzados antes de conectarlos con la estructura. En este caso se utilizan menos micropilotes y el factor de seguridad contra la falla de soporte disminuye.⁽¹⁵⁾

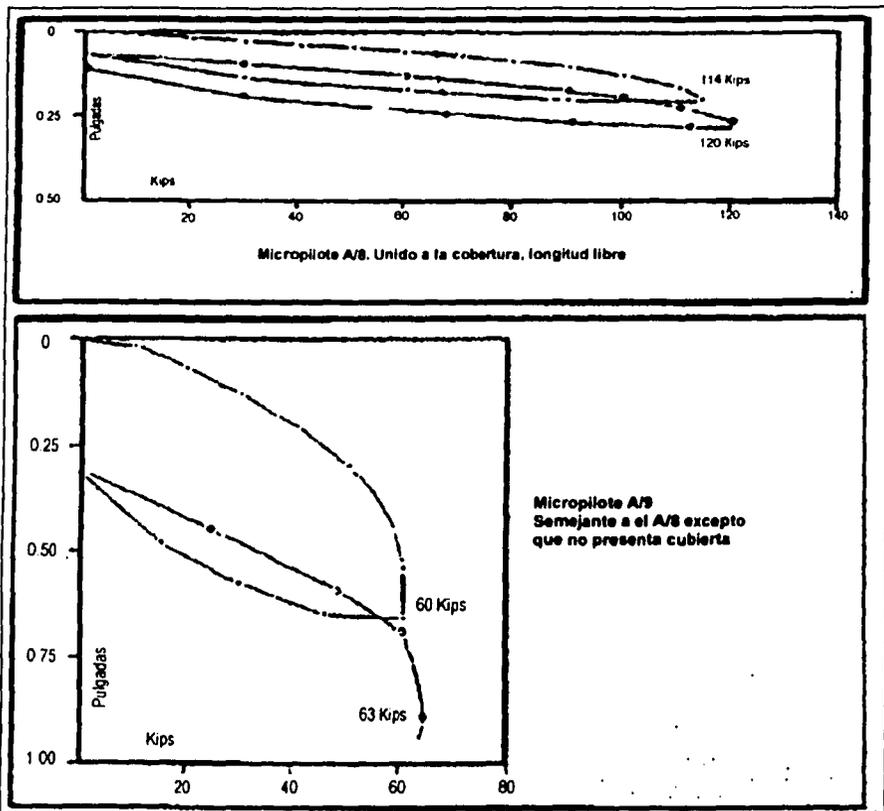


Figura 5.2 Efectos de la Cubierta en los micropilotes ⁽¹⁵⁾

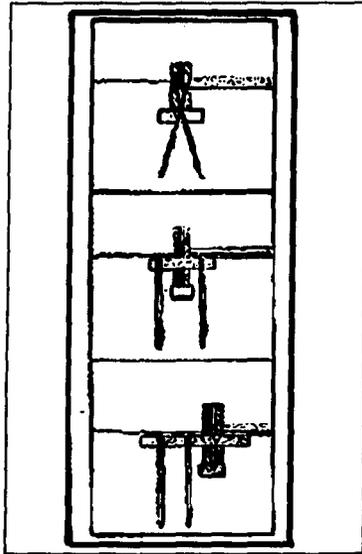


Figura 5.3 Conexión con la estructura

En la mayoría de los casos la primera opción es elegida debido a su simplicidad. Sin embargo, en algunos casos es necesario utilizar la segunda opción para tener una solución más aceptable. Esos casos incluyen cuando se deben limitar asentamientos a magnitudes muy pequeñas, cuando se puede presentar un rebote parcial de las cimentaciones anteriores, o para determinar la reacción del micropilote en la superestructura.

5.5 CAPACIDAD AXIAL ÚLTIMA DE CARGA

La última carga que se puede utilizar por un solo micropilote está definida por el valor más bajo de la sumatoria de los siguientes factores:

- Resistencia estructural del eje.
- Incidencia estructural del enlace de suelo-inyección.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La carga permisible utilizada es la última carga dividida por un factor de seguridad. Sin embargo, una carga más baja puede ser especificada debido a las limitaciones de las

tensiones y/o de los asentamientos que pueden variar por la estructura que es soportada.

5.5.1 RESISTENCIA ESTRUCTURAL DEL EJE.

La capacidad interna de un micropilote es gobernada con frecuencia por su diseño total por su área representativa pequeña y a la gran resistencia del enlace de suelo-inyección debido a las técnicas de la construcción. El acero del refuerzo es el elemento que lleva la mayor parte de la carga. Sin embargo la carga es resistida por el acero y la lechada de cemento.⁽¹⁵⁾

Es importante considerar esta acción compuesta para optimizar el diseño interno del micropilote. El uso del tubo o de la cubierta de acero como elementos del refuerzo ha llegado a ser más popular, especialmente al requerir desviaciones mínimas o utilizando cargas laterales. La lechada consiste comúnmente en cemento y agua, con relaciones agua-cemento entre 0.40 y 0.55. La relación agua-cemento mínima es fijada por el requisito de que la lechada debe tener una adecuada fluidez para permitir el bombeo y una inyección eficiente. La relación de agua-cemento máxima nos da resultados importantes porque una cantidad excesiva de agua causaría la sangría, resistencia baja, una gran contracción y una durabilidad pobre.

Las arenas finas se pueden agregar a la mezcla para reducir costos. Las relaciones de arena-cemento se limitan a 3, pero exceden raramente de 1.5; los agregados son aplicados para modificar características de la lechada. Las razones principales de los agregados son:

- Prevención de la contracción.
- Reducción en el contenido en agua, pero manteniendo la fluidez.
- Aceleración o retardamiento.
- Evitar la sangría del agua.

Para los anclajes (comparables a los micropilotes debido a su mecanismo lateral de transferencia de la carga de fricción) la fuerza de la lechada es comúnmente 407 kg/cm^2 . La experiencia ha mostrado que el enlace de inyección-acero de refuerzo no gobierna el diseño del micropilote.⁽¹⁵⁾

5.5.2 ENLACE DEL SUELO-INYECCIÓN

Típicamente, la capacidad de carga de un micropilote es a base de fricción lateral, por lo tanto, la capacidad de carga última está dada por la resistencia a la fricción entre el

enlace suelo-inyección. La capacidad de carga de la punta es despreciable en la mayoría de los casos, y la capacidad interna de carga del micropilote es menor que la capacidad externa de carga. La fricción lateral depende del enlace del suelo-inyección que es fuertemente influenciado por las técnicas de construcción y calidad. La fricción lateral es mejorada principalmente por tres factores que resultan de la presión inyectada: aumento en el diámetro, aumento en la presión lateral alrededor de la pila y aumento de la resistencia del suelo. ⁽¹⁵⁾

Para los micropilotes que son rellenados a través de una cubierta temporal, solamente una fracción de menor importancia de la presión de la inyección de lechada se transmite a la interfase de inyección-suelo. Para las inyecciones de lechada realizadas en etapas, el aumento en el diámetro y en la presión lateral puede ser considerable. Gouvenot ⁽¹⁵⁾ señaló un rango de los valores para la fricción basado en un número de pruebas. Él analizaba pruebas de la carga de los anclajes verticales y de los micropilotes rellenados bajo presión usando "tube à manchettes" (67 pruebas en 33 diferentes sitios) y sin presión (16 pruebas en 9 diferentes sitios). La resistencia de la superficie hasta la falla basada en pruebas en el terreno era calculada mientras que la fuerza aplicada se dividió por el área lateral en el anclaje o pilote.

Estas áreas fueron encontradas asumiendo que el diámetro crece dependiendo del tipo de procedimiento de la inyección. Además, Gouvenot dio un rango de las resistencias obtenidas en la superficie basadas en una tensión normal de 1.5 kg/cm^2 . La figura 5.4 presenta un resumen de sus resultados.

Gouvenot dividió las condiciones de los suelos en tres tipos basados en el ángulo de fricción (ϕ) y la cohesión (C_u) y utilizó una ecuación para encontrar la fricción de la superficie para cada tipo como sigue:

Tipo 1: Arenas y Gravas ($35^\circ < \phi < 45^\circ$, $C_u=0$), con el valor de la fricción en el fuste f , el cálculo es:

$$f = \sigma_0 \tan \phi \quad (1)$$

Tipo 2: Finos, bajo contenido de arenas ($20^\circ < \phi < 30^\circ$) y Arcillas arenosas ($0.1 < C_u < 0.5 \text{ kg/cm}^2$), donde f se calcula:

$$f = \sigma_0 \sin \phi + C_u \cos \phi \quad (2)$$

Tipo 3: Arcillas y margas (o arenas verdes) ($0.5 < Cu < 2.0 \text{ kg/cm}^2$ y $\phi = 0^\circ$), el valor de f es:

$$f = Cu, \text{ para } 0.5 \leq Cu \leq 1 \text{ kg/cm}^2 \quad (3)$$

$$f = 1 \text{ kg/cm}^2, \text{ para } 1 \leq Cu \leq 2 \text{ kg/cm}^2 \quad (4)$$

Como se puede observar en la figura 5.4 los valores de la superficie de fricción están más cercanos a los obtenidos para el anclaje y los micropilotes rellenos sin presión. Sus resultados también muestran que la resistencia superficial aumenta con presiones más altas de la inyección.

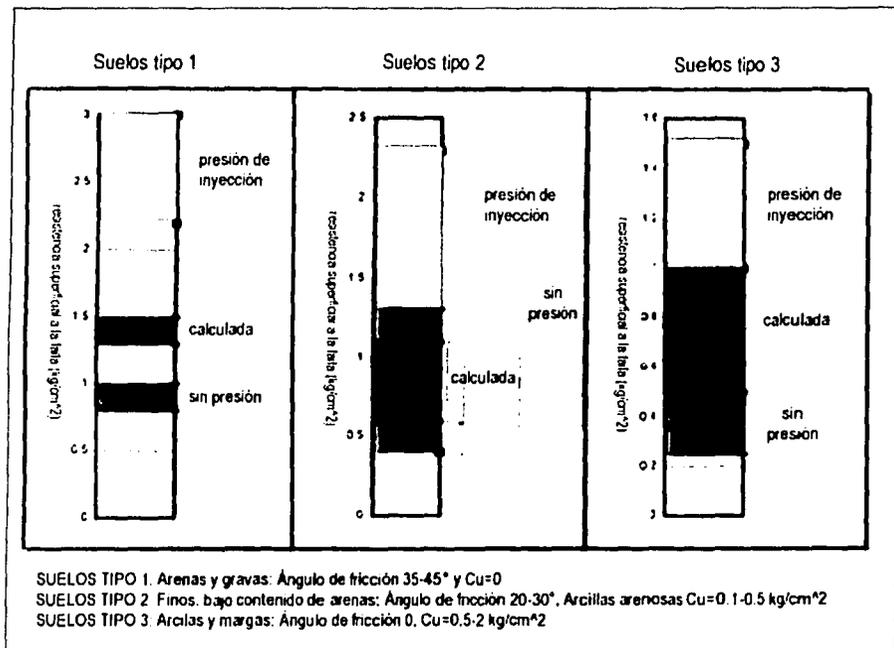


Figura 5.4 Rango de valores para la resistencia por fricción para diferentes tipos de suelos y bajo diferentes condiciones de inyección. ⁽¹⁵⁾

5.6 MÉTODOS DE CÁLCULO PARA LA OBTENCIÓN DE LA CARGA ÚLTIMA DE DISEÑO

Las secciones siguientes describen métodos para calcular la capacidad última de un micropilote. Estos métodos se utilizan para proporcionar la capacidad axial para el diseño inicial que se debe comparar con los resultados de las pruebas de carga.

5.6.1 MÉTODO EMPÍRICO BASADO EN LA EXPERIENCIA EN EL CAMPO CON LOS SISTEMAS DE ANCLAJE

Littlejohn⁽¹⁵⁾ propuso un método de diseño para los anclajes inyectados bajo presiones menores a 1 MPa (10 kg/cm²). Este método se puede utilizar para calcular la capacidad del micropilote obtenida por la fricción lateral. La ecuación para la capacidad última, Tf, es:

$$Tf = L \times n \times \tan \phi' \quad (\text{kN}) \quad (5)$$

Donde:

- L (m) es la longitud del micropilote, con la cual tiene enlace el suelo
- ϕ' (grados) es el ángulo efectivo de la resistencia cortante
- n (kN/m) es un factor que es afectado por la técnica de perforación (de percusión con lavado de agua), la profundidad de la sobrecarga, diámetro fijo del anclaje, la presión de inyección con un rango de 30 a 1000 kPa, (0.3 kg/cm² a 10 kg/cm²) los esfuerzos in situ y las características de la dilatación del suelo.

De acuerdo con experiencia del campo, n se puede seleccionar del rango siguiente de los valores para un tipo dado del suelo según lo mostrado en la tabla 5.1.

TIPO DE SUELO	RANGO DE PERMEABILIDAD (m/s)	RANGO DE n (kN/m)
Gravas y arenas gruesas	$>10^4$	400 a 600
Arenas medias a finas	10^4 a 10^6	130 a 165

Tabla 5.1 Valores de n (kN/m)⁽¹⁵⁾

Los valores para n fueron obtenidos para los materiales normalmente consolidados para los diámetros del anclaje de la perforación de aproximadamente 0.1 m. Si el diámetro de la perforación cambia, los valores de n deben ser modificados proporcionalmente.

5.6.2 MÉTODO DE DISEÑO EMPÍRICO PROPUESTO POR LIZZI

De acuerdo con su experiencia, Lizzi ⁽¹⁵⁾ propuso un fórmula empírica simple para evaluar la carga última de un micropilote, P_{ult} :

$$P_{ult} = DLKI \text{ (kg)} \quad (6)$$

Donde:

- **D** (centímetros) diámetro nominal del micropilote (diámetro de la perforación).
- **L** (centímetros) longitud del micropilote.
- **K** (kg/cm^2) es el coeficiente que representa la interacción media entre el micropilote y el suelo en toda la longitud (adherencia pilote-suelo).
- **I** es un coeficiente adimensional que depende del diámetro nominal del micropilote (diámetro de la perforación). Los valores para los dos coeficientes se dan en las tablas 5.2 y 5.3.

SUELO	K
Suelo blando	0.5
Suelo suelto	1.0
Suelo con compactación media	1.5
Suelo duro, gravas, arcillas	2.0

Tabla 5.2 Valores del coeficiente de interacción K ⁽¹⁵⁾

Diámetro del Micropilote	I
10 cm	1.00
15 cm	0.90
20 cm	0.85
25 cm	0.80

Tabla 5.3 Valores del coeficiente I ⁽¹⁵⁾

5.6.3 MÉTODO DE DISEÑO EMPÍRICO BASADO EN RESULTADOS DE LA PRUEBA DEL PIEZÓMETRO.

El piezómetro de Ménard es un instrumento que nos permite realizar mediciones en sitio de algunas propiedades mecánicas de suelos y rocas, como son los esfuerzos y las tensiones, dando como resultado la posibilidad de correlacionar en base a las mediciones obtenidas la capacidad de carga de cimentaciones superficiales y profundas, asentamientos en cimentaciones, deformación por cargas laterales en pilotes y pilas y la resistencia de los anclajes y los micropilotes, la figura 5.5 nos muestra el piezómetro Ménard con sus aditamentos y el panel de control.^(16, 17)

El método de diseño en base al piezómetro de Ménard se aplica a los micropilotes que son construidos con inyección de lechada bajo presiones relativamente altas, y no colocándola con la presión de la gravedad.

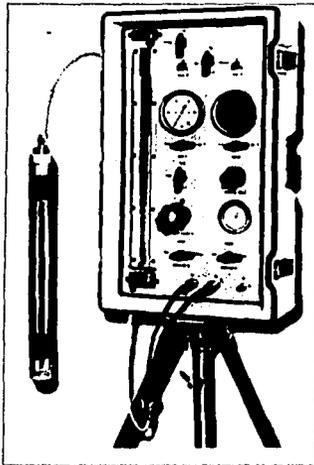


Figura 5.5 Piezómetro Ménard con sus componentes

Cuando la lechada se inyecta bajo alta presión se amplía el suelo adyacente en las paredes de la perforación. De una manera similar, la prueba del piezómetro mide la deformación en las paredes de la perforación cuando se forma un bulbo por el incremento de presión. Por esa razón, los resultados de la prueba del piezómetro pueden proporcionar una buena base para el diseño de presiones inferiores de los micropilotes rellenos a altas presiones.

Bustamante y Doix⁽¹⁵⁾ creyeron que hay también muchos parámetros implicados para el cálculo de la capacidad de carga de un micropilote. Dada la incertidumbre asociada a los procedimientos constructivos y a las condiciones de la lechada, un acercamiento puramente teórico no es posible. Para desarrollar un método de diseño, analizaron datos a partir de 249 pruebas a gama completa, incluyendo 213 anclajes verticales, 27 de micropilotes y 9 de pilotes inyectados. Para los micropilotes bajo carga de compresión, consideraban que la fricción lateral que puede ser desarrollada es igual que la fricción lateral desarrollada bajo tensión.

Con esta afirmación, los resultados que se tuvieron para los anclajes verticales se pueden comparar y analizar con los obtenidos para los micropilotes. El factor más importante que afecta el valor de la fricción lateral es el procedimiento constructivo y por lo tanto, los micropilotes son mejores comparados con los anclajes verticales que con los pilotes tradicionales para el cálculo de esta fricción.

Este método de diseño se basa en la presión del límite del suelo, p_l , encontrada con la prueba del piezómetro de Ménard. El primer paso en el diseño es elegir la presión de la inyección. Esta presión se mide en la tapa de la cubierta y no en el contacto entre la lechada que es inyectada y el suelo. Por esta razón las altas presiones no significan necesariamente que el enlace de la inyección-suelo sea de mejor calidad. Las presiones por lo menos de la presión p_l del límite del suelo aseguran más un mejor enlace que las presiones apenas de una fracción pequeña del p_l para los micropilotes del IRS ("Inyección Repetitiva y Selectiva").

En el caso de formaciones rocosas compactas, la presión no influenciaría la naturaleza del enlace. Para los micropilotes IGU ("Inyección Global Unitaria"), la presión de la inyección es más baja que el p_l , y como regla general su resistencia es más alta que para los micropilotes rellenos a presión de la gravedad pero más baja que para los micropilotes del IRS.

Bustamante y Doix (1985) propusieron elegir la presión de la inyección, p_i , como sigue:

- Para el IRS: $p_i \geq p_l$
- Para IGU: $0.5p_l < p_i < p_l$

La capacidad última de carga, Q_t , en el micropilote es:

$$Q_t = Q_{P_t} + Q_{S_t} \quad (7)$$

Donde:

Q_{P_t} : Límite de soporte de la punta

Q_{S_t} : Límite de la resistencia lateral

Para un micropilote según lo mostrado en la figura 5.6, la resistencia lateral se da aproximadamente en:

$$Q_{S_t} = \pi \times D_s \times L_s \times Q_s \quad (8)$$

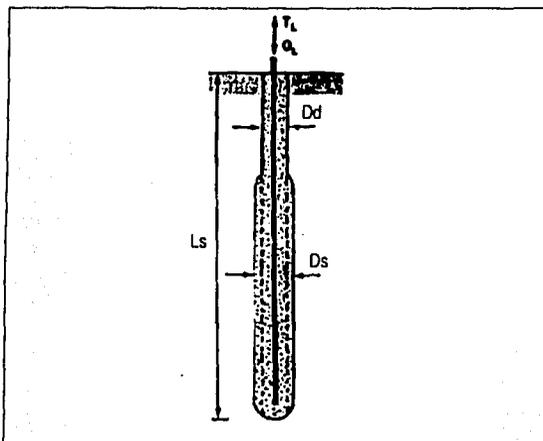


Figura 5.6 Representación esquemática de un micropilote⁽¹⁵⁾

Donde:

- D_s es el diámetro medio del bulbo formado por la lechada de cemento (figura 5.6);
- $D_s = \alpha D_d$, α es el coeficiente de ampliación que se da en la tabla 5.4 y depende del tipo de suelo y el tipo de micropilote (IGU ó IRS).
- L_s es la longitud del fuste del micropilote (figura 5.6).

- Q_s es la fricción lateral que depende de p_i y del tipo de suelo; los valores se pueden obtener de gráficos de Q_s contra p_i dados en las figuras 5.7 a 5.10.

El cuadro 5.4 indica qué curva en las figuras 5.7 a 5.10 es apropiada dependiendo del tipo de suelo y el método de inyección. En las figuras se observa que la dispersión de los datos es significativa y es importante recordar este hecho al diseñar un micropilote.

Este método se basa en un buen número de las pruebas de carga y por lo tanto puede ser una guía aceptable para un diseño inicial. Sin embargo, todavía hay muchas incertidumbres relacionadas con las variaciones en procedimientos constructivos y las pruebas de carga siguen siendo la mejor alternativa para determinar una capacidad final del diseño.

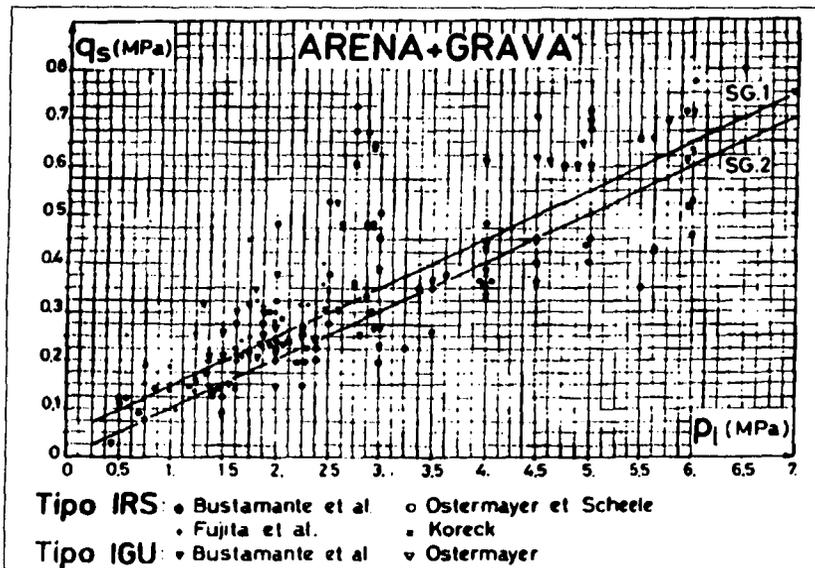


Figura 5.7 Gráfico de Q , utilizado para arenas y gravas.

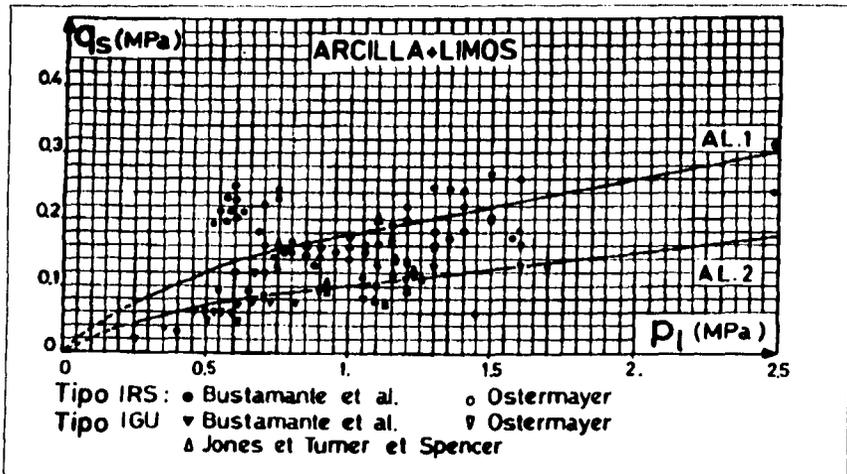


Figura 5.8 Gráfico de Q, utilizado para arcilla y limos.

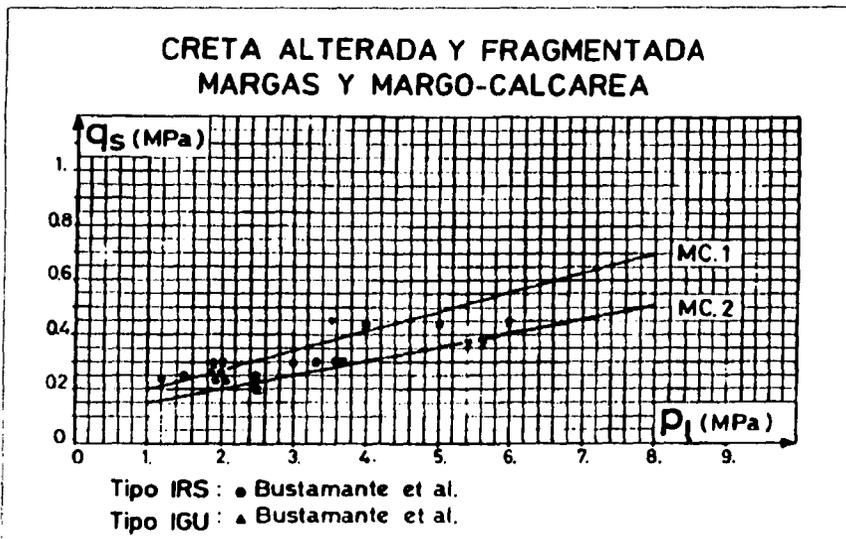


Figura 5.9 Gráfico de Q, utilizado para cretas (yesos) y margas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

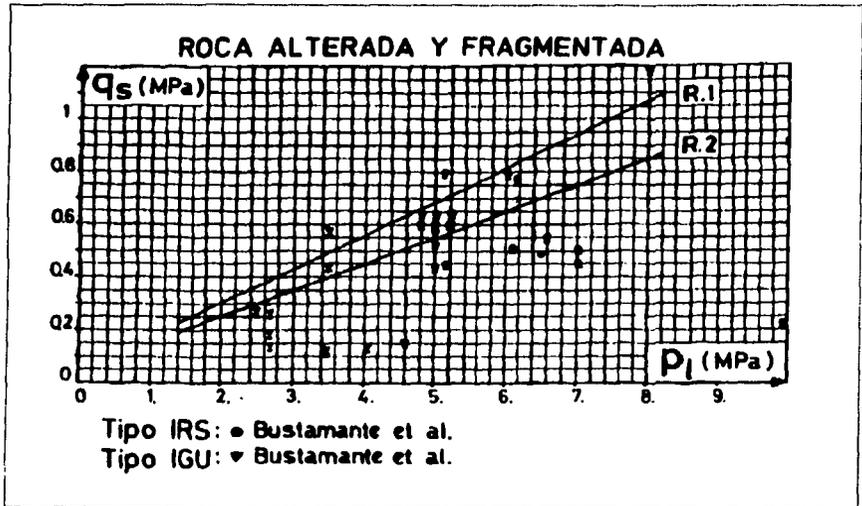


Figura 5.10 Gráfico de Q_s utilizado para rocas

Tipo de Suelo	Coeficiente α		Curva que se usa			
	IRS	IGU	IRS	IGU		
Grava	1.8	1.3 a 1.4	SG.1	SG.2		
Grava arenosa	1.6 a 1.8	1.2 a 1.4				
Arena en grava	1.5 a 1.6	1.2 a 1.3				
Arena gruesa	1.4 a 1.5	1.1 a 1.2				
Arena media	1.4 a 1.5	1.1 a 1.2				
Arena fina	1.4 a 1.5	1.1 a 1.2				
Arena limosa	1.4 a 1.5	1.1 a 1.2				
Limo	1.4 a 1.6	1.1 a 1.2				
Arcilla	1.8 a 2.0	1.2			AL.1	AL.2
Marga (Arena verde)	1.8	1.1 a 1.2			MC.1	MC.2
Marga calcárea	1.8	1.1 a 1.2				
Creta (Yeso) alterada o fragmentada	1.8	1.1 a 1.2				
Roca alterada o fragmentada	1.2	1.1	≥R.1	≥R.2		

Para IRS: $p_i \geq p_c$
 Para IGU: $0.5p_c < p_i < p_c$

Tabla 5.4 Valores del coeficiente α y curvas que se utilizan en las figuras 5.7 a 5.10 para diferentes tipos de suelo. ⁽¹¹⁾

IGU. Inyección Global Unitaria

IRS. Inyección Repetitiva y Selectiva

La resistencia de la punta se calcula de manera aproximada en:

$$QP_L = S_p \times K_p \times p_1 \quad (9)$$

Donde:

- S_p es el área de la punta del micropilote basado en un diámetro D_s (figura 5.6) si el procedimiento constructivo lo garantiza.
- K_p es un coeficiente para la punta que depende del tipo de suelo como se muestra en la tabla 5.5.
- p_1 es el límite de presión del suelo en el fondo del pilote obtenido con el piezómetro de Ménard.

Tipo de Suelo	K_p
Arenas y Gravas	1.2
Arcillas	1.6
Arcillas y Limos	1.8
Roca fragmentada	1.5

Tabla 5.5 Valores de K_p ⁽¹⁰⁾

La capacidad de la punta no excede comúnmente de 15 a 20 % de la resistencia lateral y por lo tanto, una aproximación simplificada para la capacidad de la punta se puede dar con:

$$QP_L = 0.15 QS_L \quad (10)$$

Bustamante y Doix recomendaron que el factor de seguridad debe variar entre 1.8 y 2.2 dependiendo del propósito del micropilote y sugirió un factor de seguridad de 2.0 para los micropilotes permanentes cargados bajo compresión (Tabla 5.6).

Tipo de cimentación	Factor de Seguridad			
	Tensión		Compresión	
	Temporal	Permanente	Temporal	Permanente
Anclaje	1.8	2.0	-	-
Micropilote	2.0	2.2	1.8	2.0

Tabla 5.6 Factores de seguridad para micropilotes y anclajes⁽¹⁵⁾

5.6.4 MÉTODO DE DISEÑO CONVENCIONAL PARA LOS MICROPILOTES (VESIC)

Vesic⁽¹⁵⁾ presentó un método de diseño convencional para los micropilotes. La capacidad última de carga Q_0 de un micropilote se separa comúnmente en dos componentes para los propósitos del diseño:

- Carga del eje o de la superficie (Q_s) y
- Carga de la base o de la punta (Q_p).

$$Q_0 = Q_p + Q_s = q_0 A_p + f_s A_s \quad (11)$$

Donde:

- A_p es el área de la base de carga,
- A_s es el área de la superficie de carga lateral,
- q_0 es la resistencia unitaria de la base del micropilote expresada en unidades de esfuerzo, y
- f_s es la resistencia unitaria del eje expresada en unidades de esfuerzo.

Resistencia de la punta:

La resistencia de la punta se puede encontrar al utilizar la expresión siguiente:

$$q_0 = c N_c^* + \sigma_0 N_\sigma \quad (12)$$

Donde:

- N_c^* y N_σ son factores adimensionales de la fuerza de soporte que se pueden obtener en función del ángulo de la fricción (ϕ) y del índice de la rigidez (I_r) del suelo.
- c es la cohesión o la interceptación de esfuerzos obtenida de la envolvente de Mohr

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- σ_0 es el esfuerzo normal efectivo del suelo relacionado con el esfuerzo efectivo vertical (q_v) dada por la expresión:

$$\sigma_0 = 1/3 (1+2K_0) q_v \quad (13)$$

Donde:

- K_0 es el coeficiente de la presión lateral de reposo.

$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad (14)$$

Resistencia superficial:

La resistencia superficial es asumida y consiste en dos partes, adherencia y fricción:

$$f_s = c_A + q_s \tan \delta \quad (15)$$

Donde:

- c_A es la adherencia entre el micropilote y el suelo que es independiente del esfuerzo normal que actúa en el eje. Este componente de la resistencia de la superficie es generalmente pequeño y por lo tanto no se utiliza para los propósitos del diseño.
- q_s es la presión normal que actúa en el eje de la cimentación y es relacionado convencionalmente con la presión efectiva vertical (q_v) por un coeficiente de presión de la superficie (K_s).

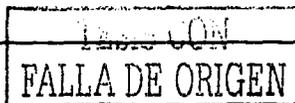
$$q_s = K_s q_v \quad (16)$$

- $\tan \delta$ es el coeficiente de fricción entre el suelo y el eje, que se pueden tomar como $\tan \phi'$ para los micropilotes con rugosidad normal.

La fricción de la superficie dada por la ecuación 15 se puede reescribir como:

$$f_s = K_s \tan \phi q_v \quad (17)$$

El coeficiente K_s depende principalmente de las condiciones del suelo iniciales y del método de colocación de los micropilotes; sin embargo, también es afectado por la forma y la longitud del micropilote.



Vesic recomendó magnitudes de K_s para los diversos tipos de pilotes comparándolo con K_0 y con el coeficiente de la presión pasiva de la tierra.

$$K_p = \tan^2(45 + \phi/2) \quad (18)$$

- Para los pilotes perforados o inyectados:

$$K_s \leq K_0$$

- Para las pilotes conducidos de bajo desplazamiento (Pilotes de acero H o de tubo abierto):

$$K_0 < K_s \leq 1.5$$

- Para las pilotes cortos hincados, para desplazamientos altos en arena: K_s puede ser tan alto como K_p

- Para los pilotes hincados en arcillas normalmente consolidadas suaves a firmes: $K_s \geq K_0$

Una manera posible de calcular la resistencia de la fricción sin saber el factor K_s para un pilote inyectado y compactado asumiendo que el suelo no puede aplicar un esfuerzo radial al pilote más arriba que el esfuerzo radial que causaría la falla del suelo. Este cálculo implica asumir que el esfuerzo radial más alto que el suelo podría resistir después de la inyección es este esfuerzo de falla, porque esfuerzos más altos no se pueden generar en el interior de la interfase suelo-inyección. Para un suelo de baja cohesión con un ángulo de fricción (ϕ') más arriba de 30 grados y $K_0 = 1 - \sin \phi$, la relación entre el esfuerzo radial de la envolvente (σ_r) y el esfuerzo vertical inicial (σ_{vo}') se pueden encontrar basados en la envolvente de falla de Mohr:

$$\sigma_r = \frac{2 \cdot (1 - \sin \phi) \cdot \left(\frac{1}{2} + \sin \phi\right)}{1 + \sin \phi} \cdot \sigma_{vo}' \quad (19)$$

En este caso, la unidad de resistencia lateral esta dada por:

$$f_s = \sigma_r \tan \phi$$

(20)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.6.5 MÉTODO DE DISEÑO PARA MICROPILOTES INYECTADOS BAJO GRAVEDAD

Los métodos para el diseño de micropilotes inyectados por gravedad fueron señalados por Bruce⁽¹⁵⁾. Es importante observar que la presión en la inyección influencia notablemente la fricción de la superficie y las ecuaciones siguientes se limitan a los micropilotes inyectados bajo la presión de la gravedad solamente.

Donde la roca es muy suave la resistencia última cortante que se tiene en la interfase, el τ_{ult} , se puede relacionar con los valores de las Pruebas de Penetración Estándar (SPT) para los valores de N. (Considerando N como el número de golpes en la prueba)^{(11), (16)}

Para los últimos valores en el enlace en granito, Suzuki⁽¹⁵⁾ señaló:

$$\tau_{ult} = 0.007N + 0.12 \text{ (MPa)} \quad (21)$$

y para la tiza (arcilla blanca terrosa), Littlejohn⁽¹⁵⁾ señaló:

$$\tau_{ult} = 0.01N \text{ (MPa)} \quad (22)$$

Cuando la zona de enlace del pilote está en roca, la fricción última de la superficie de la roca se puede utilizar para determinar la carga de trabajo del micropilote si se asume que los esfuerzos están distribuidos uniformemente en la interfase.⁽¹⁵⁾

$$LW = \pi D L \tau_{ult} / sf \quad (23)$$

Donde:

- LW es la carga de trabajo,
- D es el diámetro,
- L es la longitud,
- τ_{ult} es la fricción última de la superficie, y,
- sf es el factor de seguridad.

La ecuación anterior no debe ser considerada si $E_{inyección} / E_{roca}$ es menor de 10. La presión de inyección se puede incluir en este caso.

Para los micropilotes en suelos cohesivos, la fuerza cortante sin drenado C_u , puede ser utilizado estimando la capacidad del pilote:

$$LW = \pi D L C_u \alpha \quad (24)$$

Donde:

- LW es la carga de trabajo,
- D es el diámetro,
- L es la longitud,
- C_u es el promedio de la fuerza cortante sin drenado desde la longitud del enlace
- α es un factor de adherencia que varía entre 0.6 y 0.8 para el diseño del micropilote.

5.6.6 MÉTODO DE DISEÑO PARA MICROPILOTES TITAN

El método de diseño de los micropilotes TITAN, creados por la empresa Ischebeck⁽²⁰⁾ siguen la misma línea que los pilotes tradicionales, la capacidad de carga es dividida en dos partes, la capacidad interna y la capacidad externa del micropilote.

Como capacidad interna de carga podemos entender que es aquella que adopta el acero de refuerzo, el cual trabaja por tensión como en el caso de un concreto reforzado y según los creadores, la capacidad interna de carga es por una pequeña diferencia similar al de un armado de concreto, el acero de refuerzo que compone al micropilote TITAN, en lugar de ser un tubo o varilla lisa, presenta una barra de acero hueca con nervaduras, similares a las varillas corrugadas, lo cual proporciona la adherencia necesaria para que el concreto de la lechada se fije al acero.

La capacidad de carga última del micropilote, está determinada por la capacidad externa de carga, ya que al desarrollar los cálculos para cada una de las cargas que intervienen, el valor de la capacidad de carga externa resulta mas elevado, gobernando así el diseño del micropilote.

Basándonos en esta afirmación, el método de cálculo de la capacidad última de carga para un micropilote TITAN es el siguiente.

Para dimensionar la capacidad última de carga es necesario conocer la carga a la que será sometido el micropilote como elemento único, esto se logra a través de dividir la carga actuante de diseño (cargas vivas + cargas muertas) entre el número de micropilotes contemplados en el diseño estructural de la recimentación, cimentación temporal o permanente o en su defecto, siguiendo el procedimiento de manera inversa. Este método de análisis nos proporcionará la longitud y el diámetro del

micropilote en base a parámetros geotécnicos como el tipo de material, propiedades del suelo, diámetro de la broca perforadora, etc.

Al ser un pilote de fricción propiamente dicho, la carga ultima de diseño que se considera está dada por la fricción existente entre el suelo y el cuerpo formado por la lechada de cemento, es necesario adicionar un factor de seguridad que en la mayoría de los casos puede tomarse como 2.

Es conveniente también definir que la capacidad de carga de la punta en los micropilotes de esta naturaleza se considera despreciable o nula, ya que en base a las pruebas efectuadas en estos, no se considera.

Cálculo del diámetro del cuerpo de la inyección de lechada de cemento

Este diámetro es el que se forma por la intromisión de la lechada de cemento en el interior del suelo por la presión de inyección, la cual estará también definida por las dimensiones de la broca de perforación y por el tipo de suelo existente en el lugar, el diámetro D , se obtiene por medio de la siguiente fórmula:

$$D = T \times d \quad (25)$$

Donde:

T – Tipo de suelo (Tabla 5.7)

d – Diámetro de la perforación provocada por la broca del micropilote. (Figura 5.7)

VALORES DE D	
2.0 x d	Para gravas medianas y gruesas
1.5 x d	Para arenas y gravas arenosas
1.4 x d	Para suelos cohesivos (arcillas y margas)
1.0 x d	Para areniscas disgregadas, filitas, esquisto arcilloso

Tabla 5.7 Valores del diámetro del cuerpo de la lechada de cemento basado en el tipo de suelo⁽⁷⁰⁾

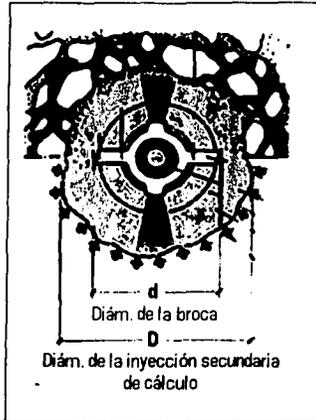


Figura 5.7 Diámetros del cuerpo de la inyección y de la broca del micropilote

Cálculo de la capacidad de carga última

La capacidad de carga última del micropilote se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$F_w = \frac{\pi \times D \times L \times q_{sk}}{S} \quad (26)$$

Donde:

- F_w – Capacidad de carga del micropilote.
- D – Diámetro del cuerpo del micropilote, obtenido de la ecuación 25.
- L – Longitud del micropilote.
- q_{sk} – Factor de fricción basado en el tipo de suelo (Tabla 5.8).
- S – Factor de seguridad.

Tipo de suelo	Fricción qsk	
	Mpa	Kg/cm ²
Grava mediana y gruesa (*)	0.20	2.0
Arenas y gravas arenosas (*)	0.15	1.5
Suelos cohesivos	0.10	1.0

(*) Si $D \geq 0.4$, entonces $q_{sk} \geq 1 \times 10^5$ MPa

Tabla 5.8 Factor de fricción qsk ⁽²⁰⁾

5.7 PRUEBAS DE CARGA

Debido a la importancia de la construcción en el funcionamiento de los micropilotes, las pruebas de carga son recomendadas para controlar su capacidad de carga real; sin embargo, las pruebas de carga no proporcionan una buena información para predecir los asentamientos futuros porque no pueden simular el comportamiento de un grupo de micropilotes. Además, para los suelos cohesivos, la duración de la prueba no es lo suficientemente larga para que los asentamientos se presenten debido al fenómeno de consolidación y una sola prueba en un pilote no puede modelar los efectos a largo plazo de un grupo de micropilotes en arcilla.

La carga máxima aplicada durante la prueba debe ir por lo menos a dos veces la capacidad permisible requerida para el micropilote, pero es preferible cargar el micropilote hasta la falla.

Los procedimientos seguidos comúnmente para realizar pruebas de la carga son ASTM D 1143-81 para la compresión y ASTM D 3689-87 para la tensión.

La mayoría de las veces, el costo de realizar pruebas de carga se integran al valor total del trabajo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Conclusiones

Las cimentación es una parte fundamental de cualquier obra civil, por lo cual el ingeniero civil debe aplicar sus conocimientos en geotecnia (mecánica de suelos, ingeniería de cimentaciones, mecánica de rocas, geología), para que ésta cumpla con su objetivo.

Es necesario que el ingeniero civil considere las normas y reglamentos aplicables en cada una de las situaciones que sean necesarias en el momento de proyectar la cimentación, y las que se vayan presentando durante la ejecución de la misma y corroborar en casos necesarios como es en el pilotaje, con pruebas de carga.

Es importante considerar que durante el diseño de cualquier cimentación, el ingeniero civil cuenta con las herramientas necesarias, mismas que se han desarrollado a partir de experimentación y pruebas aplicadas con anterioridad por profesionales en la mecánica de suelos, esto, para evitar algunos problemas que pudieran presentarse.

La decisión de la selección de una técnica de recimentación cae principalmente en el costo económico que de ella surja, ya que el hecho de recimentar, como lo menciona el Ing. Manuel Sánchez García, Director Responsable de Obra del Gobierno del Distrito Federal en el artículo titulado "Recimentación en el Distrito Federal teniendo en cuenta el nuevo Reglamento de Construcciones" del libro Recimentaciones editado por la S.M.M.S " **..recimentar es volver a cimentar parcial o totalmente una estructura, por lo que al recimentar, se está básicamente cimentando.**", y como se ha observado a lo largo de este trabajo, existen una infinidad de técnicas de recimentación, desde las más antiguas, como pilotaje, ampliación de la cimentación existente, contravolteo, hasta las relativamente más actuales, que implican un desarrollo avanzado de la tecnología, como los nuevos materiales, las resinas, congelación con hidrógeno, inyección de lechada de cementos o con aditivos, vibrocompactación, jet grouting y algunas otras que escapan por su complejidad y utilidad, pero lo mas importante es considerarlos como una opción, al parejo de la demolición; siempre y cuando que, como reza la frase "el remedio no sea mas caro que la enfermedad".

El método de recimentación con micropilotes es relativamente nuevo, ya que combina dos métodos, ya sea por el lado de la estructura, proporcionando el soporte necesario para que la cimentación vencida, derruida o en algunos casos ya inexistente vuelva a soportar la aplicación de cargas o del lado del suelo, trabajando de manera reticulada, formando un conjunto de micropilotes de tal manera que remedia el suelo, haciéndolo más compacto o consolidado; cabe decir que los micropilotes, al trabajar por fricción son anclados prácticamente al suelo, en cualquier tipo de suelo siempre y cuando sea bajo condiciones controladas, aunque presenta, como un pilote perforado y colado en sitio de los inconvenientes comunes, por la presencia de agua freática, o la inconsistencia de algunos suelos como las arenas, para lo cual, para evitar el mal funcionamiento del micropilote se debe colocar un ademe o cubierta permanente, aunque, por lógica esto da como resultado un proceso de costo más elevado, se ha demostrado que la presencia de la cubierta permanente o ademe eleva la capacidad de carga de los micropilotes en algunas condiciones del suelo.

Los métodos que se tienen para el cálculo de la capacidad última de carga son basados en las experiencias de algunos autores y en la observación del comportamiento de algunas técnicas que siguen un proceso parecido a los micropilotes, como son los anclajes, aunque en México se conocen los micropilotes como "Anclajes verticales".

Dentro de estos métodos de diseño para el cálculo de la carga última, se apreció que básicamente un micropilote trabaja como un pilote de fricción, inicialmente es necesario comprender la importancia de que un micropilote no puede adoptar las cargas completas de una estructura, ya que basándonos en la Propuesta de Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de cimentaciones de Abril de 2001, donde se establece que los pilotes de fricción en suelos blandos por experiencia no son capaces de soportar cargas accidentales (sismo). Por esta razón, las Normas no recomiendan su uso bajo esta condición, pero estudios recientes principalmente realizados en Estados Unidos por la empresa Nicholson-Rodio, demuestran que es posible utilizarlos para la cimentación de estructuras ligeras. Cabría aquí, un estudio sobre dicha posibilidad.

Como ya se mencionó, en el pilotaje es necesario que se realicen pruebas de carga en los micropilotes, esto con la finalidad de que se compruebe que el diseño teórico o la capacidad última de carga de los micropilotes propuesta por el cálculo, sea la correcta en campo, aunque las condiciones del suelo siempre pueden darnos algunas alteraciones en los resultados, ya que como se sabe, los suelos se rigen bajo condiciones algunas veces incontrolables, pero esto no es limitante y la combinación del diseño teórico con el práctico, genera en la mayoría de las ocasiones resultados muy satisfactorios.

Bibliografía

1. CIMENTACIONES URBANAS, CALIDAD Y MODERNA TECNOLOGÍA; Ed. Editores Técnicos Asociados, Barcelona 1975.
2. REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES PARA EL DISTRITO FEDERAL, Arnal Simón, Luis; Ed. Trillas, Primera reimpresión de la Cuarta edición, México 1999.
3. PATOLOGÍA DE LAS CIMENTACIONES, Logcais, Louis; Ed. Gustavo Gill, Barcelona 1984.
4. RECIMENTACIONES, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Ed. SMMC, México 1990.
5. EL SUBSUELO DE LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO Y SU RELACIÓN CON LA INGENIERÍA DE CIMENTACIONES A CINCO AÑOS DEL SISMO, Ovando Shelley, Efraín, Ed. SMMS, México 1990.
6. CIMENTACIONES, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN, Tomlison, Michael J.; Ed. Trillas, México 1996.
7. CONSTRUCCIÓN DE CIMIENTOS, Hidalgo Bahamontes, Ángel; Ed. CEAC, España 1979.
8. PILOTES Y CIMENTACIONES SOBRE PILOTES, Davidian Zaven; Ed. Técnicos Asociados, Barcelona, España 1972.
9. MANUAL DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PILAS Y PILOTES, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos; México 1983.
10. UNDERSTANDING SOIL MECHANICS, Ph.D. Roberts, Jack; Ed. Delmar Publishers, Estados Unidos 1996.
11. CIMENTACIONES Y OBRAS EN RECALCES, Bertin, Robert; Gasc, Claude; Ed. Técnicos Asociados S.A., 2ª. Edición, España 1976.
12. http://www.groundfreezing.com/html/artificial_ground_freezing.html
13. <http://tc17.poly.edu/gf.html>
14. http://www.nicholson-rodio.com/papers/pinpiles_underpinnings.htm
15. http://129.105.19.34/projects/NDE/cg_ch2.html
16. <http://www.igcotest.com>, Ensaye Piezométrico de Ménard, Devicenci, Marcclo; España, 1995

-
17. http://www.roctest.com/roctelemac/product/product/g_am_menard.html
 18. MANUAL DE EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA, Secretaría de Obras del Departamento del Distrito Federal; México D.F. 1988.
 19. <http://www.contechsystems.com/Technology/MicroP/Micropiles.html>
 20. http://www.ischebeck.de/spanish/set_1_i.htm
 21. Propuesta de Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones, Abril 2001, documento en PDF
<http://www.smic.org.mx/articulos.htm>
 22. MANUAL DE CIMENTACIONES PROFUNDAS, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos; México 2001.
 23. <http://www.arq.com.mx>, "La torre de Pisa menos inclinada", Luis Alberto González Cabrera, 11 de Febrero de 2001.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN