



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
Facultad de Tecnología de la Construcción

Monografía

**DISEÑO DE MICROPILOTES COMO ALTERNATIVA DE CIMENTACIÓN
PARA UNA VIVIENDA FAMILIAR.**

Para optar al título de ingeniero civil

Elaborado por

Br. Geovany Joel Morales Calderón

Br. Víctor Lenin Cuarezma Romero

Tutor

Dr. Oscar Gutiérrez Somarriba.

Managua, abril 2021

DEDICATORIA

Quiero dedicar ante todo a Dios por ser la guía en mi camino, por darme la fuerza y salud a lo largo de mi vida y de mis estudios.

A mi madre Yolanda Romero Gutiérrez. Su gran fortaleza fue el motor que me permitió avanzar incluso en los momentos más difíciles. Gracias desde el fondo de mi corazón.

A mis familiares lo cuales siempre estuvieron cuando más los necesite y siempre me brindaron el consejo necesario para seguir adelante.

A mi novia Stephanie Jailene por creer en mis capacidades, apoyarme y por brindarme todo el amor que pudo. Siempre te amare.

Victor Lenin Cuarezma romero

Primeramente, a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y darme salud y fuerza para salir adelante y culminar esta meta.

A todas las personas que estuvieron en estos años, en especial a mi mamá, mis tías y abuela Ada Luz que siempre creyeron en mi aconsejándome y dándome apoyo, a pesar de las circunstancias, nunca dudaron de mis capacidades y estuvo en los momentos más difíciles de la carrera brindándome su apoyo.

Geovany Joel Morales Calderón

AGRADECIMIENTO

A mis compañeros y amigos, aquellos que me han acompañado en los momentos más difíciles, los cuales siempre me ofrecieron un oído incondicional para escuchar los problemas que desafiaba.

A mi tutor Dr. Oscar Gutiérrez Somarriba, por compartir sus conocimientos, brindarnos el tiempo y guiarnos durante todo el proceso de la investigación.

A mi familia por ser siempre la mayor fuente de amor y de conocimientos que me servirá por el resto de mi vida.

Victor Lenin Cuarezma romero

Quiero agradecer ante todo a Dios por la fuerza y el coraje a lo largo de este largo viaje.

Dedico este trabajo primero a mis padres, por ser parte esencial en mi vida; motores de mis proyectos, guías y ayuda presente en el momento de los problemas que se me presentaron, de igual manera a mi padrino Raymond Trujillo que a pesar de la distancia su apoyo fue incondicional. A nuestro tutor que estuvo ahí para apoyarnos en cualquier duda y por último a mis compañeros de clase que en el transcurso de los años universitarios siempre pude contar con su apoyo.

Geovany Joel Morales Calderón

RESUMEN

El siguiente documento tiene como objetivo principal presentar una alternativa de diseño de micropilotes capaz de resistir las distintas situaciones adversas a las cuales pueden ser sometidos y poder introducir en nuestro país un nuevo sistema de cimentación.

Se basa en los criterios de diseño según el Ministerio de fomento de España (FOM) y de la Federal Highway Administration (FHWA). Además, de incluir, una metodología detallada sobre el diseño de micropilotes para implementarse en viviendas familiares de Nicaragua. Se agregaron parámetros básicos geotécnicos de diseño para una mejor comprensión de la metodología de diseño.

En base a esta metodología se realizó un ejemplo de diseño de micropilotes para los casos más comunes que existen, bajo cargas puras de compresión. En este se sigue y se expresan cada uno de los cálculos necesarios para el diseño. Posteriormente se crearon planos constructivos con especificaciones técnicas para la construcción de los micropilotes.

Para finalizar se obtuvo como resultado que los micropilotes pueden actuar como una alternativa para la cimentación en Nicaragua pudiendo resistir cargas razonables y en terrenos que presentan problemas para la aplicación de los sistemas convencionales de cimentación.

ÍNDICE

1. CAPÍTULO I: PREFACIO.....	1
1.1. Introducción	2
1.2. Antecedentes	3
1.3. Justificación	4
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo General	5
1.4.2. Objetivos específicos	5
2. CAPÍTULO II: MARCO TEORICO.....	6
2.1. Generalidades.....	7
2.2. Aplicaciones	8
2.2.1. Estructura de cimentación	8
2.2.2. Estructura de contención o sostenimiento de terreno.....	9
2.2.3. Estabilización de taludes o laderas	10
2.2.4. Paragua de sostenimiento.....	10
2.2.5. Mejora del terreno	11
2.3. Armadura	11
2.4. Lechada de cemento.....	12
2.4.1. Mortero de Cemento	13
2.5. Protección contra la corrosión	13
2.6. Recubrimiento mínimo	13
2.7. Clasificación de los micropilotes.....	14
2.7.1. En función de transmisión de la carga	14
2.7.2. En función del esfuerzo predominante	14
2.7.3. En función del acero de refuerzo.....	14
2.7.4. En función del sistema de inyección de la lechada	14
2.8. Ventajas y desventajas de los micropilotes	15

2.8.1. Ventajas	15
2.8.2. Desventajas	15
2.9. Estados limites	16
2.9.1. Fallo de capacidad soporte del terreno	16
2.9.2. Fallo estructural	16
2.9.3. Estado límite de servicio	17
2.10. Coeficientes de seguridad parcial.....	17
2.10.1. Perforación del taladro de micropilote	19
2.10.2. Colocación de armadura	20
2.10.3. Inyección de lechada	20
2.10.4. Conexión de los micropilotes con la estructura	20
2.11. Control de calidad	20
2.11.1. Control del acero.....	21
2.11.2. Control de la lechada	21
2.12. Pruebas de carga.....	22
3. CAPÍTULO III: METODOLOGIA DE DISEÑO	23
3.1. Diagrama de flujo diseño metodológico.....	24
3.2. Datos de estructura	25
3.3. Datos del terreno.....	25
3.4. Dimensionamiento preliminar	25
3.5. Resistencia estructural	26
3.5.1. Compresión.....	26
3.6. Resistencia geotécnica	28
3.6.1. Hundimiento.....	29
3.6.2. Arranque	33
3.7. Cálculo de asentamientos	34
3.7.1. Empotramiento de micropilote en roca	34

3.7.2. Empotramiento en terreno granular	35
3.7.3. Empotramiento en terreno cohesivo.....	36
3.8. Comprobación de rozamiento negativo	36
3.8.1. Dibujo de perfil de asientos del terreno sin micropilotes	37
3.8.2. Cálculo de asiento del micropilote.....	38
3.8.3. Comprobación de asientos.....	39
3.9. Esfuerzos laterales.....	39
3.9.1. Flexión	42
3.9.2. Cortante	43
3.10. Comprobación frente al pandeo	44
3.11. Cálculo de conexión y encepado.....	46
3.12. Planos y especificaciones	48
4. CAPITULO IV: EJEMPLO DE DISEÑO.....	49
4.1. Datos de estructura	50
4.2. Datos del terreno.....	52
4.3. Diseño preliminar	53
4.3.1. Cálculo de la resistencia a compresión	54
4.3.2. Cálculo de la resistencia geotécnica por hundimiento	55
4.3.3. Cálculo de los asentamientos del micropilote.....	56
4.3.4. Flexión	57
4.3.5. Cortante	57
4.3.6. Comprobación frente al pandeo lateral.....	58
4.3.7. Cálculo de conexión.....	59
5. CONCLUSIONES	60
6. RECOMENDACIONES	61
7. BIBLIOGRAFIA	62
8. ANEXOS.....	i

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1- Sección típica de micropilote</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2- Ejemplo de cimentación de nueva planta con micropilote</i>	<i>8</i>
<i>Figura 3- Ejemplo de recalce de cimentaciones preexistentes mediante micropilote.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 4- Ejemplo de micropilote como estructura de contención.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 5- Ejemplo de micropilote para estabilización de taludes o laderas</i>	<i>10</i>
<i>Figura 6- Ejemplo de micropilote como paraguas de sostenimiento</i>	<i>10</i>
<i>Figura 7- Ejemplo de micropilote como mejora del terreno.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 8- Secuencia típica en la construcción de un micropilote.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 9- Equipo de perforación del micropilote</i>	<i>19</i>
<i>Figura 10- Diagrama de flujo de diseño de micropilote.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 11- Rozamiento unitario límite por fuste</i>	<i>32</i>
<i>Figura 12- Asientos del terreno sin micropilote.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 13- Asientos del micropilote</i>	<i>38</i>
<i>Figura 14- Profundidad de eje nulo</i>	<i>39</i>
<i>Figura 15- Curva de reacción micropilote-suelo</i>	<i>40</i>
<i>Figura 16- Diagrama de momento de micropilote sometido a carga lateral ...</i>	<i>41</i>
<i>Figura 17- Diagrama de deflexión de micropilote sometido a carga lateral....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 18- Ejemplo de conexión con barras corrugadas.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 19- Ejemplo de conexión con barras corrugadas.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 20- Ejemplo de conexión con barras corrugadas.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 21- Ejemplo de conexión con barras corrugadas.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 19- Esquema de diseño.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 20- Selección del rozamiento unitario por fuste</i>	<i>55</i>
<i>Figura A.1- Micropilote tipo IU.....</i>	<i>iii</i>

<i>Figura A.2- Micropilote tipo IR</i>	<i>iv</i>
<i>Figura A.3- Micropilote tipo IRS</i>	<i>v</i>
<i>Figura A.4- Carta de plasticidad</i>	<i>viii</i>
<i>Figura A.5- Clasificación SUCS</i>	<i>ix</i>
<i>Figura A.6- Aparato de compresión</i>	<i>xii</i>
<i>Figura A.7- Lector de aparato compresión</i>	<i>xii</i>
<i>Figura A.8- Esquema de rotura</i>	<i>xii</i>
<i>Figura A.9- Diagrama esfuerzo-deformación</i>	<i>xiii</i>
<i>Figura A.10- Área de rotura de probeta</i>	<i>xiii</i>
<i>Figura A.11- Correlación $D_{50}, q_c/N$</i>	<i>xv</i>
<i>Figura A.12- Ensayo a compresión</i>	<i>xix</i>
<i>Figura A.13- Ensayo a tracción</i>	<i>xx</i>
<i>Figura A.14- Ensayo a cargas laterales</i>	<i>xx</i>

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1- Limite elastico de aceros para armaduras tubulares</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 2- Limite elástico de aceros para barras corrugadas</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 3- Recubrimiento minimos r en mm</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 4- Coeficiente de seguridad parcial</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 5- Reduccion por efecto de corrosion</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 6- Coeficiente F_u, c</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 7- Coeficiente F_e</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 8- Resistencia unitaria por fuste y punta en empotramiento en roca</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 9- Coeficiente F_r</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 10- Factor KD</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 11- Constante A</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 12- Coeficiente f</i>	<i>45</i>

<i>Tabla 13- Modelo del subsuelo.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 14- Modelo del subsuelo.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 15- Propiedades de los materiales</i>	<i>53</i>
<i>Tabla A.1- Limite liquido</i>	<i>vi</i>
<i>Tabla A.2- Escala de meteorización de rocas.....</i>	<i>x</i>
<i>Tabla A.3- Compacidad en arenas</i>	<i>xiv</i>
<i>Tabla A.4- Consistencia de suelos arcillosos.....</i>	<i>xv</i>
<i>Tabla A.5- Coeficiente Fmed, Fmin</i>	<i>xxii</i>

1. CAPÍTULO I
PREFACIO

1.1. Introducción

La cimentación es de vital importancia en cualquier tipo de estructura debido a que conecta la estructura con el suelo sobre el cual reposará, de acuerdo con (ARKITECTURA , 2012), su función principal es transmitir las cargas provenientes de la estructura hacia el suelo sin que supere las deformaciones permitidas. En el proceso de diseño se requiere de un análisis cuidadoso del subsuelo y de la estructura, las cimentaciones se pueden clasificar ya sea en superficiales o profundas dependiendo de la profundidad a la que son construidas.

Según (Ministerio de Transporte e Infraestructura (MTI), 2011, pág. 218) las alternativas de cimentación propuestas para Nicaragua son las fundaciones superficiales (zapatas, vigas a sísmicas, etc.).

A nivel mundial existen distintos tipos de cimentación, teniendo cada una sus ventajas y desventajas en función a los alcances del proyecto. Una alternativa para Nicaragua es el uso de micropilotes en determinadas zonas del país por las malas condiciones del suelo ya que estos son capaces de resolver problemas geotécnicos y logístico.

Los micropilotes cumplen un rol muy importante en el campo de la ingeniería. En un principio, fueron usados como cimentaciones profundas, pero hoy en la actualidad son elementos muy versátiles, pues son usados en proyectos donde es necesario aplicar soluciones geotécnicas como medio de cimentación, anclaje y como un elemento de retención.

El objetivo principal de esta investigación es presentar una alternativa de cimentación para viviendas demostrando la factibilidad y eficiencia que hay al ejecutar el diseño de micropilotes y así promover el uso de estos en algunas zonas de nuestro país, el diseño está pensado para solucionar suelos licuables y blandos, presencia de arcillas expansivas, sales en el suelo y topografías accidentadas.

1.2. Antecedentes

Según (Manuel, 2003) el uso de micropilotes ha crecido significativamente desde su concepción en 1950 y en particular desde mediados de 1980. Los micropilotes han sido usados principalmente como elementos de fundación para resistir cargas estáticas y sísmicas, y en menor medida como refuerzo insitu para proveer estabilización a excavaciones y taludes.

En Europa, en los años 50, existía la necesidad de plantear sistema de recalce de edificios y sobre todo a monumentos históricos afectados durante la segunda guerra mundial. De acuerdo con (Hernandez Juan), el contratista italiano Fondedile, bajo dirección técnica de Dr. Izzzi, comenzó a construir pilotes con diámetros más pequeños que los estipulados por códigos de construcción de la época.

Estos pilotes originalmente fueron llamados “radice del pali”, los cuales se conocen actualmente con el nombre de micropilote. La primera aplicación documentada de este sistema fue para el recalce de la escuela A. Angiulli en Nápoles, en la cual se utilizaron “radice del pali” de 13 m de longitud, 0.1 m de diámetro nominal y una armadura central de barra de 0.012 m. El terreno estaba constituido por arenas, cenizas volcánicas y puzolanas. En los cuales se alcanzaron 46 000 kg de carga con algo menos de 0.004 m de asiento”(Manuel, 2003, pág. 51).

“Un comportamiento excelente causó sensación y el sistema se extendió rápidamente por toda Europa, Fondedile introdujo los radice del pali en Inglaterra en 1962, en Alemania en 1965 y en USA en 1973. Sin embargo, esta técnica fue vista con escepticismo y su desarrollo no comenzó hasta finales de la década de los 80”.(Manuel, 2003, pág. 3)

Hoy en día el uso y los métodos de construcción han aumentado más en los países desarrollados y parte de Latinoamérica. En Nicaragua esta tecnología no ha tenido gran impacto debido a la poca difusión de la misma, a falta de confianza y experiencia en nuevas tecnologías además de un conformismo clásico parte de la cultura latinoamericana.

1.3. Justificación

La fuerza de una vivienda reside en sus cimientos. El propósito principal de la fundación es sostener la estructura por encima de ella y mantenerla en posición vertical. Por el contrario, un cimiento mal construido puede ser peligroso para los ocupantes y el vecindario. Por lo tanto, un buen diseño de las cimentaciones de las estructuras es de vital importancia al momento de la construcción de los mismos.

Existen diferentes soluciones a los problemas geotécnicos, desde métodos clásicos (mejoramiento del subsuelo, cimentaciones superficiales, pilotes, etc...), hasta nuevas tecnologías que se han venido desarrollando a lo largo de las últimas décadas.(eadic, s.f.).

En Nicaragua, las soluciones más utilizadas se basan en métodos convencionales de cimentaciones, pero a pesar de que estos puedan brindar una solución a un problema geotécnico, existen otras alternativas que puedan brindar una solución más óptima.

La falta de implementación de nuevas tecnologías en el campo de las cimentaciones en relación a Nicaragua se debe principalmente al poco conocimiento de las mismas, falta de seguridad y conformismo al usar métodos convencionales para la mayor cantidad de problemas geotécnicos.

Tomando en cuenta los múltiples daños a edificaciones que son causados por los distintos fenómenos naturales que afectan nuestro país, en cierta parte por no tener otras alternativas de cimentación es necesario crear otro tipo de sistemas y no usar como única opción los cimientos corridos o sistemas convencionales, ante esto, se ve la necesidad de desarrollar cimientos capaces de enfrentarlos y desarrollarse funcionalmente en suelos con baja capacidad de resistencia.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Proponer micropilotes como alternativa de cimentación para soportar las cargas de una vivienda.

1.4.2. Objetivos específicos

- Plantear metodología para el diseño de micropilotes como alternativa de cimentación.
- Seleccionar los parámetros básicos necesarios del suelo a utilizar en el diseño de acuerdo a las normas ASTM.
- Diseñar micropilotes para que resistan las cargas de una vivienda.
- Crear planos constructivos para la ejecución de micropilotes como alternativa de cimentación para una vivienda familiar.

2. CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.1. Generalidades

Una cimentación es un conjunto de elementos estructurales, los cuales reciben todas las cargas de la estructura para luego transferirlas al subsuelo sobre el cual reposan. En el proceso de diseño de la cimentación se debe de cuidar que la carga transmitida al suelo no genere fallas en el suelo ni asentamientos excesivos.

Las cimentaciones se clasifican en función de muchos parámetros ya sea su geometría, su forma de ejecución, el material a emplear, por su forma de transmitir la carga y la más importante la profundidad en que se desplantara la cimentación. Según este último se pueden clasificar como superficiales, semi-profundas y profundas.

Un micropilote es una estructura de cimentación profunda de forma cilíndrica, de diámetro inferior a trescientos milímetros (0.3 m), perforados en el terreno, armados con tubería de acero reforzada a veces con una o varias barras corrugadas, e inyectado con lechada o mortero de cemento en una o varias fases. Ver **Figura1**.

Fuente: FHWA micropile design and construction, 2005. Figure 4-16

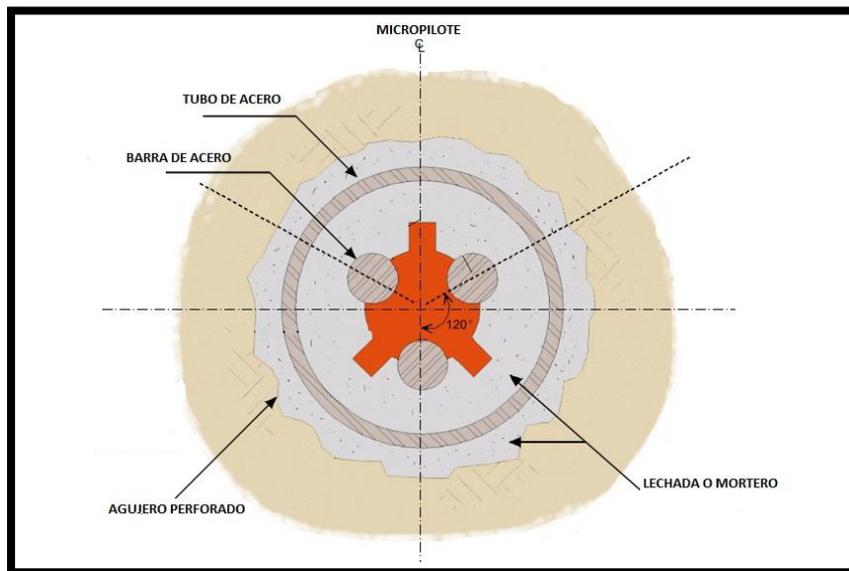


Figura 1- Sección típica de micropilote.

Los micropilotes son usados cuando los suelos de fundación no tienen una suficiente resistencia mecánica para soportar las cargas que se pretenden instalar, por lo tanto, es necesario transmitir esos esfuerzos a suelos de mayor

capacidad portante, a modo de evitar asentamientos y roturas o fallas en la estructura. Estos pueden soportar cargas axiales relativamente significativas y cargas laterales moderadas, considerándose un sustituto de los pilotes tradicionales.

2.2. Aplicaciones

Sus usos potenciales dependen de las solicitudes a las cual estarán sometidas. Compresión, tracción, fuerzas laterales o acciones combinadas. Según la guía para el proyecto y ejecución de los micropilotes de España, (2005). Los micropilotes son usados como:

2.2.1. Estructura de cimentación

- Cimentación nueva: Su campo de aplicación fundamental son las estructuras con espacios de trabajo reducido o acceso complicado, los terrenos difíciles de perforar por intercalación de niveles rocosos, bolos o bloques de grandes dimensiones, etc. Los micropilotes transmiten las cargas de manera menos concentrada y más uniforme que los pilotes, pudiendo suponer una ventaja en determinadas circunstancias, como por ejemplo en zonas construidas por roca alterada. Ver **Figura 2**.

Fuente: Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Figura 1.1

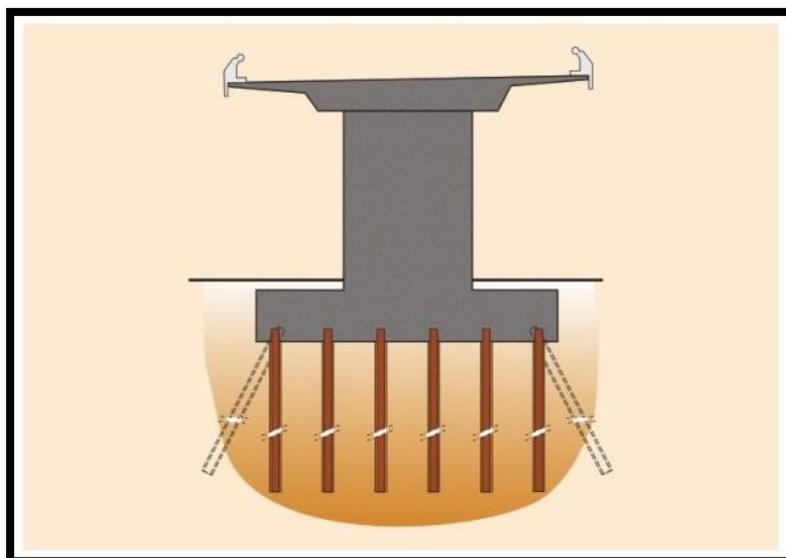


Figura 2- Ejemplo de cimentación de nueva planta con micropilotes.

- Recalces: obras de reparación, refuerzo, rehabilitación, y mejora de estructuras existentes que presentan incrementos de las solicitaciones, asentamientos diferenciales o patologías de la cimentación superficial.

Fuente: Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Figura 1.2

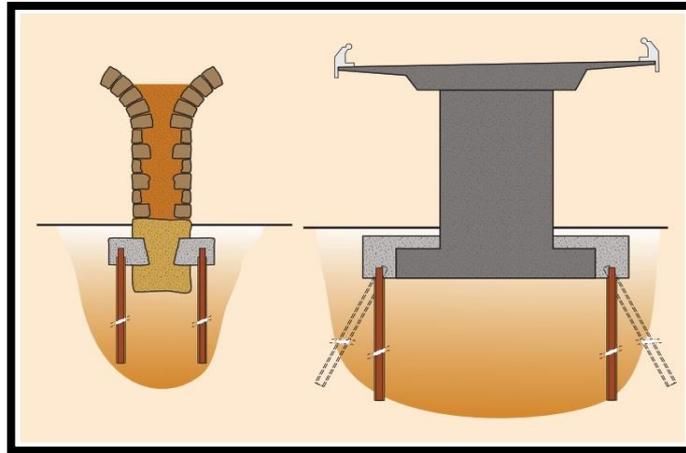


Figura 3- Ejemplo de recalce de cimentaciones preexistentes mediante micropilotes.

2.2.2. Estructura de contención o sostenimiento de terreno

Normalmente se disponen formando alineaciones o grupos numerosos con varias inclinaciones, se encepitan en cabeza y se acompañan de anclajes u otras unidades de obra. Se sitúan en un mismo plano (generalmente vertical) o formando abanico. Ver **Figura 4**.

Fuente: Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Figura 1.3

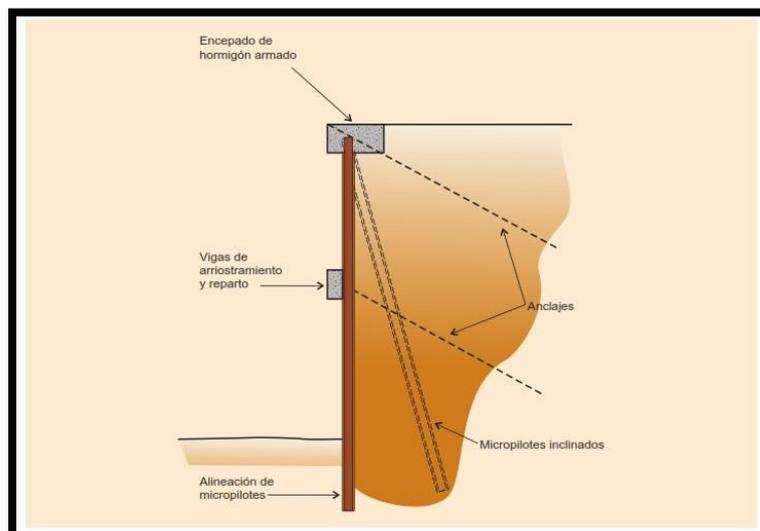


Figura 4- Ejemplo de micropilote como estructura de contención.

2.2.3. Estabilización de taludes o laderas

Se disponen formando alineaciones o grupos numerosos con varias inclinaciones y se encepitan en cabeza, pudiendo ir acompañados de anclajes u otras unidades de obra. Producen una mejora en el coeficiente de seguridad global de los taludes o laderas por incremento de la resistencia al corte de las mismas.

Fuente: Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Figura 1.4

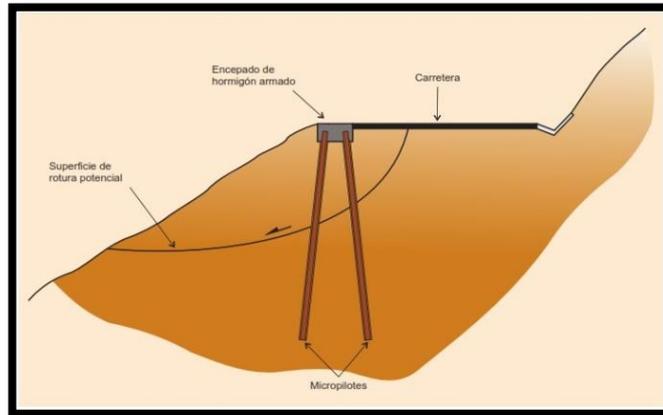


Figura 5- Ejemplo de micropilote para estabilización de taludes o laderas.

2.2.4. Paragua de sostenimiento

Ejecutados como sostenimiento del terreno en la excavación de túneles, normalmente antes de la fase de avance, bien con carácter general en toda obra, en emboquilles, zonas de especial dificultad.

Fuente: Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Figura 1.5

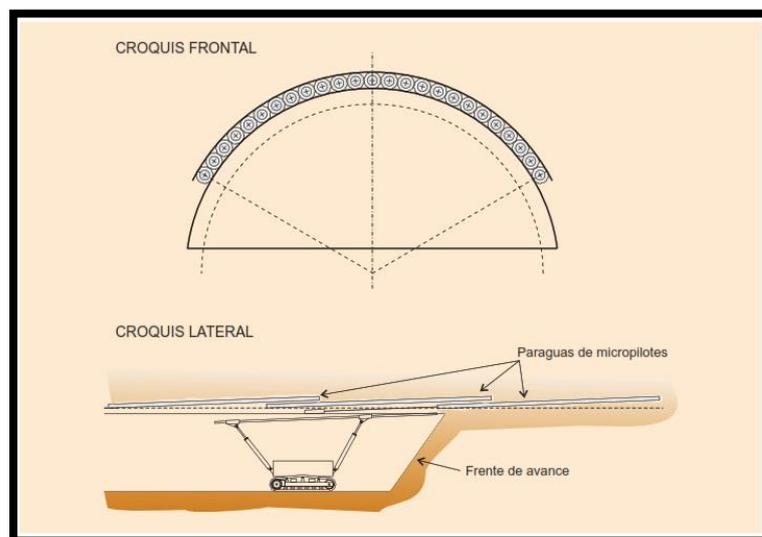


Figura 6- Ejemplo de micropilotes como paraguas de sostenimiento.

2.2.5. Mejora del terreno

Pretenden el aumento de la capacidad de soporte global de una masa de terreno y la reducción de asentamientos de la estructura, cimentadas posteriormente sobre el mismo.

Fuente: Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Figura 1.6

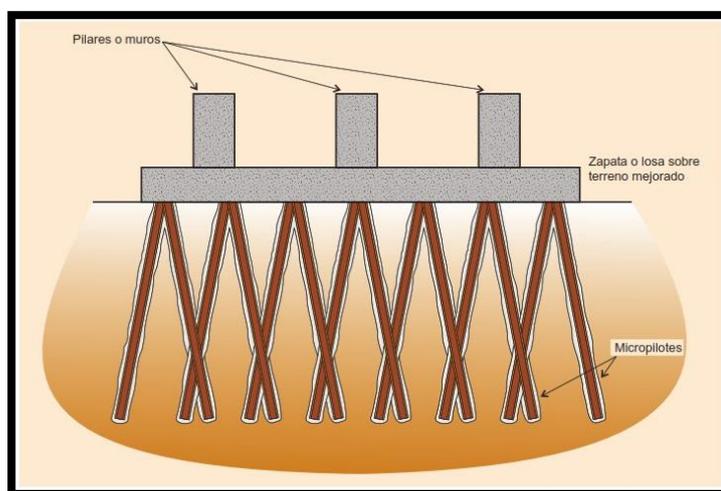


Figura 7- Ejemplo de micropilote como mejora de terreno.

2.3. Armadura

Según (FHWA, 2005), la cantidad de acero colocado en un micropilote está determinada por la carga que soporta y la rigidez necesaria para limitar los desplazamientos elásticos. El refuerzo puede consistir de una sola barra de refuerzo, un grupo de barras o un tubo de acero estructural.

En obras permanentes no se reutilizarán, como armaduras tubulares, perfiles procedentes de campañas petrolíferas, sondeos, o cualquier otra aplicación. Sin embargo, en obras auxiliares, en las que la función resistente se desempeñe en un plazo corto, se podrá contemplar el uso de esos materiales siempre que cumplan los mismos requisitos que los exigidos a las armaduras tubulares nuevas.

En la **Tabla 1** se muestran los límites elásticos de los aceros más habituales empleados como armadura tubular según UNE. Además, para el refuerzo constituido por barras corrugadas de acero los límites elásticos deberán tomarse de la **Tabla 2**.

Fuente: Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Tabla 2.1

DESIGNACIÓN UNE EN 10027	LÍMITE ELÁSTICO f_y (MPa)
S 235	235
S 275	275
S 355	355
S 420	420
S 460	460

Tabla 1-Limite elástico de aceros para armaduras tubulares

Fuente:Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Tabla 2.2

DESIGNACIÓN UNE EN 36068:94	LÍMITE ELÁSTICO f_{sk} (MPa)
B 400 S	400
B 500 S	500

Tabla 2-Limite elástico de aceros para barras corrugadas

2.4. Lechada de cemento

Las lechadas se definen como mezclas de cemento, agua y aditivos según el caso. Así mismo se definen como lechadas aquellas mezclas que incluyan polvo mineral o arena de tamaño inferior a 0.002 m. Las mezclas que superen las limitaciones anteriores de tamaño máximo o peso total, serán consideradas morteros.

Las operaciones con lechada tienen un gran impacto en la capacidad del micropilote. Estas están diseñadas para proporcionar una alta resistencia y estabilidad, pero a su vez deben de ser bombeable, lo que implica unas relaciones agua/cemento (w/c) en el intervalo de 0.4 a 0.50. Las lechadas se tienen que producir con agua potable, para reducir el peligro de corrosión.

Debido a que la lechada es un componente tan vital, se debe de prestar mucha atención al control de calidad del mismo. Un plan de control de calidad que como mínimo debe de incluir pruebas de compresión de cubos o cilindros y densidad de lechada. Además, es importante garantizar una sección uniforme con un diámetro real mayor o igual al diámetro nominal por lo cual no

debe haber pérdida de lechada durante el proceso de bombeo que produzca una sección transversal variable. Para evitar pérdidas de lechada en la inyección se inyecta al menos dos veces el volumen de la perforación.

2.4.1. Mortero de Cemento

La resistencia característica a compresión a veintiocho días (28 d) de los morteros de cemento a utilizar en micropilotes, será superior o igual a veinticinco megapascales ($f_{ck} \geq 25 \text{ Mpa}$).

Los ensayos para determinar la resistencia del mortero se efectuarán con probetas cilíndricas fabricadas, curadas y ensayadas a compresión a veintiocho días de edad (28 d) según la normativa.

2.5. Protección contra la corrosión

Las armaduras de los micropilotes y el resto de elementos metálicos de los mismos, como por ejemplo los de unión, deberían estar protegidos frente a la corrosión durante su vida útil.

El sistema de protección se basa en la disposición de un recubrimiento mínimo de la armadura, mediante lechada o mortero de cemento y en la consideración de una reducción del espesor de acero debido a la corrosión.

2.6. Recubrimiento mínimo

Se recomienda que la punta de la armadura no apoye directamente sobre el fondo y que el recubrimiento mínimo entre armadura y terreno se materialice mediante centradores. Los valores mínimos del recubrimiento se deberán tomar de la tabla 3 debiendo garantizarse, incluso en las secciones de empalme de las armaduras.

Fuente:Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Tabla 2.3

	LECHADA	MORTERO
Compresión	20	30
Tracción	25	35

Tabla 3- Recubrimientos mínimos r en mm.

2.7. Clasificación de los micropilotes

2.7.1. En función de transmisión de la carga

La capacidad portante de los micropilotes depende mucho del sistema constructivo, del tipo de armadura, de la longitud e inclinación de los mismos, del terreno donde se apoya, debido a esto, se puede emplear una forma de trabajo, ya sea:

- Como un elemento que trabaja individualmente (puntual).
- Como grupo de elementos (grupo de micropilotes).

2.7.2. En función del esfuerzo predominante

- Esfuerzo axial (compresión o tracción).
- Esfuerzos cortantes y flectores.

2.7.3. En función del acero de refuerzo

- Refuerzo con armadura tubular.
- Refuerzo con barras corrugadas.
- Refuerzo con perfiles metálicos.

2.7.4. En función del sistema de inyección de la lechada

- **Tipo IU:** Inyección única global (IU), se efectúa en una sola fase, rellena el hueco comprendido entre el taladro de la perforación y la armadura tubular, así como el interior de esta. Son adecuados en rocas más o menos sanas, suelos cohesivos muy duros y suelos granulares (ver Anexo A-1).
- **Tipo IR:** Inyección repetitiva (IR), se efectúa en dos fases, la primera una vez introducida la armadura, se realiza un relleno del taladro con lechada como en los tipos IU, posteriormente se realiza una reinyección. Se emplean generalmente en rocas blandas y fisuradas y en materiales granulares gruesos y de compacidad media (ver Anexo A-2).
- **Tipo IRS:** Inyección repetitiva (IRS), se realiza mediante inyección a presión, desde el interior de la armadura tubular, con doble obturador, a través de manguitos instalados en dicha armadura. Se recomiendan en suelos cohesivos (salvo los muy duros), suelos de consistencia baja o media y especialmente en suelos granulares en los que se intenta formar un bulbo (ver Anexo A-3).

Según (Federal Highway Administration(FHWA), 2005), se puede clasificar la inyección de la lechada de la siguiente manera:

- **Tipo A:** Lechada colocada bajo gravedad.
- **Tipo B:** Se inyecta lechada a presión a través del encamisado.
- **Tipo C:** Se inyecta lechada dos veces.
- **Tipo D:** Se inyecta lechada dos o más veces.

2.8. Ventajas y desventajas de los micropilotes

2.8.1. Ventajas

- Un medio viable de cimentación en zonas de difícil acceso y zonas urbanas, su construcción no afecta estructuras aledañas. El proceso de perforación produce menores vibraciones y reduce los efectos sobre las estructuras vecinas.
- Debido a su esbeltez, la mayor parte de la carga se resiste mediante el fuste y por su reducida sección transversal se garantizan asentamientos menores en comparación con otras cimentaciones.
- Se puede instalar en cualquier tipo de suelo, inclusive en roca.
- Es un método que se ejecuta con relativa rapidez en comparación con otros sistemas de cimentación.
- Facilidad de ejecución en ángulos inclinados, lo cual permite aumentar la capacidad portante frente a esfuerzos horizontales.

2.8.2. Desventajas

- Es un elemento esbelto susceptible al pandeo.
- Muchas de sus fórmulas son basadas en datos y correlaciones empíricas.
- El control de calidad es muy riguroso.
- No existe metodología de diseño universalmente aceptada.
- Muchos procesos de cálculo son empíricos y solo se pueden contrastar con pruebas de carga si se pretende aprovechar al máximo la resistencia del micropilote.

2.9. Estados limites

El cálculo de los micropilotes requiere el conocimiento previo de los esfuerzos actuantes, transmitidos por la estructura a cimentar. Se deben de aplicar factores de seguridad siguiendo el procedimiento de coeficientes de seguridad parcial. Considerar como acción principal las reacciones en los apoyos de la estructura.

Los estados límites son aquellos que dan lugar a una situación de fallo del cimiento. Para una cimentación de una vivienda se encuentran:

- Estado límite último
 - Fallo de capacidad de soporte del terreno.
 - Fallo estructural.
- Estado límite de servicio
 - Asentamiento

2.9.1. Fallo de capacidad soporte del terreno

El fallo de cimiento puede producirse por falta de resistencia del terreno, de los siguientes modos.

- Hundimiento: Cuando la capacidad de soporte del terreno es inferior a la carga (de compresión) que transmite el micropilote al terreno.
- Arranque: Cuando en micropilotes sometidos a esfuerzos de tracción sufren fatiga por esfuerzo rasante en el fuste.
- Rotura horizontal del terreno: Cuando en micropilotes de eje aproximadamente vertical, las presiones horizontales sobrepasan la capacidad del terreno.

2.9.2. Fallo estructural

- Fallo estructural de los micropilotes: Cuando los esfuerzos transmitidos superan la resistencia del micropilote como elemento estructural.
- Fallo de conexión con la estructura: Cuando los esfuerzos transmitidos superan la resistencia de la conexión entre el micropilote y la estructura de cimentación de la que forma parte, o el encepado que une sus cabezas. Según el caso.

2.9.3. Estado límite de servicio

No implican el fallo del cimiento, aunque si suponen una limitación de su capacidad funcional, estética, etc. Deberán abordarse de carácter general teniendo en cuenta que los asientos del micropilote pueden originar un estado limite ultimo por daños en la estructura soportada. Pará cada modo de fallo, la capacidad resistente del micropilote deberá cumplir que:

$$R_d \geq E_d \quad \text{Ec.1}$$

Dónde:

R_d : Resistencia de cálculo frente a un determinado modo de fallo, obtenida a partir de valores característicos (de las propiedades resistentes de los materiales o del terreno) minorados.

E_d : Esfuerzo de cálculo para un determinado modo de fallo, obtenido a partir de acciones mayoradas.

2.10. Coeficientes de seguridad parcial

El proyecto estructural habitual se realiza mediante el método de los coeficientes parciales de seguridad que requiere la utilización de coeficientes que mayoran las acciones y minoran las resistencias. En el diseño de micropilotes se seguirá esta misma lógica y se aplicará los mismos coeficientes de seguridad parciales a estudio geotécnico necesario para el diseño. para el cálculo de las cargas actuantes en los micropilotes se usará el método de mayoración de carga "RESISTENCIA ULTIMA" según el RNC-07, código de Nicaragua vigente. Los parámetros geotécnicos tendrán coeficientes de minoración expresados en la **tabla 4**.

Fuente: Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Tabla A-1.2

Tipo de Coeficiente	Parametro Geotécnico	Coeficiente Parcial	
Parametro resistentes	Tangente del ángulo de rozamiento efectivo	1.25	$tg \phi$
	Cohesión efectiva	1.25	C
	Resistencia al corte sin drenar	1.4	s_U
	Resistencia a compresión simple en suelo	1.4	q_u
	Resistencia a compresión simple en roca	2	R_c

Tabla 4- Coeficientes de seguridad parcial para el cálculo geotécnico

Para una buena ejecución de las fases que se presentaran a continuación, se deberá de tener en cuenta un buen control de calidad en cada una de estas con el fin de cumplir los estándares especificados para la ejecución de micropilotes y claramente tener ciertas precauciones al momento de cada maniobra para evitar accidentes y no tener retrasos en el proyecto o en un caso más trascendental la pérdida de vida de algún operario.

La ejecución de un micropilote comprende la realización de las siguientes operaciones básicas a las cuales hemos clasificados por fases, se dará una breve explicación de los tipos de herramientas y procedimientos con cual ejecutaremos cada fase:

- Perforación del taladro de micropilote (Fase 1,2 y 3).
- Colocación de armadura (Fase 4).
- Inyección del micropilote (Fase 5).
- Conexión con la estructura o con el resto de micropilotes (Fase 6).

Fuente:Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Figura 4.1

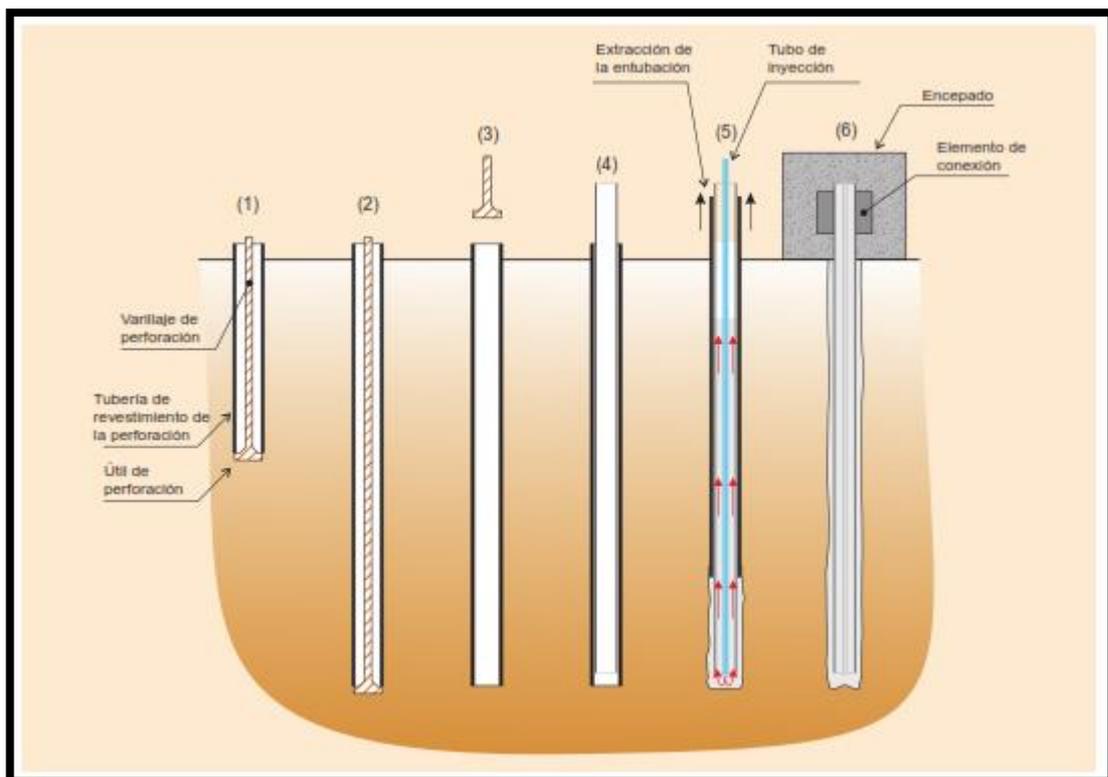


Figura 8- Secuencia típica en la construcción de un micropilote.

2.10.1. Perforación del taladro de micropilote

Por lo general, la perforación se realiza independientemente de la inyección de lechada. La perforación de los micropilotes puede dividirse en dos categorías, perforación sin camisa de protección a hueco abierto y perforación con camisa de protección, siendo la perforación sin camisa el método más común, porque la mayoría de las maquinas no son capaces de encamisar la perforación.

Se posiciona y estabiliza la maquina colocando el mástil y la sarta de perforación en el punto donde va a realizarse el taladrado, la perforación se hará emboquillando en los puntos marcados en el replanteo y con las inclinaciones especificadas en el proyecto.

Los métodos y diámetros de perforación dependen de la naturaleza del terreno, siendo habitual el uso de equipos hidráulicos a rotación o rotopercusión y manteniéndose las paredes de perforación mediante entubación.

Fuente: Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Figura 4.2



Figura9- Equipo de perforación del micropilote.

2.10.2. Colocación de armadura

La armadura metálica de los micropilotes dependerá de las solicitaciones a soportar y de la rigidez necesaria para limitar las deformaciones. Una vez terminada la perforación y limpia de detritus, se coloca la armadura tubular del micropilote. Cabe decir que el refuerzo metálico puede ser colocado antes o después de la inyección de la lechada.

La armadura de los micropilotes está formada por tubos de acero que se unen por tramos mediante roscas macho-hembra o manguitos roscados, sin embargo la tendencia mundial es usar barras roscadas de alta capacidad y tuberías de acero de alta capacidad, bien sea por separado o conjunto, estos elementos son de rápida y fácil colocación debido a que son roscados y vienen en diversas longitudes que se adaptan a las condiciones del proyecto.

2.10.3. Inyección de lechada

Se rellena el hueco comprendido entre el taladro de la perforación, la armadura tubular y su interior, la inyección puede realizarse antes o después de introducir la armadura, la inyección de la lechada es uno de los factores preponderantes de la ejecución y comportamiento de los micropilotes. La importancia de la lechada radica en que esta es la responsable de transmitir los esfuerzos entre el refuerzo metálico y el terreno de fundación, resiste en el peor de los casos en 40% de la totalidad de las tensiones a las que está sometido el micropilote, y actúa como un medio protector del acero de refuerzo.

2.10.4. Conexión de los micropilotes con la estructura

Una vez efectuada la inyección del micropilote, se deberá proceder la conexión de este con la estructura, o con el resto de los micropilotes mediante un encepado o viga de estado.

Los micropilotes en conexiones nuevas están conectados a cabezales, los cuales pueden ser diseñados de acuerdo con los códigos de construcción de concreto reforzado.

2.11. Control de calidad

El control de calidad en sistemas de micropilotaje, como en cualquier proceso de ingeniería civil, se aplica a los materiales, a la ejecución y a la

conservación del producto final, convirtiéndose en una cadena continua que garantice las prestaciones de dicho elemento, la adherencia es un factor primordial de máxima importancia en la ejecución de elementos inyectados, como son los micropilotes.

La perforación es una etapa muy importante en la construcción de un micropilote debido a que afecta al resto de ella, debemos de garantizar la inclinación correcta (si el diseño así lo estipula) y verificar que la broca este en buenas condiciones, si utilizaremos agua eliminar completamente el lodo evitando presiones que fracturen el suelo.

La aplicación de control de calidad se extiende a los materiales, ejecución y producto final dentro del proceso micropilotaje. El control en materiales se refiere a los acero y lechada.

2.11.1. Control del acero

Los aceros comúnmente empleados en las obras pueden variar su límite de fluencia, teniendo en cuenta que el límite del acero ha de ser al menos de 500Mpa. Los ensayos a los que se someten los tubos de los micropilotes determinan:

- Diagrama de rotura
- Tensión de rotura (Mpa)
- Alargamiento (%)
- Limite elástico (Mpa)

2.11.2. Control de la lechada

- Cementos tipo GU, salvo justificación especial.
- PH del agua inferior a 7.
- Relación agua/cemento lo más baja posible compatible con las condiciones de fluidez (normalmente oscila entre 0.4 y 05).
- Exudación de la lechada inferior al 2%, pudiendo llegar incluso al 4%.
- Resistencia a compresión a 28 días superior a 30 MPa. Asimismo, se deben hacer con frecuencia diaria los siguientes controles:
- Presión de la inyección, que oscila entre 2 y 8 MPa.
- Cantidad de aditivo.

- Viscosidad con el cono de Marsh, que suele estar comprendida entre 17 y 25 segundos.
- Registro de temperatura ambiente máxima y mínima.

2.12. Pruebas de carga

Debido a la importancia, en cualquier construcción a desarrollar, del funcionamiento de los micropilotes es recomendable realizar pruebas de carga que permitan comprobar su capacidad real. La carga máxima aplicada durante la prueba debe ser por lo menos dos veces la capacidad requerida para el micropilote (Mascardi 1982).

Este procedimiento tiene como objeto la descripción de los pasos a efectuar para inyectar un micropilote y efectuar una prueba para comprobar su resistencia a tracción. La resistencia a tracción nos permitirá estimar la adherencia existente entre el micropilote inyectado y el terreno. Este valor obtenido nos permitirá dimensionar la longitud de micropilote en función de la carga de trabajo del mismo.

El proyecto debe definir, en cada caso, el procedimiento de prueba de carga que considere más adecuado, las normas se refieren específicamente a pilotes, si bien, a los efectos de esta metodología pueden servir como esquemas básicos de actuación para micropilotes.

Los tipos de prueba de carga más usuales, para pilotes, se describen en las normas ASTM que se indican a continuación y que se pueden observar en detalle en **Anexo C**:

- D1143 Cargas axiales de compresión.
- D3689 Cargas axiales de tracción.
- D3966 Cargas laterales.

3. CAPÍTULO III
Metodología de diseño

3.1. Diagrama de flujo diseño metodológico

Fuente: Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. (Elaboración propia)

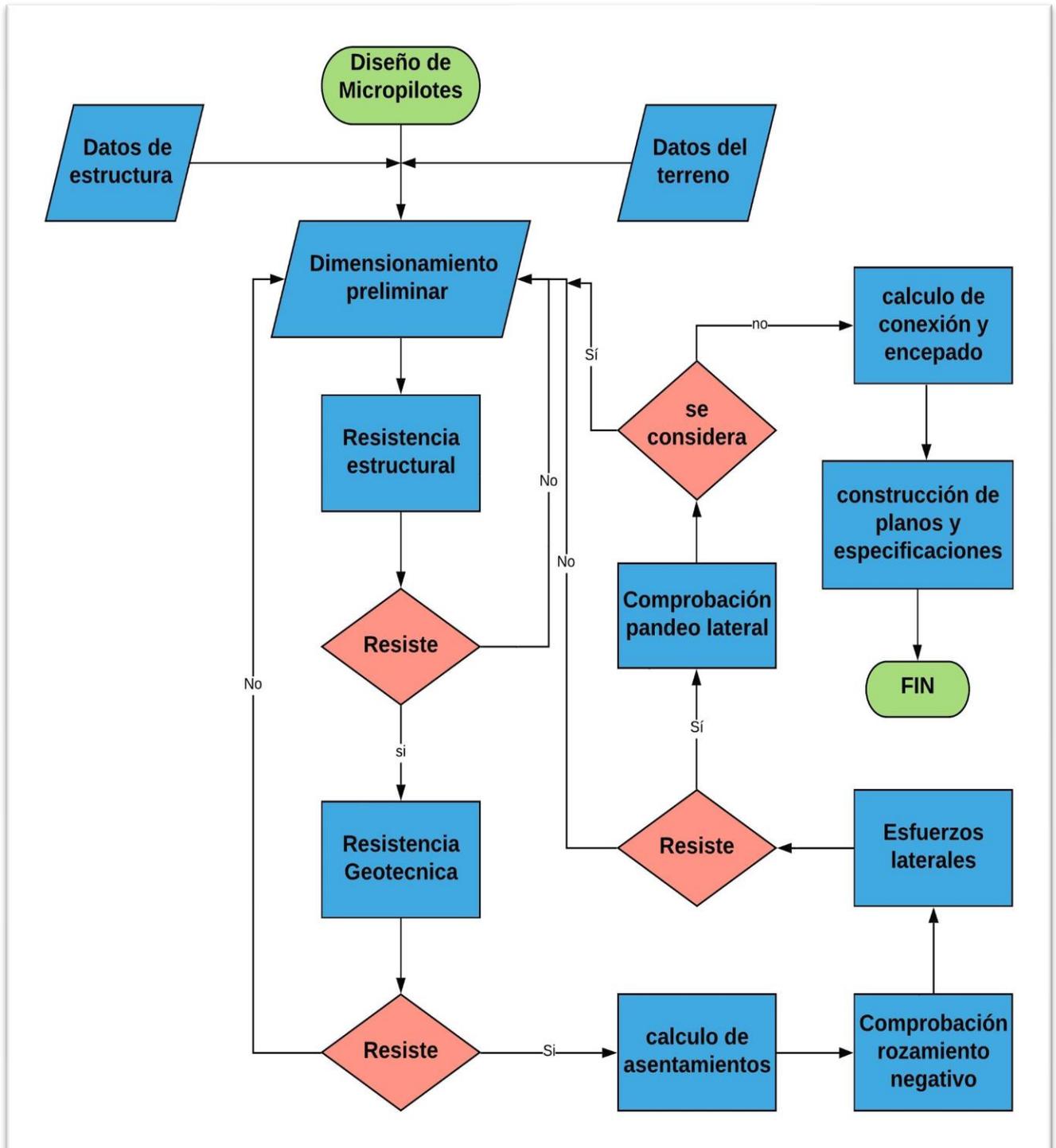


Figura 10 - Diagrama de flujo de diseño de micropilote (Elaboración propia).

3.2. Datos de estructura

Las acciones que ha de considerarse para definir las diferentes situaciones de proyecto, susceptibles de análisis, serán esencialmente las reacciones en los apoyos de la estructura correspondiente (axial, cortante y momento).

El método de mayorar estas acciones se basará en el método de **coeficientes parciales de seguridad** (ver cap.2.11). el cual se considera una aproximación más lógica al problema de la incertidumbre. Para el cual se considerará como método de mayoraciones de carga el de "RESISTENCIA ULTIMA" dispuesto en el RNC-07 (Reglamento Nacional de la Construcción), código vigente de Nicaragua.

3.3. Datos del terreno

Para caracterizar el comportamiento del terreno será necesario definir una serie de parámetros:

- Datos generales que permitan clasificarlo: la información relevante que permite esta clasificación obtener mediante ensayos de identificación (granulometría, Límites de Atterberg, clasificación SUCS):
- Datos de estado: serán generalmente necesarios los datos relativos a pesos específicos, grado de saturación, porosidad e índice de poros.
- Parámetros resistentes: la resistencia se caracterizará con procedimientos acordes al tipo de terreno en cuestión, en general para cualquier tipo de suelo se considera adecuado el uso de modelo resistente de Mohr-Coulomb, definiendo los parámetros de ángulo de rozamiento y cohesión. Además, se puede caracterizar el terreno mediante parámetros indirectos tales como índice N del ensayo SPT y q_c del ensayo de penetración estática.

3.4. Dimensionamiento preliminar

La longitud total de un micropilote individual se seleccionará de manera tal que la capacidad geotécnica se desarrollará por fricción (resistencia lateral) entre lechada y el suelo sobre el estrato apropiado. Se debe considerar instalar micropilotes de mayor capacidad en comparación con una mayor cantidad de los mismo de menor capacidad. Además, se vuelven más eficientes a resistir fuerzas laterales.

3.5. Resistencia estructural

3.5.1. Compresión

Para el cálculo de la resistencia estructural a compresión Se deberá comprobar que:

$$N_{c,Rd} \geq N_{c,Ed} \text{ [kN]} \quad \text{Ec.2}$$

Dónde:

$N_{c,Rd}$: Resistencia estructural del micropilote sometido a esfuerzos de compresión.

$N_{c,Ed}$: Esfuerzo axial de cálculo (compresión), obtenido a partir de acciones mayoradas.

La resistencia estructural a esfuerzos de compresión de un micropilote se define como:

$$N_{c,Rd} = \frac{0.85A_c f_{cd} + A_s f_{sd} + A_a f_{yd}}{1.20F_e} \text{ [kN]} \quad \text{Ec.3}$$

Dónde:

A_c : Sección neta de lechada o mortero, descontando armaduras.

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

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \text{ [MPa]} \quad \text{Ec.4}$$

f_{ck} : Resistencia del mortero o lechada a compresión simple, a los veintiocho días de edad.

γ_c : Coeficiente parcial de seguridad. Se deberá tomar un valor de $\gamma_c = 1.50$

A_s : Sección total de las barras corrugadas de acero.

f_{sd} : Resistencia de cálculo del acero de las armaduras corrugadas. Debe de considerarse que:

$$f_{sd} = \frac{f_{sk}}{\gamma_s} \leq 400 \text{ MPa} \quad \text{Ec.5}$$

f_{sk} : Limite elástico del acero de armaduras corrugadas. Ver **Tabla2**.

γ_s : Coeficiente parcial de seguridad para acero de armaduras corrugadas. Se deberá tomar un valor de $\gamma_s = 1.15$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero de la armadura tubular. Debe de considerarse que:

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_a} \leq 400 \text{ MPa} \quad \text{Ec.6}$$

f_y : Limite elástico del acero de la armadura tubular, ver **Tabla1**.

γ_a : Coeficiente parcial de seguridad para acero de armadura tubular. se deberá tomar un valor de $\gamma_a = 1.10$

A_a : Sección de cálculo de la armadura tubular de acero:

$$A_a = \frac{\pi}{4} [(d_e - 2r_e)^2 - d_i^2] F_{u,c} [\text{mm}^2] \quad \text{Ec.7}$$

Dónde:

d_e : Diámetro exterior nominal de la armadura tubular.

r_e : Reducción de espesor de la armadura tubular por efecto de corrosión. Ver **Tabla 5**.

Fuente: Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Tabla 2.4

TIPO DE TERRENO	VIDA ÚTIL REQUERIDA AL MICROPILOTE ³ (años)				
	5	25	50	75	100
Suelos naturales sin alterar	0,00	0,30	0,60	0,90	1,20
Suelos naturales contaminados o suelos industriales	0,15	0,75	1,50	2,25	3,00
Suelos naturales agresivos (turbas, ciénagas, etc.)	0,20	1,00	1,75	2,50	3,25
Rellenos no agresivos sin compactar ²	0,18	0,70	1,20	1,70	2,20
Rellenos agresivos sin compactar (cenizas, escorias, etc.) ²	0,50	2,00	3,25	4,50	5,75

Tabla 5- Reducción por efecto de corrosión r_e en *mm*.

d_i : Diámetro interior nominal de la armadura.

Fuente: Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Tabla 3.4

TIPO DE UNIÓN	$F_{u,c}$
Mediante manguitos exteriores doblemente roscados, sin disminución de sección	1,0
De rosca machihembrada con sección ensanchada	
De rosca machihembrada, sin sección ensanchada y con contacto a tope en ambos extremos	
Otras uniones diseñadas específicamente para no sufrir pérdidas de resistencia	
Resto de casos	0,5

Tabla 6- Coeficiente de minoración $F_{u,c}$ del área de la armadura tubular en función del tipo de unión (compresión).

Fuente: Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Tabla 3.5

TIPO DE TERRENO Y DE PERFORACIÓN	F_e
Terreno con nivel freático por encima de la punta del micropilote y perforación sin revestir, sin empleo de lodos	1,50
Terreno con nivel freático permanentemente bajo la punta del micropilote y perforación sin revestir, sin empleo de lodos	1,30
Cualquier tipo de terreno perforado con lodos	1,15
Cualquier tipo de terreno perforado al amparo de revestimiento recuperable	1,05
Micropilote con tubería de revestimiento dejada «in situ» de forma permanente (camisa perdida)	1,00

Tabla 7- Coeficiente F_e Coeficiente de influencia del tipo de ejecución, que tiene en cuenta la naturaleza del terreno y sistema de perforación empleado.

3.6. Resistencia geotécnica

La Resistencia del terreno frente al fenómeno de hundimiento se da cuando la capacidad soporte del terreno es inferior a la carga (de compresión). En líneas generales se trata del establecimiento de las condiciones límites de equilibrio entre las fuerzas exteriores aplicadas y la resistencia ejercida por el terreno frente a ellas. Otro de los fenómenos que hay que analizar es la resistencia por arranque que se da cuando los micropilotes son sometidos a esfuerzos de tracción y alcanza el agotamiento por esfuerzo rasante del fuste.

3.6.1. Hundimiento

Se deberá comprobar que:

$$R_{cd} \geq N_{c,Ed} [kN] \quad \text{Ec.8}$$

Dónde:

R_{cd} : Resistencia de cálculo frente al modo de fallo de hundimiento.

$N_{c,Ed}$: Esfuerzo axial de cálculo (compresión), obtenido a partir de acciones mayoradas.

La resistencia de cálculo R_{cd} , será la suma de las resistencias de cálculo por fuste y por punta en su caso, los cuales dependen tanto de las características del micropilote, como del terreno de su entorno.

$$R_{cd} = R_{p,d} + R_{fc,d} [kN] \quad \text{Ec.9}$$

Dónde:

$R_{p,d}$: Resistencia por punta de cálculo.

$R_{fc,d}$: Resistencia por fuste de cálculo frente a esfuerzos de compresión.

Para poder considerarse la resistencia por punta es preciso que se verifique, simultáneamente, en la zona de influencia de la misma. Según el tipo de terreno donde se empotre el micropilote.

En suelos cuando cumpla:

- En terrenos granulares, con índice **N** de SPT superiores a 30 ($N > 30$) es decir, compacidad densa a muy densa.
- en terrenos cohesivos, cuando la resistencia a compresión simple del terreno, sea superior a cien kilopascales ($q_u > 100kPa$), es decir consistencia firme, muy firme o dura.

Bajo estas condiciones anteriores, la resistencia por punta $R_{p,d}$, será:

$$R_{p,d} \leq 0.15R_{fc,d} [kN] \quad \text{Ec.10}$$

En roca cuando cumpla:

- Presentar un grado de meteorización inferior o igual a III según escala ISRM, el índice RQD sea superior a sesenta ($RQD > 60\%$) y la resistencia a compresión simple de la roca sea superior a veinte megapascales ($q_u > 20MPa$).
- El empotramiento en el terreno sea superior o igual a seis diámetros nominales ($L_{emp} \geq 6D$).

Bajo estas circunstancias, la resistencia de cálculo frente al modo de fallo de hundimiento R_{cd} , será:

$$R_{cd} = R_{e,d} [kN] \quad \text{Ec.11}$$

Donde:

R_{cd} : Resistencia de cálculo frente al modo de fallo de hundimiento.

$R_{e,d}$: Resistencia de cálculo por empotramiento en roca.

$$R_{e,d} = A_{le} f_{e,d} + A_{pe} q_{pe,d} [kN] \quad \text{Ec.12}$$

Dónde:

A_{le} : Área lateral del micropilote en el empotramiento en roca.

$f_{e,d}$: Resistencia unitaria por fuste de cálculo en el empotramiento en roca.

A_{pe} : Área de la sección recta de la punta en el empotramiento en roca.

$q_{pe,d}$: Resistencia unitaria por punta en el empotramiento en roca.

Los valores $f_{e,d}$ y $q_{pe,d}$, se tomarán de la **Tabla 8**.

Fuente: Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Tabla 3.3

TIPO DE ROCA	$f_{e,d}$ (MPa)	$q_{pe,d}$
Margas y margocalizas	0,15 - 0,40	$0,07 \cdot q_u$
Pizarras y otros esquistos	0,20 - 0,30	$0,07 \cdot q_u$
Areniscas	0,30 - 0,45	$0,07 \cdot q_u$
Calizas y dolomías	0,40 - 0,50	$0,10 \cdot q_u$
Granitos y basaltos	0,40 - 0,60	$0,10 \cdot q_u$

Tabla 8- Resistencia unitaria por fuste y punta en empotramiento en roca.

La resistencia de cálculo por fuste $R_{fc,d}$, se podrá obtener a partir del valor de rozamiento unitario por fuste de cálculo, ya sea por métodos teóricos o correlaciones empíricas, en la cual el cálculo se hará solo por correlaciones empíricas usando la siguiente expresión:

$$R_{fc,d} = \sum_{i=1}^n A_{Li}(r_{fc,d})_i [kN]$$

Dónde:

Ec.13

n : Número de tramos que comprende la discretización.

A_{Li} : Área lateral del micropilote en la zona comprendida dentro del tramo i -ésimo de la discretización efectuada.

$r_{fc,d}$: Rozamiento unitario por fuste en el tramo i -ésimo. Obtenido mediante métodos teóricos o correlaciones.

➤ **Correlaciones empíricas**

Rozamiento unitario por fuste de cálculo se obtiene de la siguiente expresión:

$$r_{fc,d} = \frac{r_{f,lim}}{F_r} [Mpa]$$

Ec.14

Dónde:

$r_{f,lim}$: Rozamiento unitario limite por fuste. Se puede obtener a partir de la **Figura 11**.

Fuente: Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Tabla 3.2

DURACIÓN	F_r
Obras donde los micropilotes tienen una función estructural de duración inferior o igual a seis (6) meses	1,45
Obras donde los micropilotes tienen una función estructural de duración superior a seis (6) meses	1,65

Tabla 9- Coeficiente F_r , Coeficiente de minoración, que toma en cuenta la duración de la función estructural de los micropilotes.

La **Figura 11** relaciona el rozamiento unitario límite por fuste, con una serie de parámetros geotécnicos representativos, índice N del ensayo SPT, resistencia a compresión simple o presión límite del terreno en el ensayo presiometrico.

Así mismo cada figura incluye curvas correspondientes en función del tipo de inyección aplicada. Debe de tenerse en cuenta que si no se cumplen los límites inferiores con respecto a las presiones de inyección, dichas curvas no resultaran de aplicación.

Para aquellas zonas que se encuentren a una profundidad menor de 5 m, medidos verticalmente desde la superficie del terreno, deberá de adoptarse independientemente del tipo de inyección utilizado, un valor $r_{f,lim}$ correspondiente al de una inyección del tipo IU.

Fuente: Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Figura 3.3

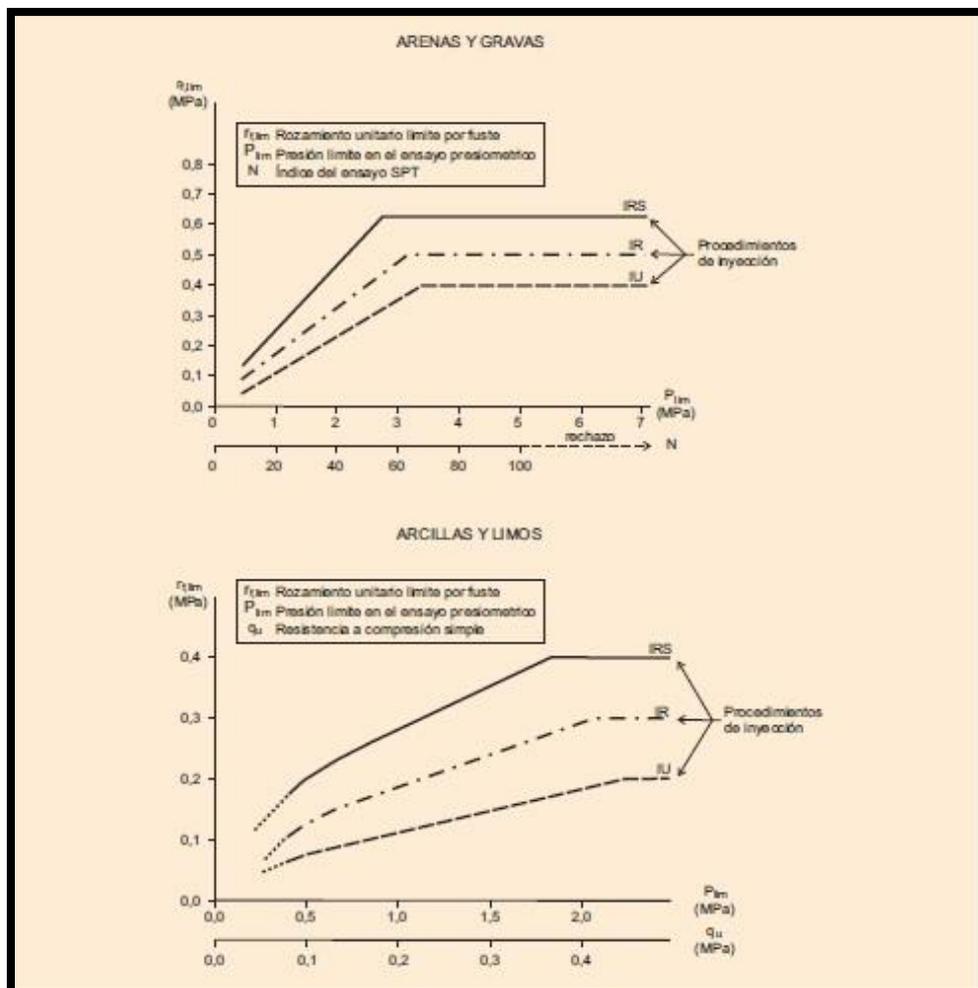


Figura 11- Rozamiento unitario límite por fuste.

3.6.2. Arranque

El fallo se da cuando los micropilotes son sometidos a esfuerzos de tracción y alcanza la fatiga por esfuerzo rasante del fuste. Se deberá comprobar:

$$R_{td} \geq N_{t,Ed} [kN] \quad \text{Ec.15}$$

Dónde:

R_{td} : Resistencia de cálculo frente al modo de fallo de arranque.

$N_{t,Ed}$: Esfuerzo axial de cálculo (tracción), obtenido a partir de acciones mayoradas.

La resistencia de cálculo frente al modo de fallo de arranque R_{td} , será la suma de las resistencias de cálculo por fuste frente a esfuerzos a tracción y la componente del peso propio del micropilote en la dirección de su eje.

$$R_{td} = R_{ft,d} + \frac{W_e}{F_{we}} [kN] \quad \text{Ec.16}$$

Dónde:

R_{td} : Resistencia de cálculo frente al modo de fallo de arranque.

W_e : Componente del peso propio del micropilote en la dirección de su eje.

F_{we} : Coeficiente de minoración. Deberá adoptarse un valor de $F_{we} = 1.2$

$R_{ft,d}$: Resistencia de cálculo por fuste frente a esfuerzos de tracción.

$$R_{ft,d} = A_L * r_{tf,d} [kN] \quad \text{Ec.17}$$

Dónde:

A_L : Área lateral del micropilote.

$r_{tf,d}$: Rozamiento unitario de cálculo frente a esfuerzos de tracción.

La resistencia de cálculo por fuste frente a esfuerzos de tracción $r_{tf,d}$, se puede deducir bien mediante ensayos de carga, o a partir del valor del rozamiento unitario por fuste de cálculo frente a esfuerzos de tracción, deducido por métodos teóricos o correlaciones empíricas.

El rozamiento unitario por fuste de cálculo frente a esfuerzos de tracción podrá determinarse mediante la siguiente expresión:

$$r_{ft,d} = \eta r_{fc,d} \quad \text{Ec.18}$$

Dónde:

η : Coeficiente que tiene en cuenta la alternancia de cargas sobre el micropilote:

- Micropilotes sometidos alternativamente a cargas de compresión y tracción: $\eta = 0.60$
- Micropilotes sometidos únicamente a esfuerzos de tracción: $\eta = 0.75$

3.7. Cálculo de asentamientos

El asiento de los micropilotes sometidos a esfuerzos de compresión deberá determinarse preferiblemente a través de pruebas de carga. Cuando no se disponga de dichos ensayos puede calcularse de modo aproximado, dependiendo si el micropilote está empotrado en roca, o situado en terreno granular o cohesivo.

En el cálculo de asientos de cimentaciones nuevas, en que los micropilotes atraviesen suelos granulares y cohesivos, el trabajo principal corresponde a los niveles menos deformables, que son los primeros en entrar en carga de modo significativo. Por tanto, en el cálculo se recomienda tener en cuenta únicamente los suelos cohesivos de consistencia muy firme a dura ($q_u > 0.35 \text{Mpa}$) y granulares de compacidad media densa y muy densa ($N > 20$).

3.7.1. Empotramiento de micropilote en roca

Cuando se produzca empotramiento en roca el asiento corresponderá aproximadamente con el acortamiento elástico del micropilote.

$$S_e = \frac{N_{c,Ek} \cdot L_E}{A_p E_p} [\text{mm}] \quad \text{Ec.19}$$

S_e : Acortamiento elástico del micropilote.

$N_{c,Ek}$: Esfuerzo característico, considerando las acciones sin mayorar.

L_E : Longitud del micropilote que se acorta elásticamente. Es igual a la longitud total de micropilote, menos la longitud de la parte empotrada en roca.

$$L_E = L - L_{emp} [m] \quad \text{Ec.20}$$

$A_P E_P$: Rigidez de la sección transversal del micropilote. Equivalente a la suma de las rigideces de la lechada o mortero y de la armadura.

$$A_P E_P = A_C E_C + (A_{pr} + A_s) E_a [kN] \quad \text{Ec.21}$$

Donde:

A_C : Sección neta de lechada o de mortero, descontando armadura.

E_C : Modulo de elasticidad de la lechada o mortero.

E_a : Modulo de elasticidad del acero.

A_s : Sección total de las barras corrugadas de acero.

A_{pr} : Sección reducida de la armadura tubular de acero.

$$A_{pr} = \frac{\pi}{4} [(d_e - 2r_e)^2 - d_i^2] [mm^2] \quad \text{Ec.22}$$

3.7.2. Empotramiento en terreno granular

En terrenos granulares se puede emplear la siguiente expresión:

$$S_N = \left(\frac{9N_{C,Ek}}{R_{c,d}} - 2 \right) \cdot \frac{D}{90} [mm] \quad \text{Ec.23}$$

Donde:

S_N : Asiento de micropilote sometido al esfuerzo $N_{C,Ek}$, en terreno granular.

$R_{c,d}$: Resistencia de cálculo frente al modo de fallo de hundimiento.

D : Diámetro nominal del micropilote.

Si en el caso específico de diseño se considera la resistencia por punta, al asiento calculado en la expresión anterior se le deberá agregar el acortamiento elástico del micropilote S_e . Además, cuando exista presencia de capas blandas profundas situadas por debajo de la punta del micropilote, es decir:

$$S_{TOT} = S_N + S_e [mm] \quad \text{Ec.24}$$

3.7.3. Empotramiento en terreno cohesivo

En terreno cohesivo se puede emplear la siguiente expresión:

$$S_N = \frac{0.6N_{C.Ek}}{Lq_c} [mm] \quad \text{Ec.25}$$

Donde:

S_N : Asiento del micropilote sometido al esfuerzo $N_{C.Ek}$, en terreno cohesivo.

$N_{C.Ek}$: Esfuerzo axial característico, considerando las acciones sin mayorar.

L : Longitud del micropilote.

q_c : Resistencia unitaria a la penetración estática, se determinará mediante correlación con el índice **N** del ensayo **SPT** (Ver **Anexo B-10**).

Si en el caso específico de diseño se considera la resistencia por punta el asiento calculado en la expresión anterior se le deberá agregar el acortamiento elástico del micropilote S_e . Además, cuando exista presencia de capas blandas profundas situadas por debajo de la punta del micropilote, usando la **Ec.24**.

3.8. Comprobación de rozamiento negativo

Esta situación se produce cuando el asiento del terreno alrededor del micropilote es mayor que el asiento del mismo o en su caso de la zona de adherencia. En esta situación el micropilote soporta, además de la carga que le transmite la estructura, parte del peso del terreno. Como consecuencia, el rozamiento negativo hace que la carga total de compresión que se ha de soportar aumente.

El rozamiento negativo puede producirse cuando:

- Consolidación por su propio peso de rellenos o niveles de terreno de reciente deposición.
- Consolidación de niveles compresibles bajo sobrecargas superficiales.
- Variaciones del nivel freático.
- Asientos de materiales granulares inducidos por cargas dinámicas (vibraciones, sismo).
- Asiento justo después de construirse mayor de 1 cm.

En micropilotes resistentes por punta es suficientemente aproximado y conservador, suponer que en todo el fuste se moviliza el rozamiento negativo cuando se temen asientos del terreno en superficie. A estos efectos, se puede estimar el rozamiento negativo suponiéndolo igual a la resistencia por fuste.

Cuando se traten de micropilotes resistentes por fuste, la situación es más complicada y es necesario calcular la profundidad por debajo de la cual no se produce el efecto del rozamiento negativo. Para ello es necesario calcular las deformaciones relativas entre el suelo y el micropilote. El procedimiento que permite calcularlo es el siguiente:

3.8.1. Dibujo de perfil de asientos del terreno sin micropilotes

El asiento del terreno debe calcularse primero, en la hipótesis de que no existan los micropilotes. Esta estimación de asientos del terreno debe de realizarse para puntos situados a diferentes profundidades, dentro de un mismo vertical. Ver **Figura 12**.

Para realizar este cálculo, el terreno natural se dividirá en varios estratos horizontales y se calculará el acortamiento individual de cada uno de ellos debido a la sobrecarga que se coloca a la superficie. De esta forma, el asiento de un punto del interior del terreno situado a una profundidad z , será la suma de los acortamientos de todos los estratos que queden por debajo de esta profundidad.

Fuente: Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Figura 5.3

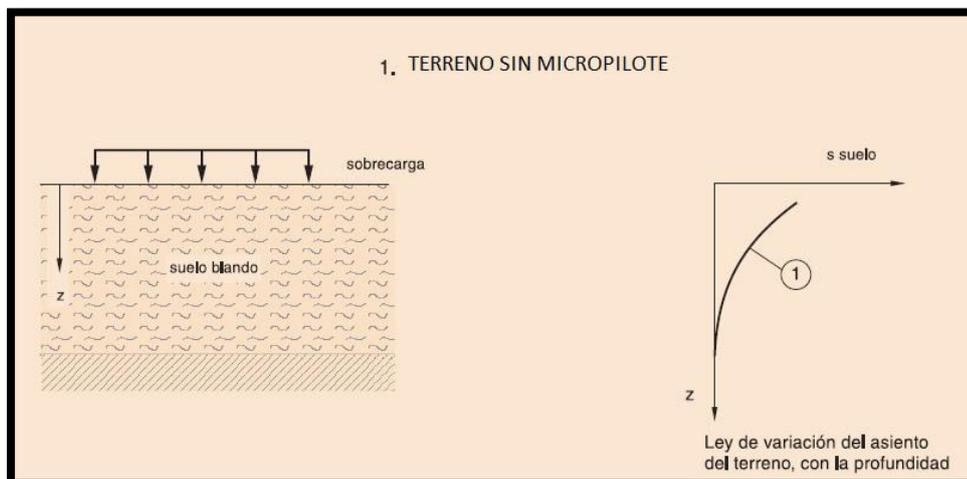


Figura 12- Asientos del terreno sin micropilote.

3.8.2. Cálculo de asiento del micropilote

Por otro lado, se debe de estimar el asiento del micropilote suponiendo el terreno inmóvil, y variando las condiciones de sustentación, para lo cual puede usarse método sancionado por la práctica.

Para hacer estos cálculos se supondrá que, desde la superficie hasta una profundidad denominada x , el terreno no existe (el micropilote que sustentado únicamente por debajo de dicha profundidad) y que la carga sobre el pilote es igual a la suma de la carga actuante sobre su cabeza más el peso del mismo y más el rozamiento negativo hasta la profundidad x . Es decir:

$$P_{virtual} = p + w + R^-(x) \quad \text{Ec.26}$$

Donde:

$P_{virtual}$: Carga vertical de referencia, incluyendo el rozamiento negativo.

p : Carga vertical que actúa sobre el micropilote.

w : Peso del micropilote.

$R^-(x)$: Rozamiento negativo hasta la profundidad x .

El cálculo se realizara para diferentes valores de x . Con los resultados se podrá dibujar la relación que existe entre el asiento del micropilote y la profundidad de cambio de signo del rozamiento.

Fuente:Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Figura 5.3

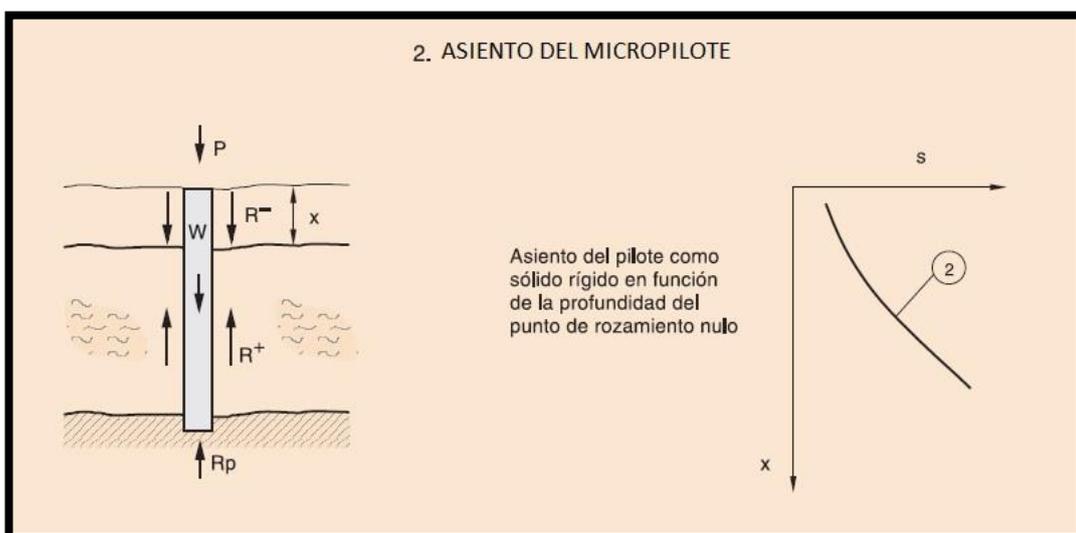


Figura 13- Asientos del micropilote.

3.8.3. Comprobación de asientos

Al comparar ambas curvas de asiento (la del terreno y la del micropilote), se obtendrá una profundidad donde el asiento del terreno coincide con el asiento del micropilote sometido al rozamiento negativo hasta esa misma profundidad x . Este punto definirá la profundidad buscada para la carga de servicio considerada. Ver **Figura 14**.

La compresión máxima inducida por el rozamiento negativo será igual a la integración del rozamiento por fuste que corresponde a la zona ubicada por encima del punto en cuestión (punto de rozamiento nulo). para cada carga deservicio existe un rozamiento negativo diferente. Siempre es conservador estimarlo para una carga de servicio baja y aplicarlo para cualquier otra situación.

Fuente:Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Figura 5.3

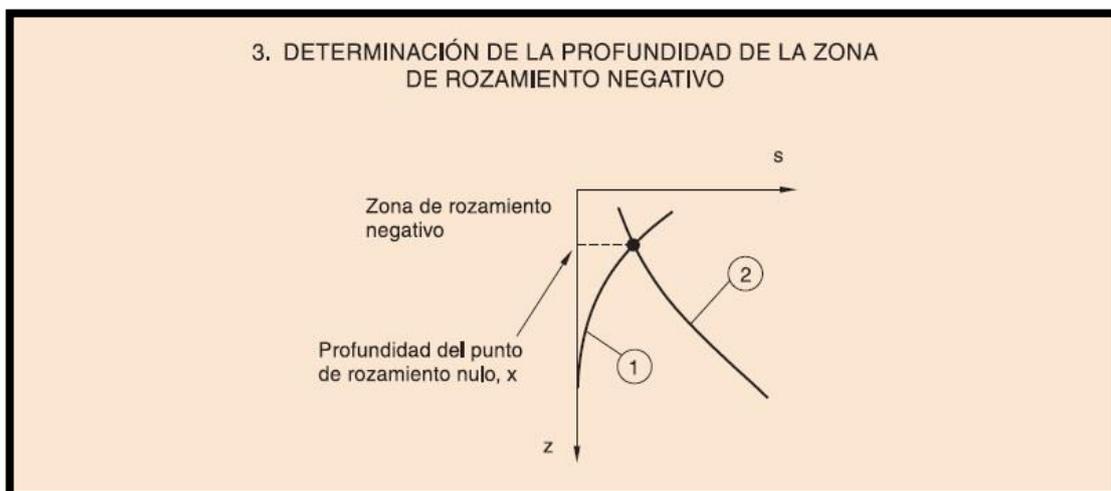


Figura 14- Profundidad de eje nulo.

3.9. Esfuerzos laterales

Para el diseño de micropilotes sometidos a cargas laterales se tendrá que seguir métodos analíticos basado en teorías y datos empíricos que permiten la consideración racional del comportamiento del suelo.

El micropilote se deformará bajos estos esfuerzos hasta movilizar en el suelo la reacción p , a una profundidad z , con un desplazamiento lateral y , para mantener el equilibrio. Graficando esto se generan las **curvas $P - Y$** del sistema. Ver **Figura 15**.

Fuente: Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Figura A-3.2

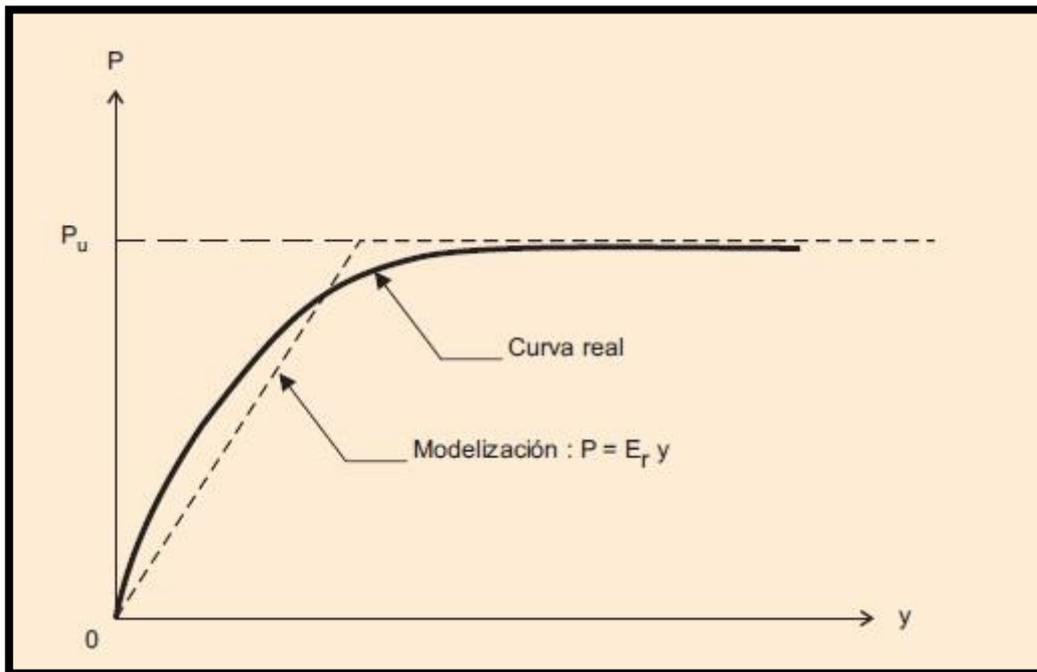


Figura 15- Curva de reacción micropilote suelo.

P: Reacción horizontal del terreno sobre el micropilote.

Y: Desplazamiento lateral del micropilote.

E_r : Módulo de reacción del terreno.

P_u : Presión de fluencia del terreno.

La interacción suelo-micropilote sometido a carga lateral es una función compleja de las características de respuesta no lineal tanto del suelo como del micropilote.

Para el análisis de estas curvas (p-y) y bajo la complejidad de las propiedades de los elementos se usarán software de interacción suelo-estructura, los cuales con parámetros resistentes del suelo y propiedades del micropilote arroja como resultado las deflexiones, cortantes y momentos a lo largo del micropilote.

Además, se tendrán que asumir 3 hipótesis de restricción de cabeza. Totalmente empotrado, totalmente articulo y al 50% de empotramiento. Para luego comparar resultados y escoger los valores máximos. de empotramiento. Para luego comparar resultados y escoger los valores máximos.

Fuente: FHWA micropile design and construction, 2005. Figure 5-19

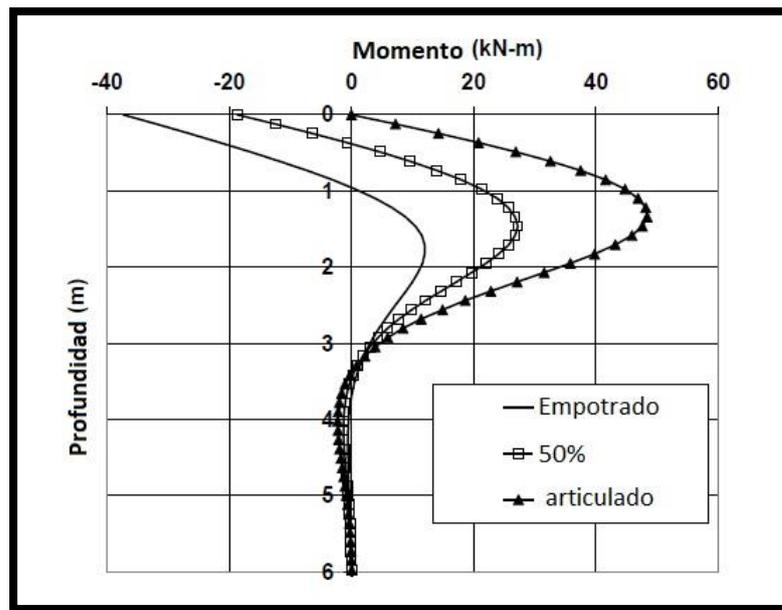


Figura 16- Diagrama de momento de micropilote sometido a carga lateral.

Fuente: FHWA micropile design and construction, 2005. Figure 5-19

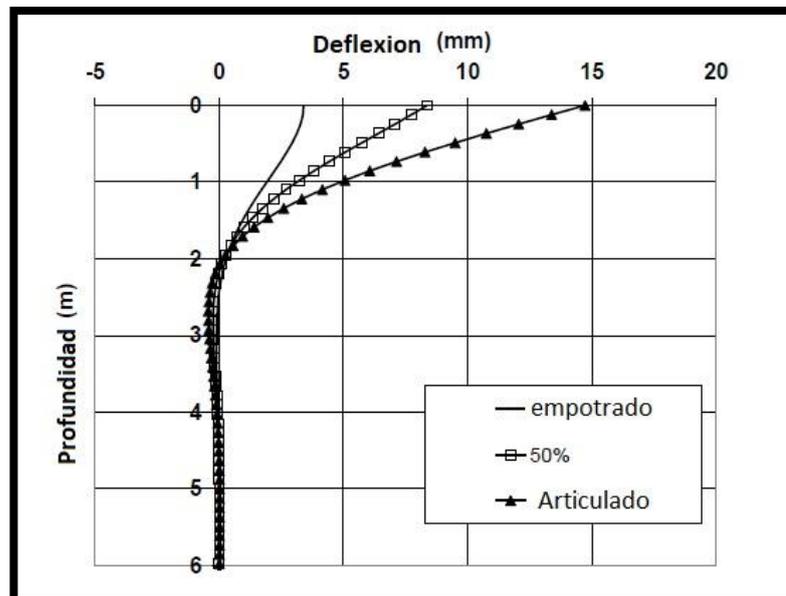


Figura 17- Diagrama de deflexión de micropilote sometido a carga lateral.

Los micropilotes sometidos a cargas laterales deberán resistir los esfuerzos encontrados anteriormente. Se supone que solo resistirá la armadura tubular del micropilote, debido a la poca inercia y rigidez que aporta la barra corrugada.

3.9.1. Flexión

Para calcular la resistencia estructural del micropilote a flexión, se supondrá que únicamente colabora la armadura tubular del micropilote. En la unión de armaduras se considerará además la capacidad a flexión de dicha unión, si fuera menor que la de la armadura.

El valor de cálculo de momento flector M_{Ed} , en cada sección, deberá cumplir la condición:

$$M_{c,Rd} \geq M_{Ed} [KN - m] \quad \text{Ec.27}$$

Donde:

M_{Ed} : Momento flector de cálculo, obtenido a partir de modelo p-y.

$M_{c,Rd}$: Resistencia de cálculo de la sección a flexión. Se determinará de acuerdo con la siguiente expresión:

$$si \frac{d_e - 2r_e}{t - r_e} \leq \frac{16450}{f_y} \quad \text{Ec.28}$$

$$M_{c,Rd} = W_{pl} * \frac{f_y}{\gamma_a} * F_{u,f} \quad \text{Ec.30}$$

$$si \frac{16450}{f_y} < \frac{d_e - 2r_e}{t - r_e} \leq \frac{21150}{f_y} \quad \text{Ec.29}$$

$$M_{c,Rd} = W_{el} * \frac{f_y}{\gamma_a} * F_{u,f} \quad \text{Ec.31}$$

Siendo:

d_e : Diámetro exterior de la armadura tubular.

r_e : Reducción de espesor de la armadura por efecto de la corrosión. Deberá tomarse de la **tabla 5**.

t : Espesor de la armadura tubular.

f_y : Limite elástico del acero de la armadura tubular, expresado en megapascales (Mpa), que puede obtenerse de la **tabla 1**.

γ_a : Coeficiente parcial de seguridad para el acero de la armadura tubular, se deberá tomar un valor de uno coma diez ($\gamma_a = 1,10$).

W_{pl} : Modulo plástico de la sección:

$$W_{pl} = \frac{(d_e - 2r_e)^3 - d_i^3}{6} [m^3] \quad \text{Ec.32}$$

W_{el} : Modulo elástico de la sección:

$$W_{el} = \frac{\pi[(d_e - 2r_e)^4 - d_i^4]}{32(d_e - 2r_e)} [m^3] \quad \text{Ec.33}$$

d_i : Diámetro interior nominal de la armadura tubular.

$F_{u,f}$: Coeficiente de minoración del módulo de resistencia de la armadura tubular en función del tipo de unión. Si no se dispusiera de ensayos específicos sobre las propias uniones a utilizar, se adoptará un valor de ($F_{u,f} = 0.5$).

3.9.2. Cortante

Para calcular la resistencia estructural del micropilote a cortante, se supondrá que únicamente colaborará la armadura tubular del micropilote.

El valor de cálculo del esfuerzo cortante V_{Ed} , en cada sección deberá cumplir la condición:

$$V_{Ed} \leq V_{c,Rd} [KN] \quad \text{Ec.34}$$

Donde:

V_{Ed} : Esfuerzo cortante de cálculo, obtenido a partir de acciones mayoradas.

$V_{c,Rd}$: Resistencia de cálculo de la sección a esfuerzo cortante. Se adoptará

$$V_{pl,Rd} = V_{c,Rd}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{2A_{pr}}{\pi} * \frac{1}{\sqrt{3}} * \frac{f_y}{\gamma_a} [KN] \quad \text{Ec.35}$$

$$A_{pr} = \frac{\pi}{4} [(d_e - 2r_e)^2 - d_i^2] [m^2] \quad \text{Ec.36}$$

Siendo:

d_e : Diámetro exterior de la armadura tubular

r_e : Reducción de espesor de la armadura por efecto de la corrosión. Deberá tomarse de la **tabla 1**.

d_i : Diámetro interior nominal de la armadura tubular.

3.10. Comprobación frente al pandeo

El análisis de estabilidad estructural del micropilote puede efectuarse mediante el siguiente método. Se debe tomar en cuenta el efecto del pandeo si se verifica la siguiente expresión:

$$\frac{I_a}{A_{pr}^2} \leq \frac{f_{yd}^2}{4KDE_a}$$

Dónde:

Ec.37

I_a : Momento de inercia de la sección de acero.

A_{pr}^2 : Sección reducida de la armadura tubular de acero, ver **Ec.22**

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero de la armadura tubular.

E_a : Modulo de elasticidad del acero.

KD : Su valor depende de la resistencia unitaria del terreno a la penetración estática q_c , y puede obtenerse de la **Tabla 10**.

Fuente: Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Tabla A-3.1

TIPO DE TERRENO	KD (MPa)
Suelos coherentes	0,29 q_c
Suelos arenosos secos o húmedos	0,40 q_c^2
Suelos arenosos sumergidos	0,28 q_c^2

Tabla 10- Factor KD

En los casos en que se concluya que es conveniente analizar el efecto del pandeo en los micropilotes, se podrá determinar la carga crítica de pandeo mediante la siguiente expresión:

$$N_c = \pi^2 * \frac{E_a I_a}{(L_l + L_{ef})^2} A \text{ [KN]} \quad \text{Ec.38}$$

Donde:

N_c : Carga crítica de pandeo.

E_a : Modulo de elasticidad del acero.

I_a : Momento de inercia de la sección de acero.

A : Constante que depende del tipo de coacción en cabeza y que puede obtenerse de la **Tabla 11**.

Fuente: Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Tabla A-3.2

TIPO DE COACCIÓN EN CABEZA	A
Articulada	2,045
Libre	0,25
Empotrada	4,0
Sin giro y con desplazamiento	1,0

Tabla 11- Constante **A**.

L_l : Longitud libre del micropilote que sobresale de la superficie del terreno.

L_{ef} : Profundidad de empotramiento ficticio.

$$L_{ef} = 1.2fl_e [M] \quad \text{Ec.39}$$

l_e : Longitud elástica del micropilote.

$$l_e = \left(\frac{3E_a I_a}{E_L} \right)^{1/4} [M] \quad \text{Ec.40}$$

E_a : Modulo de elasticidad del acero.

E_L : Modulo de elasticidad del terreno a la profundidad L , siendo L la longitud del micropilote.

f : Factor que depende de la relación entre el valor del módulo de elasticidad del terreno y la profundidad L .

Fuente: Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Tabla 3.8

E_v/E_L	f
0	1,70
0,5	1,25
1	1,00

Tabla 12- Coeficiente f

3.11. Cálculo de conexión y encepado

En las conexiones en la que la armadura tubular del micropilote se prolonga por el canto del encepado, y dentro del mecanismo de transmisión de esfuerzos elegido, se cuenta con la transmisión en la interfaz acero-hormigón. En general se han de disponer conectadores para aumentar la capacidad resistente.

Mayormente las conexiones del micropilote terminan en la parte inferior del encepado aproximadamente en una longitud mínima de 65 cm y terminando al menos 15 cm antes de la parte superior de la misma, la resistencia de adherencia de cálculo del conjunto armadura tubular y conectores debe ser superior a la acción mayorada que transmite el micropilote $N_{c.Ed}$.

$$R_{adh} \geq N_{c.Ed} [KN] \quad \text{Ec.41}$$

Donde:

R_{adh} : Resistencia de armadura tubular y conectares

$N_{c.Ed}$: Esfuerzo de cálculo (compresión), obtenido a partir de acciones mayoradas.

$$R_{adh} = R_{adh,armtub} + R_{adh,armcorrug} [KN] \quad \text{Ec.42}$$

$$R_{adh,armtub} = \pi \phi_{ext} L \tau_{bd,lisa} = \pi \phi_{ext} L \frac{1.2}{\gamma_c} \sqrt{f_{ck}} [KN] \quad \text{Ec.43}$$

Siendo:

ϕ_{ext} : Diámetro exterior de la armadura tubular. (mm)

L : Longitud de entrega de la armadura tubular en el encepado. Mínimo 60 cm.

$\tau_{bd,lisa}$: Tensión de adherencia.

f_{ck} : Resistencia a compresión del hormigón.

γ_c : Coeficiente de seguridad. (1.5)

$$R_{adh,armcorrug} = \pi \phi_b L_b n_b \tau_{bd} [KN] \quad \text{Ec.44}$$

$$R_{adh,armcorrug} = \pi \phi_b L_b n_b 2.25 \eta_1 \eta_2 \frac{(0.7)(0.3) f_{ck}^{\frac{2}{3}}}{\gamma_c} [KN] \quad \text{Ec.45}$$

Donde:

ϕ_b : Diámetro de la barra corrugada (mm).

L_b : Longitud de la barra corrugada.

τ_{bd} : Tensión de adherencia de cálculo.

$$\tau_{bd} = 2.25 * \eta_1 * \eta_2 * f_{ctd} [Mpa] \quad \text{Ec.46}$$

η_1 : Coeficiente relacionado con la calidad de la adherencia y la posición de barra durante el hormigonado.

η_1 : 1 Para adherencia buena.

η_1 : 0.7 Para cualquier otro caso

η_2 : Coeficiente relacionado con el diámetro de la barra.

η_2 : 1 para barras de diámetro $\phi \leq 32 \text{ mm}$.

η_2 : $\frac{(132-\phi)}{100}$ para barras de diámetro $\phi > 32 \text{ mm}$.

f_{ctd} : Resistencia a tracción de cálculo.

$$f_{ctd} \cdot \frac{f_{ct,k}}{\gamma_c} = \frac{0.7 * 0.3 * f_{ck}^{\frac{2}{3}}}{\gamma_c} [Mpa] \quad \text{Ec.47}$$

n_b : Numero de barras corrugadas soldadas a la armadura corrugada.

Introduciendo como variables el diámetro de las barras corrugadas y el número de barras a colocar se obtiene un valor que debe ser igual o superior a la acción mayorada que transmite el micropilote y por tanto queda definida la conexión del micropilote al encepado. En la **Figura 18** se muestra un ejemplo de conexión con barras corrugadas soldadas.

El espesor de garganta de las soldaduras de unión entre la armadura tubular y las barras corrugadas se determinará a partir de soldaduras de prueba ejecutadas sobre probetas de la misma sección que vaya a ser usada en producción. Las probetas se deberán seccionar para medir sobre ellas el espesor de garganta. Este proceso se repetirá hasta obtener una técnica de

soldeo que garantice conseguir, en producción, el espesor de garganta deseado.

Fuente: Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Figura A-5.3

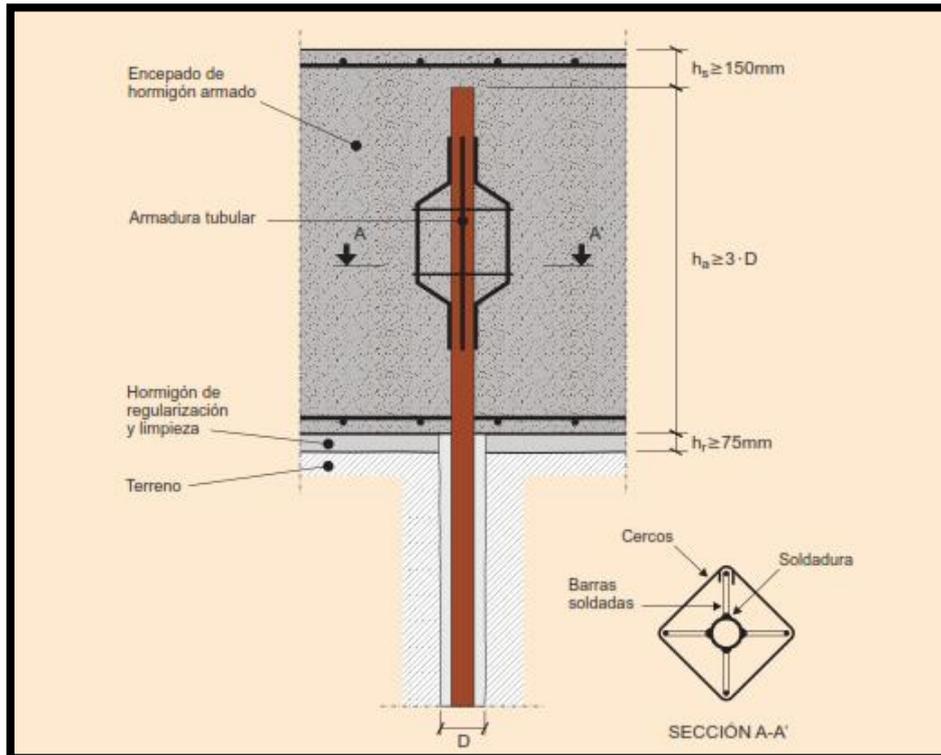


Figura 18- Ejemplo de conexión con barras corrugadas soldadas.

A menos que un solo micropilote sea utilizado para resistir las cargas, un encepado será necesario para distribuir las cargas en los micropilotes. Generalmente la conexión entre un encepado y el micropilote varía en función del refuerzo, el tipo de micropilote y la magnitud de las cargas. El encepado se diseñará según criterios según el ACI 318-14.

3.12. Planos y especificaciones

Una vez finalizada la etapa de diseño se deberá preparar los planos, las especificaciones técnicas, los procedimientos a utilizar para verificar la resistencia del micropilote y las medidas para el control de calidad durante la construcción.

4. CAPITULO IV

Ejemplo de diseño

Ejemplo de diseño de micropilotes para una vivienda de 2 niveles de mampostería confinada.

Se presenta el caso de una vivienda familiar de 2 niveles fabricada en mampostería confinada, donde esta consta de una losa de entrepiso y de cubierta de techo. Con un total de área de construcción de 239.87 m². Se divide en 3 habitaciones, 2 baños, sala, comedor, cocina, área de lavado y cuarto de servicio con su baño en cada nivel. A continuación, se presenta la planta arquitectónica de la vivienda.

Fuente: Elaboración propia

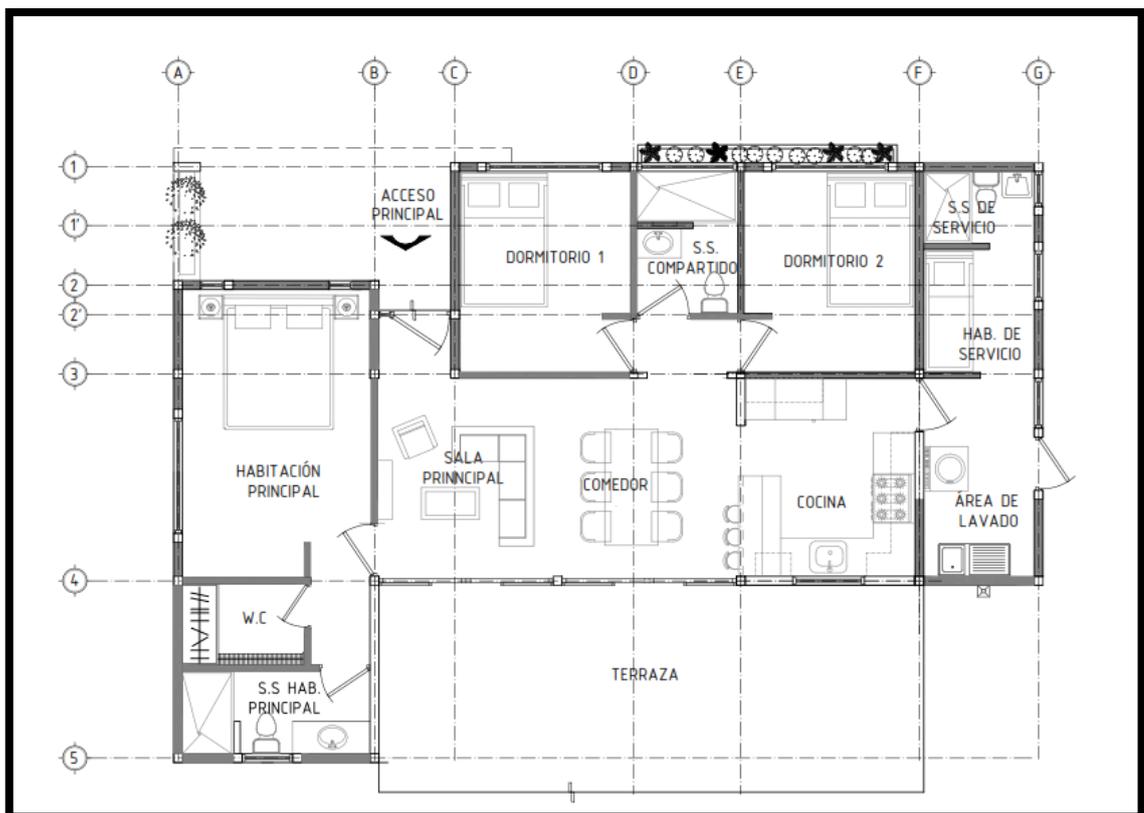


Figura 19- Planta arquitectónica primer nivel

4.1. Datos de estructura

Previo al diseño de micropilote se necesitó conocer las cargas actuantes que llegan a las columnas, esto se realizó mediante software, en específico el uso de ETABS, obteniendo como resultado los pesos actuantes y las combinaciones de cargas.

Fuente: Elaboración propia

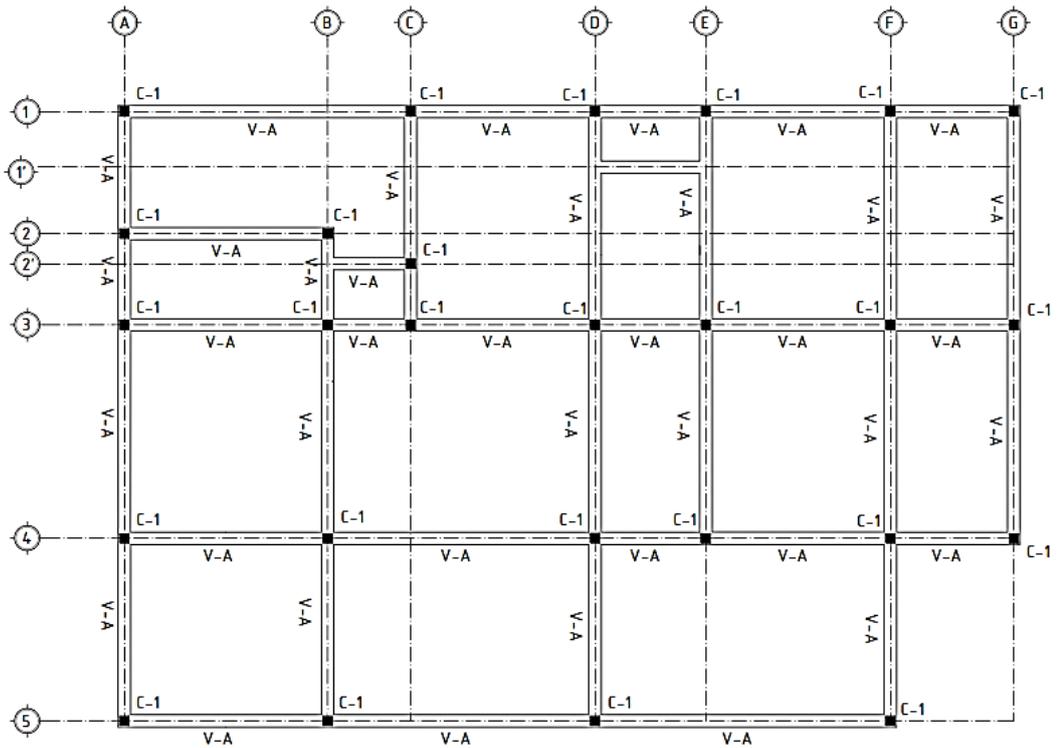


Figura 20- Planta de fundaciones

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13- Cargas actuantes sobre la estructura.

Combinaciones	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
	kN	kN	kN	kN-m	kN-m	kN-m
1.- 1.4CM	0.0611	-0.2259	128.259	0.2048	0.0547	-0.0031
2.- 1.2CM + 1.6CV	0.0692	-0.2733	149.7963	0.2476	0.0619	-0.0036
3.- 1.2CM + CV	0.0629	-0.2434	134.8488	0.2206	0.0563	-0.0033
4.- 1.2CM + Static X + CV	-0.0855	-0.2697	135.2231	0.2517	-0.1144	-0.0027
5.- 1.2CM + Static Y + CV	0.0168	-0.3548	135.4925	0.3471	0.0043	-0.0023
6.- 0.9CM + Static X	-0.1092	-0.1715	82.8265	0.1627	-0.1355	-0.0015
7.- 0.9CM + Static Y	-0.0068	-0.2567	83.0959	0.2581	-0.0169	-0.0011
8.- 1.2CM + Dynamic X + CV	0.1901	-0.2159	135.1481	0.2511	0.2028	-0.0029
9.- 1.2CM + Dynamic Y + CV	0.1811	0.0361	136.271	0.5339	0.1918	-0.0002
10.- 0.9CM + Dynamic X	0.1665	-0.1177	82.7515	0.1622	0.1816	-0.0016
11.- 0.9CM + Dynamic Y	3.2723	18.7508	102.196	1.5118	0.2754	0.1209

De la tabla anterior se seleccionó las cargas máximas a la que estarán sometidas las columnas y con las cuales se diseñará los micropilotes que puedan soportar estas mismas.

$$N_{c,Ed} = 150 \text{ KN}$$

$$V_{c,Rd} = 19 \text{ KN}$$

$$M_{Ed} = 1.52 \text{ kN} - m$$

Fuente: Elaboración propia

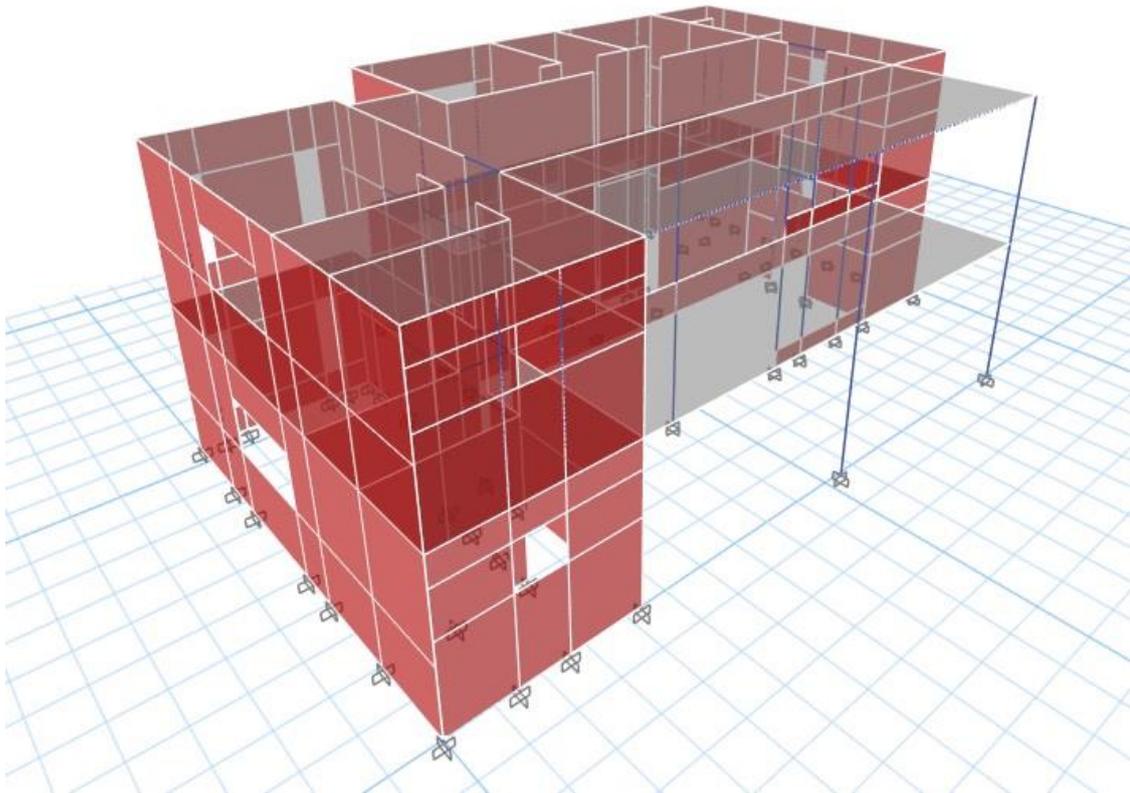


Figura 21- vista 3D del diseño en ETABS

4.2. Datos del terreno

La vivienda se diseñará para estar apoyada sobre el tipo de suelo de la tabla 14. El cual es un modelo de sub suelo con la característica principal de tener un primer estrato a una arena limosa de baja resistencia por lo cual se decide apoyar el micropilote en el siguiente estrato que cuenta con mayor resistencia debido a valor de N del SPT el cual es >30.

Fuente: Elaboración propia

Tipo de Suelo	Espesor [M]	Peso específico [KN/m^3]	N_{60} Promedio	Angulo de Fricción (°)	Cohesión [Kpa]	Modulo de elasticidad [Kpa]
SM	4.35	12.26	8	26	0	4900
SM	5.65	12.75	54	32	0	56000

Tabla 14- Modelo del subsuelo.

4.3. Diseño preliminar

Para el diseño preliminar se tomaron valores característicos para los materiales a utilizar tales como el mortero y acero. Además, se tomó medidas de micropilote y tubo de acero basándose en diámetros comerciales y medidas de las columnas de la estructura.

Fuente: Elaboración propia

Descripción	Simbolo	valor	Unidad	Elemento
Resistencia a compresion	f'c	25	Mpa	Lechada
Modulo de elasticidad	Ec	25000	Mpa	Lechada
Limite elastico	Fy	317	Mpa	Armadura Tubular
Modulo de elasticidad	Ea	200	Gpa	Armadura Tubular
Diametro Exterior	de	60.33	mm	Armadura Tubular
Diametro interior	di	50.81	mm	Armadura Tubular

Tabla 15- Propiedades de los materiales.

Fuente: Elaboración propia

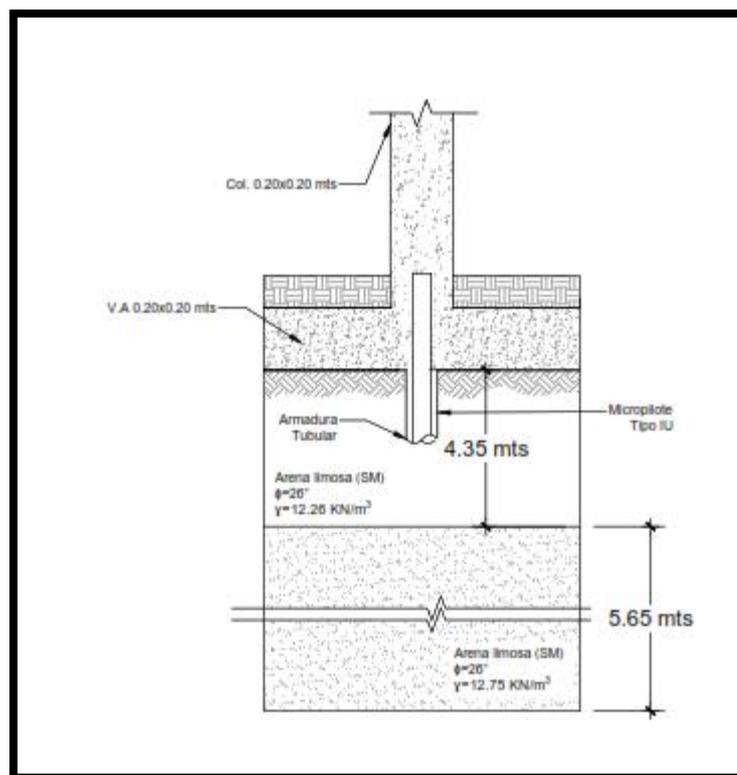


Figura 19- Esquema de diseño.

4.3.1. Cálculo de la resistencia a compresión

Para el cálculo de la resistencia estructural a compresión del micropilote se puede determinar de manera general con la siguiente expresión:

$$N_{c,Rd} = \frac{0.85A_c f_{cd} + A_s f_{sd} + A_a f_{yd}}{1.20 F_e} [kN] \quad \text{Ec.3}$$

F_e : 1.05 Cualquier tipo de terreno perforado al amparo de revestimiento recuperable. (ver tabla 7).

Resistencia de cálculo de la lechada a compresión

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{25}{1.5} = 16.66 \text{ Mpa}$$

➤ Resistencia de cálculo del acero de la armadura tubular

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_a} \leq 400 \text{ MPa} \quad \text{Ec.6}$$

$$f_{yd} = \frac{317}{1.1} = 288.18 \text{ Mpa} \leq 400 \text{ MPa}$$

➤ Área de acero tubular

$$A_a = \frac{\pi}{4} [(de - 2re)^2 - di^2] * F_{UC} \quad \text{Ec.7}$$

$$A_a = \frac{\pi}{4} [(0.06033m - (2)(0.0006m))^2 - (0.05081m)^2] * 1 = 7.18 \times 10^{-4} m^2$$

re : 0.6 mm, para suelo natural sin alterar a 50 años. (ver tabla 5).

F_{UC} : 1, Unión mediante manguitos exteriores. (ver tabla 6).

➤ Área de concreto

$$A_c = A_n - A_a = \left[\frac{\pi}{4} (0.1m^2) \right] - 7.18 \times 10^{-4} m^2 = 7.13 \times 10^{-3} m^2$$

➤ Resistencia estructural del micropilote a compresión.

$$N_{c,Rd} = \frac{(0.85)(7.13 \times 10^{-3} m^2)(16.66 \text{ Mpa}) + (7.18 \times 10^{-4} m^2)(288.18 \text{ Mpa})}{(1.20)(1.05)}$$

$$N_{c,Rd} = 244.35 > 150 [kN]$$

4.3.2. Cálculo de la resistencia geotécnica por hundimiento

El micropilote estará sometido a esfuerzos axiales de compresión por lo cual se diseñará para el modo de falla de hundimiento. El cálculo se puede hacer mediante la siguiente expresión:

$$R_{cd} = R_{p,d} + R_{fc,d} [kN] \quad \text{Ec.9}$$

- Cálculo de la resistencia por fuste

El micropilote se empotrará en el segundo estrato debido a que tiene un $N > 30$, además no se considerara el aporte del primer estrato por su bajo valor de N. Para el cálculo de $R_{fc,d}$ se usará la siguiente expresión:

$$R_{fc,d} = \sum_{i=1}^n A_{Li}(r_{fc,d})_i [kN] \quad \text{Ec.13}$$

- Cálculo del rozamiento unitario por fuste

$$r_{fc,d} = \frac{r_{f,lim}}{F_r} [Mpa] \quad \text{Ec.14}$$

Para determinar el valor de $r_{f,lim}$ se tendrá que hacer uso de la figura 20, donde conociendo el valor N del estrato y el tipo de inyección en el cual se desarrollará el mecanismo de fuste se puede conocer el valor de fuste unitario del material.

Fuente: Guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. Elaboración propia

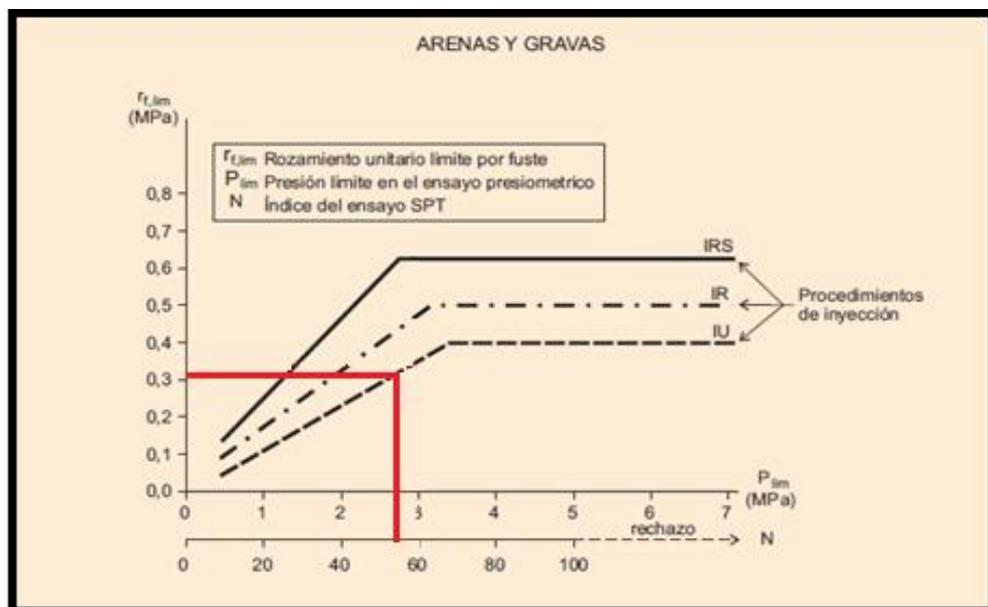


Figura 20- Selección del Rozamiento unitario por fuste (Elaboración Propia).

$$r_{fc,d} = \frac{r_{f,lim}}{F_r} = \frac{0.32}{1.65} = 0.19 [Mpa]$$

F_r : 1.65 para obras de mas de 6 meses de duración (ver tabla 9).

$$R_{fc,d} = (2\pi) \left(\frac{0.1 m}{2} \right) (2.5m)(0.19 Mpa) = 149.22 [kN]$$

➤ Cálculo de la resistencia por punta.

Debido a que el tipo de terreno donde se empotrara es un terreno granular además de cumplir también con un $N > 30$ es decir de compacidades densas, se puede considerar el aporte de la punta mediante la siguiente expresión:

$$R_{p,d} \leq 0.15 R_{fc,d} [kN] \quad \text{Ec.10}$$

$$R_{p,d} = (0.15)(149.22 KN) = 22.38KN$$

$$R_{cd} = 22.38KN + 149.22KN = 171.60 [kN]$$

$$R_{cd} = 171.60 > 150 [kN]$$

4.3.3. Cálculo de los asentamientos del micropilote

Para el asentamiento en terreno granular se ocupará la siguiente expresión:

$$S_N = \left(\frac{9N_{c,Ek}}{R_{c,d}} - 2 \right) \cdot \frac{D}{90} [mm] \quad \text{Ec.23}$$

$$S_N = \left(\frac{9(117 KN)}{171.60 KN} - 2 \right) \cdot \frac{100 mm}{90} [mm]$$

$$S_N = 4.59 mm$$

Cuando se considera el aporte de la punta en el diseño se tendrá que calcular el acortamiento elástico mediante la siguiente expresión:

$$S_e = \frac{N_{c,Ek} \cdot L_E}{A_p E_p} [mm] \quad \text{Ec.23}$$

$$L_E = L - L_{emp} [m] \quad \text{Ec.20}$$

$$L_E = 6.15 m - 3 m = 3.15 [m]$$

$$A_p E_p = A_c E_c + (A_{pr} + A_s) E_a [kN] \quad \text{Ec.21}$$

$$A_p E_p = (7.13 \times 10^{-3} m^2)(25000 Mpa) + (7.18 \times 10^{-4} m^2)(200,000 Mpa)$$

$$A_p E_p = 321,850 \text{ KN}$$

$$A_{pr} = \frac{\pi}{4} [(d_e - 2r_e)^2 - d_i^2] \text{ [mm}^2\text{]} \quad \text{Ec.22}$$

$$A_{pr} = \frac{\pi}{4} [(0.06033\text{m} - 2 * 0.0006\text{m})^2 - (0.05081\text{m})^2] = 7.18 \times 10^{-4} \text{m}^2$$

$$S_e = \frac{(117\text{KN})(3150 \text{ mm})}{321850 \text{ KN}} = 1.14 \text{ [mm]}$$

Asentamiento total

$$S_{TOT} = S_N + S_e \text{ [mm]} \quad \text{Ec.24}$$

$$S_{TOT} = 4.59 \text{ mm} + 1.14 \text{ mm} = 5.73 \text{ mm}$$

4.3.4. Flexión

$$M_{c,Rd} \geq M_{Ed} \text{ [KN} \cdot \text{m]}$$

$$\text{si } \frac{d_e - 2r_e}{t - r_e} \leq \frac{16450}{f_y} = \frac{60.33 - 2(0.6)}{3.17 - 0.6} \leq \frac{16450}{317}$$

$$23 \leq 51.89$$

Si cumple, por lo tanto, se calcula el módulo plástico de la sección.

$$\begin{aligned} W_{pl} &= \frac{(d_e - 2r_e)^3 - d_i^3}{6} \text{ [mm}^3\text{]} = \frac{(60.33 - 2(0.6))^3 - (53.99)^3}{6} \\ &= 8227.17 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

Cálculo de resistencia a flexión

$$M_{c,Rd} = W_{pl} * \frac{f_y}{\gamma_a} * F_{u,f} = \frac{(8227.17 * \frac{317}{1.10} * 0.5)}{(1000)^2} = 1.18 \text{ KN} * \text{M}$$

$$M_{c,Rd} = 1.18 \text{ KN} * \text{M} \geq 1.15 \text{ KN} * \text{M}$$

4.3.5. Cortante

$$V_{Ed} \leq V_{c,Rd} \text{ [KN]}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{2A_{pr}}{\pi} * \frac{1}{\sqrt{3}} * \frac{f_y}{\gamma_a} \text{ [KN]}$$

$$A_{pr} = \frac{\pi}{4} [(0.06033m - 2 * 0.0006m)^2 - (0.05081m)^2] = 7.18 \times 10^{-4} m^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{\left(\frac{2(718)}{\pi} * \frac{1}{\sqrt{3}} * \frac{317}{1.10}\right)}{1000} = 76.05 [KN]$$

$$V_{Ed} = 76.05 [KN] \geq 18.75 [KN]$$

4.3.6. Comprobación frente al pandeo lateral

El análisis de estabilidad de la estructura frente al pandeo puede calcularse por el siguiente método. Se debe tomar en cuenta el efecto del pandeo si se verifica la siguiente expresión:

$$\frac{I_a}{A_{pr}^2} \leq \frac{f_{yd}^2}{4KDE_a}$$

Ec.36

KD: 0.40 q_c^2 , Suelos arenosos secos o húmedos (ver tabla 10).

E_a: 210 Gpa, Módulo de elasticidad del acero.

Cálculo del momento de inercia de la sección tubular

$$I = \frac{\pi}{32} (D_2^4 - D_1^4) = \frac{\pi}{32} [0.06033^4 - 0.05081^4] = 6.46 \times 10^{-7} m^4$$

Cálculo de sección reducida de la armadura tubular

$$A_{pr} = \frac{\pi}{4} [(d_e - 2r_e)^2 - d_i^2] \quad \text{Ec.36}$$

$$A_{pr} = \frac{\pi}{4} [(0.06033m - (2)(0.0006m))^2 - (0.05081m)^2] = 7.18 \times 10^{-4} m^2$$

Cálculo del factor **KD**

Para el cálculo del factor **KD** necesitamos obtener el valor de q_c , el cual se obtendrá a partir de la correlación de los ensayos **SPT** y **CPT** (ver figura A.11).

$$\frac{q_c}{N} = 0.2 \therefore q_c = (0.4)(8) = 3.2$$

$$KD = 0.40q_c^2 = 0.40(3.2)^2 = 4.10 \text{ Mpa}$$

Verificación de pandeo 1

$$\frac{I_a}{A_{pr}^2} \leq \frac{f_{yd}^2}{4KDE_a}$$

$$\frac{6.46 \times 10^{-7} \text{ m}^4}{(7.18 \times 10^{-4} \text{ m}^2)^2} \leq \frac{(288.18 \text{ Mpa})^2}{(4)(4.10 \text{ Mpa})(200 \text{ Gpa})}$$

1.25 ≤ 0.026 al no cumplir la inecuación no existe efecto por pandeo

4.3.7. Cálculo de conexión

➤ Cálculo de la adherencia de la armadura tubular

$$R_{adh,arm tub} = \pi L \phi_{ext} \frac{1.2}{\gamma_c} \sqrt{f_{ck}} [KN] \quad \text{Ec.43}$$

$$R_{adh,arm tub} = \pi(30 \text{ cm})(6.033 \text{ cm}) \left(\frac{1.2}{1.5}\right) \sqrt{255 \text{ Kp/cm}^2} = 71.25 [KN]$$

➤ cálculo de la adherencia de la armadura tubular

$$R_{adh} = R_{adh,arm tub} + R_{adh,arm corrug} [KN] \quad \text{Ec.42}$$

$$150 \text{ KN} = 71.25 \text{ KN} + R_{adh,arm corrug} [KN]$$

$$R_{adh,arm corrug} = 78.75 \text{ KN}$$

$$R_{adh,arm corrug} = \pi \phi_b L_b n_b 2.25 \eta_1 \eta_2 \frac{(0.7)(0.3) f_{ck}^{\frac{2}{3}}}{\gamma_c} [KN] \quad \text{Ec.45}$$

$$R_{adh,arm corrug} = \pi \phi_b (25 \text{ cm})(6)(2.25)(1)(1) \frac{(0.7)(0.3) (255 \text{ Kp/cm}^2)^{\frac{2}{3}}}{1.5}$$

$$78.75 \text{ KN} = (58.53 \text{ KN}) \phi_b$$

$$\phi_b = 1.34 \text{ cm} = 1/2''$$

5. CONCLUSIONES

Del estudio y metodología desarrolladas en este documento y con base a los objetivos planteados en el capítulo I que han servido como meta para desarrollar la presente tesis, se ha podido llegar a obtener las siguientes conclusiones:

- La metodología planteada será una guía que brindara información acerca de los pasos a seguir y criterios a tomar para el diseño y ejecución de micropilotes debido a que en nuestro país no son muy comunes el uso de estos, existe poca información sobre este tema y por la cual la presente tesis nos brinda de una manera muy explícita cada proceso de diseño.
- Para el diseño de los micropilotes se requieren diversos parámetros geotécnicos en los cuales se basaron en las normas ASTM D4318, D2487, D6032, D2166, D1586 para los ensayos y estudios de laboratorio con los que se podrán definir el tipo de suelo y todas sus características, así como también la resistencia de los micropilotes.
- Como referencia para el diseño de los micropilotes el documento se basó gran parte en la Guía para proyecto y ejecución de micropilotes de España como también de otras normativas como es el ACI 318-19 y el RNC-07 (Reglamento Nacional de la Construcción) este último que establece los requerimientos aplicables al diseño y construcción en obras ejecutados en nuestro territorio.
- La creación de planos nos dará una idealización luego de haber diseñado las conexiones y el encepado del micropilote siempre tomando en cuenta las normativas de diseño antes mencionadas.
- Según el ejemplo de diseño del CAPITULO IV, se observa que los micropilotes pueden resistir cargas considerables con secciones de elemento relativamente pequeñas, dando como resultado un mejor aprovechamiento de las propiedades del mismo.

6. RECOMENDACIONES

- Cabe mencionar que este sistema por ser relativamente nuevo en nuestro país se recomienda hacer un estudio profundizado y en todo caso es preciso complementar con otros tipos de metodología de diseño de micropilotes ya que no existe una global para el diseño de estos.
- A pesar de que es un sistema versátil se recomienda siempre hacer una evaluación TECNICO-ECONOMICA con otras soluciones y escoger la más óptima, tomando en cuenta que garantice buenos resultados.
- Se recomienda para un proyecto de micropilotaje en vivienda cumplan con todo lo especificado en el CAPITULO 2 referente al control de calidad y ejecución de este documento y sobre todo que cumplan con las normas de seguridad establecidas para salvaguardar sus vidas, debido a que es un proceso que conlleva el uso de maquinarias.
- El uso de pruebas de cargas es el método para el diseño más fiable pues se basa en ensayos in-situ a escala real de micropilote por lo tanto se deberá tomar como primera opción, teniendo en cuenta el costo que esto implica al diseño.

7. BIBLIOGRAFIA

- American Association of State Highway and Transportation Officials(AASTHO). (2014). *LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS*. Washington DC.
- ARKITEKTURA . (Marzo de 2012). *DE ARKITEKTURA* . Obtenido de <http://dearkitektura.blogspot.com/2012/04/la-cimentacion-tipos-de-cimientos.html>
- Cerrón, E. (2018). Diseño de micropilotes para soportar las cargas de las viviendas del condominio villa chorrillos en la avenida Hernando de lavalle. *tesis inédita de pregrado* . Universidad de San Martín de Porres, Lima, Perú.
- eadic. (s.f.). *eadic*. Obtenido de <https://www.eadic.com/tipos-de-cimentacion-descripciones/>
- Federal Highway Administration(FHWA). (2005). *Micropile design and construction*.Washington DC.
- Hernandez Juan, L. F. (s.f.). *Micropilotes inyectados* .
- Limia, J. M. (2018). *Consolidación muro de contención en c/bajada sangre. Castellana. Alicante*. Murcia .
- Manuel, R. (2003). *Micropilotes uso en recalces*. Valencia.
- Ministerio de fomento. (2005). *Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera*. España.
- Ministerio de Transporte e Infraestructura (MTI). (2011). *Cartilla de la Construcción*. Managua .
- Palacios, A. (2013). Implementación del diseño de cimentaciones con micropilotes en el laboratorio virtual de ingeniería geotécnica(LVIG). *tesis inédita de pregrado*. Universidad Técnica particular de Loja, Ecuador.
- Silvia, G. (2003). *Sistema de fundación sobre micropilotes: alternativa para edificaciones livianas*. Piura.

8. ANEXOS

ANEXO A: TIPO DE INYECCIONES

1. Inyección única global (IU):

Efectuada en una sola fase, rellena el hueco comprendido entre el taladro de la perforación y la armadura tubular, así como el interior de esta, La inyección se debe realizar desde la punta a la cabeza del micropilote, pudiéndose efectuar de alguna de las siguientes maneras:

Mediante inyección a través de un tubo, generalmente de plástico, colocado en el fondo del taladro, produciéndose el ascenso de la lechada tanto por el exterior como por el interior de la armadura tubular. En este caso, y debido al pequeño diámetro de los tubos de plásticos empleados, solo se puede inyectar la lechada.

En algunos casos, si transcurridos cierto tiempo (sin alcanzar el fraguado) se observa que disminuye el nivel de la lechada, por penetración de esta en el terreno, puede ser necesario volver a inyectar, en los micropilotes IU la presión de inyección normalmente será superior a la mitad de la presión límite del terreno e inferior a dicha presión límite.

$$0.5P_{lim} \leq P_i \leq P_{lim} \quad \text{Ec.A.1}$$

La presión límite del terreno P_{lim} será la obtenida preferiblemente en el ensayo presiometrico, la presión de inyección se podrá medir a la salida de la bomba, siempre que la boca del taladro no se encuentre a una distancia superior a cincuenta metros (50m) en planta, ni a un desnivel mayor de un metro (1m). en caso contrario se medirá en boca de taladro.

En la mayoría de los casos, suele resultar un criterio practico suficiente, fijar la presión de inyección entre medio y un mega pascal ($0.5 \leq P_i \leq 1Mpa$), salvo cuando dichos valores superen la presión límite del terreno, lo que podría suceder en suelos granulares de compacidad floja a media, cohesivos de consistencia blanda a media firme, o rocas muy fracturadas.

En aquellos casos en que, bien por no permitirlo el terreno según los criterios recién especificados o bien por cualquier otra circunstancia, la presión de inyección no hubiera alcanzado el valor mínimo de medio mega pascal ($P_i \leq 0.5 Mpa$) durante todo el proceso de inyección, los ábacos para el cálculo del

rozamiento unitario limite por fuste (ver figura 3.1) no resultarían de aplicación, recomendándose preferiblemente la realización de pruebas de carga.

En la siguiente figura se observa el proceso de inyección única global, con la ayuda de un tubo de plástico se observa que se aplica la lechada de cemento.

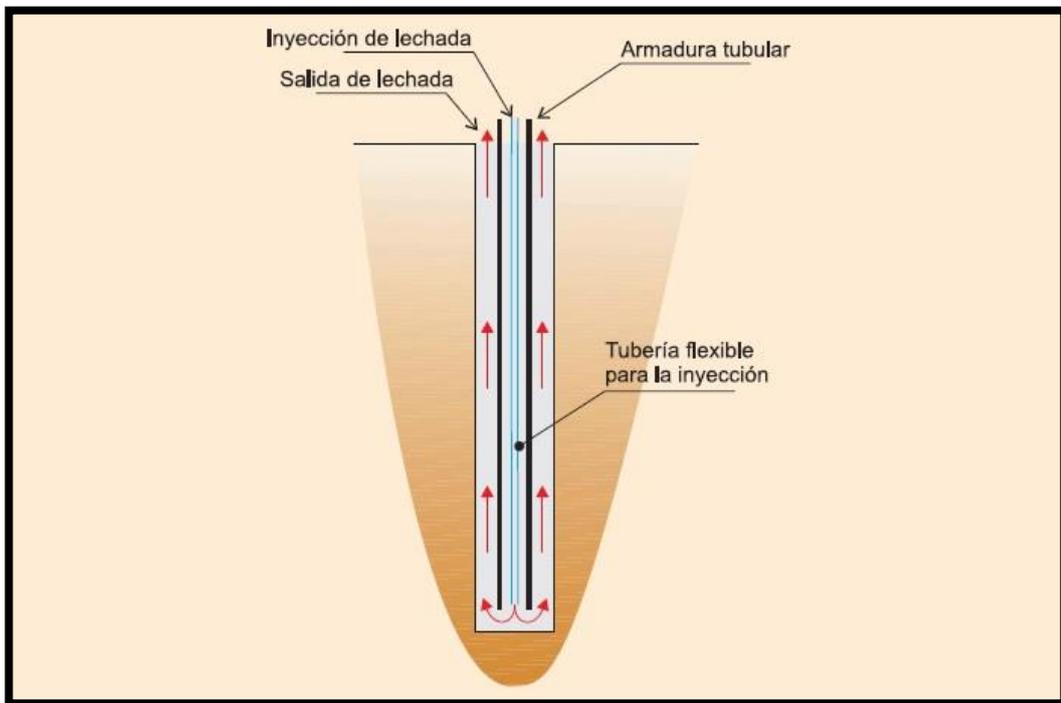


Figura A.1- Micropilote tipo IU (tomado de guía de cimentaciones en obras de carreteras. **Figura 4.3**).

2. Inyección repetitiva (IR):

En estos micropilotes, el relleno e inyección se realiza en dos fases, en primer lugar, y una vez introducida la armadura, se realiza un relleno del taladro con la lechada en la forma ya descrita para los micropilotes del tipo IU. Posteriormente se realiza la reinyección la reinyección, de alguno de los siguientes modos. Ver **Figura A.2**.

Al final de la última fase de inyección, la presión en la boca del taladro deberá cumplir los mismos criterios que se han especificado para las inyecciones tipo IU, no siendo de aplicación los ábacos de la figura 3.1, cuando la presión de inyección no alcanzase el valor mínimo requerido para poder considerarlos,

en las inyecciones tipo IU, acabado el proceso se realizara una inyección final de relleno de la armadura tubular.

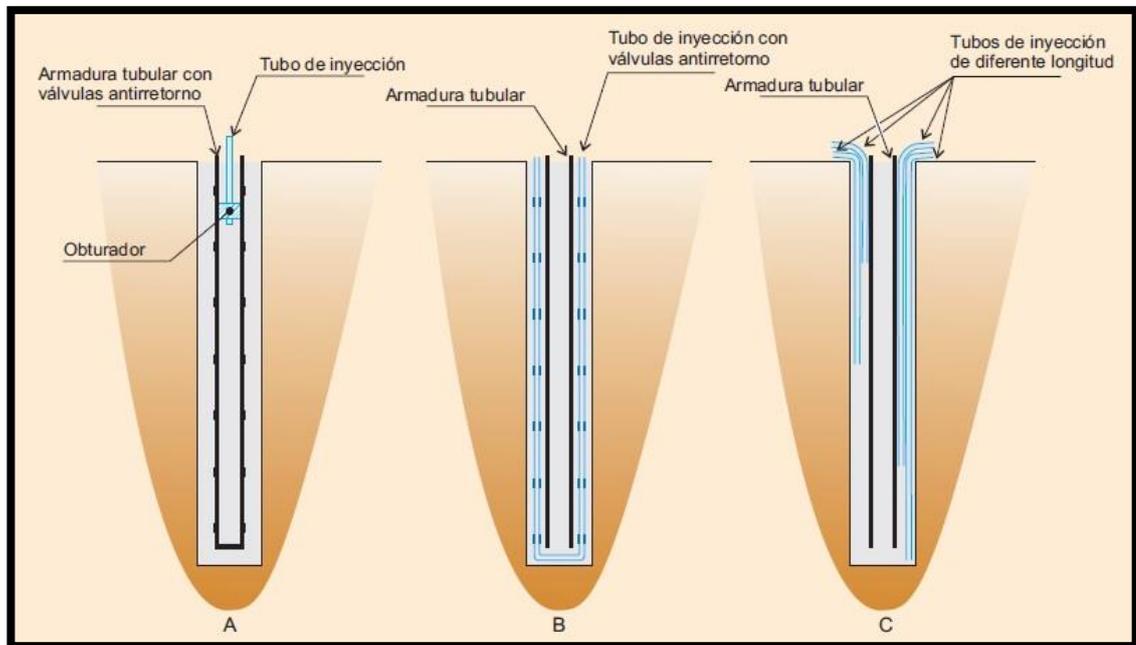


Figura A.2- Micropilote tipo IR (tomado de guía de cimentaciones en obras de carreteras. **Figura 4.4**).

3. Inyección repetitiva selectiva (IRS):

Realizada mediante inyección a presión de la perforación, desde el interior de la armadura tubular, con doble obturador, a través de manguitos instalados en dicha armadura, la distancia entre cada dos maguitos consecutivos deberá ser como máximo de un metro (1m).

Previamente, la corona anular entre la tubería de armadura y la pared del taladro debe rellenarse con una lechada (inyección de sellado) que sirva de cierre, e impida a la inyección a presión escapar hacia la superficie.

Se puede inyectar más de dos veces a través de aquellos manguitos que se desee en función, normalmente, de la admisión de la lechada obtenida.

La presión de inyección será normalmente algo superior a la presión límite del terreno, que deberá obtenerse del ensayo presiometrico.

$$P_i \geq P_{lim}$$

Ec.A.2

Además de lo anterior, la presión de inyección deberá ser, en general, mayor que un mega pascal $P_{lim} \geq 1 \text{ Mpa}$, acabado el proceso se realizará una inyección final de relleno de la armadura tubular.

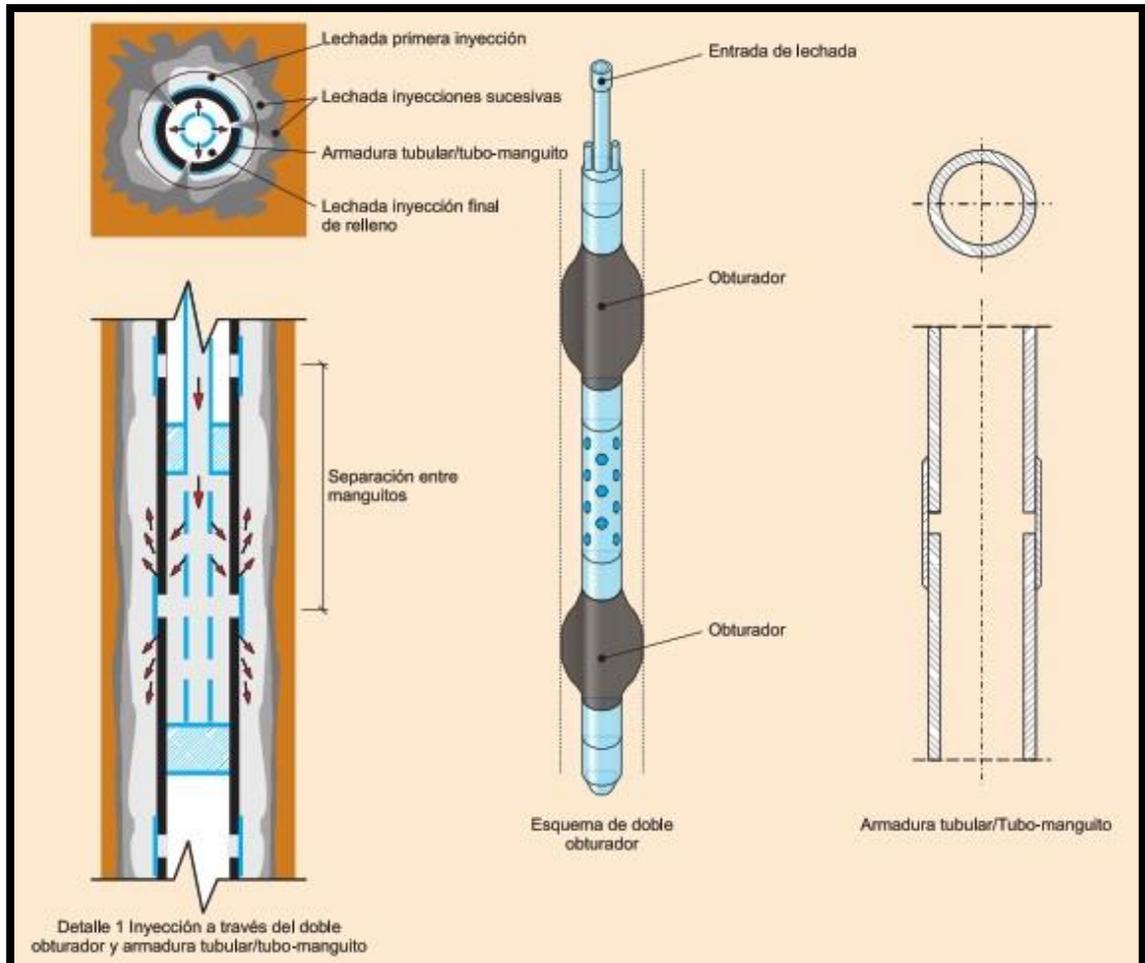


Figura A.3- Micropilote tipo IRS (tomado de guía de cimentaciones en obras de carreteras. **Figura 4.5**).

ANEXO B: PARAMETROS GEOTECNICOS DEL SUELO

1. Límites de atterberg

1.1. Ensayo de limite liquido

El límite líquido se define como el porcentaje de humedad del suelo, por debajo del cual se presenta un comportamiento plástico, datos que ayudan a estimar asentamientos en problemas de consolidación. Cuando los suelos alcanzan porcentajes de humedad mayores al límite líquido, su comportamiento será el de un fluido viscoso. La prueba consiste en colocar la muestra en una copa de Casagrande, hacer una ranura y cuando esta se cierre aproximadamente 13mm a 25 golpes de la copa de Casagrande entonces estaremos en el límite líquido, lo recomendable es hacer dos puntos por debajo de los 25 golpes y dos puntos por arriba de los 25 golpes.

Para realizar el cálculo de Limite Liquido se tomará como ejemplo la siguiente tabla basada en las normas de ASTM-D4318. Donde para obtener la gráfica del límite líquido tendremos que graficar el Numero de golpes Vs Contenido de Agua.

Numero de golpes	No. Tara	Masa Tara + Suelo humedo (g)	Masa Tara + Suelo seco (g)	Masa del Agua (g)	Tara (g)	Masa de l Suelo seco (g)	Contenido del Agua (%)

Tabla A.1- Limite liquido (Elaboración propia).

Donde:

$$M. agua = (M. Tara + suelo humedo) - (M. Tara + suelo Seco) \quad \text{Ec.A.3}$$

$$M. del Suelo Seco = (M. Tara + Suelo Seco) - M. de la Tara \quad \text{Ec.A.4}$$

$$Contenido del agua = \frac{M. del agua}{M. del suelo seco} \quad \text{Ec.A.5}$$

1.2. Ensayo de limite plástico (WP)

Es el contenido de agua, en porcentaje con el cual el suelo al ser enrollado en rollitos de 3.00mm de Diámetro, se desmorona. Para esto se realiza una mezcla de agua y suelo, la cual se amasa entre los dedos o entre el dedo índice y una superficie inerte (vidrio), hasta conseguir un cilindro de 3.00mm y si se vuelve el suelo quebradizo, el contenido de humedad es el límite plástico.

Para el cálculo del límite plástico se realizará con la tabla “” con el mismo procedimiento, donde el valor del límite plástico será el promedio del contenido de agua.

1.3. Índice de plasticidad

Atterberg definió el índice de plasticidad para describir el rango de contenido de humedad natural sobre el cual el suelo era plástico. Por tanto, el índice de plasticidad, es la diferencia entre el límite líquido y limite plástico de un suelo.

$$I_p = WL - WP \quad \text{Ec.A.6}$$

2. Ensayo de análisis granulométrico

El método de determinación granulométrico es hacer pasar las partículas por una serie de mallas de distintos anchos de entramado que actúen como filtros de los granos que se llama comúnmente columna de tamices.

Para la Clasificación de los suelos se usará la norma ASTM D2487 (SUCS), esta clasificación se vale de unos símbolos de grupo, consistentes en un prefijo que se designa la composición del suelo y un sufijo que matiza sus propiedades:

- Suelos gruesos: Se dividen en gravas y arena, y se separan con el tamiz N° 4, de manera que un suelo pertenece al grupo de grava si más del 50% retiene el tamiz No 4 y pertenecerá al grupo arena en caso contrario.
- Suelos finos. El sistema unificado considera los suelos finos divididos entre grupos: limos inorgánicos (M), arcillas inorgánicas (C) y limos y arcillas orgánicas (O). Cada uno de estos suelos se subdivide a su vez

según su límite líquido, endos grupos cuya frontera es $LI = 50\%$. Si el límite líquido del suelo es menor de 50 se añade al símbolo general la letra L (lowcompresibility). Si es mayor de 50 se añade la letra H (hightcompresibility). Obteniéndose de este modo los siguientes tipos de suelos:

ML: Limos Inorgánicos de baja compresibilidad.

OL: Limos y arcillas orgánicas.

CL: Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad.

CH: Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad.

MH: Limos inorgánicos de alta compresibilidad.

OH: arcillas y limos orgánicas de alta compresibilidad.

- Suelos orgánicos. Constituidos fundamentalmente por materia orgánica. Son inservibles como terreno para cimentación.

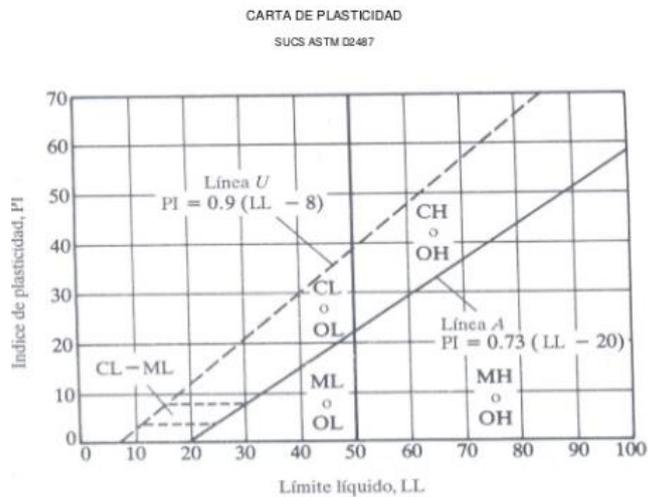


Figura A.4- Carta de plasticidad (tomado de clasificación unificada de los suelos **SUCS**).

3. Clasificación de los suelos (SUCS)

Divisiones mayores			Símbolo del grupo	Nombre del grupo
Suelos granulares gruesos más del 50% retenido en el tamiz n°200 (0.075 mm)	grava > 50% de la fracción gruesa retenida en el tamiz n°4 (4.75 mm)	grava limpia <5% más pequeña que el tamiz n°200	GW	grava bien graduada, grava fina a gruesa
			GP	grava pobremente graduada
		grava con >12% finos	GM	grava limosa
			GC	grava arcillosa
	arena < 50% de fracción gruesa que pasa el tamiz n°4	Arena limpia	SW	Arena bien graduada, arena fina a gruesa.
			SP	Arena pobremente graduada
		Arena con >12% finos	SM	Arena limosa
			SC	Arena arcillosa
Suelos con finos graduados más del 50% pasa el tamiz No.200	limos y arcillas límite líquido < 50	inorgánico	ML	limo
			CL	arcilla
		orgánico	OL	Limo orgánico, arcilla orgánica
	limo y arcilla límite líquido ≥ 50	inorgánico	MH	limo de alta plasticidad, limo elástico
			CH	Arcilla de alta plasticidad
		orgánico	OH	Arcilla orgánica, Limo orgánico
Suelos altamente orgánicos			Pt	turba

Figura A.5- Clasificación **SUCS**(tomado de clasificación unificada de los suelos **SUCS**).

4. RQD (Rock Quality Designation)

El **RQD (Rock Quality Designation)** Norma ASTM D6032-08, es el índice más usado para medir el grado de fracturación de un macizo rocoso. Nos da idea del número y condiciones de las fracturas que afectan a los materiales. Este índice viene definido por la **fórmula RQD** expuesta a continuación:

$$RQD = \frac{\sum \text{Testigos o núcleos de sondeo de longitud} > 10\text{cm}}{\text{Longitud total de la maniobra}} * 100\% \quad \text{Ec.A.7}$$

El **RQD** se mide en porcentaje y solo puede medirse en testigos de sondeo con un diámetro mínimo de 55 mm y en los cuales el grado de meteorización es aceptable (grado de meteorización \geq IV). En estos casos, el **RQD** se considera igual a 0. Las roturas causadas por las maniobras de perforación no deben tenerse en cuenta y frecuentemente se pintan con spray para distinguirlas del resto. Hay que prestar especial hincapié en que el RQD se suele medir por longitud de maniobra de sondista y no en tramos de 60 o 100cm.

5. ESCALA DE METEORIZACION DE LAS ROCAS (ISRM)

GRADO	DENOMINACIÓN	CRITERIO DE RECONOCIMIENTO
I	Roca sana o fresca	La roca no presenta signos visibles de meteorización, pueden existir ligeras pérdidas de color o pequeñas manchas de óxidos en los planos de discontinuidad
II	Roca ligeramente meteorizada	La roca y los planos de discontinuidad presentan signos de decoloración. Toda la roca ha podido perder su color debido a la meteorización y superficialmente ser más débil que la roca sana
III	Roca moderadamente meteorizada	Menos de la mitad del material está descompuesto a suelo. Aparece roca sana o ligeramente meteorizada de forma continua o en zonas aisladas
IV	Roca meteorizada a muy meteorizada	Más de la mitad del material está descompuesto a suelo. Aparece roca sana o ligeramente meteorizada de forma discontinua
V	Roca completamente meteorizada	Todo el material está descompuesto a un suelo. La estructura original de la roca se mantiene intacta
VI	Suelo residual	La roca está totalmente descompuesta en un suelo y no puede reconocerse ni la textura ni la estructura original. El material permanece «in situ» y existe un cambio de volumen importante

Tabla A.2- Escala de meteorización de las rocas (tomado de guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. **TablaA.6.1**).

6. Resistencia compresión simple

El ensayo de compresión simple o no confinada es un ensayo relativamente sencillo Normado por la ASTM D2166 que nos permite medir la carga última a la que un suelo sometido a una carga compresión falla. Sin embargo, es muy importante tener en cuenta las simplificaciones que este ensayo supone, y por las cuales no es un método exacto, sino más bien aproximado, a pesar de esto es un ensayo muy solicitado, ya que la sencillez de su método y el equipo que utiliza lo convierten en un ensayo de bajo costo en relación a otros relacionados, como el ensayo triaxial, que requiere de equipo más especializado.

La relación altura (H) a diámetro (ϕ) debe encontrarse entre 2 y 2.5 ($2 \leq \frac{H}{\phi} \leq 2.5$), la probeta se debe de pesar antes de ser ensayada, se coloca la muestras en el aparato de carga de tal manera que quede centrado en la platina inferior y superior apenas que haga contacto con la muestra (Ver **Figura A.6**), el indicador de deformación debe de estar en "0" para aplicar la carga de tal manera que se produzca una deformación axial a una velocidad de 2 a 2.5% por minuto, se toman las medidas de las deformaciones y las cargas cada treinta segundos hasta que estas comiencen a disminuir o bien hasta que la deformación axial sea del 15% Tomándose lo que antes suceda (Ver **Figura A.7**).

La rotura de la probeta se alcanzará cuando la carga axial (N) comience a disminuir o cuando la deformación axial (ϵ) sea del 15%, adoptándose como valor de rotura (N_R) el correspondiente a la carga que antes se alcance. Finalizado el ensayo se realiza un esquema de la forma de rotura y se mide el Angulo del plano de rotura (α) siempre que sea posible (Ver **Figura A.8**), para finalizar se introduce la probeta para determinar su humedad natural.

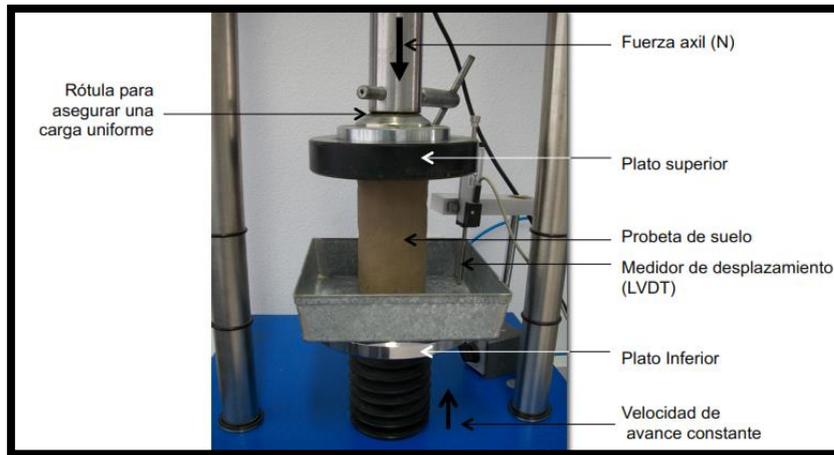


Figura A.6- Aparato de compresión (tomado de guía de ingeniería del terreno GIT).

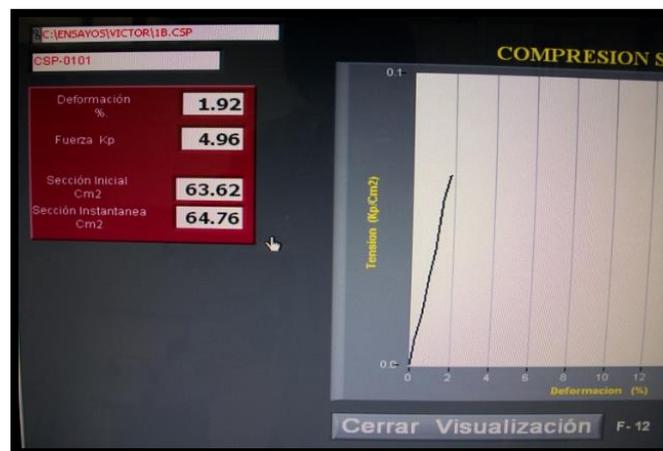


Figura A.7- Lector de aparato compresión (tomado de guía de ingeniería del terreno GIT).

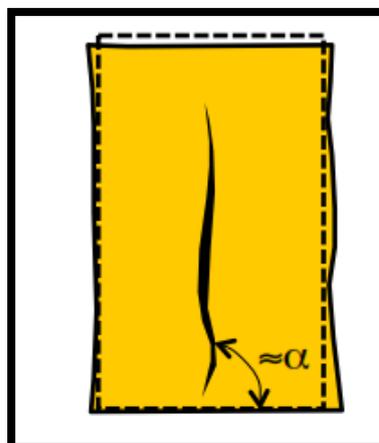


Figura A.8- Esquema de la forma de rotura de la probeta ensayada (tomado de guía de ingeniería del terreno GIT).

6.1. Cálculo de Resistencia a compresión

La resistencia a la compresión simple (q_u) del suelo se expresa como el cociente de la carga de rotura (N_R) y el área corregida de la probeta (A_c).

$$q_u = \frac{N_R}{A_{C,rotura}} \quad \text{Ec.A.8}$$

Donde:

N_R : Es el valor antes alcanzado entre N_{max} y $N_{15\%}$. (Ver **Figura A.7**).

$A_{C,rotura}$: Área de rotura de la probeta (Ver **Figura A.7**).

N_{max} : Valor de la carga máxima alcanzada.

$N_{15\%}$: Valor correspondiente al 15% de deformación.

\emptyset : Diámetro de la probeta.

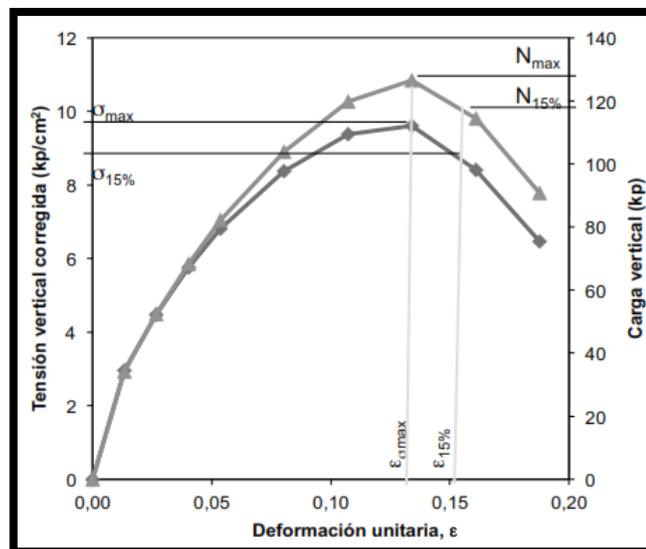


Figura A.9- Diagrama esfuerzo-deformación (tomado de guía de ingeniería del terreno GIT).

$$A_c = \frac{\pi \frac{\emptyset^2}{4}}{1 - \varepsilon}$$

Siendo el valor del área corregida en rotura ($A_{c,rotura}$) el calculado con la expresión anterior para $\varepsilon = \varepsilon_{rotura}$.

Figura A.10- Área de rotura de la probeta (tomado de guía de ingeniería del terreno GIT).

7. Ensayo de penetración estándar (SPT)

Según la norma ASTM D1586 Se trata de uno de los ensayos más utilizados en el ámbito de la geotecnia por su sencillez, rapidez y economía, es un tipo de prueba de penetración dinámica, empleada para ensayar terrenos en los que se quiere realizar un reconocimiento del terreno.

El ensayo SPT básicamente consiste en la hincas en el terreno de una puntaza metálica mediante golpes por lo que da idea de la resistencia del terreno ya que se contabilizan el número de golpes necesarios para clavar el ensayo, pero debido a su amplio uso, este ensayo puede correlacionarse con otros parámetros geotécnicos como veremos en los siguientes apartados.

La prueba **SPT** puede afectarse por diferentes factores como son la longitud del varillaje, presencia del nivel freático o dispositivo de golpeo (manual o automático). Por ello el golpeo N debe corregirse en función de estos factores. Se contabiliza y se anota el número de golpes necesarios para hincar la cuchara los primeros 15 cm (N_{15-30} y N_{30-45}), el resultado del ensayo es el golpeo SPT o resistencia a la penetración estándar y corresponde a la suma de golpes necesarios para introducir la toma muestras en los dos últimos intervalos.

$$N_{60} = N_{15-30} + N_{30-45} \quad \text{Ec.A.9}$$

8. Clasificación de compacidad de arenas

N	CLASIFICACIÓN
< 5	Muy floja
5-10	Floja
11-30	Media
31-50	Densa
> 50	Muy densa

Tabla A.3- Compacidad en arenas según N del SPT (tomado de guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. **TablaA.6.2**).

9. Consistencia de suelos arcillosos

CONSISTENCIA DE LOS SUELOS ARCILLOSOS	RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE (kN/m ²)	ENSAYO MANUAL
Muy blanda	0 - 25	Se extruye entre los dedos
Blanda	25 - 50	Se puede moldear fácilmente
Media	50 - 100	Se moldea con dificultad
Firme	100 - 200	Se puede deformar con el dedo pulgar
Muy firme	200 - 500	Se puede arañar con la uña del pulgar
Dura	> 500	Difícil de arañar

Tabla A.4- Consistencia de suelos arcillosos (tomado de guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. **TablaA-6.4**).

10. Correlación de ensayos SPT y CPT

El valor del índice **N** del ensayo de penetración estándar SPT puede relacionarse con la resistencia por punta q_c , del ensayo de penetración con el cono **CPT**, en función del tamaño medio de las partículas del suelo D_{50} , de acuerdo a la **Figura A.11**.

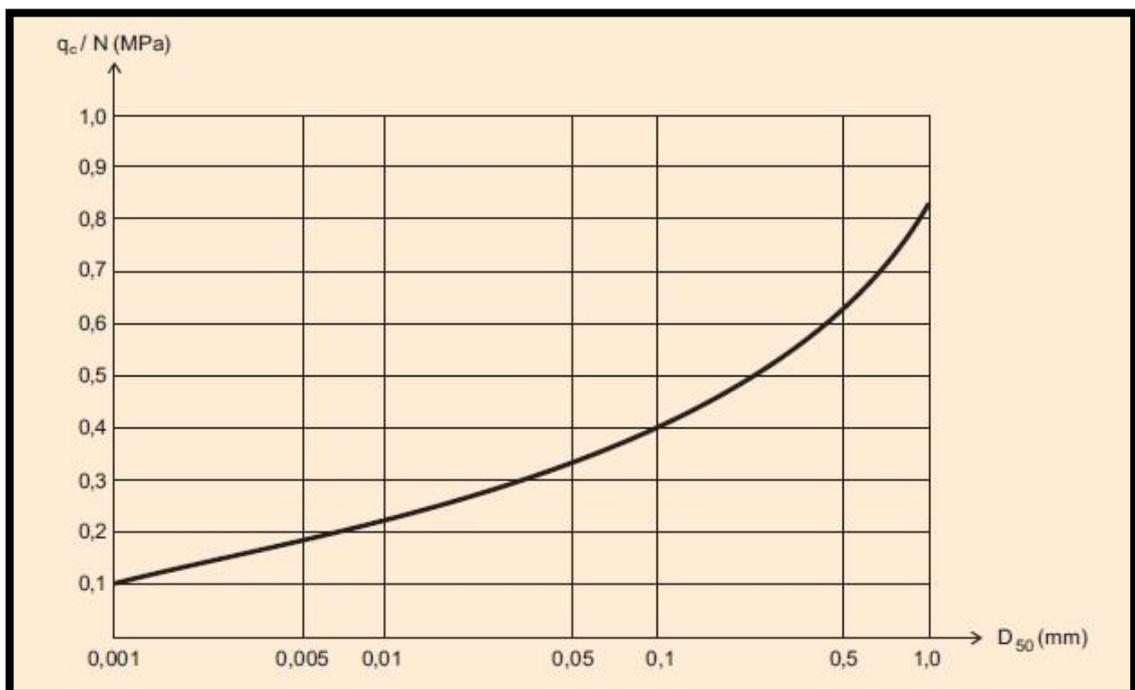


Figura A.11- Correlación $D_{50}, q_c/N$ (tomado de guía de cimentaciones en obras de carreteras. **Figura A.6.1**).

ANEXO C: PRUEBAS DE CARGA

El mecanismo principal para la transferencia de las cargas a los micropilotes es la fricción lateral. Los movimientos necesarios para movilizar la resistencia lateral de un micropilote son pequeños en comparación con los necesarios para movilizar la punta del mismo (20 o 40 veces menos). La fricción lateral depende de la unión inyección-terreno que está influenciado principalmente por las técnicas y la calidad de la construcción. La fricción lateral se mejora principalmente por tres factores:

- Aumento de diámetro.
- Aumento de la presión lateral de inyección.
- Resistencia de terreno.

1. Ensayo de carga axial de compresión

Procedimiento normal de carga. Se debe fijar la carga máxima de ensayo previamente a la realización de la prueba de carga, que se puede tomar, a modo de ejemplo como el doscientos por ciento (200%) de la sollicitación nominal si trabaja aisladamente, o el ciento cincuenta por ciento (150%) de la misma, si lo hace en grupo.

La carga se aplica en escalones mediante incrementos del veinticinco por ciento (25%) de la de diseño. Cada escalón de carga se mantiene hasta que se produzca alguna de las siguientes circunstancias:

- Que transcurra dos horas (2h) desde la aplicación del escalón de carga.
- Que la velocidad de asiento sea inferior o igual a veinticinco centésimas de milímetros por hora ($v_s \leq 0,25 \text{ mm/h}$).

Si para cuando se completan los escalones de carga no se ha producido el fallo por hundimiento, se retira la carga de la siguiente forma:

- Si transcurrida una hora (1h) el asiento no supera las veinticinco centésimas de milímetro ($S_{TOT} \leq 0,25 \text{ mm}$), se quita toda la carga en cualquier momento dentro de las doce horas (12h) siguientes.
- En caso contrario, se dejará que el pilote permanezca cargado durante veinticuatro horas (24 h) más, para después retirar la carga en cuatro

(4) escalones del veinticinco por cientos (25%) de la carga total y una hora (1 h) de duración cada uno.

En caso de que se hubiera alcanzado el fallo del micropilote por hundimiento. Se mantendría la carga actuante hasta que el asiento fuese igual al quince por ciento del diámetro nominal del micropilote ($S_{TOT} = 0,15D$).

La norma establece una serie de procedimientos opcionales de carga:

- Carga superior a la del procedimiento normal. Una vez que se ha procedido a la descarga según el procedimiento normal, se vuelve a cargar el pilote hasta alcanzar idénticos valores de carga. Posteriormente se va aumentando la sollicitación en escalones de veinte (20) minutos de duración y diez por ciento (10%) de la carga de diseño, hasta alcanzar el fallo por hundimiento, o la carga máxima requerida.
- Procedimientos de intervalos de tiempo constantes. Método análogo al procedimiento normal, aunque con escalones de carga y descarga de una hora (1 h) de duración.
- Método de velocidad de asiento constante para pilotes aislados. Se carga el pilote de forma creciente y continua, controlando la velocidad de asiento. Se mantiene el proceso hasta que se produzca el fallo por hundimiento.
- Método rápido de carga para pilotes aislados. Se aplican escalones de carga sucesivos de dos min y medio (2,5 min) de duración y del diez al quince por ciento (10 al 15%) de la carga de diseño. Se mantiene el proceso hasta llegar al hundimiento o a la máxima carga que puede proporcionar el equipo.
- Método de incrementos de asiento constantes para pilotes aislados. Se aplican los incrementos de cargas necesarios para producir incrementos de asientos de aproximadamente el uno por ciento del diámetro nominal del pilote ($\Delta_s = 0,001 D$).
- Carga cíclica. Método bastante similar al procedimiento normal, en el que se produce la repetición de fases de carga y descarga.

2. Ensayo de carga axial de tracción

Los procedimientos de aplicación son esencialmente análogos a los de compresión, si bien habrán de entenderse referidos a cargas de tracción lo especificado para las compresiones, a levantamientos lo relativo a asientos, y a fallo por arrancamiento lo tocante al hundimiento.

Por sus especiales características, el método de los incrementos constantes de asiento para pilotes aislados no resulta de aplicación para esfuerzos de tracción.

3. Ensayo de carga lateral

Procedimiento normal de carga. Método de ensayo en el que se llega a solicitaciones de hasta el doscientos por ciento (200%) de la carga lateral nominal, siguiendo un patrón de carga que dura unas cuatro horas (4 h), en el que debe prestar especial atención a la limitación de las cargas laterales, hasta alcanzar el valor que produzca unos movimientos preestablecidos.

La norma establece una serie de procedimientos opcionales de carga:

- Carga superior a la del procedimiento normal. Después de cargar y descargar el pilote siguiendo el procedimiento normal se vuelve a cargar hasta alcanzar de nuevo la misma sollicitación, posteriormente se aplican escalones de carga adicionales del diez por ciento (10%) de carga de diseño y quince minutos (15min) de duración cada uno, hasta llegar a un valor máximo de la carga especificado previamente.
- Carga cíclica. Se proponen patrones cíclicos de carga para los dos procedimientos recién referidos.
- Cargas inversas. Este procedimiento de carga implica la sollicitación del pilote mediante cargas laterales de empuje y tiro. El pilote se ensaya según alguno de los métodos ya descritos y posteriormente se invierte el sentido de la carga.
- Carga reciproca. Bastante similar al método anterior, si bien invierte el sentido de cada escalón de carga.

4. Cargas combinadas

Cuando el micropilote este sometidos a sollicitaciones combinadas (axiales y laterales) se aplicará en primer lugar la carga axial y una vez estabilizada, se procederá según alguno de los métodos ya descritos para cargas laterales, manteniendo la carga axial constante.

5. Montaje de la prueba de carga

Para la realización de estas pruebas de carga (axiales y laterales) se suelen utilizar sistemas de cargas con gatos hidráulicos y dispositivos de reacción.

De los dispositivos de reacción, los más frecuentes son los micropilotes adyacentes de reacción, los anclajes (en posición vertical o inclinada) y las zapatas o losas que transmitan al terreno la reacción necesaria para las pruebas, como se muestran algunos ejemplos en las siguientes figuras:

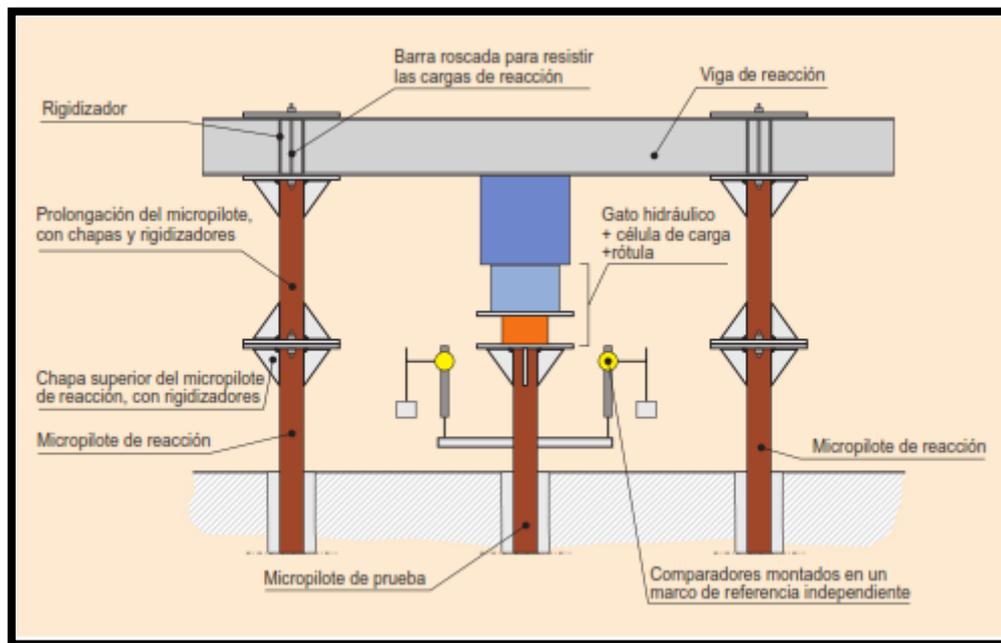


Figura A.12- Posible disposición para el ensayo de compresión (tomado de guía de cimentaciones en obras de carreteras. **Figura A-2.1**).

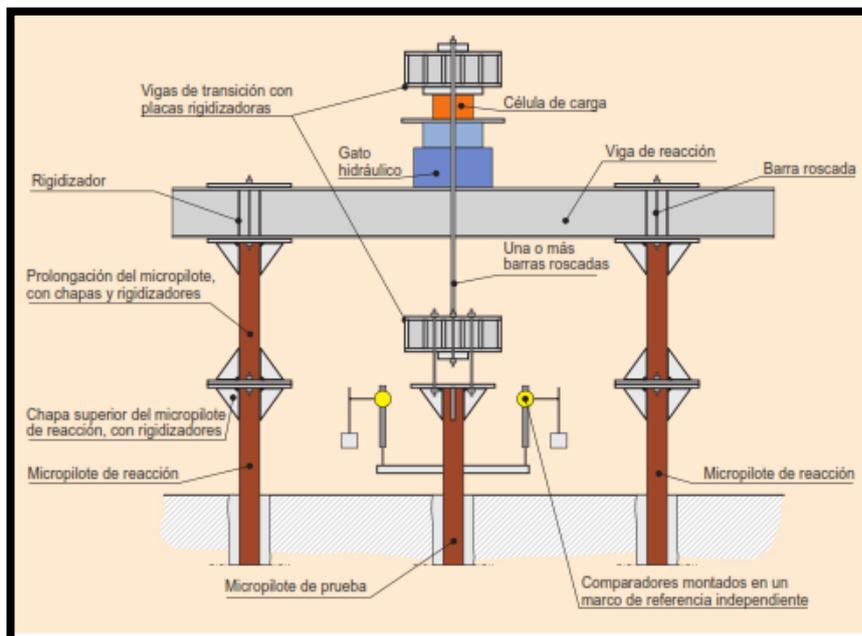


Figura A.13- Posible disposición para el ensayo de tracción (tomado de guía de cimentaciones en obras de carreteras. **Figura A-2.2).**

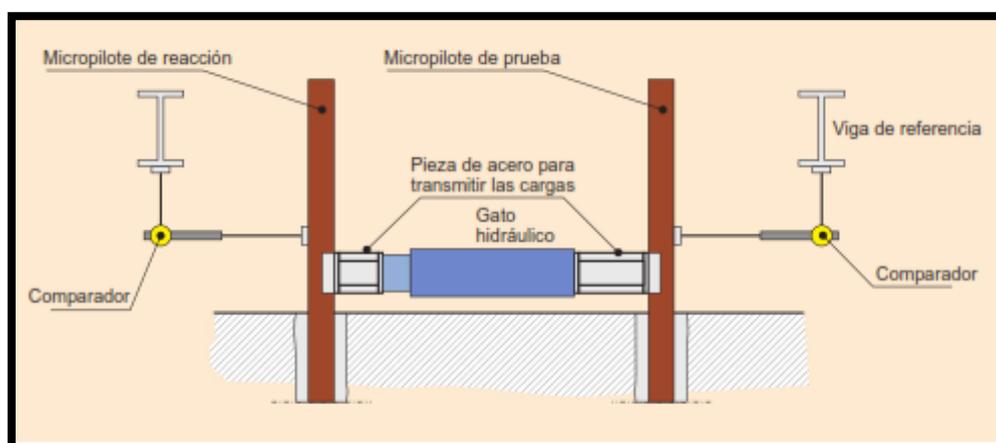


Figura A.14- Posible disposición para el ensayo de carga lateral (tomado de guía de cimentaciones en obras de carreteras. **Figura A-2.3).**

6. Instrumentación de las cargas de prueba

- **Comparadores:** Los desplazamientos verticales y laterales se suelen medir mediante comparadores o extensómetros (mecánicos o eléctricos), con precisiones de hasta veinticinco micras ($25 \mu m$). Dichos dispositivos deben instalarse en vigas de referencia independientes situadas, como mínimo, a dos metros (2m) de distancia del micropilote de prueba. Se tomará como valor del desplazamiento, preferiblemente la media aritmética de las lecturas de tres comparadores distintos.

- **Cable y espejos con escala:** Se puede determinar el movimiento de la cabeza del micropilote utilizando un espejo con escala montado sobre el mismo y un cable de referencia delante del espejo, que va anclado a una referencia independiente. Se leerá la medida ajustando la visual hasta que el cable este alineado con su reflejo. Este método se puede usar para contrastar los datos del comparador, si bien presenta una menor precisión.
- **Equipos topográficos:** También se puede controlar el desplazamiento del micropilote mediante equipos topográficos. Al igual que en el caso del cable con espejo, este sistema permite contrastar los datos recogidos con los comparadores si bien resulta, en general, menos preciso.
- **Células de carga:** Las células de carga se pueden utilizar como método de contraste adicional para medir la carga aplicada. Resultan una herramienta útil para mantener, de forma precisa. Al disponer las células en el montaje de la prueba, se debe prestar especial atención a la alineación de la célula con los ejes del micropilote y el gato hidráulico.
- **Extensómetro:** La instalación de extensómetros a distintas alturas en la armadura tubular, permite los esfuerzos que soporta la misma. Se debe cuidar especialmente el proceso de instalación para evitar que los propios equipos o cables de conexión sufran daños. Pueden resultar especialmente adecuado para este tipo de aplicaciones los de cuerda vibrante.
- **Extensómetro de varilla:** Compuesto por varillas de metal o fibra de vidrio que van ancladas a la lechada del micropilote y que, dispuestas a distintas alturas, proporcionan datos sobre los desplazamientos longitudinales en dichos puntos. Uno de los extremos de la varilla queda incrustado en la lechada a la altura deseada y el resto se encuentra cubierto por una funda, para permitirle libertad de movimiento.

Se debe medir el desplazamiento del extremo superior de la varilla mediante comparadores o instrumentos electrónicos de medida. Han de adoptarse

precauciones durante la instalación para no deteriorar las varillas y evitar que la funda se llene de lechada.

7. Cálculo de la resistencia por fuste

El valor de la resistencia característica por fuste a esfuerzos de compresión de un micropilote $R_{fc,k}$, podrá deducirse de los valores medidos anteriormente, mediante la siguiente expresión:

$$R_{fc,d} = \frac{\text{mín} \left[\frac{R_{c,med}}{F_{med}}, \frac{R_{c,min}}{F_{min}} \right]}{F_{fc}}$$

Donde:

Ec.A.10

$R_{fc,d}$: Resistencia de cálculo por fuste a esfuerzos de compresión.

$R_{c,med}$: Resistencia media en n_c pruebas de carga.

$R_{c,min}$: Resistencia mínima en n_c pruebas de carga.

F_{med} : coeficiente aplicable al valor medio de los resultados. Ver **Tabla A.5**

F_{min} : coeficiente aplicable al valor mínimo de los resultados. Ver **Tabla A.5**

COEFICIENTE	NÚMERO DE ENSAYOS DE CARGA, n_c				
	1	2	3	4	≥ 5
F_{med}	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00
F_{min}	1,40	1,20	1,05	1,00	1,00

Tabla A.5- Coeficiente F_{med}, F_{min} (tomado de guía para el proyecto y ejecución de micropilotes. **TablaA-2.1**).

F_{fc} : Coeficiente de minoración de la resistencia característica por fuste. Salvo justificación expresa, deberá adoptarse un valor de $F_{fc} = 1.3$

Análogamente el valor de cálculo por fuste de un micropilote frente a esfuerzos de tracción, se podrá deducir mediante el procedimiento anteriormente indicado para compresión, pero llevándolo hasta provocar el arrancamiento.

