

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**EJECUCIÓN DE MICROPILOTES COMO PANTALLA  
PARA EXCAVACIÓN DE TÚNEL – APLICACIÓN AL  
PROYECTO VÍA PARQUE RÍMAC**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**Para optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO CIVIL**

**PERCY EDWIN CHINCHAY CORDOVA**

**Lima- Perú**

**2015**

***“Es necesario ser perseverantes y no tener miedo al fracaso para darnos cuenta que nuestro límite está más allá de lo que nuestros ojos ven” (Elaboración propia)***

***A mis padres y hermanos, con todo cariño***

	N° Pág.
<b>RESUMEN</b> .....	<b>4</b>
<b>LISTA DE CUADROS</b> .....	<b>5</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>6</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS</b> .....	<b>11</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>13</b>
<b>CAPÍTULO I: ANTECEDENTES</b> .....	<b>14</b>
1.1. REFERENCIA HISTÓRICA DE LOS MICROPILOTES .....	14
<b>CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
2.1. DEFINICIÓN .....	17
2.2. CLASIFICACIÓN .....	18
2.2.1. Según la forma de transmisión de los esfuerzos al terreno ----	18
2.2.2. Según el tipo de sollicitación dominante a la que están sometidos .....	19
2.2.3. Según el sistema de inyección de la lechada o mortero de cemento .....	19
2.3. CAMPOS DE APLICACIÓN .....	19
2.3.1. Estructuras de cimentación .....	19
2.3.2. Estructuras de contención o sostenimiento del terreno ----	21
2.3.3. Estabilización de taludes o laderas .....	22
2.3.4. Paraguas de sostenimiento .....	22
2.3.5. Mejora del terreno .....	23
2.4. MATERIALES Y EQUIPOS .....	23
2.4.1. Materiales .....	24
2.4.2. Equipos .....	30

<b>CAPÍTULO III: PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO</b> .....	<b>34</b>
3.1. PERFORACIÓN .....	35
3.1.1. Características geométricas .....	38
3.1.2. Sistemas de perforación .....	40
3.1.3. Principales precauciones a adoptar en la perforación .....	41
3.2. COLOCACIÓN DE ARMADURA .....	42
3.3. INYECCIÓN .....	44
3.4. CONEXIÓN CON EL RESTO DE ESTRUCTURAS .....	45
<b>CAPÍTULO IV: APLICACIÓN AL PROYECTO VÍA PARQUE RÍMAC</b> –	<b>47</b>
4.1.1. Caracterización Geológica .....	50
4.1. CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO .....	50
4.1.2. Caracterización del Suelo .....	50
4.1.3. Caracterización Geotécnica – Sísmica .....	50
4.1.4. Parámetros Geotécnicos .....	51
4.2. EJECUCIÓN DE PANTALLA DE MICROPILOTES Y	52
CONSTRUCCIÓN DE TÚNEL .....	
4.2.1. Características y distribución de micropilotes .....	56
4.2.2. Características y distribución de anclajes .....	58
4.2.3. Sondeos de exploración .....	62
4.2.4. Procedimiento constructivo de túnel en puente Trujillo – Zona	64
de ejecución de pantalla de micropilotes .....	
4.3. CONTROLES DE CALIDAD .....	66
4.3.1. Ensayos de calidad para control de micropilotes ejecutados ..	81
4.3.2. Control diario de partes de trabajo de producción .....	81
4.3.3. Control de Ejecución .....	83
4.3.4. Control de materiales .....	85
4.4. COSTOS DE OBRA .....	85
4.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS .....	88
4.5.1. Ventajas .....	89
4.5.2. Desventajas .....	89
	91

<b>CAPÍTULO V: PROBLEMAS CONSTRUCTIVOS</b> .....	<b>92</b>
<b>CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>99</b>
6.1. CONCLUSIONES .....	99
6.2. RECOMENDACIONES .....	102
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>105</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>106</b>
A.1. PLANOS DE PROYECTO VÍA PARQUE RÍMAC .....	106

## RESUMEN

El presente informe de suficiencia presenta una metodología de ejecución de pantalla de micropilotes para el sostenimiento de taludes en la excavación que se requiere para la construcción de un túnel de una longitud de dos kilómetros aproximadamente, que pasará debajo del río Rímac aliviando considerablemente el flujo de tránsito de la Vía Evitamiento e integrando once distritos de Lima.

Este informe tiene una estructura de seis capítulos en los cuales se desarrolla la ejecución de micropilotes como tal y que surgen como solución geotécnica ante el problema de construir el túnel debajo del río Rímac sin alterar la estructura del puente de Piedra, hoy en día llamado como puente Trujillo, el cual es considerado patrimonio cultural de la nación por la UNESCO.

En el capítulo I se presenta una visión general de la ejecución de los micropilotes a lo largo del tiempo y la relevancia de uso que ha ido teniendo en las obras de ingeniería.

En el capítulo II se aborda el fundamento teórico que involucra la ejecución de micropilotes como solución geotécnica.

En el capítulo III se explica el procedimiento constructivo de los micropilotes en el cual se puede resaltar las tres principales etapas que son: perforación, colocación de armadura e inyección del micropilote.

En el capítulo IV se hace incidencia en la ejecución y aplicación de micropilotes como solución geotécnica para la construcción de túnel en el proyecto Vía Parque Rímac.

En el capítulo V se menciona los posibles problemas constructivos que se suscitan al momento de la ejecución de micropilotes y que pueden reflejarse seriamente en sobrecostos y tiempos improductivos.

En el capítulo VI son presentadas algunas conclusiones y recomendaciones que pueden derivarse de este trabajo, en donde se menciona aspectos de gran relevancia referentes a la ejecución de micropilotes.

## LISTA DE CUADROS

	Nº Pág.
Cuadro Nº 1. Características orientativas sobre ejecución de micropilotes -----	18
Cuadro Nº 2. Límites elásticos de los aceros de armaduras tubulares más empleados en la ejecución de micropilotes -----	24
Cuadro Nº 3. Diámetros más habituales de perforación (Dp) de micropilote de diámetro (D) y armadura tubular (De) en milímetros -----	39
Cuadro Nº 4. Insumos utilizados en construcción de túnel -----	47
Cuadro Nº 5. Parámetros geotécnicos referenciales característicos del suelo -----	53
Cuadro Nº 6. Perfil estratigráfico - Sondeo diamantino Nº 1 -----	54
Cuadro Nº 7. Perfil estratigráfico - Sondeo diamantino Nº 2 -----	55
Cuadro Nº 8. Características de anclajes en sistema de contención con pantalla de micropilotes -----	64
Cuadro Nº 9. Ensayos de Integridad para control de calidad de micropilotes -----	86

## LISTA DE FIGURAS

	Nº Pág.
Figura Nº 1. Esquema de cimentación de nueva planta con micropilotes -----	20
Figura Nº 2. Esquema de recalce de cimentaciones preexistentes mediante micropilotes -----	20
Figura Nº 3. Recalce de estructura existente para excavación de sótanos en Alcántara, Lisboa -----	21
Figura Nº 4. Esquema de micropilotes como estructura de cimentación o sostenimiento -----	21
Figura Nº 5. Contención con pantalla de micropilotes en excavación bajo el puente Ricardo Palma – Lima -----	21
Figura Nº 6. Contención con pantallas de micropilotes en Málaga – España -----	22
Figura Nº 7. Esquema de micropilotes para estabilización de taludes o laderas -----	22
Figura Nº 8. Esquema de micropilotes como paraguas de sostenimiento -----	23
Figura Nº 9. Esquema de micropilotes como mejora del terreno ---	23
Figura Nº 10. Armaduras tubulares de acero para micropilotes -----	25
Figura Nº 11. Esquema de sarta de perforación -----	28
Figura Nº 12. Sarta de perforación -----	28
Figura Nº 13. Sarta de perforación con tubería de revestimiento ----	28
Figura Nº 14. Brocas de perforación -----	29
Figura Nº 15. Zapata para perforación -----	29
Figura Nº 16. Tuberías de revestimiento roscadas y barra de perforación API -----	30
Figura Nº 17. Equipo de inyección de lechada de cemento -----	31
Figura Nº 18. Central de inyección de micropilotes – Puente Trujillo	31
Figura Nº 19. Equipo de perforación de micropilotes – Puente Trujillo	32
Figura Nº 20. Equipos de suministro de aire – Compresoras y pulmón de aire -----	33
Figura Nº 21. Mini-excavadora con brazo hidráulico -----	33

Figura N° 22.	Fases de proceso constructivo de micropilotes - - - - -	34
Figura N° 23.	Diagrama de flujo de procedimiento constructivo de micropilotes - - - - -	35
Figura N° 24.	Muro guía de micropilotes en Vía Evitamiento - - - - -	37
Figura N° 25.	Muro guía de micropilotes Ricardo Palma - - - - -	37
Figura N° 26.	Posicionamiento del equipo - - - - -	38
Figura N° 27.	Perforación de micropilotes a bajo gálibo – Puente Trujillo - - - - -	38
Figura N° 28.	Unión simple macho – hembra - - - - -	42
Figura N° 29.	Unión con manguito interior macho - - - - -	42
Figura N° 30.	Unión con manguito macho – hembra - - - - -	43
Figura N° 31.	Colocación de armadura de micropilote - - - - -	43
Figura N° 32.	Armadura colocada en micropilote perforado - - - - -	44
Figura N° 33.	Vista en planta de micropilote inyectado – Puente Trujillo - - - - -	45
Figura N° 34.	Ejecución de viga de coronación de pantalla de micropilotes en el puente Ricardo Palma - Lima - - - -	46
Figura N° 35.	Esquema de túnel debajo del río Rímac – proyecto Vía Parque Rímac - - - - -	47
Figura N° 36.	Sistemas de estabilización utilizados en la excavación de túnel Vía Parque Rímac - - - - -	48
Figura N° 37.	Sistemas de estabilización y contención Soil-Nailing – Tramo entre los puentes Trujillo y Ricardo Palma - - - -	48
Figura N° 38.	Sistemas de estabilización y contención con pantalla de micropilotes – Tramo Vía Evitamiento antes del Puente Santa Rosa - - - - -	49
Figura N° 39.	Mapa geológico de la ciudad de Lima Ingemmet (1992) e Ingeniero A. Martínez Vargas (1976) - - - - -	50
Figura N° 40.	Figura N° 40. Mapa de distribución de tipos suelos de la ciudad de Lima – Ing. A. Martínez Vargas (1975) CISMID (2003) - - - - -	51
Figura N° 41.	Mapa de zonificación sísmica de la ciudad de Lima – CISMID (2004) - - - - -	52
Figura N° 42.	Muestra N° 1 de suelo característico en la zona de trabajo - - - - -	53

Figura N° 43.	Muestra N° 2 de suelo característico en la zona de trabajo -----	53
Figura N° 44.	Bolones obtenidos en muestreo del suelo -----	54
Figura N° 45.	Señalética en obra de protección al puente Trujillo considerado patrimonio cultural de la UNESCO -----	57
Figura N° 46.	Sección de micropilotes verticales -----	58
Figura N° 47.	Referencia de espaciamiento entre micropilotes -----	59
Figura N° 48.	Vista en planta de distribución de micropilotes en Puente Trujillo -----	59
Figura N° 49.	Distribución de micropilotes tipo A y D en el Pilar 1 del Puente Trujillo -----	60
Figura N° 50.	Distribución de micropilotes tipo A y D en el Pilar 4 del Puente Trujillo -----	60
Figura N° 51.	Distribución de micropilotes tipo B en el Pilar 2 del Puente Trujillo -----	61
Figura N° 52.	Distribución de micropilotes tipo B en el pilar 3 del Puente Trujillo -----	61
Figura N° 53.	Distribución de micropilotes tipo C -----	62
Figura N° 54.	Esquema de forma y composición de anclajes -----	63
Figura N° 55.	Ejecución de anclajes en pantalla de micropilotes puente Ricardo Palma -----	64
Figura N° 56.	Sondeo vertical en pilares 2 y 3 del Puente Trujillo ---	65
Figura N° 57.	Resultado de muestras de sondeo vertical en pilares 2 y 3 del Puente Trujillo -----	65
Figura N° 58.	Trabajos de sondeo horizontal en pilares del Puente Trujillo -----	65
Figura N° 59.	Sondeo horizontal en pilares 2 y 3 del Puente Trujillo -	66
Figura N° 60.	Resultado de muestras de sondeo horizontal en pilares 2 y 3 del Puente Trujillo -----	66
Figura N° 61.	Vista en elevación de la excavación a realizar -----	67
Figura N° 62.	Mezcla pobre de cemento en cabeza de micropilote --	68
Figura N° 63.	Vista en planta de micropilotes, encepados y vigas de amarre y coronación -----	68
Figura N° 64.	Vista en elevación de micropilotes, encepados y vigas de amarre y coronación -----	69

Figura N° 65.	Sección transversal de pilar del puente -----	69
Figura N° 66.	Sección de micropilotes horizontales como paraguas de sostenimiento de excavación de galerías -----	70
Figura N° 67.	Alternativa A para sostenimiento de galerías horizontales -----	70
Figura N° 68.	Alternativa B para sostenimiento de galerías horizontales -----	70
Figura N° 69.	Vista en elevación de vigas de apeo -----	71
Figura N° 70.	Vista en planta de vigas de apeo -----	71
Figura N° 71.	Vista en elevación de vigas de reparto, coronación y primer nivel de anclajes -----	72
Figura N° 72.	Vista en planta de vigas de reparto -----	72
Figura N° 73.	Vista en elevación de postesado de vigas de apeo ---	73
Figura N° 74.	Vista en planta de orden de postesado de vigas de apeo -----	73
Figura N° 75.	Vista en elevación de cimbrado de arcos y arriostramiento de vigas de reparto -----	74
Figura N° 76.	Vista en planta de cimbrado de arcos y arriostramiento de vigas de reparto -----	74
Figura N° 77.	Vista en elevación de ubicación de gatos hidráulicos y primera zona de excavación -----	75
Figura N° 78.	Sección trasversal de los pilares centrales 2 y 3 – Puente Trujillo -----	75
Figura N° 79.	Vista en planta de zona a excavar después de poner en marcha el sistema de apeo mediante gatos hidráulicos -----	75
Figura N° 80.	Vista en elevación de segunda excavación y saneo de base de pilares -----	76
Figura N° 81.	Vista en elevación de ejecución de losa superior de túnel y conexión con micropilotes, impermeabilización de base de pilares -----	77
Figura N° 82.	Empresillado de micropilotes verticales para sistema de apeo -----	77

Figura N° 83.	Vista en elevación de ejecución de anclajes en pantalla de micropilotes y excavación hasta nivel superior de base de túnel -----	78
Figura N° 84.	Perfil de pantalla de micropilotes con niveles de anclajes -----	78
Figura N° 85.	Vista en elevación de corte de micropilotes verticales, retiro de gatos hidráulicos y descimbrado de arcos ---	79
Figura N° 86.	Vista en planta de micropilotes a cortar -----	80
Figura N° 87.	Vista en elevación de relleno de y enrocado de lecho de río Rímac -----	80
Figura N° 88.	Vista en elevación de túnel terminado debajo del río Rímac -----	80
Figura N° 89.	Vista en planta de lecho de Río debajo del Puente Trujillo -----	81
Figura N° 90.	Control de verticalidad en la perforación del micropilote	84
Figura N° 91.	Esquema de ensayos PIT en micropilotes -----	86
Figura N° 92.	Ejecución de ensayos PIT en micropilotes de frente Vía Evitamiento -----	87
Figura N° 93.	Falta de drenaje adecuado que impide continuar la perforación de micropilotes de manera segura -----	97
Figura N° 94.	Destrucción de material rocoso para evitar problemas en la ejecución de micropilotes como desviaciones y rotura de materiales -----	97
Figura N° 95.	Martillo atrapado en pozo de perforación -----	97
Figura N° 96.	Recuperación de martillo y broca -----	98
Figura N° 97.	Rotura de tubería de revestimiento en el fondo -----	98

## LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

a/c	Relación agua cemento
API	American Petroleum Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
ASTM D1143	Norma referente a cargas axiales de compresión
ASTM D3689	Norma referente a cargas axiales de tracción
ASTM D3966	Norma referente a cargas laterales
CISMID	Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres
c	Cohesión
cm	Centímetros
D85	Tamiz que pasa el 85% de la muestra
D100	Tamiz que pasa el 100% de la muestra
D	Diámetro nominal de micropilote con o sin tubería de revestimiento
De	Diámetro exterior de armaduras
Dp	Diámetro de perforación
DIWIDAG	Barra de acero cuya denominación se remonta a la fundación de Dyckerhoff & Widmann AG
E	Módulo de Young
$f_{ck}$	Resistencia característica a compresión de la lechada de cemento a 28 días
$f_{ck,7}$	Resistencia característica a compresión de la lechada de cemento a 7 días
Fy	Límite elástico de armadura metálica
GP	Grava mal gradada
IR	Inyección repetitiva
IRS	Inyección repetitiva selectiva
IU	Inyección única global
kg	Kilogramo
KN	Kilonewton
Lt	Litro
M.F.S.	Martillo de fondo de sondeo
m	Metros

m <sup>2</sup>	Metro cuadrado
m <sup>3</sup>	Metro cubico
mm	Milímetros
mm <sup>2</sup>	Milímetros cuadrados
Mpa	Megapascales
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
N	Newton
PIT	Pile Integrity Testing – Prueba de integridad en pilotes
Qp-al	Depósitos aluviales referentes a la clasificación geológica de la ciudad de Lima
S	Factor de amplificación sísmica por efecto local del suelo referente a la norma de diseño sismorresistente E.030
S 460	Armadura con límite elástico de 460 megapascales
S 420	Armadura con límite elástico de 420 megapascales
S 355	Armadura con límite elástico de 355 megapascales
S 275	Armadura con límite elástico de 275 megapascales
S 235	Armadura con límite elástico de 235 megapascales
TM	Tamaño máximo
TM80	Tubería de acero N80 según norma API como armadura metálica de micropilotes
Tn	Tonelada
Tp	Período natural del suelo referente a la norma de diseño sismorresistente E.030
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
UNI	Universidad Nacional de Ingeniería
w	Contenido de humedad
y	Peso Unitario
ΔD	Diferencia de diámetro nominal real del micropilote respecto al proyecto
ΔL	Diferencia de longitud de perforación real respecto al proyecto
Δi	Inclinación del taladro de perforación respecto al eje del micropilote
ϕ	Angulo de Fricción

## INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo, la Ingeniería Civil ha desarrollado tecnologías y procesos técnicos de construcción que permiten un eficiente aprovechamiento de los espacios físicos dentro de las obras civiles. En este aspecto ha sido determinante la ejecución de micropilotes, pilotes raíz o minipilotes como son llamados en las diversas obras de ingeniería en el mundo. Aunque su ejecución en un principio se debió a un uso exclusivo en cimentaciones profundas, en la actualidad los micropilotes son elementos muy versátiles, pues forman parte de numerosas soluciones geotécnicas como: pantallas de contención, estabilización de taludes, mejoramiento de capacidad portante en suelos, drenaje, recalces en cimentaciones, paraguas de sostenimiento, etc. y además su construcción es indicada en terrenos que presentan algún tipo de dificultad como: espacios reducidos, terrenos rígidos y heterogéneos, gálibos estrictos (restricción en altura de perforación), condiciones geotécnicas especiales, etc.

Respecto al proyecto Vía Parque Rímac la contención de los taludes para excavación y construcción del túnel debajo del río Rímac fue mediante diversas soluciones geotécnicas (Pantalla de pilotes, pantalla de micropilotes, sistema Soil-Nailing con anclajes activos y pasivos) en todo el frente de trabajo. Sin embargo, en este informe se abordó la ejecución de pantallas de micropilotes específicamente en el Puente Trujillo por la relevancia en cuanto a innovación y procesos constructivos se refiere, pues la construcción del túnel es la obra central de todo el proyecto Vía Parque Rímac, debido a que en el Perú nunca se ha ejecutado una obra vial debajo de un río, y menos debajo de un puente o alguna estructura antigua, lo cual implica un alto costo y requiere de experiencia, conocimiento y tecnología especializada. Existen experiencias similares en ciudades como Santiago de Chile (Américo Vespucio) y Madrid (M-30).

Por otro lado los micropilotes en el puente Trujillo también se ejecutarán para la contención de los pilares centrales de dicho puente, donde será necesario gatos hidráulicos que transfieran la carga de los pilares a las cimentaciones de los micropilotes, además se ejecutarán paraguas de micropilotes horizontales para hacer las vigas de apeo. Esto nos manifiesta la gran importancia y variabilidad funcional de los micropilotes en el proyecto Vía Parque Rímac.

## CAPÍTULO I

### ANTECEDENTES

#### 1.1. Referencia histórica de los micropilotes

Los micropilotes surgieron en Italia en la década de 1950, como una solución geotécnica para mejorar las fundaciones de monumentos y principales edificios históricos como la Torre de Pisa. Su concepción original se debe al ingeniero civil Fernando Lizzi (2 enero de 1914 - 28 agosto del 2003), considerado padre de la tecnología del micropilote por desarrollar un sistema de fundación constituido por varios grupos de pilotes pequeños que en conjunto formaban una masa de suelo reforzado actuando geotécnicamente con un comportamiento similar al sistema de raíces de los árboles. La primera patente de los micropilotes se dio en 1952.

Generalmente nos referimos a los pilotes de pequeño diámetro con el término "micropilotes", sin embargo existe una gran profusión de términos en diferentes idiomas:

- Italiano: "Pali radice". "Micropali" (en singular "Pali radice". "Micropalo").
- Francés: "Pieux racines". "Pieux aiguilles", "Micro pieux".
- Inglés: "Micropile". "Minipile". "Root pile". "Needle pile".
- Alemán "Wurzelpfahle". "Verpresspfahle".
- Portugués "Estaca raiz"

La primera referencia documentada que se ha encontrado sobre los micropilotes está en el libro de Sansoni (1963), donde describe los "pali radice" como pilotes de pequeño diámetro ejecutados con perforación a rotación y una tubería de entubación de unos 100 mm de diámetro; posteriormente se coloca una armadura central (de una o más barras) y se hormigona manteniendo la presión del mortero en cabeza con aire comprimido, mientras se extrae la tubería de entubación; para la mezcla de mortero se tiene en cuenta una dosificación "elevada" de cemento y aditivos.

La primera aplicación documentada del sistema propuesto por Lizzi, fue para el recalce de la Escuela A. Angiulli en Nápoles. Se utilizaron "pali radice" de 13 m de longitud, 100 mm de diámetro nominal y una armadura central de una barra de 12 mm. El terreno estaba constituido por arenas, cenizas volcánicas y puzolanas. Este tipo de pilotes especiales son usados comúnmente cuando es necesaria la re-cimentación de monumentos y edificios. Estos micropilotes son, en esencia, pilotes muy delgados colados en el lugar; su diámetro puede oscilar entre 10 y 25 cm.

En 1985 Lizzi presentó los primeros resultados de una prueba de carga en micropilotes. Los resultados alcanzaron 46 toneladas de carga con algo menos de 4 mm de asiento y según Lizzi a ese nivel de carga se produjo la fracturación del pie del pilote a una tensión de compresión de 45 MPa. En todo caso la curva carga-asiento denota un comportamiento elástico. El asiento remanente tras un ciclo carga-descarga hasta 20 toneladas fue del orden de 0,3 mm. Un comportamiento tan excelente causó sensación y el sistema se extendió rápidamente por toda Europa, siempre con resultados similares. Fondedile (Empresa donde Lizzi trabajaba como Director Técnico) introdujo los "pali radice" en Inglaterra en 1962, en Alemania en 1965 y en USA en 1973 (mercado que abandonó en 1984 por razones económicas).

Durante la década 1960-1970 se usó el sistema en la construcción de algunas secciones del Metro de Milán y allí la Administración del proyecto introdujo el término "micropali" para evitar el uso de un término que estaba patentado.

En 1967 RODIO (Empresa Española) patentó un sistema alternativo, denominado "Tubfix", con inyección a través de tubos manguitos y armadura mediante un tubo metálico (Mascardi, 1968). El sistema sigue siendo ofertado por RODIO con el nombre comercial "Ropress".

A partir de la década 1980-1990 muchas empresas especializadas en cimentaciones empezaron a ofrecer el servicio de ejecución de micropilotes con distintos nombres según el método de construcción del mismo. En el mercado anglosajón a veces se diferencia entre "minipile" con diámetro entre 150 y 250 mm, y "micropile" con diámetro menor de 150 mm (Herbert, 1985). En el Norte

de Europa se usa a veces el término “minipile”. En España no es necesario establecer esta distinción y no se usa el término minipilote.

En el año 1984 se crearon los micropilotes-anclajes TITAN por la empresa ISCHEBECK, que son micropilotes autoperforantes de inyección y permiten realizar obras inteligentes y emblemáticas. Varias patentes demuestran su base innovadora al conseguir utilizar la barra TITAN para la perforación del micropilote y como armadura del mismo.

En el Perú los micropilotes empezaron a ser utilizados en la década de 1990 y fueron ejecutados con equipos rotativos convencionales y con diámetro máximo de 1.50m. Con el avance de la tecnología, hoy en día es posible ejecutar perforaciones a rotoperusión con martillo de fondo que permiten perforar y revestir el taladro de perforación simultáneamente, aumentando de modo significativo la velocidad de perforación comparado con los procesos convencionales que utilizan brocas tricónicas que no permiten perforar y revestir los taladros al mismo tiempo. En la actualidad en el Perú se pueden ejecutar todo tipo de micropilotes de diámetros variables y grandes profundidades.

## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTO TEÓRICO

#### 2.1. Definición

Los micropilotes son un tipo de solución geotécnica que consiste en la ejecución de estructuras de gran esbeltez, de forma cilíndrica con un diámetro menor o igual a los 300 milímetros y por lo general tienen profundidades entre 15 a 30m. 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 que muchas veces se encuentran a grandes profundidades, a modo de evitar asentamientos y roturas o fallas.

Constructivamente consta de tres fases: perforación in situ, colocación e instalación de armadura de tubería o acero corrugado e inyección de lechada o mortero de cemento. Para determinar el proceso constructivo de un micropilote se debe tener en cuenta los siguientes datos previos como: Estudio geotécnico del suelo donde se determine el corte estratigráfico, nivel de capa freática, características mecánicas del suelo y profundidad proyectada de micropilote (dimensionamiento). Una vez obtenido estos datos se procede a la elección de los materiales, métodos y técnicas más favorables para la ejecución del proyecto dejando el frente de trabajo con espacio suficiente para el manejo de todos los equipos involucrados en la construcción y ejecución de los micropilotes.

Por otro lado los micropilotes son en general el tipo de cimentación profunda más cara desde el punto de vista costo/carga a soportar, ya que requieren procesos de perforación de pequeño diámetro e inyecciones de relleno y sellado a diferentes presiones según sea el caso de micropilote a ejecutar. En presencia de suelos heterogéneos, los micropilotes pueden ser muy competitivos, pues gracias a su pequeño diámetro y a la posibilidad de ser dispuestos en cualquier dirección espacial pueden perforar grandes macizos de roca.

En los países en que la prefabricación está más desarrollada como por ejemplo en España, los micropilotes perforados y autoperforantes tiene un porcentaje de uso significativo, en cuanto a Portugal los micropilotes moldados son los más usuales. Los micropilotes inicialmente estaban constituidos por lechada de cemento y una varilla de acero que en conjunto tenían una resistencia de 445 KN, en la actualidad con varillas de alta resistencia y métodos de inyección más avanzados se pueden alcanzar resistencias hasta de 1780 KN a esfuerzos axiales.

**Cuadro N° 1. Características orientativas sobre ejecución de micropilotes**

<b>Altura de máquina</b>	Entre 2 y 6 m
<b>Diámetro</b>	75 a 300 mm
<b>Sistema de perforación</b>	Barrena
	Corona
	Trépano
	Trialeta
<b>Extracción del suelo</b>	Con la barrena
	Con agua
	Con aire comprimido
<b>Material de relleno</b>	Lechada de cemento
	Mortero de cemento
<b>Armadura</b>	Barras
	Tubería
	Tubería + barras
<b>Inyección</b>	Gravedad
	A baja presión (0.5 a 1 Mpa)
	A media presión (3 a 4 Mpa)
<b>Resistencia a compresión</b>	100 - 1500KN

*Fuente: "Ejecución de micropilotes - Constructora Mota Engil Perú S.A." Lima, 2014.*

## 2.2. Clasificación

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

- **Micropilotes individuales.** Son utilizados como cimentación profunda, a través del fuste y la punta.
- **Micropilotes como grupo.** Generalmente actúan sobre una determinada zona del terreno.

### 2.2.2. Según el tipo de sollicitación dominante a la que están sometidos

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

### 2.2.3. Según el sistema de inyección de la lechada o mortero de cemento

- Los inyectados en una sola fase, también denominados de inyección única global (IU). Los micropilotes del tipo IU suelen ser los más adecuados en rocas más o menos sanas, suelos cohesivos muy duros y suelos granulares.
- Los reinyectados hasta dos veces a través de tubos o circuitos con válvulas antirretorno, también denominados de inyección repetitiva (IR). Los del tipo IR se emplean generalmente en rocas blandas y fisuradas y en materiales granulares gruesos y de compacidad media.
- Los reinyectados varias veces a través de tubos-manguito desde el interior de la tubería de armadura, en toda la longitud del micropilote o en parte, también denominados de inyección repetitiva y selectiva (IRS). Los del tipo IRS, que permiten efectuar una inyección más controlada, 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.

## 2.3. Campos de Aplicación

2.3.1. **Estructuras de cimentación.** Pueden emplearse tanto en obra nueva como en recalces, reparaciones, etc., de estructuras preexistentes:

- **Obras de nueva planta:** su campo de aplicación fundamental son las estructuras con espacio 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 constituidas por roca alterada, etc.

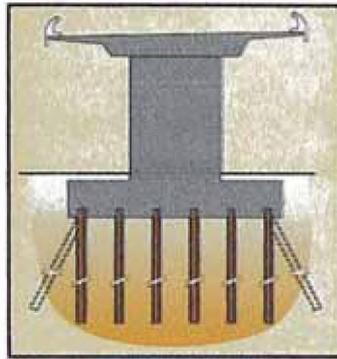


Figura N° 1. Esquema de cimentación de nueva planta con micropilotes

- **Obras de reparación, refuerzo, rehabilitación, mejora o recalce de estructuras preexistentes:** incluye la remodelación de aquéllas que presentan incrementos de las solicitaciones, la actuación frente a determinadas patologías geotécnicas, etc.

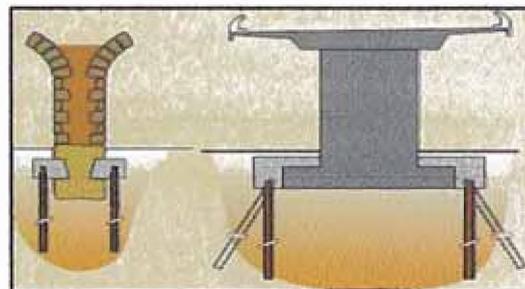


Figura N° 2. Esquema de recalce de cimentaciones preexistentes mediante micropilotes

Tanto en obras de nueva planta como de refuerzo o recalce, en general, los micropilotes se deberán proyectar para que trabajen sometidos a esfuerzos axiales, fundamentalmente de compresión y en ocasiones de tracción. Cuando la cimentación esté sometida a esfuerzos horizontales significativos, se podrán disponer micropilotes inclinados para absorber la componente horizontal de la carga, o parte de la misma. Los modos de fallo más típicos para esta aplicación son los de:

- *Hundimiento.*
- *Arranque.*
- *Rotura del terreno por esfuerzos horizontales.*
- *Fallo estructural de los micropilotes.*
- *Fallo de la conexión con la estructura.*



Figura Nº 3. Recalce de estructura existente para excavación de sótanos en Alcántara, Lisboa

2.3.2. Estructuras de contención o sostenimiento del terreno. Normalmente se disponen formando alineaciones o grupos numerosos con varias inclinaciones, se encepzan en cabeza y se acompañan de anclajes u otras unidades de obra. Se sitúan en un mismo plano (generalmente vertical) o formando abanico.

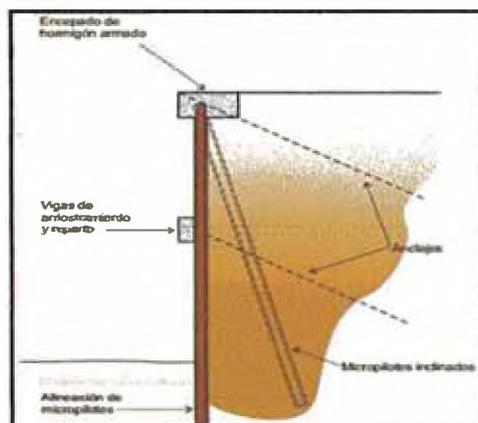


Figura Nº 4. Esquema de micropilotes como estructura de cimentación o sostenimiento



Figura Nº 5. Contención con pantalla de micropilotes en excavación bajo el puente Ricardo Palma – Lima



Figura Nº 6. Contención con pantallas de micropilotes en Málaga – España

2.3.3. **Estabilización de taludes o laderas.** Se disponen formando alineaciones o grupos numerosos con varias inclinaciones y se encajan en cabeza, pudiendo ir acompañados de anclajes u otras unidades de obra. Producen una mejora del coeficiente de seguridad global de los taludes o laderas por incremento de la resistencia al corte de las mismas, evaluada según potenciales superficies de rotura, que comprenden secciones transversales a la alineación de micropilotes.

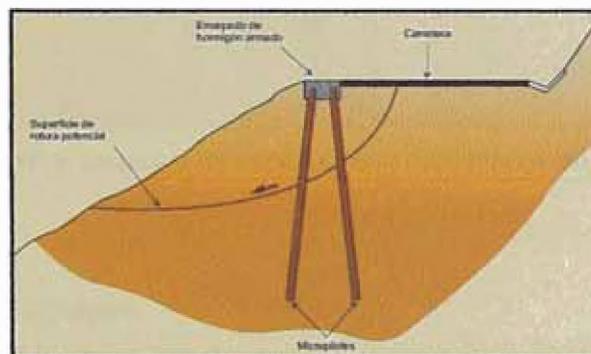


Figura Nº 7. Esquema de micropilotes para estabilización de taludes o laderas

2.3.4. **Paraguas 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 una obra, en emboquilles, zonas de especial dificultad, etc.

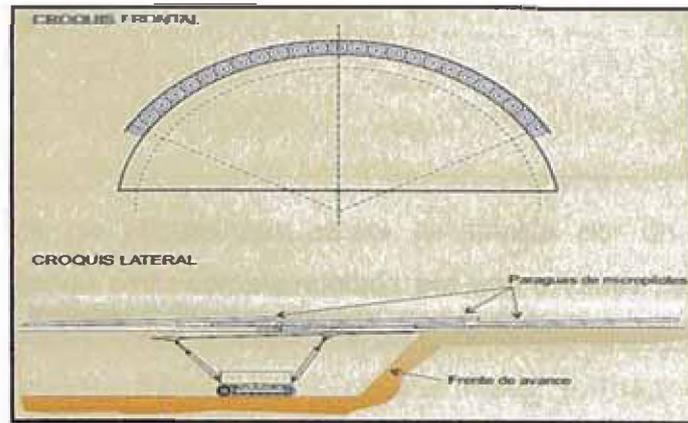


Figura N° 8. Esquema de micropilotes como paraguas de sostenimiento

2.3.5. **Mejora del terreno.** Pretenden el aumento de la capacidad de soporte global de una masa de terreno y la reducción de asentos de las estructuras, cimentadas posteriormente sobre el mismo.

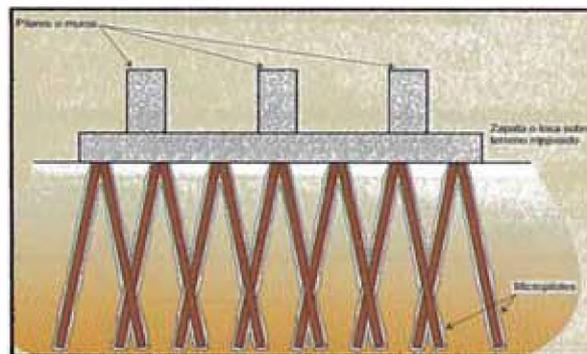


Figura N° 9. Esquema de micropilotes como mejora del terreno

## 2.4. Materiales y Equipos

Para la ejecución de micropilotes se emplea diversos materiales y equipos que dependen del sistema de perforación, de condiciones geológicas y geotécnicas del terreno, del tipo de micropilotes, de las diferentes aplicaciones de los micropilotes, del tipo de armadura, del tipo de inyección, de costos de operación y de condiciones particulares de obra como: ubicación, construcción de estructuras, plazos, especificaciones técnicas, presupuesto, planificación, control y avance según actividades de producción en general.

## 2.4.1. Materiales

### Armaduras

La armadura de los micropilotes estará constituida por un tubo de acero estructural, pudiendo estar complementada por una o varias barras corrugadas de acero situadas en su eje, o dispuestas en torno al mismo.

En obras permanentes no se reutilizarán como armaduras tubulares los 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 muy corto, se podrá contemplar el uso de esos materiales siempre que cumplan los mismos requisitos que los exigidos a las armaduras tubulares nuevas. A efectos de cálculo, los límites elásticos de los aceros más habituales empleados como armadura tubular son los siguientes:

**Cuadro N° 2. Límites elásticos de los aceros de armaduras tubulares más empleados en la ejecución de micropilotes**

Designación armadura tubular	Límite elástico $f_y$ (Mpa)
S 235	235
S 275	275
S 355	355
S 420	420
S 460	460

*Fuente: "Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera" Madrid, 2005.*

La armadura de tubo garantiza la continuidad del micropilote en caso de corte del mortero y además proporciona resistencia al corte y a flexión, necesarios cuando los micropilotes no trabajan solo a compresión. Además puede realizarse un pretensado del micropilote mediante un cable o barra sujeto a la parte inferior del tubo y sujeto en cabeza con un pequeño gato hidráulico o una tuerca.

La longitud comercial máxima de los tubos suele ser de 9 m, para facilitar un transporte por medios convencionales. Si se desea construir micropilotes de más longitud (o en trozos más pequeños) la unión suele hacerse por rosca, lo que es cómodo, pero debilita la sección de acero, especialmente a flexión. En esos

casos la unión correcta incluye un manguito exterior de refuerzo. Bermejo (2003) ha realizado ensayos, a flexión y a esfuerzo cortante, de tubos de diámetro exterior 88.9 mm y espesor 7 mm, comparando la resistencia de tubos continuos con la de tubos unidos con rosca macho-hembra y con la de tubos unidos con un manguito exterior de diámetro exterior 102 mm y espesor 7 mm. Los ensayos se realizaron con tubos huecos y con tubos rellenos con lechada de cemento de 50-60 MPa de resistencia compresión simple. Su conclusión es que las cargas de rotura (a flexión o a cortante) de los tubos con empalme por manguito es del mismo orden, o ligeramente superior, que la del tubo continuo, mientras que en el caso de los tubos con unión a rosca macho-hembra las cargas de rotura son del orden del 50% de las de los tubos con manguito.



Figura N° 10. Armaduras tubulares de acero para micropilotes

## Lechadas y morteros de cemento

### - **Lechadas de cemento**

La resistencia característica a compresión de la lechada a utilizar en micropilotes debe cumplir:

- A veintiocho días de edad será superior o igual a veinticinco megapascales ( $f_{ck} \geq 25 \text{ MPa}$ ).
- A siete días de edad será superior o igual que el sesenta por ciento de la requerida a los veintiocho días ( $f_{ck,7} \geq 0,6 f_{ck}$ ).

Los ensayos para determinar la resistencia de la lechada se efectuarán con probetas cilíndricas fabricadas, curadas y ensayadas a compresión. Respecto a

su dosificación, las lechadas de cemento deberán presentar alta resistencia y estabilidad, ser fácilmente bombeables y alcanzar la resistencia a compresión requerida.

La relación agua/cemento, en peso, deberá mantenerse aproximadamente entre cuarenta y cincuenta y cinco centésimas ( $0,40 \leq a/c \leq 0,55$ ). En caso de que sea necesario recurrir a lechadas con relaciones agua/cemento por debajo de cuarenta centésimas ( $a/c < 0,40$ ), normalmente deberán agregarse aditivos a las mismas para permitir que se puedan bombear de forma adecuada.

La exudación de la lechada será menor o igual que el tres por ciento en volumen, transcurridas dos horas desde la preparación de la mezcla.

#### - **Morteros de Cemento**

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

Los ensayos para determinar la resistencia del mortero se efectuarán con probetas cilíndricas fabricadas, curadas y ensayadas a compresión a veintiocho días de edad. Respecto a su dosificación, los morteros deberán presentar un contenido mínimo de cemento de trescientos setenta y cinco kilogramos por metro cúbico ( $375 \text{ kg/m}^3$ ), salvo especificación expresa del proyecto. Su relación agua/cemento, en peso, deberá ser inferior a sesenta centésimas ( $a/c < 0,60$ ) y la distribución granulométrica del árido a emplear deberá cumplir:

$$D_{85} \leq 4 \text{ mm}$$

$D_{100} \leq 8 \text{ mm}$ , donde:  $D_x \rightarrow$  Tamiz por el que pasa el  $x\%$  de la muestra.

La arena de los morteros deberá estar limpia y seca, y cumplir con los husos granulométricos establecidos. Las arenas redondeadas, en general, mejoran la inyectabilidad de la mezcla.

## Sarta de perforación

La sarta de perforación, también conocida como columna de perforación o línea de perforación está compuesta por diversos elementos y materiales. Es la encargada de transmitir las fuerzas de empuje y rotación al martillo y broca. Además nos permite determinar la profundidad del pozo perforado. Por dentro de la sarta circula aire a presión que facilita la evacuación del detritus y asimismo enfriar la broca y agua que sirve para estabilizar las paredes del pozo de perforación.

La sarta de perforación tiene los siguientes componentes:

- Amortiguador
- Adaptador
- Barras, tuberías de perforación
- Martillo
- Adaptador de broca
- Broca (con seguros, alas y pasadores)
- Anillo guía
- Zapatas

El largo de la sarta va aumentando a medida que vamos avanzando con la perforación, pues las tuberías o barras son adicionadas a la sarta según la longitud permitida en cada máquina de perforación. Para una perforación eficiente siempre debemos tener una sarta de perforación lo más vertical posible para evitar vibraciones que provoquen fatigas de material en los componentes.

En la sarta de perforación uno de los elementos más esenciales es el martillo de fondo, el cual es una herramienta de perforación, que funciona mediante aire comprimido, y que básicamente lo que hace es transformar la energía cinética, transmitiendo esta energía a la boca de perforación, a través de un pistón de acero con objeto de que pueda ir descendiendo en el pozo de perforación, a medida que este se perfora. La forma del martillo es totalmente cilíndrica. Existen en el mercado numerosos modelos de martillos los cuales dependen de las diferencias constructivas y de diseño que hay entre ellos.



Figura N° 11. Esquema de sarta de perforación



Figura N° 12. Sarta de perforación



Figura N° 13. Sarta de perforación con tubería de revestimiento



Figura N° 14. Brocas de perforación



Figura N° 15. Zapata para perforación

### Otros materiales

- Accesorios diversos de perforación, colocación de armadura e inyección
- Aceite hidráulico
- Aditivos estabilizadores de terreno
- Agua
- Ciclón de desfogue para expulsión de detritus
- Combas, martillos, picos y llaves
- Elementos de protección personal (EPP)
- Escaleras
- Grasa
- Inclínómetro y/o nivel
- Linternas
- Madera
- Mangueras
- Manómetros

- Material de soldadura y oxicorte (acetileno, oxígeno, boquillas, varillas y/o electrodos de soldar, otros.)
- Parihuelas de madera
- Tacos de madera
- Tuberías de revestimiento con unión soldada y/o roscada



Figura N° 16. Tuberías de revestimiento roscadas y barras de perforación API

## 2.4.2. Equipos

### Central de Inyección

El equipo para la ejecución de la inyección estará constituido al menos por una mezcladora, un agitador y una bomba de inyección.

- La mezcladora deberá ser de alta turbulencia, de forma que se garantice la calidad y homogeneidad de la mezcla obtenida.
- El agitador sirve como depósito de acumulación entre la mezcladora y la bomba de inyección, para garantizar la continuidad de inyección. Mediante unas aspas que giran lentamente se homogeneiza la lechada o mortero durante su permanencia en el depósito, evitando así la formación de burbujas de aire. Deberá disponer de un sistema para controlar la admisión en cada fase o taladro.
- La bomba de inyección, hidráulica o neumática, es la encargada de impulsar la mezcla durante la inyección, proporcionando los caudales y presiones

especificados en el proyecto. Irá provista de un manómetro para medir la presión.



Figura Nº 17. Equipo de inyección de lechada de cemento



Figura Nº 18. Central de inyección de micropilotes – Puente Trujillo

### Equipo de perforación

Es una perforadora hidráulica multifuncional. Su diseño modular hace que esta máquina sea adecuada para la ejecución de micropilotes, tirantes, tratamientos jet-grouting, drenajes, anclajes, pozos de agua y otros trabajos de cimentaciones y geotecnia. Está equipada con mandos hidráulicos de tipo proporcional servo-asistidos que posibilitan operaciones de perforación y posicionamiento de forma sencilla, precisa y regular. La hidráulica de nueva concepción permite maximizar el uso de la máquina, reduciendo los costos operativos y suministrando, cuando sea necesario, potencia hidráulica a cualquier circuito.

La extrema versatilidad de estos equipos de perforación permite personalizarlos según las exigencias del cliente y las condiciones geológicas:

- Cabeza de rotación a velocidad variable
- Martillo en cabeza
- Vibrorotación (vibrador y cabeza de rotación)
- Doble cabeza de rotación
- Circulación inversa
- Bomba de lodos
- Cargador de varillas tipo carrusel para 6 varillas de 3000 mm



Figura N° 19. Equipo de perforación de micropilotes – Puente Trujillo

### Otros equipos

- Máquina soldadora trifásica o similar
- Luminaria
- Grupo electrógeno
- Miniexcavadora con brazo hidráulico adaptado
- Amoladora
- Gata hidráulica
- Camión Grúa
- Compresoras y Pulmones de aire



**Figura N° 20. Equipos de suministro de aire – Compresoras y pulmón de aire**



**Figura N° 21. Mini-excavadora con brazo hidráulico**

## CAPÍTULO III

### PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

La ejecución de un micropilote comprende normalmente la realización de operaciones básicas ejecutadas en forma de fases sucesivas:

- **Fase 1, 2 y 3.** Perforación del taladro del micropilote.
- **Fase 4.** Colocación de la armadura.
- **Fase 5.** Inyección del micropilote.
- **Fase 6.** Conexión con la estructura o con el resto de los micropilotes, mediante un encepado o viga de coronación.

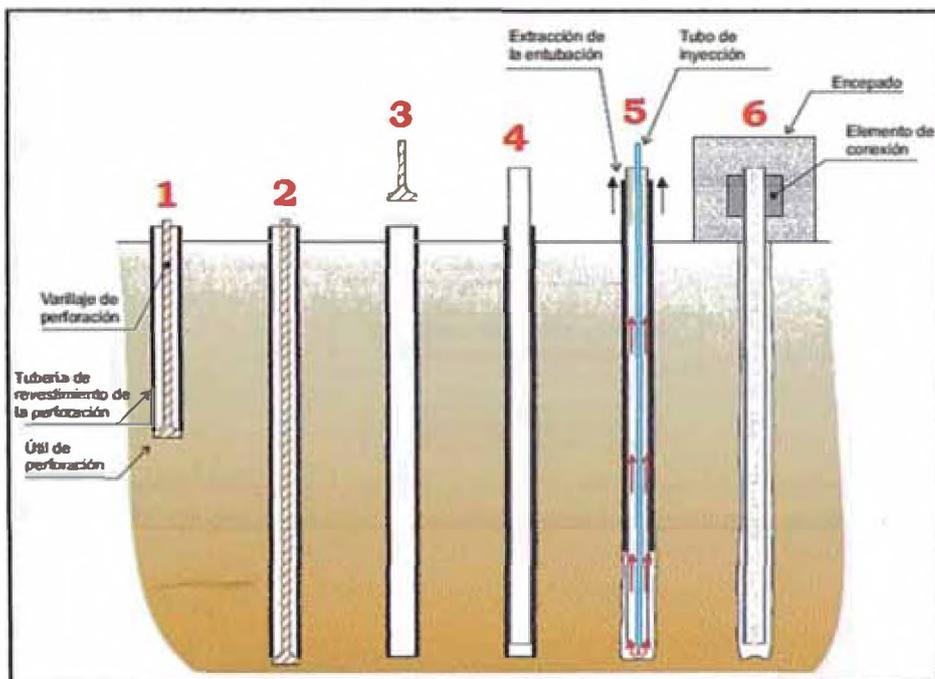


Figura Nº 22. Fases de proceso constructivo de micropilotes

Para poder realizar estas operaciones se deberá disponer una plataforma de trabajo que cuente con la superficie necesaria para ubicar tanto el material como los equipos. El gálibo debe ser adecuado a los requerimientos del área de trabajo en el proyecto. Todas las actividades involucradas en la ejecución de micropilotes se realizarán acordes a la norma vigente en materia medioambiental, de seguridad y salud, de construcción, de almacenamiento y transporte de productos de construcción.

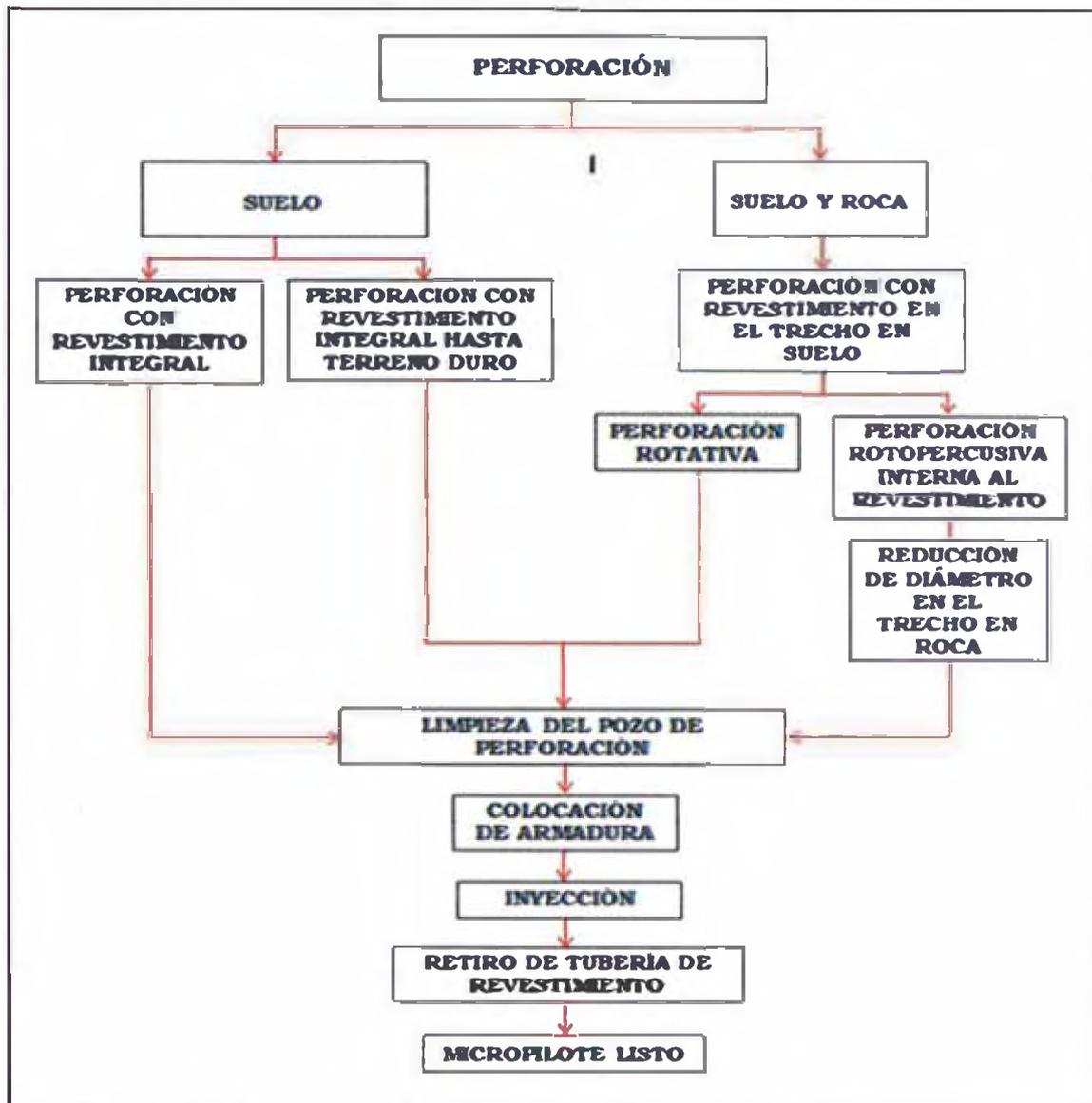


Figura N° 23. Diagrama de flujo de procedimiento constructivo de micropilotes

### 3.1. Perforación del taladro del micropilote

Para iniciar los trabajos de perforación, por lo general se construye muros de concreto en el cual son replanteados todos los micropilotes a ejecutar. A este muro se le denomina muro guía. En la pantalla de micropilotes de Evitamiento y Puente Ricardo Palma se perforó con muros guía, sin embargo en el Puente Trujillo se realizó las perforaciones sin dicho muro.

Una vez instalado y posicionado el equipo en la zona de trabajo, se inicia la perforación propiamente dicha que consiste en la extracción del terreno, a través

de detritos de perforación, que son originados por destrucción del macizo rocoso, debido al impacto de la broca del martillo de fondo del sondeo (M.F.S.), por circulación directa de aire comprimido.

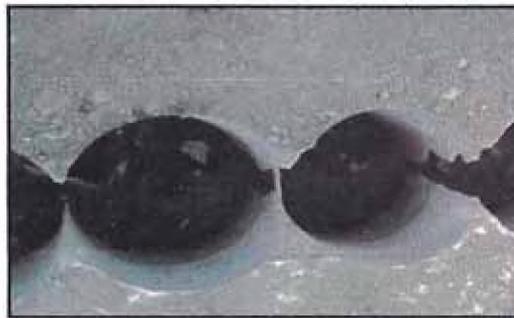
El proceso se inicia por la unión roscada de la primera barra API, unida del martillo de fondo de sondeo, a la cabeza de la máquina, que genera rotación al conjunto. El aire que circula por el interior de las barras acciona el funcionamiento percusor del M.F.S. y en su flujo de retorno arrastra consigo los fragmentos de terreno desmontado. A la medida que la perforación va prosiguiendo se van adicionando mayor cantidad de barras API hasta llegar a la profundidad de proyecto. Para el revestimiento se usa tuberías roscadas o soldadas recuperables hasta la profundidad que sea necesario, esto en función a la estabilidad del terreno.

La perforación se da por concluida cuando tenga una penetración en metros lineales que cumpla con el requerimiento del proyecto, procediendo con la limpieza del taladro y retiro de las barras y martillo por el orden inverso al de la perforación.

Gracias al ingenio de profesionales competentes y al desarrollo de los conocimientos en el ámbito de cimentaciones y geotecnia, las técnicas de perforación se mejoran constantemente y se introducen mejores tecnologías a las máquinas perforadoras. Pero es una tarea realmente de mucho riesgo por manejar grandes fuerzas de empujes y torsiones. Es por eso que es una tarea donde se requiere mucha concentración y compromiso para cuidar la propia vida y la de los demás. Las técnicas de perforación también cambian, las fuerzas que se van aplicar y las brocas que se utilizarán son de acuerdo al terreno. Se debe tener operadores con amplia experiencia pues una mala operación podría generar un atrapamiento de la broca.

El sector a trabajar se debe delimitar para solo permitir el ingreso de personal de trabajo autorizado en obra, los cuales tienen como líder al operador de equipo. Existen muchos riesgos dentro del área de perforación como: aplastamiento, electrocución, proyección de metales, atrapamiento, polución, caídas a distinto nivel, golpes, lesiones, cortes, gases nocivos, peligro de explosiones, por

nombrar algunos, además se debe tener en cuenta que existen puntos ciegos para el operador en las máquinas de perforación, esto presenta un riesgo alto para las personas que se encuentran alrededor de la máquina. Por eso cuando entremos a un área de perforación siempre pensemos en estos puntos y estacionemos nuestros vehículos en un sector donde no tengamos un accidente y no debemos ingresar a zonas de trabajo con acceso restringido.



**Figura N° 24. Muro guía de micropilotes en Vía Evitamiento**



**Figura N° 25. Muro guía de micropilotes Ricardo Palma**



Figura N° 26. Posicionamiento del equipo



Figura N° 27. Perforación de micropilotes a bajo gálibo – Puente Trujillo

### 3.1.1. Características geométricas

Las perforaciones se efectuarán respetando las posiciones, diámetros, longitudes e inclinaciones, indicadas en los planos del proyecto. El diámetro del taladro debe garantizar el recubrimiento mínimo de la armadura tubular a lo largo de todo el micropilote.

Los diámetros más habituales de perforación (DP), con revestimiento provisional, en relación con el diámetro de la tubería de revestimiento (D), y con los exteriores de armaduras tubulares (De), que resultan más habituales en la práctica, son los que se indica en la siguiente tabla:

**Cuadro N° 3. Diámetros más habituales de perforación (Dp) de micropilote de diámetro nominal (D) y armadura tubular (De) en milímetros.**

Dp	D	De (*)
120	114.3	60.3 - 73.0
140	133.0	60.3 - 73.0 - 88.9
160	152.4	73.0 - 88.9 - 101.6
185	177.8	88.9 - 101.6 - 114.3 - 127.0
200	193.7	101.6 - 114.3 - 127.0 - 139.0
225	219.1	114.3 - 127.0 - 139.0 - 168.3

Nota: (\*) El valor mayor de cada una de las filas de diámetros exteriores de armadura tubular (De) será válido únicamente en uniones roscadas.

**Fuente: "Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera" Madrid, 2005.**

Salvo justificación expresa en otro sentido, el equipo de perforación deberá realizar los taladros con las siguientes tolerancias:

- La posición del eje de la boca de la perforación no deberá estar desplazado más de cincuenta milímetros (50 mm) respecto de su posición teórica, a comprobar incluso con cinta métrica. Esta verificación (comprobación del replanteo) se efectuará en todos y cada uno de los taladros.
- Respecto al diámetro nominal del micropilote D, previsto en el proyecto, su posible reducción, fundamentalmente debida al desgaste de los útiles de perforación, deberá ser inferior o igual a dos milímetros ( $\Delta D \leq 2$  mm), a comprobar midiendo dichos útiles con calibre. Se verificará cada vez que se cambie el útil de perforación o cuando se observe un desgaste apreciable y en todo caso, en al menos un cinco por ciento (5%) de los micropilotes que se ejecuten.
- La longitud de la perforación no debe diferir en más de veinte centímetros ( $\Delta L \leq 20$  cm) de la indicada en el proyecto, a comprobar midiendo, incluso con cinta métrica, la longitud total de los útiles de perforación empleados. Esta

verificación se efectuará en al menos un veinte por ciento (20%) de los taladros, con un mínimo de tres unidades por tajo.

- Respecto a la inclinación del taladro, no se deberá desviar más de dos grados sexagesimales ( $\Delta i \leq 2^\circ$ ) respecto de la teórica, comprobándose con clinómetro o escuadra con doble graduación en milímetros. Se efectuará en al menos un cinco por ciento (5%) de los taladros, con un mínimo de tres unidades por tajo.

### 3.1.2. Sistemas de perforación

Se deberá escoger un sistema de perforación que afecte lo menos posible al terreno y a las estructuras a recalzar. Según la consistencia del terreno y su posible riesgo de colapso frente al agua, se determinará si la perforación se debe efectuar al amparo de entubación metálica, recuperable o no, o simplemente de los fluidos más adecuados en cada circunstancia (lodos de estabilización). Si los trabajos forman parte de obras de recalce, o en el caso de suelos susceptibles al agua, resulta fundamental el empleo de aire en lugar de agua. Los fluidos de perforación no serán nocivos ni para los materiales constituyentes de la inyección, ni para la armadura del micropilote, debiendo cumplir en todo caso la normativa vigente en materia medioambiental y de seguridad y salud.

En el caso de terrenos blandos, cársticos, colapsables, etc., será necesario el empleo de entubaciones provisionales. Normalmente se usará la entubación perdida en zonas de huecos o cavernas. Los sistemas de perforación a utilizar serán:

- **Perforación a rotación:** consiste en provocar la rotura del terreno, o los materiales a perforar (en el caso de cimentaciones preexistentes), por la fricción generada en la rotación del útil de perforación. Este tipo de perforación resulta especialmente recomendable para atravesar cimentaciones antiguas al provocar, en general, menores vibraciones que la rotoperCUSión. En general se efectúa con la batería usual de sondeos, con barrenas helicoidales o tricono.

- **Perforación a rotopercusión:** consiste en provocar la trituración de los materiales a perforar, por fricción y percusión de manera conjunta. Se emplean para ello, martillos de fondo o en cabeza. La maquinaria de perforación, debe contar con sistemas de recuperación de polvo cuando se trabaje en seco y especialmente cuando se haga en roca. Este sistema rotatorio con aire comprimido consiste de un martillo de percusión que se halla colocado en el extremo inferior de la tubería de perforación (varillaje) el cual combina el efecto percusivo con la acción rotatoria de los equipos respectivos. Hay tres aspectos claves para el buen funcionamiento de este sistema: primero los compresores deben ser de alta presión y buen caudal de aire, segundo una buena elección del martillo y tercero que el sistema funciona en terrenos consolidados, de modo contrario el pozo se derrumba durante la perforación. Los martillos tienen incrustaciones de carbono de tungsteno el cual es muy resistente a la abrasión.

El proceso de perforación deberá efectuarse de forma que cualquier variación significativa de las características del terreno, respecto a lo previsto en el proyecto, sea detectada inmediatamente, debiendo reflejarse en el correspondiente parte diario de trabajo. Habrá de tenerse en cuenta, en todo caso, que el sistema de perforación realmente empleado tiene incidencia en el cálculo de la resistencia estructural del micropilote a compresión, por lo que, cualquier variación en la elección del sistema de perforación, respecto de lo previsto en el proyecto, deberá implicar la plena asunción de los nuevos valores de cálculo resultantes.

### **3.1.3. Principales precauciones a adoptar en la perforación**

Las perforaciones deberán ejecutarse de conformidad con lo especificado en el proyecto, y en todo caso, según lo indicado en el protocolo de ejecución. Se deberán prever con antelación las técnicas necesarias para contrarrestar la presión del agua y los posibles desmoronamientos de los taladros, tanto durante la propia perforación como durante la colocación de la armadura y la realización de la inyección.

En concreto, se adoptarán precauciones especiales al atravesar niveles artesianos para evitar la salida de agua con arrastres de terreno. Se podrán emplear varios sistemas: inyección de la zona hasta conseguir taponar la afluencia de agua, y reperforación posterior; entubación perdida desde a superficie hasta la cota inferior de artesianismo; elevación de la plataforma de trabajo para contrarrestar la presión; sistema de cierre en la boca de taladro, etc.

### 3.2. Colocación de Armadura

Después de finalizar la perforación del taladro deberá procederse, a la mayor brevedad posible, a la colocación de la armadura; para lo cual será necesaria la liberación del pozo de perforación del micropilote (profundidad y verticalidad) por el área de calidad y supervisión de obra correspondiente.

Previamente a la colocación de la armadura tubular se comprobará que toda la longitud del taladro se encuentra libre de obstáculos y limpia de incrustantes o de cualquier posible material o cuerpo extraño. Asimismo se comprobará el estado de las uniones de las armaduras tubulares. La unión entre los cuerpos de armadura es muy importante, por lo general se recomienda que cuenten con un manguito exterior para no reducir la sección de acero y evitar así que la estructura del micropilote se debilite.



Figura N° 28. Unión simple macho - hembra

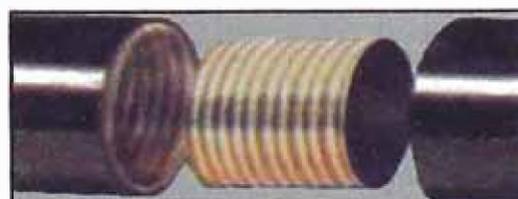


Figura N° 29. Unión con manguito interior macho



Figura N° 30. Unión con manguito macho - hembra

La colocación de la armadura se efectuará sin alterar la posición de ninguno de sus elementos (centradores, manguitos, etc.).

Se empleará el número de centradores necesario para garantizar la correcta colocación de la armadura y asegurar el recubrimiento mínimo frente a la corrosión, disponiéndose de modo tal, que no impidan el correcto proceso de inyección del micropilote y sean solidarios a la armadura tubular. Salvo justificación expresa en otro sentido, se colocarán al menos cada tres metros (3 m) de longitud de la armadura. En cualquier caso, e independientemente de la longitud del micropilote, el número mínimo de secciones transversales en que se instalen centradores será de dos. En caso de utilizarse, además de la armadura tubular, barras de acero corrugadas, será necesario disponer elementos que las centren o mantengan en la posición adecuada.

Se recomienda que la armadura tubular quede a una distancia mínima de diez centímetros (10 cm) del fondo del taladro. Para el avance en la colocación de armaduras es importante el gálibo de trabajo, que permite variar los tramos de armadura a colocar.



Figura N° 31. Colocación de armadura de micropilote



Figura N° 32. Armadura colocada en micropilote perforado

### 3.3. Inyección del Micropilote

Después de efectuar la perforación del taladro y la colocación de la armadura, deberá procederse, a la mayor brevedad posible, a la inyección del micropilote.

El proceso de inyección involucra el retiro de las tuberías de revestimiento, esto se realiza con gatos hidráulicos de determinadas capacidades de carga cuando las tuberías de revestimiento es unido con soldadura, o con la propia máquina de perforación cuando las tuberías de revestimiento son unidas mediante rosca, en tramos de 1.50 a 3.00 m.

La inyección del micropilote, con lechada o mortero de cemento, tiene los siguientes objetivos fundamentales:

- Constituir el fuste y la punta del micropilote propiamente dichos, materializando tanto el contacto con las paredes de la perforación como el relleno interior de la armadura tubular.
- Proteger a la armadura de la corrosión.
- Los parámetros de inyección (presión, caudal, etc.) deben definirse en el proyecto, y en todo caso en el protocolo de ejecución, y reflejarse en los correspondientes partes de trabajo. El tiempo transcurrido entre la perforación, instalación de la armadura e inyección habrá de ser el menor posible, debiéndose establecer de forma expresa en el proyecto y en todo caso en el protocolo de ejecución, según las características del terreno y de

las obras a realizar. Se recomienda que en ningún caso este tiempo sea superior a veinticuatro horas.



Figura N° 33. Vista en planta de micropilote inyectado – Puente Trujillo

### 3.4. Conexión de los micropilotes con el resto de estructuras

Una vez efectuada la inyección del micropilote, se deberá proceder a la conexión de éste con la estructura, o con el resto de los micropilotes mediante un encepado o viga de atado. En el caso de recalces en que la unión entre la estructura a recalzar y los micropilotes se realice de una forma directa, es decir que la propia cimentación existente haga las veces de encepado, se recomienda observar las siguientes cuestiones básicas:

- Antes de la ejecución del micropilote se debe perforar el cimiento preexistente mediante un taladro pasante.
- Posteriormente se debe ejecutar el micropilote.
- En la última fase se debe eliminar la lechada o mortero de la zona en que el micropilote atraviese el antiguo cimiento (mediante chorro de arena a presión preferiblemente), y rellenarse con lechada o mortero sin retracción para garantizar el contacto efectivo entre las diferentes superficies. Si se produjera decantación en esta última inyección, debería procederse a su relleno hasta compensar ésta.

Cuando se construyan nuevos encepados o elementos de unión, se debe limpiar de lechada o mortero la zona de armadura tubular que vaya a quedar en contacto con el hormigón armado, en los encepados o vigas de atado. Se deben colocar, asimismo, en el tramo limpio de la armadura tubular, los conectadores

previstos en el proyecto, efectuándose las conexiones con sujeción a lo especificado en el mismo.

La colocación de los elementos de unión con el encepado (cimentación nueva) o la zapata existente (recalce) son normalmente por medio de placas de acero con tuerca y contratuerca, en el primer caso, y la propia entubación que queda embebida en la zapata, en el segundo caso.



Figura N° 34. Ejecución de viga de coronación de pantalla de micropilotes en el puente Ricardo Palma - Lima

## CAPÍTULO IV

### APLICACIÓN AL PROYECTO VÍA PARQUE RÍMAC

Para la construcción de la nueva Vía Expresa Línea Amarilla en la ciudad de Lima, se proyecta un túnel de 1,6 km de recorrido por debajo del río Rímac.



Figura N° 35. Esquema de túnel debajo del río Rímac – Proyecto Vía Parque Rímac

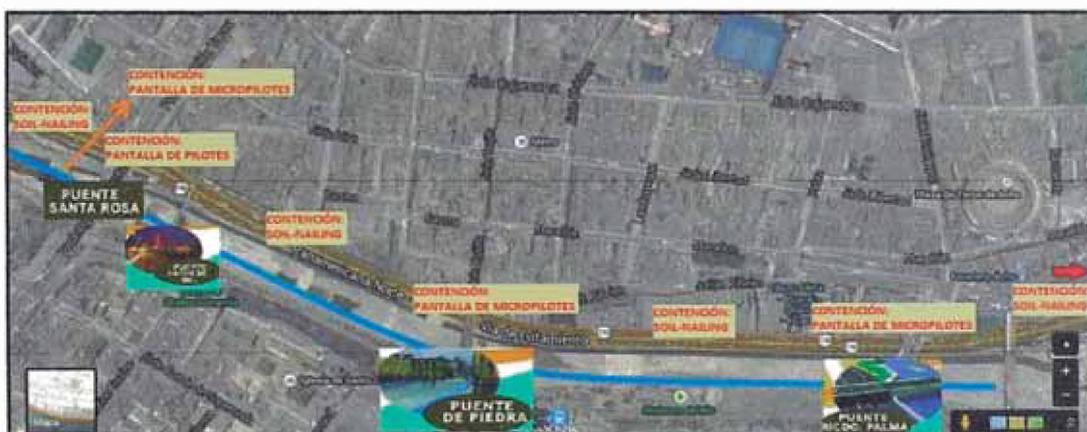
En la construcción de dicho túnel se utilizará diversos insumos, siendo los principales los mostrados en la siguiente tabla:

Cuadro N° 4. Insumos utilizados en construcción de túnel

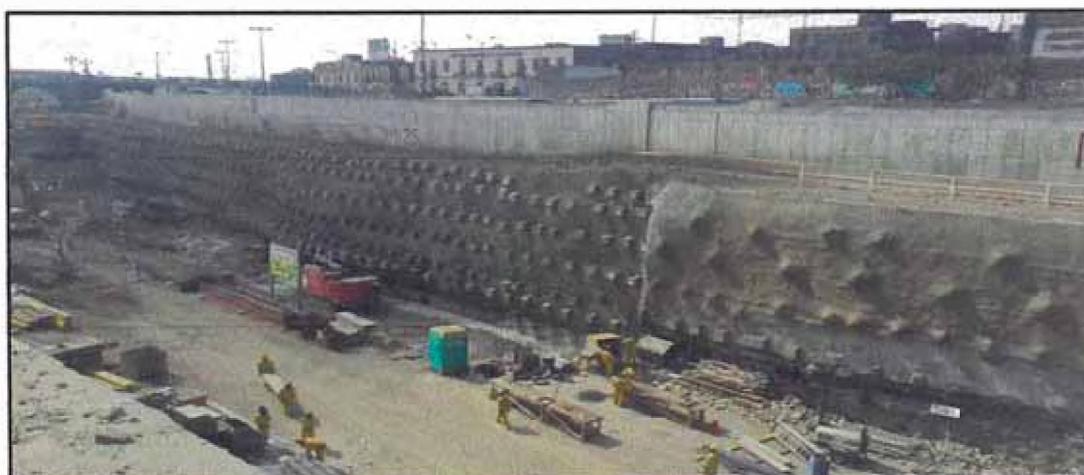
Insumo	Unidad	Cantidad
Concreto estructural	m <sup>3</sup>	104792.4
Cemento	Tn	39820.8
Arena gruesa	Tn	76339.2
Grava	Tn	143166
Agua	m <sup>3</sup>	18859.2
Incorporador de Aire	Lt	13728
Aditivo Fluidificante	Lt	254797.2
Acero	Tn	17700
Encofrado de madera	m <sup>2</sup>	864
Encofrado metálico	m <sup>2</sup>	203391.6

Fuente. "Constructora OAS", Lima, 2014.

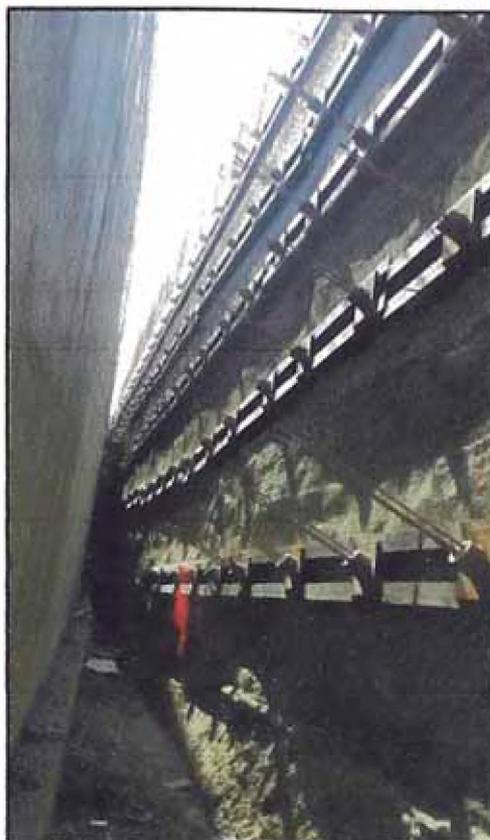
La metodología constructiva para la ejecución del túnel consiste en el desvío temporal del río mediante la construcción de un canal, y la estabilización de los taludes de excavación para abrir un tajo completo de trabajo que permita la construcción posterior del túnel mediante métodos convencionales. El túnel tendrá una entrada que estará ubicada a 200 metros aproximadamente de la avenida Tacna y se extenderá hasta el Puente Huánuco, en todo este tramo la excavación realizada cuenta con diferentes sistemas de estabilización de talud como: pantalla de pilotes en el puente Santa Rosa, pantalla de micropilotes en un tramo de la vía evitamiento y en los puentes Trujillo y Ricardo Palma, y contención con sistema Soil-Nailing (armado de terreno con anclajes de cables y/o de barras de acero unidos en cabeza mediante un muro de concreto armado vía malla metálica y que generalmente lleva hormigón proyectado – Shotcrete) en el resto de frentes.



**Figura N° 36. Sistemas de estabilización y contención utilizados en la excavación de túnel  
Vía Parque Rímac**



**Figura N° 37. Sistema de estabilización y contención Soil-Nailing – tramo puentes Trujillo y  
Ricardo Palma**



**Figura N° 38. Sistemas de estabilización y contención con pantalla de micropilotes – Tramo Vía Evitamiento antes del Puente Santa Rosa**

La ejecución de pantalla de micropilotes en un tramo de la vía evitamiento se debió a la presencia de rellenos limo-orgánicos en el estrato superficial con una potencia de 6 metros encontrados al momento de excavación, lo cual hizo necesarios cambiar el sistema de contención inicial que consistía en sostenimiento por el método Soil-Lining.

En los puentes Ricardo Palma y Trujillo la elección de pantallas de micropilotes como sistemas de contención se debió a las condiciones especiales de perforación, excavación y construcción de túnel. Todo esto con la finalidad de preservar el carácter de zona monumental del Centro Histórico de Lima, declarada así por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

#### 4.1. Características generales del terreno

##### 4.1.1. Caracterización Geológica.

Geológicamente la zona de ejecución de micropilotes es de facie continental sedimentaria, pertenece a la serie Pleistoceno en el sistema cuaternario, correspondiente a la eratema Cenozoica. Tiene como unidad estratigráfica representativa a los depósitos aluviales (Qp-al) con presencia de rocas intrusivas como la Diorita, Andesita y Riolita. (Ver figura N° 39)

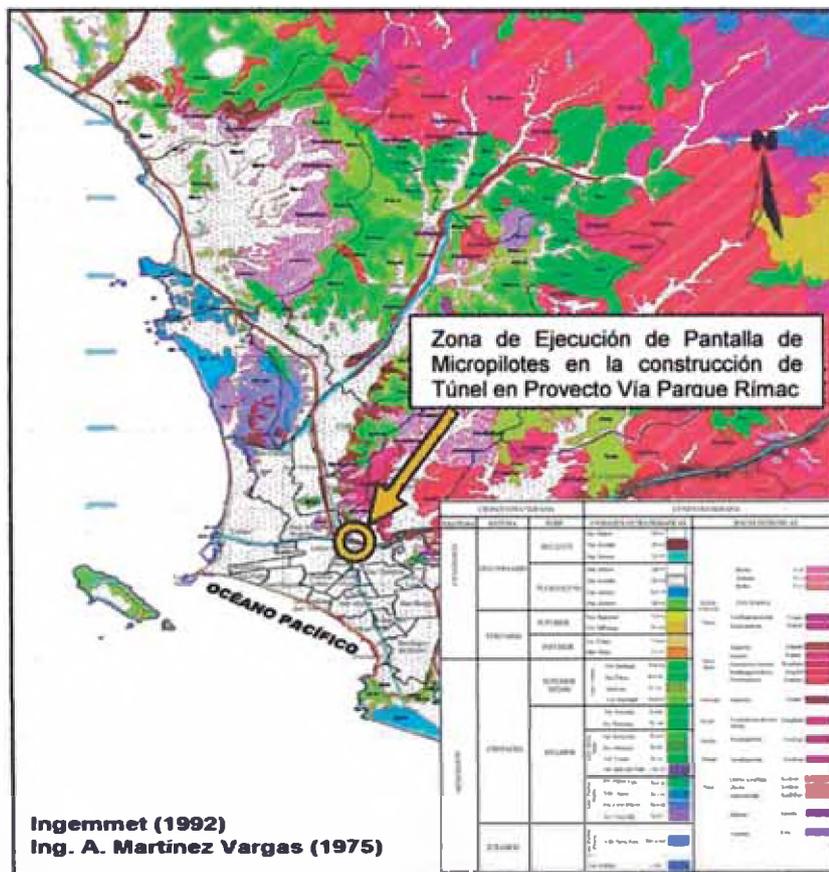


Figura N° 39. Mapa geológico de la ciudad de Lima Ingemmet (1992) e Ingeniero A. Martínez Vargas (1976)

##### 4.1.2. Caracterización del Suelo

En esta zona los suelos poseen material granular grueso, son sedimentarios, de aspecto uniforme que pueden clasificarse como conglomerado de canto rodado, gravas, arenas y limos íntimamente mezclados, en su totalidad ígneos,

pertencientes al gran cono de deyección del río Rímac y sus quebradas tributarias, formado por material de acarreo en un tiempo geológico muy largo. Estos materiales son altamente resistentes, tienen muy poca capacidad de deformación y sólo presentan problemas en grandes excavaciones o en los acantilados, por problemas de estabilidad de taludes. Esta zona presenta las mejores características geomecánicas para la cimentación superficial. Este tipo de suelo cubre la mayor parte del área de estudio. (Ver figura N° 40)

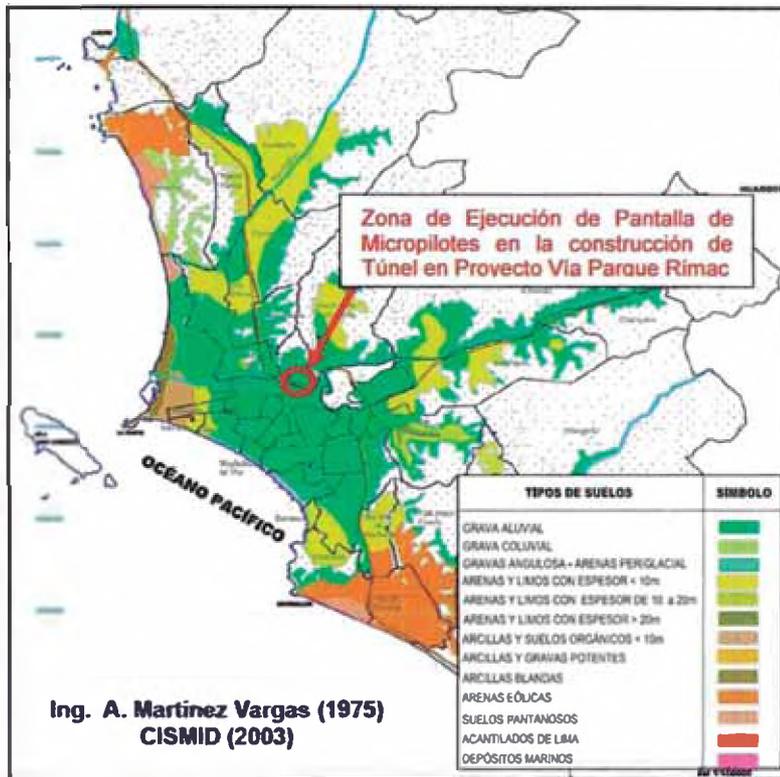


Figura N° 40. Mapa de distribución de tipos de suelos de la ciudad de Lima – Ing. A. Martínez Vargas (1975) CISMID (2003)

#### 4.1.3. Caracterización Geotécnica - Sísmica

Según la zonificación geotécnica - sísmica de la ciudad de Lima, establecida por el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), la ubicación del túnel que se encontrará debajo del río Rímac se encuentra en la Zona I (Ver figura N° 41), por ende todos los trabajos que involucran la construcción del túnel, entre ellos la ejecución de pantalla de micropilotes son caracterizados

sísmicamente como zonas que incluyen afloramientos rocosos, estratos potentes de grava que conforman los conos de deyección de los ríos Rímac y Chillón y los estratos de grava coluvial – eluvial de los pies de las laderas. Presenta un comportamiento rígido, con periodos de vibración natural entre 0.1 y 0.3 segundos. El factor de amplificación sísmica por efecto local del suelo en esta zona es  $S=1.0$  y el periodo natural del suelo es  $T_p=0.4$  segundos correspondiendo a un suelo tipo 1 de la norma sismorresistente peruana. En estos suelos no se esperan amplificaciones importantes en periodos intermedios y largos.

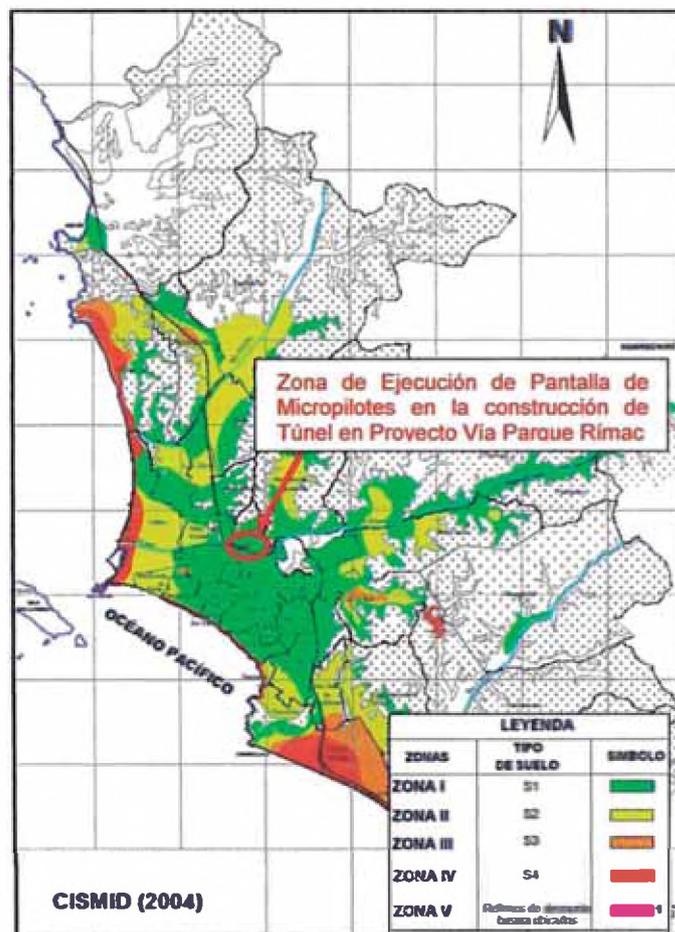


Figura N° 41. Mapa de zonificación sísmica de la ciudad de Lima – CISMID (2004)

#### 4.1.4. Parámetros Geotécnicos

El material que se encuentra en la zona de ejecución de la pantalla de micropilotes consiste en depósitos aluviales, con presencia de una grava gruesa

de matriz predominantemente arenosa. Las gravas son subredondeadas de tamaño máximo 3" (75% aprox.), arena de grano fino a grueso (22% aprox.) medianamente densas en la superficie y densas en profundidad, y escasos finos no plásticos (1% aprox.), con una humedad ( $w$ ) de 1,4 a 2,5% y tiene cantos rodados y boleos de  $TM=20"$  (30% aprox. del peso total). Según el estudio geofísico, plano geológico y clasificación de los suelos de la ciudad de Lima se puede inferir que el estrato gravoso se extiende a mayores profundidades ( $> 20$  m). Esto fue corroborado al momento de la perforación de los micropilotes, pues a una profundidad de 25 metros los detritos expulsados en la perforación eran parte de material gravoso mencionado, esto es compuestos por una grava mal gradada con arena (GP).

Los parámetros geotécnicos referenciales característicos del suelo en la zona de trabajos son:

**Cuadro N° 5. Parámetros geotécnicos referenciales característicos del suelo**

Parámetro	Símbolo	Valores	Unidades
Angulo de Fricción	$\phi$	36	Grados (°)
Cohesión	$c$	0	KN/m <sup>2</sup>
Peso Unitario	$\gamma$	21.5	KN/m <sup>3</sup>
Módulo de Young	$E$	200	MPa

**Fuente: "Estudio definitivo de Ingeniería Vía Expresa Línea Amarilla". Setiembre 2010.**



**Figura N° 42. Muestra N° 1 de suelo característico en la zona de trabajo**



**Figura N° 43. Muestra N° 2 de suelo característico en la zona de trabajo**



Figura N° 44. Bolones obtenidos en muestreo del suelo

Cuadro N° 6. Perfil estratigráfico - Sondeo diamantino N° 1

Profundidad (m)	Clasificación SUCS	Descripción
0.00 - 0.50	SM	Arenas con gravas y limo-arcillas orgánicas de mediana plasticidad blanda, medianamente compactas, húmedas, de color marrón claro. Las gravas de forma sub redondeadas de tamaño máximo 2". Gravas 30%, arena 50% y finos 20%.
0.50 - 2.60	SP-SM	Arenas con gravas y limo-arcillas, finos de mediana a baja plasticidad, blanda, medianamente compactas, muy húmedas, de color marrón claro. Las gravas de forma sub redondeadas de tamaño máximo 3", aisladamente bolones de 4.5". Gravas 20%, arena 70% y finos 10%.
2.60 - 9.10	GP-GM	Gravas de origen predominantemente de roca intrusiva mal clasificada, con arenas limosas, finos de mediana plasticidad, medianamente compactas, saturadas de color marrón claro. Las gravas de forma sub redondeadas de tamaño máximo 2.5", bolones de tamaño máx. de 8". Bolones 20%, gravas 55%, arenas 15% y finos 10%.
9.10 - 10.10	GP	Gravas de origen predominantemente de roca intrusiva mal clasificada, saturadas, color verde grisáceo, de forma sub redondeada, aisladamente bolones de tamaño máx. 6", ausencia de finos. Bolones 15% y gravas 85%.
10.10 - 11.20	GP-GM	Gravas de origen predominantemente de roca intrusiva mal clasificada, con arenas limosas, finos de mediana plasticidad, medianamente compactas, saturadas de color marrón claro. Las gravas de forma subredondeadas de tamaño máx. 2.5", bolones de tamaño máx. 8". Bolones 20%, gravas 55%, arenas 15% y finos 10%.
11.20 - 12.00	GP	Gravas de origen predominantemente de roca intrusiva mal clasificada, saturadas, color verde grisáceo, de forma sub redondeada de tamaño máx. de 2.5", aisladamente bolones de tamaño máx. 6", ausencia de finos. Bolones 15% y gravas 85%.
12.00 - 14.50	GP -GM	Gravas de origen predominantemente de roca intrusiva mal clasificada, con arenas limosas, finos de mediana plasticidad, medianamente compactas, saturadas de color marrón claro. Las gravas de forma subredondeadas de tamaño máx. 2.5", bolones de tamaño máx. 5". Bolones 10%, gravas 60%, arenas 20% y finos 10%.

Fuente: "Estudio definitivo de Ingeniería Via Expresa Línea Amarilla". Setiembre 2010.

**Cuadro N° 7. Perfil estratigráfico - Sondeo diamantino N° 2**

Profundidad (m)	Clasificación SUCS	Descripción
0.00 - 1.50	CL - ML	Material de relleno limo-arcilloso gravoso, finos de mediana plasticidad, firmes, medianamente compactas, húmedas de color marrón rojizo. Las gravas de forma subredondeadas de tamaño máx. 2.5". Gravas 30%, arenas 15% y finos 55%.
1.50 - 2.90	GP	Gravas de origen predominantemente de roca intrusiva mal clasificada, con arenas y escasos limos, finos de baja plasticidad, firmes, medianamente compactas, muy húmedas de color marrón oscuro amarillento. Las gravas de forma subredondeadas de tamaño máx. 2", aisladamente bolones de tamaño máx. 3.5". Bolones 10%, gravas 75%, arenas 10% y finos 5%.
2.90 - 6.00	GP	Gravas de origen predominantemente de roca intrusiva mal clasificada, saturadas de color verde violáceo, muy húmedas. Las gravas de forma subredondeadas de tamaño máx. 2.5", bolones de tamaño máx. 4". Bolones 20%, gravas 78% y arenas 2%.
6.00 - 9.75	GP	Gravas de origen predominantemente de roca intrusiva mal clasificada con limo-arenas, finos de plasticidad media, firmes, medianamente compactas, saturadas de color marrón amarillento. Las gravas de forma subredondeadas de tamaño máx. 2.5", aisladamente bolones de tamaño máx. 2.5". Bolones 15%, gravas 60%, arenas 10% y finos 15%.
9.75 - 11.00	GM	Gravas de origen predominantemente de roca intrusiva mal clasificada, con arenas-limosas, finos de baja plasticidad, firmes, medianamente compactas, muy húmedas de color marrón oscuro amarillento. Las gravas de forma sub angulosa a sub redondeadas de tamaño máx. 2", aisladamente bolones de tamaño máx. 4". Bolones 25%, gravas 60%, arenas 10% y finos 5%.
11.00 - 12.65	GM	Gravas de origen predominantemente de roca intrusiva mal clasificada con limo-arcillas y arenas. Finos de mediana plasticidad, firmes, medianamente compactas, saturadas de color marrón anaranjado. Las gravas de forma subredondeadas de tamaño máx. 2", secuencialmente bolones de tamaño máx. 4.5". Bolones 20%, gravas 55%, arenas 5% y finos 20%.
12.65 - 14.85	GP - GM	Bloque y grava predominantemente de roca intrusiva mal clasificada, con limos y arenas, finos de mediana plasticidad, medianamente compactas saturadas de color marrón anaranjado. Las gravas de forma subangulosas a subredondeadas de tamaño máx. 2.5", bloques de tamaño máx. 15".

**Fuente: "Estudio definitivo de Ingeniería Vía Expresa Línea Amarilla". Setiembre 2010.**

## 4.2. Ejecución de pantalla de micropilotes y construcción de túnel

La solución geotécnica adoptada en proyecto para la construcción de túnel debajo del Puente Trujillo consiste en la ejecución de 288 micropilotes de 140 toneladas de capacidad, con una longitud media de 26.00 m (empotrándose como mínimo 10.00 metros en el terreno de fundación del Puente). Dependiendo de la ubicación y las cargas transmitidas los micropilotes se agruparon en cuatro tipos (A, B, C y D).

La perforación se realizó con diámetro 300 mm, y se armaron los micropilotes con tubería de acero de límite elástico 560 Mpa, de dimensión exterior 177 mm y 9 mm de espesor.

La ejecución de pantalla de micropilotes como solución geotécnica adoptada para la estabilización de taludes en el Puente Trujillo en excavación de túnel y pantalla sostenimiento de pilares centrales, se debió a las siguientes condiciones del área de trabajo:

- **Espacios disponibles muy reducidos**, en cuanto a superficie en planta y gálibo de trabajo; este hecho hace inviable el planteamiento de cortinas de pilotes o muros pantalla. Frente a ello existe maquinaria para ejecución de micropilotes capaz de trabajar en las más reducidas condiciones de espacio.
- **Accesibilidad complicada de la maquinaria**, puesto que el Puente Trujillo es considerado la gran mayoría de trabajos de rehabilitación, sobre todo cuando se trata de edificios de cierta antigüedad, suelen ser en los cascos históricos lo que habitualmente lleva implícito calles estrechas con giros difíciles, que hacen inviables la mayoría de los transportes pesados. Sin embargo la maquinaria necesaria para la ejecución de micropilotes es fácilmente transportable con medios convencionales capaces de acceder a estos lugares.
- **Existencia de edificaciones históricas muy próximas**. Todos los trabajos que hace necesario el planteamiento de una contención estructural del terreno limitando deformaciones que pudieran afectar a dichas edificaciones, que en muchos casos presentan una gran sensibilidad a los movimientos.



**Figura N° 45. Señalética en obra de protección al puente Trujillo considerado patrimonio cultural de la UNESCO**

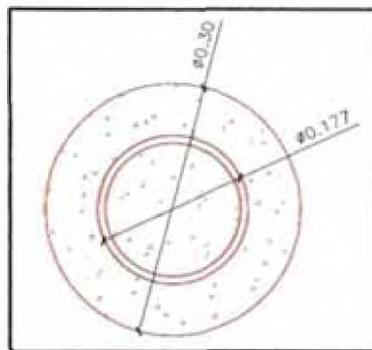
- **Versatilidad de los micropilotes**, esto es, facilidad para adaptarse a las “sorpresas” que suelen ofrecer los trabajos de perforación en centros históricos (aparición de galerías, cimentaciones antiguas, materiales de naturaleza y consistencia tremendamente variables, etc.) permitiendo garantizar su continuidad y verticalidad, aspectos muy importantes en este tipo de contenciones.
- **Ausencia de nivel freático por encima de la cota de máximo vaciado.** Debido a que se trata de una solución discontinua de contención, no es completamente impermeable al agua, por lo que la cota del nivel freático es un requisito indispensable a tener en cuenta. Según estudios de la zona se considera que el nivel freático se encuentra a una profundidad de 30m.

Para el diseño de pantalla de micropilotes se tuvo en cuenta las siguientes solicitudes de cálculo:

- Peso propio de los micropilotes y viga de atado
- Empujes del terreno, obtenidos según cálculo tenso-deformacional teniendo en cuenta las profundidades máximas de excavación y niveles de anclajes indicados en los planos.
- Solicitaciones sísmicas

#### 4.2.1. Características y distribución de micropilotes

Los micropilotes verticales ejecutados en el puente Trujillo son de 30 cm de diámetro, longitud promedio de 28 cm, armadura metálica TM80 ( $F_y \geq 560$  MPa) de 9 mm de espesor y diámetro exterior de 177 mm con unión macho - macho más manguito exterior y con inyección única global (IU), siendo la resistencia a la compresión de la lechada de cemento mayor o igual a 21 Mpa. La tolerancia de inclinación respecto al eje del micropilote es menor a 0.5%. El sistema de perforación es rotoperkusivo con martillo de fondo, barrido de aire comprimido y revestimiento hasta fondo de perforación.



FiguraN° 46. Sección de micropilotes verticales

La distribución de micropilotes tiene una gran influencia en el comportamiento de estos como grupo, pues una pantalla de micropilotes se comporta como una estructura continua debido al efecto arco que induce al suelo. El espaciado necesario para que se produzca dicho efecto depende de muchos factores (Propiedades resistentes del suelo, altura del nivel freático, cargas exteriores actuantes, etc). Generalmente un espaciado entre micropilotes de dos a tres veces su diámetro suele ser suficiente (Nethero, 1982) para producir el efecto arco.

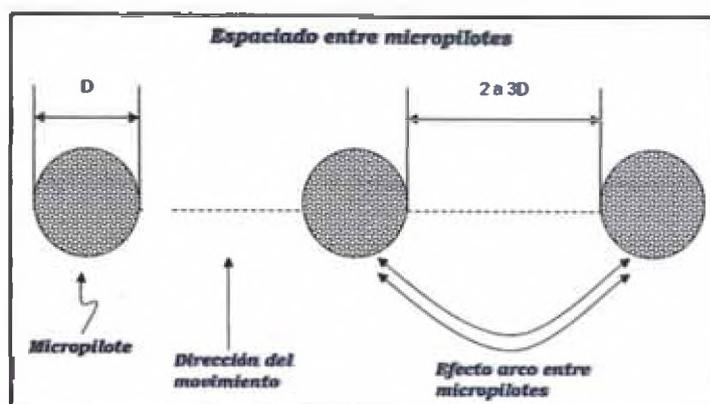


Figura N° 47. Referencia de espaciamiento entre micropilotes

La cantidad total de micropilotes ejecutados en la zona Puente Trujillo asciende a 288 unidades, lo cual involucra una perforación de más 7200 metros lineales. Los micropilotes se encuentran distribuidos en planta en tres grupos y en cuatro tipos.

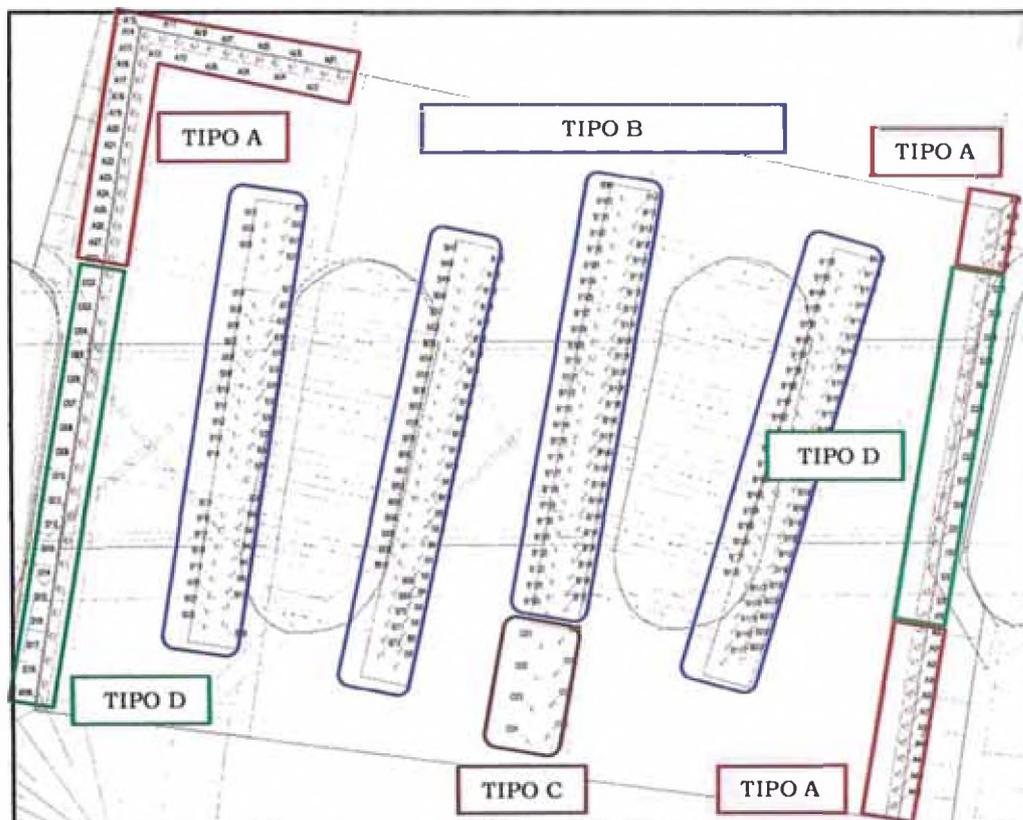


Figura N° 48. Vista en planta de distribución de micropilotes en Puente Trujillo

- **Micropilotes perimetrales.** Dentro de este grupo se encuentran los micropilotes tipo A y tipo D correspondientes a la pantallas de contención de los pilares 1 y 4 respectivamente. Tienen como cota final de perforación al nivel +120,55 m.s.n.m. La distancia entre ejes de los micropilotes tipo A y tipo D son 0.75m y 1.125m respectivamente. En total son 77 micropilotes perimetrales: 43 del tipo A y 34 del tipo D.

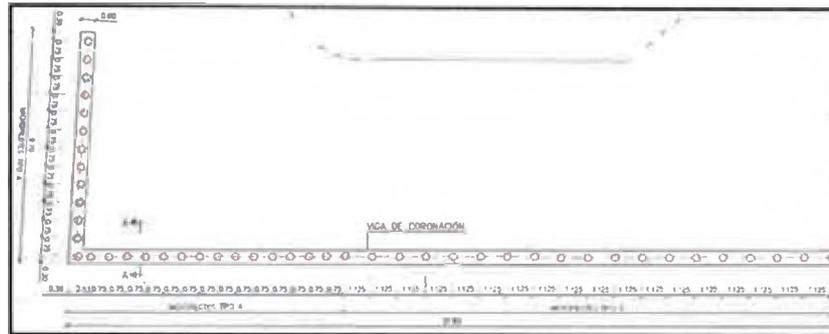


Figura N° 49. Distribución de micropilotes tipo A y D en el Pilar 1 del Puente Trujillo



Figura N° 50. Distribución de micropilotes tipo A y D en el Pilar 4 del Puente Trujillo

- **Micropilotes de apeo.** Pertenecen a este grupo todos los micropilotes del tipo B, los cuales forman parte de un sistema complejo de apeo que permitirá el sostenimiento de los pilares 2 y 4 del Puente Trujillo durante la construcción del túnel que se encontrará por debajo del nivel de fondo de zapata de los pilares. Tienen como cota final de perforación al nivel +119.91 m.s.n.m. Las pantallas que contienen a estos micropilotes no son de contención de terreno sino de recalce y/o cimentación, pues estarán sometidos a fuerzas axiales permanentes, pues tendrán como principal función transmitir y soportar las cargas de los pilares cuando se excave el material de fundación; debido a esto, los micropilotes de este tipo serán empresillados diagonalmente cada 0.75m y serán arriostrados a medida que se avance con los niveles de excavación correspondientes. En total están distribuidos en ocho filas, las cuales están repartidas en dos filas a cada lado de los pilares. La distancia

entre eje de los micropilotes es de 0.75m y el espaciamiento entre filas es de 0.80m. En total son 203 micropilotes de este tipo.

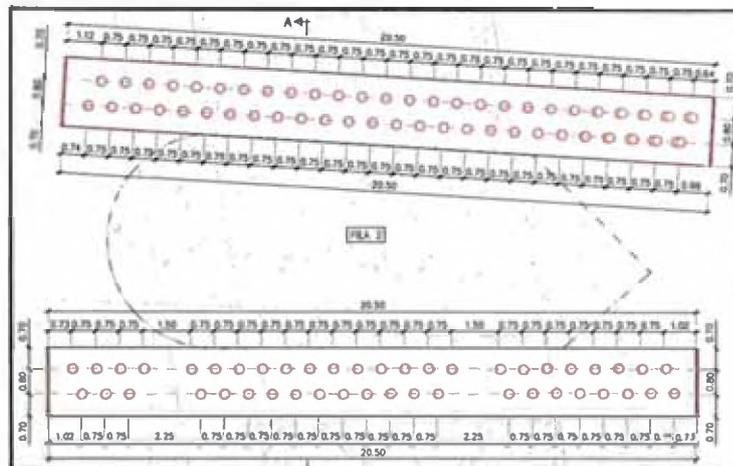


Figura N° 51. Distribución de micropilotes tipo B en el Pilar 2 del Puente Trujillo

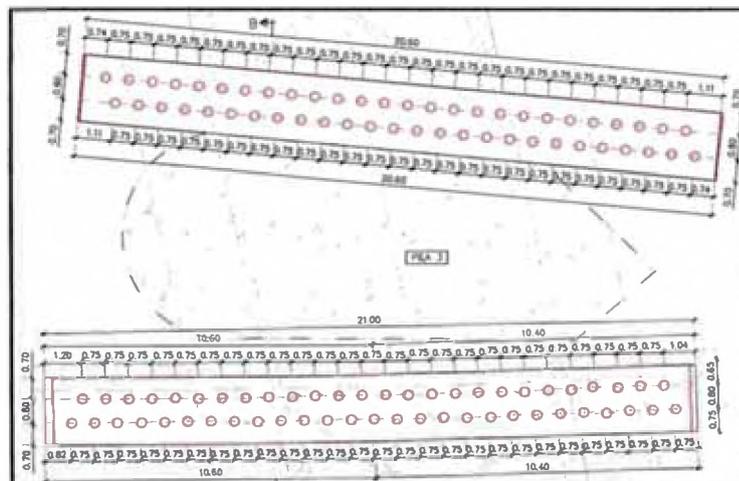


Figura N° 52. Distribución de micropilotes tipo B en el pilar 3 del Puente Trujillo

- **Micropilotes de apoyo provisional de cubierta.** Incluye a los micropilotes tipo C, son de la misma característica que los micropilotes tipo B, solo que no participan activamente en el sistema de apeo de los pilares, pero sí trabajan como soporte provisional de losa superior de túnel (cubierta). La distancia entre eje de los micropilotes es de 1.50m y el espaciamiento entre filas es de 0.80m. En total son 8 micropilotes de este tipo.

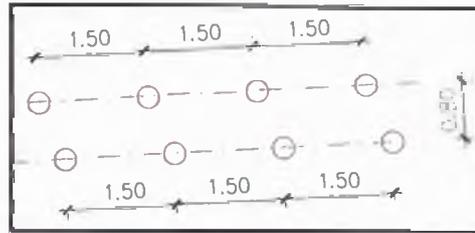


Figura N° 53. Distribución de micropilotes tipo C

#### 4.2.2. Características y distribución anclajes.

Los anclajes a ejecutarse en la pantalla de micropilotes son del tipo DIWIDAG de diámetro igual 32mm con un diámetro de perforación mínimo de 105mm. El anclaje tendrá una carga de rotura de 1050 KN y un límite elástico de cálculo de 850 KN. El acero de las barras DIWIDAG cumplirá las condiciones siguientes:

- Tensión Mínima de Rotura 1050 N/mm
- Límite Elástico Mínimo 850 N/mm<sup>2</sup>

La inyección del anclaje será única y la lechada de cemento tendrá una resistencia mínima de 25 MPa

#### Tesado del anclaje.

La operación de tesado se realizará con lentitud y escalonada, deteniéndola cuando alcancen el 80%, el 100% y el 120% (carga de prueba) de la carga del anclaje.

- El tiempo de estabilización para los escalones de carga será de 15 minutos para el primero, 15 minutos para el segundo y 15 minutos para la carga de prueba
- Establecido el comportamiento satisfactorio del anclaje para la carga de prueba se reducirá la presión a la carga de anclaje indicada en la tabla (carga de bloqueo)
- El sistema utilizado permitirá el retesado

### Protección del anclaje.

- Se considerarán los anclajes como provisionales
- Una vez tesados los tendones se inyectará en las vainas en toda la longitud libre un producto (grasa o betún) apropiado para la protección anticorrosiva del acero.

### Desenclavamiento del anclaje.

- Los anclajes serán desenclavados en el orden que se indica en los planos de fases de ejecución de la estructura
- La operación de desenclavado se realizara con lentitud, reproduciendo en orden inverso las etapas indicadas para el tesado

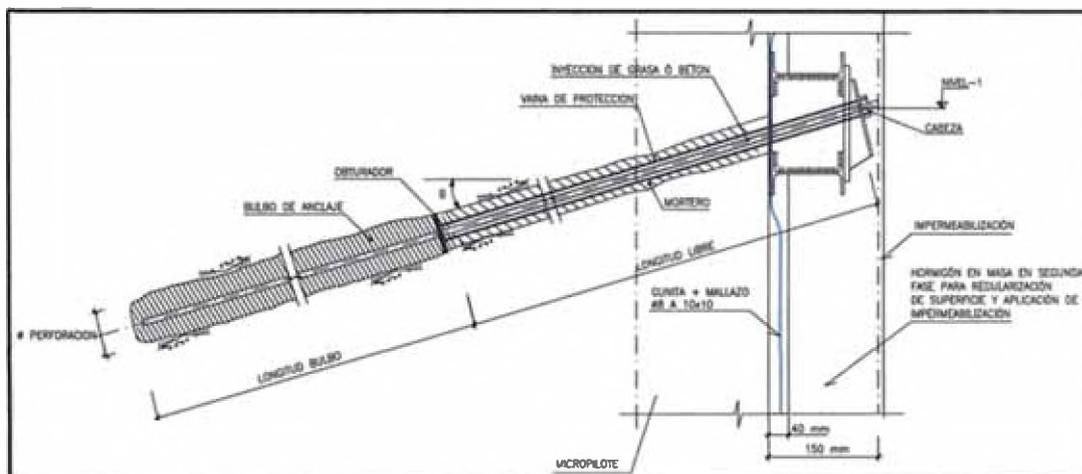


Figura N° 54. Esquema de forma y composición de anclajes

Las características específicas de los anclajes que se ejecutarán para arriostamiento de pantalla de micropilotes en siete niveles se muestran en el cuadro N° 8, estos anclajes serán provisionales y serán ejecutados alternadamente en la primera capa de shotcrete de la pantalla de micropilotes.

**Cuadro N° 8. Características de anclajes en sistema de contención con pantalla de micropilotes.**

Nivel de anclaje (N°)	Longitud libre (m)	Longitud de bulbo (m)	Angulo de inclinación (<sup>°</sup>)	Fuerza de pretensado (KN)	Separación horizontal (m)	Separación vertical (m)	Cota de nivel (m)
1	6.5	13	20	300	3	0	143.2
2	6.5	13	20	300	3	3	140.2
3	6.5	13	20	300	3	1.5	138.7
4	6.5	13	20	300	3	1.5	137.2
5	6.5	13	20	300	3	1.5	135.7
6	6.5	13	20	300	1.50	1.5	134.2
7	6.5	13	20	300	1.50	1.5	132.7

**Fuente: "Planos de Ingeniería definitivos para ejecución de anclajes en pantalla de micropilotes", 2014.**



**Figura N° 55. Ejecución de anclajes en pantalla de micropilotes puente Ricardo Palma**

#### **4.2.3. Sondeos de exploración.**

Para la ejecución de los micropilotes de contención y sistema de apeo en la zona de excavación central, se realizó pruebas de sondeo a rotación vertical desde tablero horizontal del Puente Trujillo y pruebas de sondeo a rotación horizontal en los pilares 2 y 3 del Puente Trujillo.

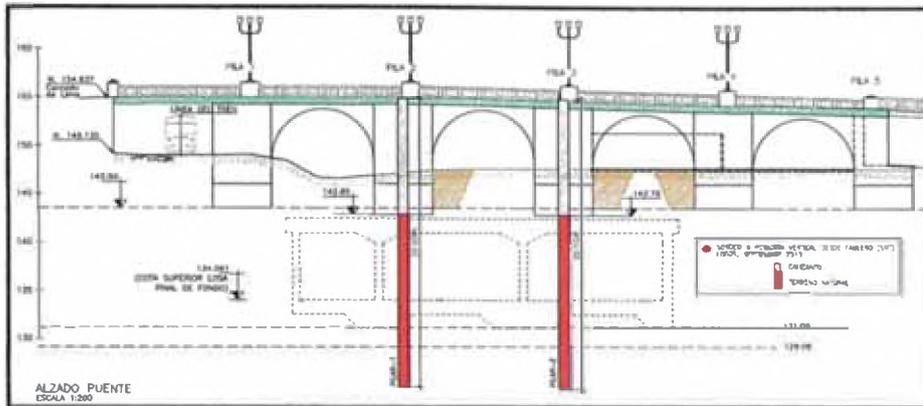


Figura N° 56. Sondeo vertical en pilares 2 y 3 del Puente Trujillo



Figura N° 57. Resultado de muestras de sondeo vertical en pilares 2 y 3 del Puente Trujillo



Figura N° 58. Trabajos de sondeo horizontal en pilares del Puente Trujillo

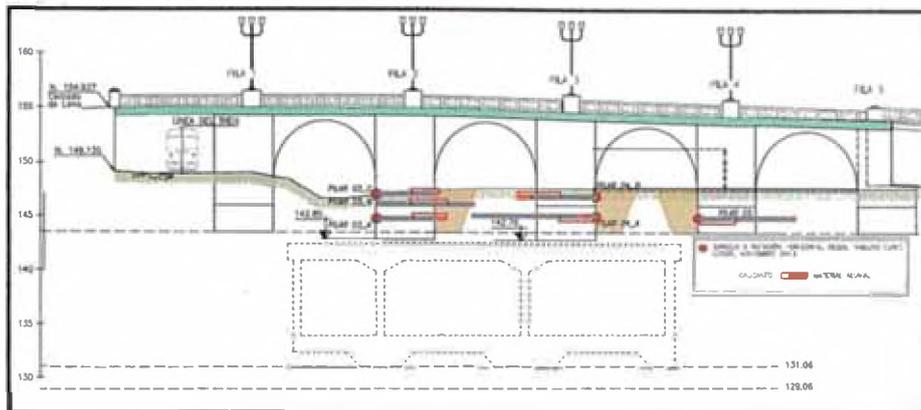


Figura N° 59. Sondeo horizontal en pilares 2 y 3 del Puente Trujillo

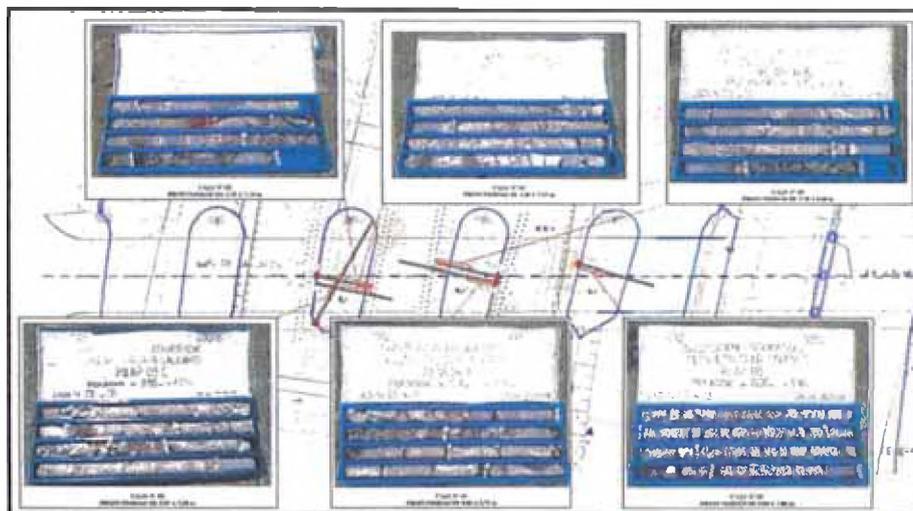


Figura N° 60. Resultado de muestras de sondeo horizontal en pilares 2 y 3 del Puente Trujillo

#### 4.2.4. Procedimiento constructivo de túnel en puente Trujillo – Zona de ejecución de pantalla de micropilotes

1. En primera instancia se realizó el desvío del cauce normal del río Rímac hacia un canal provisional de concreto. Este canal fue construido el 2013, es de sección rectangular y según cálculos ingenieriles de proyección cumple con todas las características necesarias para conducir las aguas del río Rímac en épocas de avenida, aun así sólo se pueden realizar trabajos de construcción

en el cauce normal del río durante la época de estiaje (meses de abril a noviembre).

2. Los trabajos iniciales consisten en la excavación de material de lecho de río y material de relleno que fue colocado para construcción en zonas aledañas permitiendo un paso adecuado de máquinas de perforación y movimiento de tierras, además dicho material a excavar también estaba conformado por rocas y concreto que fue colocado para paso del río luego de los trabajos del 2013. La excavación se realizó hasta la cota 143.61 m.s.n.m., la cual determinó el nivel de plataforma de trabajo para ejecución de micropilotes. Este movimiento de tierras fue a recurso de excavadoras, picotón y volquetes. Estos trabajos debían realizarse con extrema protección de la estructura del Puente, pues al ser considerado patrimonio de la UNESCO todas las excavaciones y otros procesos constructivos debían tener una aprobación de personal de la municipalidad así como una observación continua de las actividades por personal de arqueología.

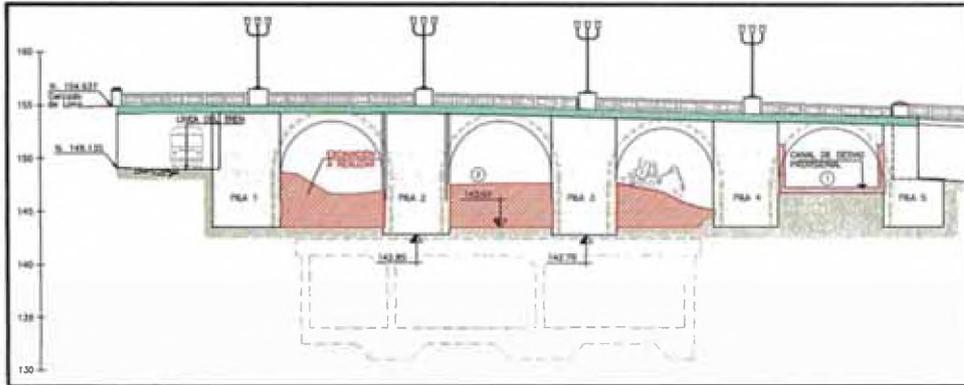


Figura N° 61. Vista en elevación de la excavación a realizar

3. Con la plataforma de trabajo acondicionada se procede a ejecutar los 288 micropilotes verticales, que involucra las fases de perforación, colocación de armadura e inyección del micropilote. Las perforaciones se inician sobre los micropilotes replanteados en los muros guías correspondientes, o en su defecto replanteados en la plataforma de trabajo.
4. Demolición del muro guía y saneo de coronación de micropilotes (descabezado de micropilote: mezcla pobre de cemento).



Figura N° 62. Mezcla pobre de cemento en cabeza de micropilote

5. Terminado la ejecución de micropilotes verticales y la demolición del muro guía se procede a la construcción de viga de coronación de los micropilotes perimetrales y el encepado de los micropilotes de apeo al lado de los pilares centrales (armado, encofrado y concretado)
6. Se realiza la ejecución de topes sísmicos en cada lado de los pilares 2 y 3 respectivamente.
7. Ejecución de vigas de amarre en el perímetro de los pilares 1 y 4. Se dejarán embebidas las esperas y arranques de tubos necesarios para la posterior ejecución de los arriostramientos.

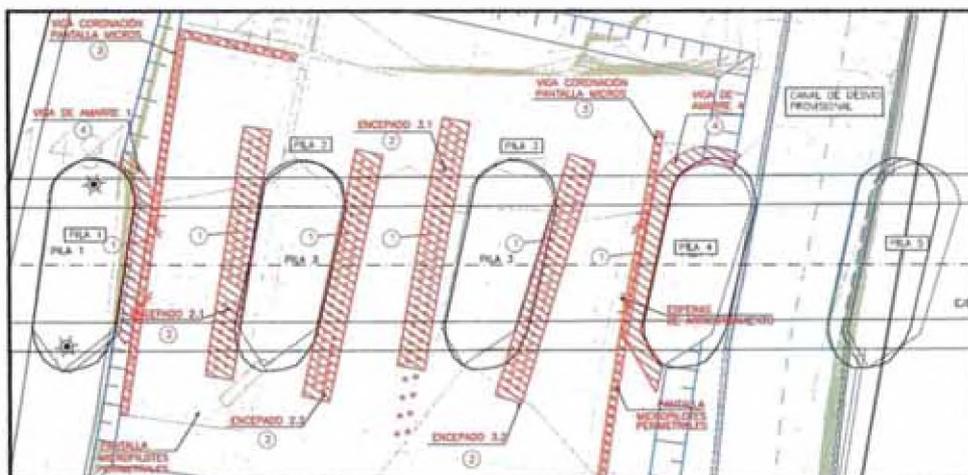


Figura N° 63. Vista en planta de micropilotes, encepados y vigas de amarre y coronación

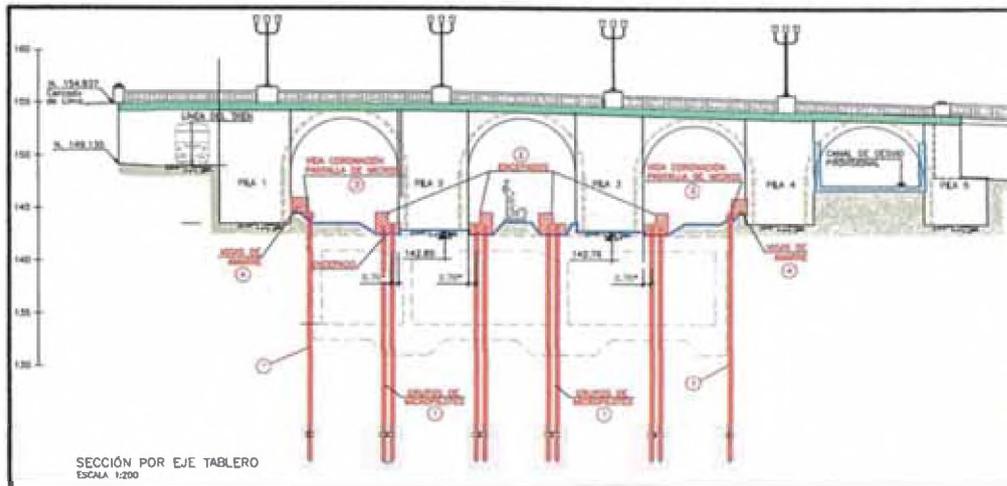


Figura N° 64. Vista en elevación de micropilotes, encepados y vigas de amarre y coronación

8. Ejecución de las galerías atravesando los pilares centrales, las excavaciones serán en tramos de 1m y con dos frentes de avance uno por cada lado del pilar. La excavación de las galerías será en dos fases según indicación (3 galerías por cada pilar por fase).

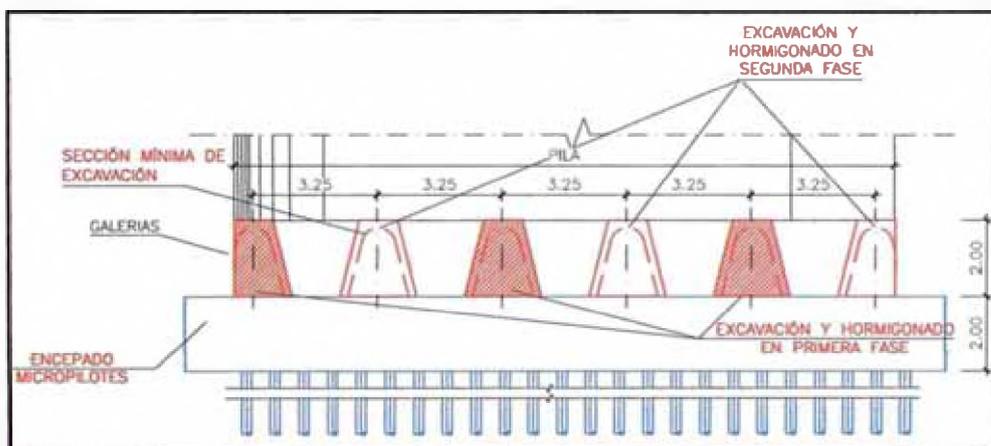


Figura N° 65. Sección transversal de pilar del puente

Los sistemas de sostenimiento para la excavación de estas galerías (vigas pasantes) que se usarán son:

**Alternativa A.** Ejecución de paraguas de micropilotes (inclinación máxima de  $1^\circ$  respecto a la horizontal) más perfiles metálicos como cercha de sostenimiento, además de la colocación de puntales discretos para posibles desprendimientos puntuales.

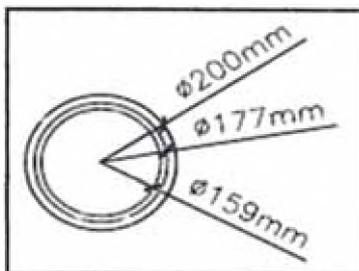


Figura N° 66. Sección de micropilotes horizontales como paraguas de sostenimiento de excavación de galerías.

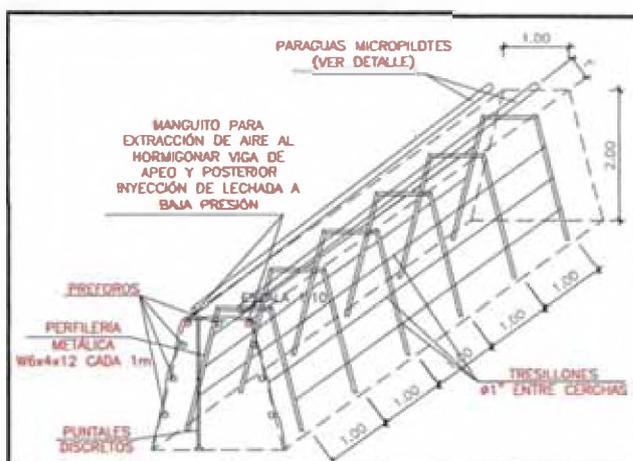


Figura N° 67. Alternativa A para sostenimiento de galerías horizontales

- **Alternativa B.** Ejecución de paraguas de micropilotes (inclinación máxima de 1° respecto a la horizontal) más sostenimiento provisional de chapas de acero corrugado modular con puntales interiores cada 1m para cierre de sección.

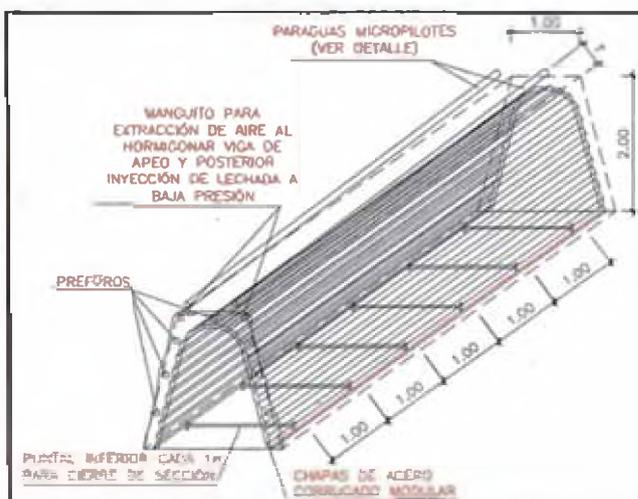


Figura N° 68. Alternativa B para sostenimiento de galerías horizontales

- Se realiza el armado de acero, encofrado y concretado de las galerías excavadas en la fase anterior para formación de vigas de apeo, se tendrá especial cuidado en dejar: Vaina para armadura activa de galerías y esperas en extremos de vigas de apeo para las vigas de reparto.
- Repetición de los puntos 7 y 8 para ejecución de las vigas de apeo restantes. No se podrá iniciar este punto hasta que el concreto de las galerías ya ejecutadas anteriormente alcance su resistencia característica.

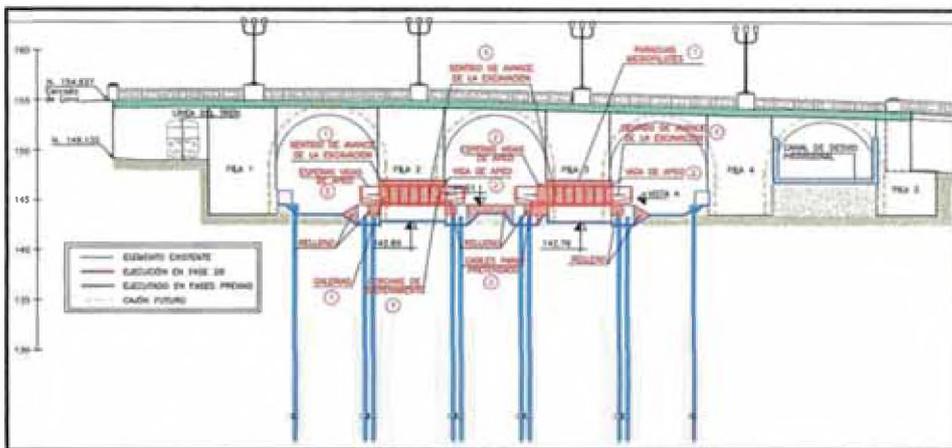


Figura N° 69. Vista en elevación de vigas de apeo

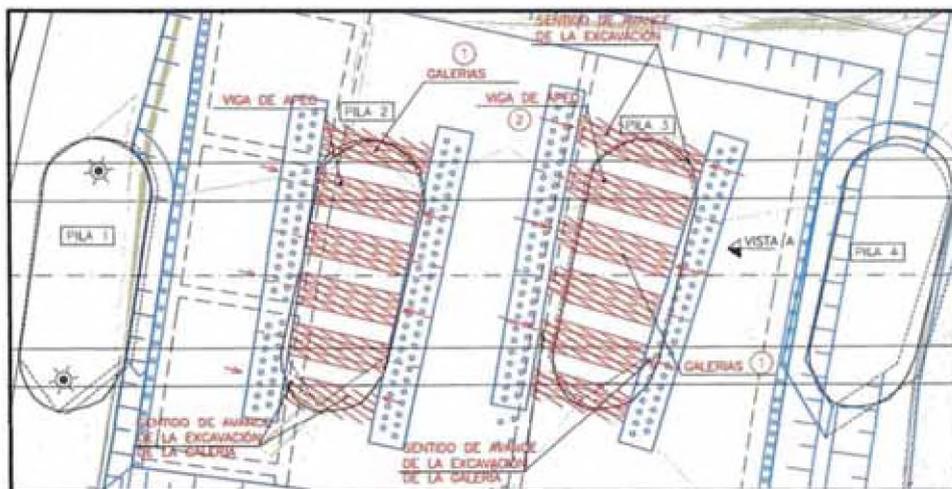


Figura N° 70. Vista en planta de vigas de apeo

- Armado de acero, encofrado y concretado de las vigas de reparto sobre los encepados de micropilotes. Se dejarán embebidos las esperas y arranques de tubos necesarios para la posterior ejecución de los arriostramientos.

12. Ejecución de la primera fila de anclajes, replanteados en las vigas de coronación de las pantallas perimetrales de micropilotes.

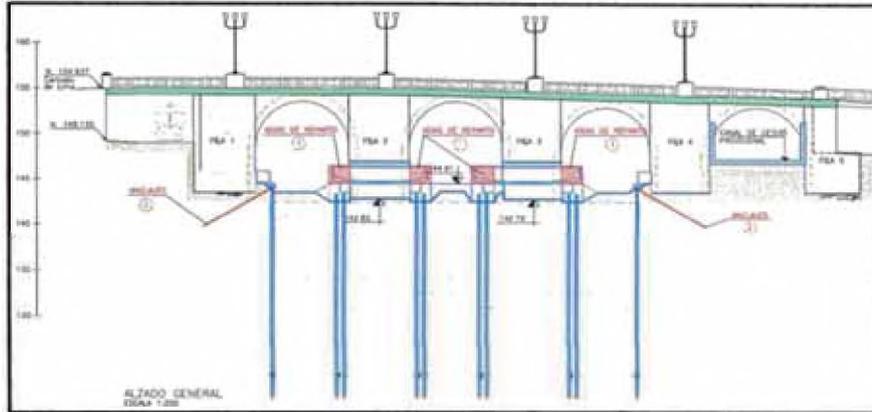


Figura N° 71. Vista en elevación de vigas de reparto, coronación y primer nivel de anclajes

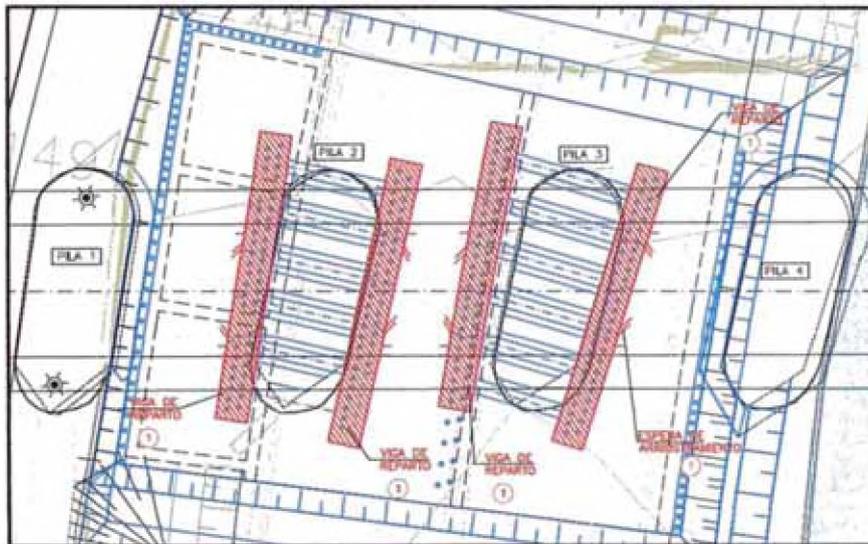


Figura N° 72. Vista en planta de vigas de reparto

13. Ejecución de los postesados de las vigas de apeo. Se seguirá la misma secuencia de postesado que en la excavación de las galerías y concretado de las vigas de apeo.

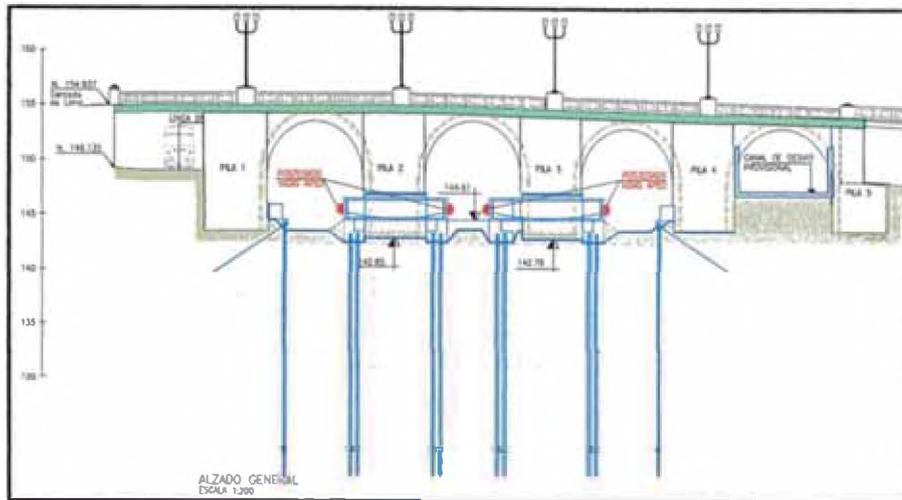


Figura N° 73. Vista en elevación de postesado de vigas de apeo

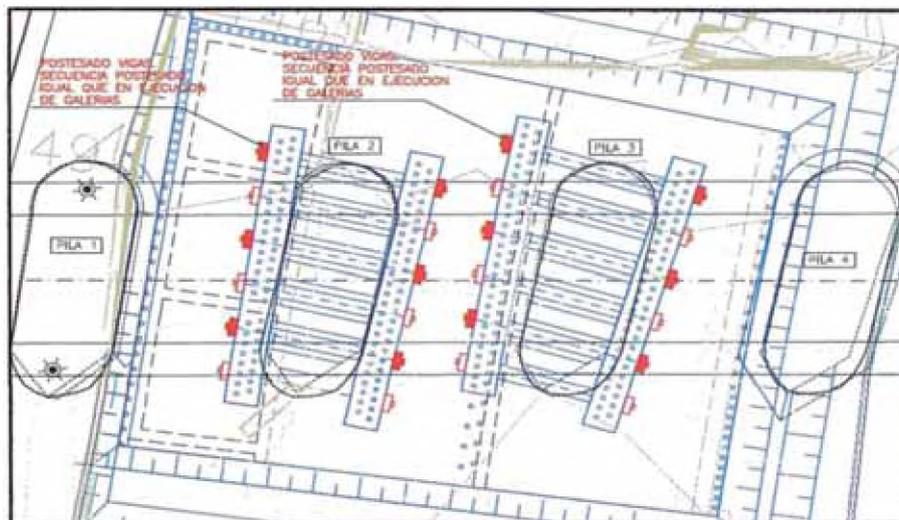


Figura N° 74. Vista en planta de orden de postesado de vigas de apeo

14. Ejecución de elementos de arriostramiento entre vigas de reparto
15. Ejecución de Cimbrado de los arcos del puente. La cimbra deberá poder ajustarse en altura de modo preciso, para poder hacerlo en su caso cualquier fase del proceso constructivo.

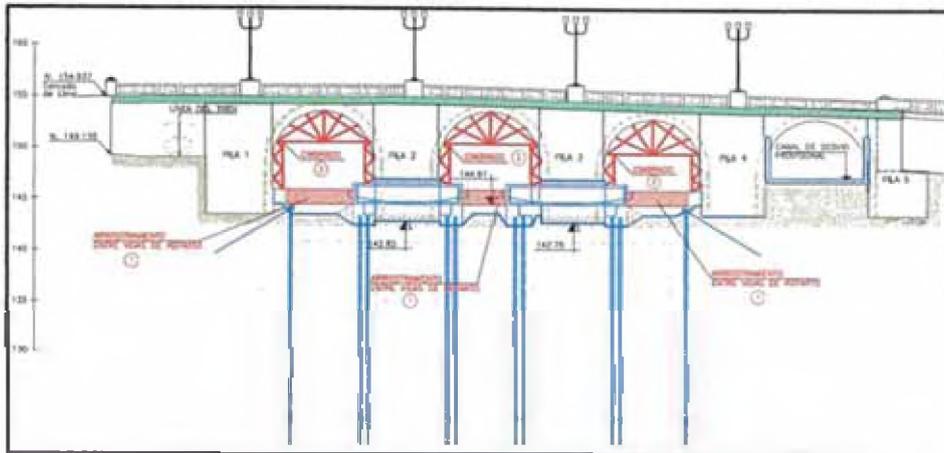


Figura N° 75. Vista en elevación de cimbrado de arcos y arriostramiento de vigas de reparto

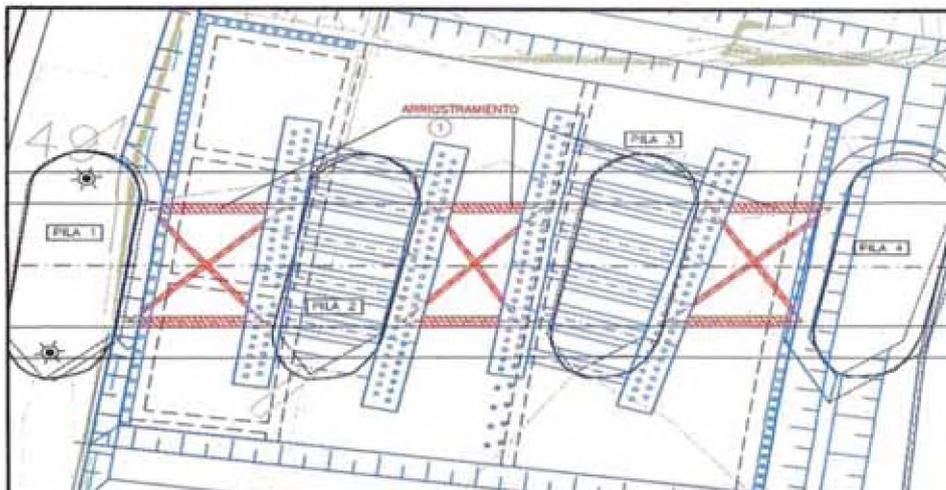


Figura N° 76. Vista en planta de cimbrado de arcos y arriostramiento de vigas de reparto

16. Excavación hasta cota cara superior de la cubierta del modulo
17. Se dispondrán 8 gatos por cada pilar en los espacios habilitados para ello, entre los encepados de los micropilotes y las vigas de reparto.
18. Puesta en carga simultanea de los gatos para transferir la carga de los pilares a las cimentaciones de micropilotes

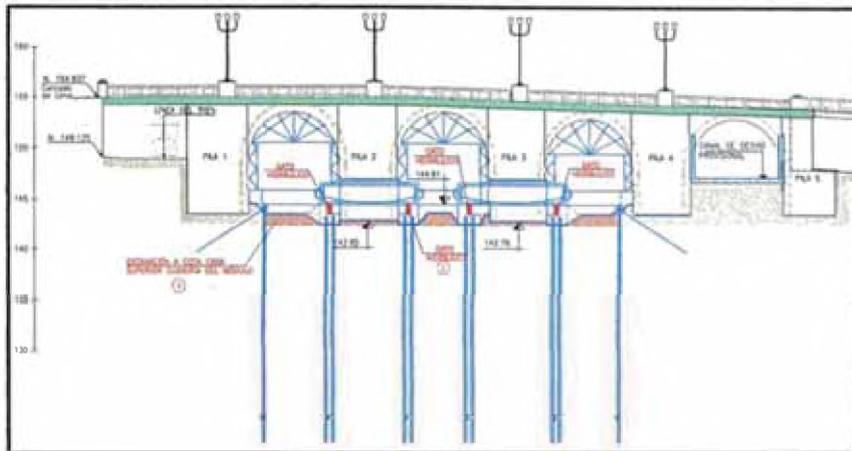


Figura N° 77. Vista en elevación de ubicación de gatos hidráulicos y primera zona de excavación

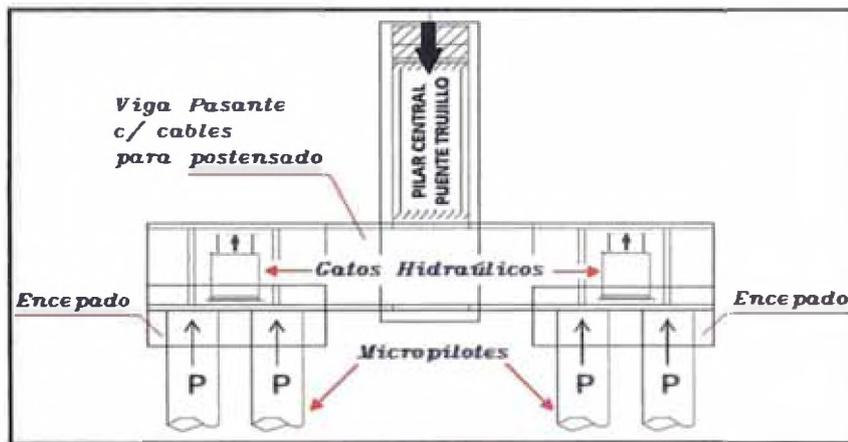


Figura N° 78. Sección transversal de los pilares centrales 2 y 3 – Puente Trujillo

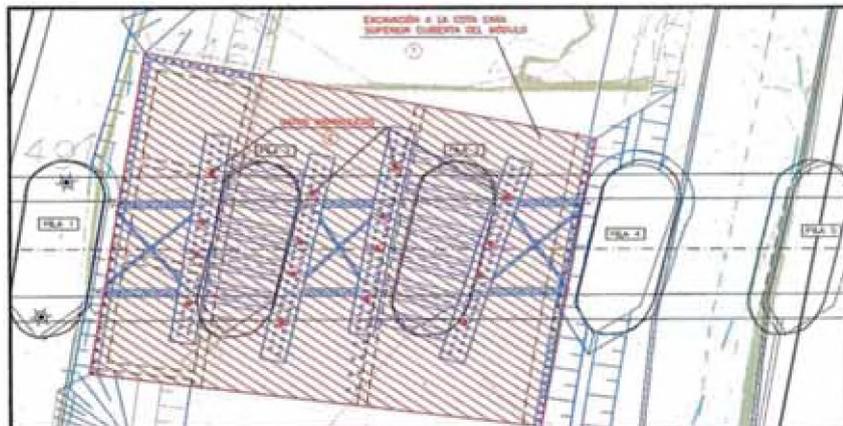


Figura N° 79. Vista en planta de zona a excavar después de poner en marcha el sistema de apeo mediante gatos hidráulicos

19. Excavación en mina bajo los pilares en sentido de avance longitudinal al cauce del río hasta la cota inferior de la losa de cubierta del futuro módulo junto con concreto de limpieza más polietileno para encofrado contra el terreno.
20. Será necesario realizar un saneo de la base de pilar de las zonas que se aprecien inestables. En caso de ser necesario, se dispondrán perfiles metálicos de sostenimiento bajo los pilares en los espacios entre vigas de apeo, anclados a las mismas vigas.

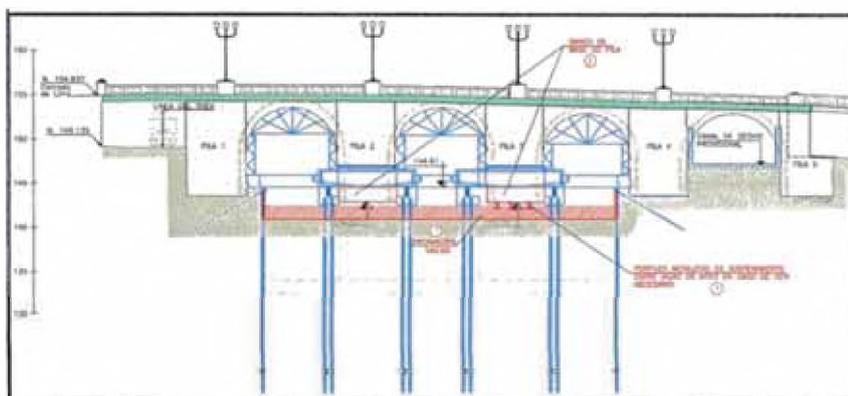


Figura N° 80. Vista en elevación de segunda excavación y saneo de base de pilares

21. Ejecución de conectores entre micropilotes y futura losa superior
22. Ejecución de la losa superior del módulo por tramos y conexión a los micropilotes verticales
23. Impermeabilización de la losa superior
24. Relleno con concreto hasta 10cm de la base de pilares
25. Relleno con mortero de alta resistencia sin retracción en base de los pilares. Al menos habrán pasado 2 días desde el concretado del punto anterior

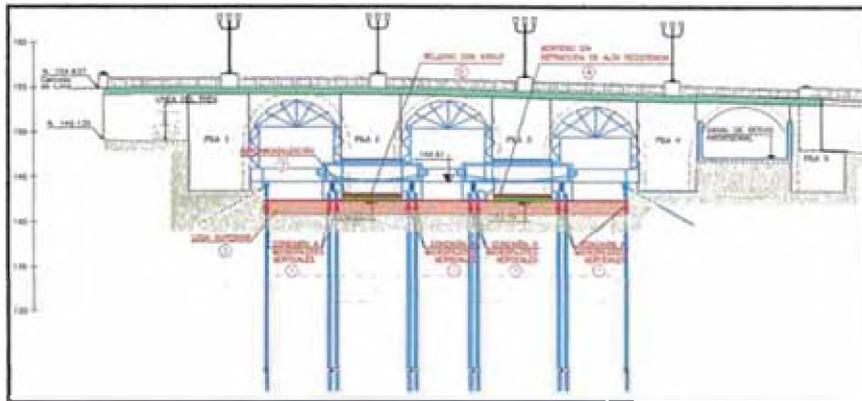


Figura N° 81. Vista en elevación de ejecución de losa superior de túnel y conexión con micropilotes, impermeabilización de base de pilares

26. Excavación hasta cota máxima al abrigo de los micropilotes de contención perimetrales que se anclaran de forma provisional, según procedimiento
27. Durante el proceso de excavación se estabilizaran los micropilotes mediante presillas metálicas, la excavación máxima sin empresillado será de 3m

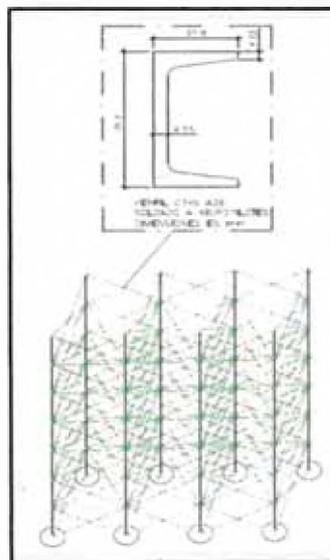


Figura N° 82. Empresillado de micropilotes verticales para sistema de apeo

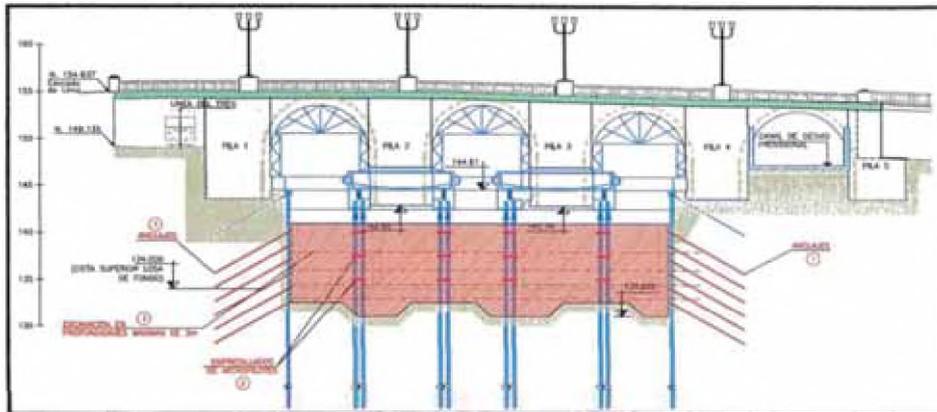


Figura N° 83. Vista en elevación de ejecución de anclajes en pantalla de micropilotes y excavación hasta nivel superior de base de túnel

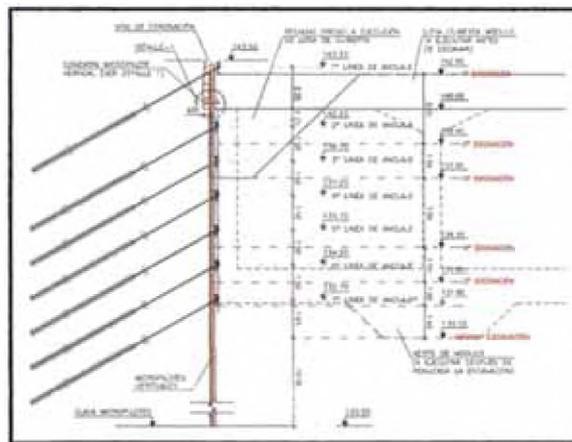


Figura N° 84. Perfil de pantalla de micropilotes con niveles de anclajes

### Proceso Detallado de Excavación

- Excavación a cota de la viga de coronación de la pantalla de micropilotes +142.90m
- Ejecución del primer nivel de anclajes a cota +143.20m
- Excavación por debajo del segundo nivel de anclajes a cota +139.45m
- Ejecución del segundo nivel de anclajes a cota +140.20m y construcción de revestimiento entre micropilotes con shotcrete
- Excavación por debajo del tercer nivel de anclajes a cota +137.95m
- Ejecución del tercer nivel de anclajes a cota +138.70m y construcción de revestimiento entre micropilotes con shotcrete

- Relleno de tierras hasta la cota de la cara inferior de la losa de cubierta +140.95m
- Ejecución de la losa de cubierta
- Excavación por debajo del cuarto y quinto nivel a cota +134.95
- Ejecución del cuarto y quinto nivel de anclaje a cotas +137.20m y +135.70m y construcción de revestimiento entre micropilotes con shotcrete
- Excavación por debajo del sexto y séptimo nivel a cota +131.95m
- Ejecución del sexto y séptimo nivel a cotas +134.20m y 132.70m y construcción de revestimiento entre micropilotes con shotcrete
- Excavación a cota máxima

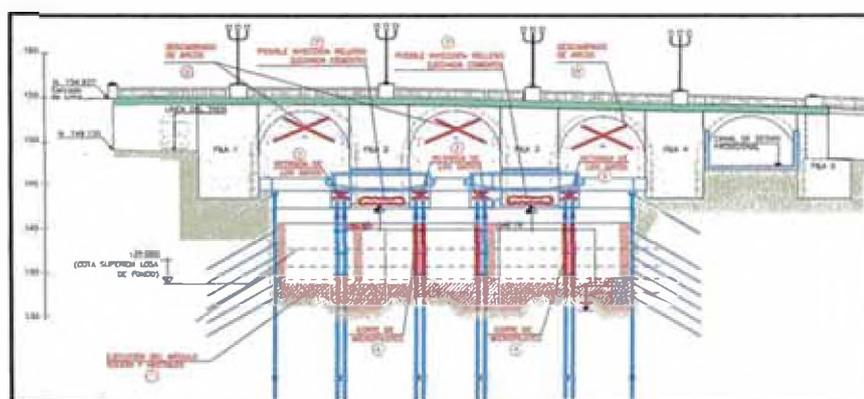
28. Ejecución del módulo: Soleras y hastiales

29. Al alcanzar el módulo su resistencia a compresión (concreto bajo los pilares) se procederá al desgato (según procedimiento específico)

30. Posible inyección de relleno en base de pilar, se dejarán manguitos para tal efecto

31. Corte de micropilotes y sellado en el corte con el módulo. Se cortarán sólo aquellos micropilotes que pudieran interferir con la futura funcionalidad del túnel.

32. Descimbrado de arcos



**Figura N° 85. Vista en elevación de corte de micropilotes verticales, retiro de gatos hidráulicos y descimbrado de arcos**

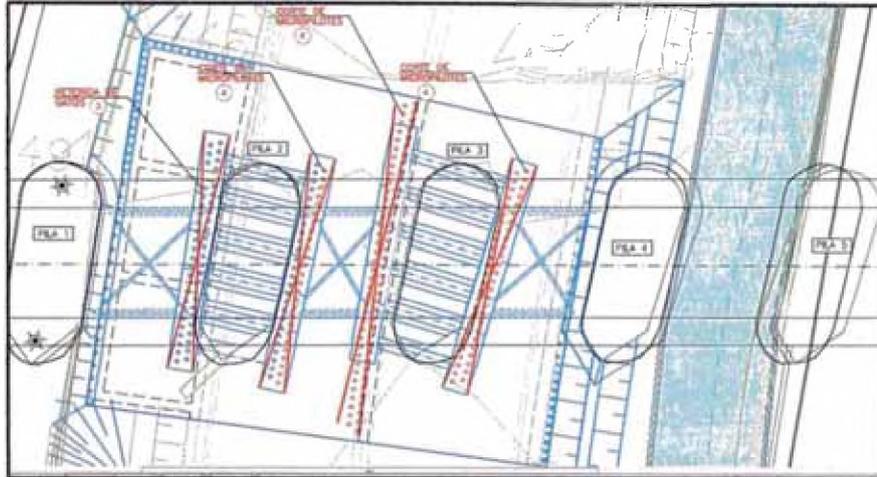


Figura N° 86. Vista en planta de micropilotes a cortar

33. Relleno con material de préstamo hasta cota de río
34. Ejecución de acabado con enrocado recebado
35. Ejecución de los acabados de túnel

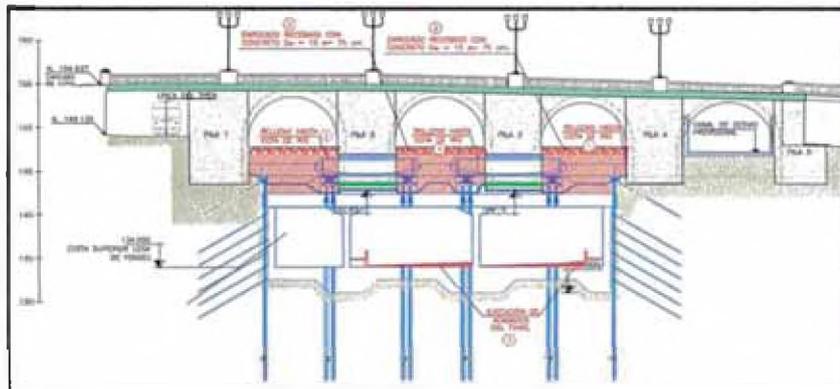


Figura N° 87. Vista en elevación de relleno de y enrocado de lecho de río Rímac

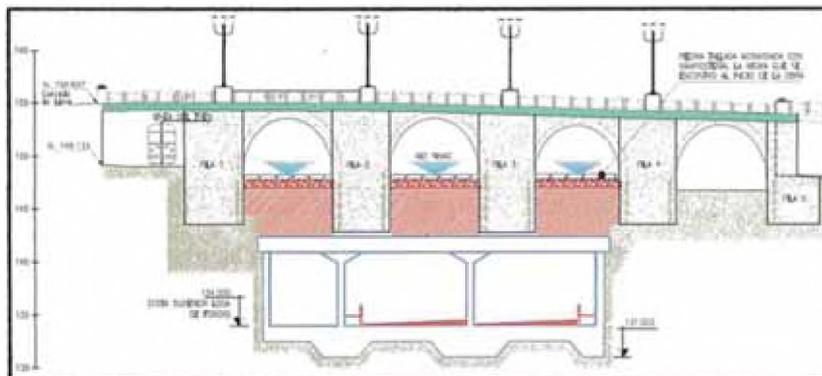


Figura N° 88. Vista en elevación de túnel terminado debajo del río Rímac

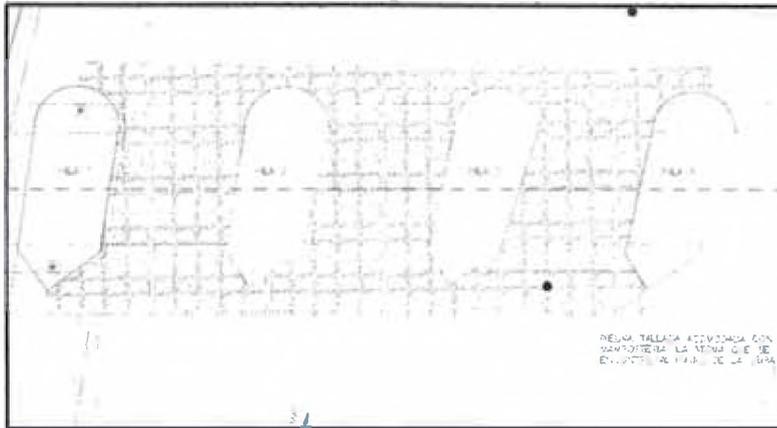


Figura N° 89. Vista en planta de acabado de lecho de Río debajo del Puente Trujillo

### 4.3. Control de calidad

Deberán controlarse en cualquier caso, los siguientes aspectos:

- Materiales.
- Cada una de las fases de ejecución.
- Perforación.
- Colocación de la armadura.
- Fabricación de la lechada o mortero.
- Inyección.
- Partes de trabajo.

#### 4.3.1. Control de materiales

##### Armadura tubular

A los efectos del control del suministro de los productos de acero para armadura tubular, se denomina partida al material que cumpla simultáneamente las siguientes condiciones:

- Que corresponda al mismo tipo de perfil hueco.
- Que corresponda al mismo tipo y grado de acero.
- Que proceda de un mismo fabricante.
- Que haya sido suministrado de una vez.

No podrán utilizarse productos de acero como armadura tubular que no adjunten la documentación indicada a continuación:

- Nombre y dirección de la empresa suministradora.
- Fecha de suministro.
- Identificación del vehículo que lo transporta.
- Número de partidas que componen el suministro, identificando, para cada partida, al fabricante y su contenido (peso, número de perfiles, tipo y grado de acero del material base de partida).

Además, cada partida deberá llegar acompañada de la siguiente documentación:

- Certificado del fabricante, firmado por persona física, en el que se indiquen los valores de las diferentes características que contenga la armadura
- Resultados de los ensayos que justifiquen que los productos de acero cumplen las características anteriormente citadas.

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del proyecto incluirá los criterios para llevar a cabo el control de los acopios de armaduras.

## **Cemento**

Se comprobará la temperatura del cemento a su llegada a obra. Se considerará como lote, que se aceptará o rechazará en bloque, a la cantidad de cemento del mismo tipo y procedencia recibida semanalmente, diariamente, o según requerimiento de obra en suministros continuos, o cada uno de los suministros, en suministros discontinuos.

De cada lote se tomarán dos muestras, una para realizar los ensayos de recepción y otra para ensayos de contraste que se conservará al menos durante cien días, en un lugar cerrado, donde las muestras queden protegidas de la humedad, el exceso de temperatura o la contaminación producida por otros materiales.

Una vez cada tres meses y como mínimo tres veces durante la ejecución de la obra, por cada tipo, clase resistente de cemento, y cuando lo especifique el

pliego de prescripciones técnicas particulares al proyecto o lo solicite el Ingeniero Residente, se realizarán obligatoriamente los mismos ensayos indicados anteriormente como de recepción.

Si el cemento hubiera estado almacenado, en condiciones atmosféricas normales durante un plazo superior a un mes, dentro de los diez días anteriores a su empleo se realizarán, como mínimo, los ensayos de fraguado y resistencia a compresión a tres y siete días sobre una muestra representativa de cada lote de cemento almacenado, sin excluir los terrones que hubieran podido formarse. El Director de las Obras definirá los lotes de control del cemento almacenado. En todo caso, salvo si el nuevo período de fraguado resultase incompatible con las condiciones particulares de la obra, la sanción definitiva acerca de la idoneidad de cada lote de cemento para su utilización en obra vendrá dada por los resultados de los ensayos exigidos a la unidad de obra de la que forme parte.

En ambientes muy húmedos, o en condiciones atmosféricas desfavorable o de obra anormales, el Director de las Obras podrá variar el plazo de un mes anteriormente indicado para la comprobación de las condiciones de almacenamiento del cemento.

El ingeniero residente indicará las medidas a adoptar en el caso de que el cemento no cumpla alguna de las especificaciones establecidas en el presente artículo, o ante alguna observación por parte de supervisión de obra.

#### **4.3.2. Control de Ejecución**

##### **Control de la perforación y colocación de la armadura**

Durante la ejecución de los micropilotes se comprobará que se cumplen los procedimientos y secuencias constructivas establecidas en el proyecto y en el protocolo de ejecución.

Al realizar la perforación se comprobará que el estado y características del terreno se corresponden con las previstas en el proyecto. En caso contrario se deberán analizar las potenciales repercusiones de dichas variaciones en la propia concepción del micropilote y en su proceso de ejecución.

En caso de que fuera necesario emplear sistemas de perforación diferentes de los previstos en el proyecto, deberá tenerse en cuenta su repercusión en la determinación del valor de la resistencia estructural, a través del coeficiente de influencia del tipo de ejecución.

Se comprobará el replanteo de cada uno de los micropilotes, ejecutándose posteriormente la perforación con las tolerancias geométricas establecidas en el proyecto.



Figura N° 90. Control de verticalidad en la perforación del micropilote

### **Control de la fabricación de la lechada o mortero y del proceso de inyección**

Se efectuarán controles para verificar la idoneidad, tanto de la fabricación de la mezcla, como del proceso de inyección. En el proyecto o en el protocolo de ejecución, se dividirá la obra en lotes de control y se fijará el número de muestras y ensayos a llevar a cabo por cada lote, atendiendo a las características de la obra, la función de los micropilotes, el carácter temporal o permanente de los mismos, etc. Los controles que se llevarán a cabo con frecuencia diaria son:

- Tiempo de amasado.
- Relación agua/cemento (a/c).

- Cantidad de aditivo utilizado.
- Viscosidad con el cono Marsh.
- Densidad aparente de la lechada con una balanza de lodos, inmediatamente antes de la inyección.
- Al menos dos veces por semana se efectuará una toma de muestras para realizar los siguientes ensayos:
  - De resistencia a compresión de la
  - Lechada o mortero, mediante la rotura de tres probetas a veintiocho días de edad.
  - De exudación y reducción de volumen.
- Se comprobará que los valores de los parámetros controlados coinciden con los establecidos en el proyecto y en el protocolo de ejecución.

#### **4.3.3. Control diario de partes de trabajo de producción**

Una vez que se haya concluido la ejecución de cada micropilote, se completará un parte de trabajo que contendrá toda la información de la perforación, colocación de armadura e inyección del micropilote, en dicho parte se colocarán también todas las incidencias ocurridas en cada etapa de ejecución, así como los controles que se realizan oportunamente.

Se verificará la existencia de un parte de trabajo por cada micropilote, comprobando su contenido, conforme a lo indicado en el párrafo precedente. Los partes de trabajo de ejecución estarán en todo momento a disposición de todas las áreas involucradas en el desarrollo de la obra y el control del proyecto, entre estos: Producción, control de calidad y oficina técnica. Es recomendable su archivo junto con el resto de documentación técnica de las mismas.

#### **4.3.4. Ensayos de calidad para control de micropilotes ejecutados**

##### **Ensayos de Integridad**

Los ensayos de integridad suministran informaciones sobre las dimensiones físicas, la continuidad o la consistencia de los materiales empleados en el relleno

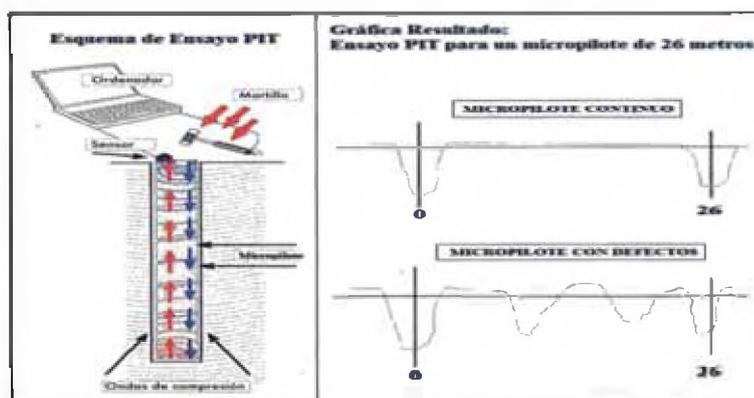
de micropilotes, pero no dan información directa sobre su comportamiento en condiciones de carga. Estos ensayos pueden ser llevados a cabo bajo métodos no destructivos y bajo métodos destructivos.

**Cuadro N° 9. Ensayos de Integridad para control de calidad de micropilotes**

Principio Físico	Ensayo de integridad
Ondas de Choque	Baja Deformación (PIT)
	Registros Sónicos Cruzados (CSL)
	Sísmico Paralelo
Radioactividad	Radiometría
	Radiografía
	Registros Gamma-Gamma
Electricidad	Cobertómetro
Magnetismo	Potencial de media celda
Penetrabilidad	Prueba de Absorción
Radiación Térmica	Termografía Infrarroja
Ondas Electromagnéticas	Radar

**Fuente: "Control de calidad – Constructora Mota Engil Perú S.A.", Lima, 2014.**

En el proyecto Vía Parque Rímac se realizó las pruebas de integridad de baja deformación, conocidas como "Pile Integrity Testing by Low Strain" en inglés. Es uno de los métodos más utilizados a nivel internacional y consiste en golpear la cabeza del micropilote con un martillo de mano que genera una onda sísmica que baja por el fuste del micropilote, rebota en la punta y mediante instrumentación (acelerómetro) se obtiene el movimiento de la cabeza como consecuencia de la onda de choque generada. También se le denomina "método sísmico", "método sísmico", "sonic echo" o "ensayo de impedancia mecánica".



**Figura N° 91. Esquema de ensayos PIT en micropilotes**



Figura N° 92. Ejecución de ensayos PIT en micropilotes de frente Vía Evitamiento

### Ensayos de Carga

El proyecto debe definir, en cada caso, el procedimiento de prueba de carga que considere más adecuado.

A título meramente informativo se describirá la operatoria de ensayo establecida por las normas estadounidenses que se ha creído interesante incluir en el presente trabajo. Estas normas en cuestión se refieren específicamente a pilotes, si bien, a los efectos del Proyecto, pueden servir como esquemas básicos de actuación para micropilotes.

En ninguna de estas normas se incluye la interpretación de los resultados de ensayo, ni su posible aplicación al diseño de cimentaciones. Los tipos de prueba de carga más usuales, para pilotes, se describen en las normas ASTM que se indican a continuación:

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

#### **4.4. Costos de obra**

##### **Costos de perforación**

El motivo principal de tener un plan de control de aceros de perforación es tener información real del costo total de una perforación además del costo individual de cada componente de perforación. Con un buen plan de control de aceros podremos tener información en tiempo real y además podremos obtener información predictiva de aceros, para eso debemos llevar un control metódico de los metrajes que perfora cada acero de perforación.

##### **Información del costo en tiempo real:**

El costo de perforación es medida por metros/dólar y es dada por el metraje perforado dividido por la suma de los costos en dólares. Los costos totales de perforación son:

- Costo de combustible o energía eléctrica
- Precios de los aceros
- Costo Horas hombre
- Costo de la mantención de las maquinarias

##### **Información del costo de cada acero de perforación:**

El costo de los componentes también se mide en metros/dólar, pero es diferente al costo total porque es solo el metraje perforado acumulado del componente dividido por el precio del componente en dólar. Los aceros de perforación son los siguientes:

- Amortiguador
- Adaptador superior
- Barra de perforación
- Adaptador inferior o de broca
- Broca, tricono o trepano
- Anillo guía

El contar con un plan eficaz de control de aceros nos permitirá además tener una data de las fallas comunes, durabilidad máxima, durabilidad promedio, durabilidad de acuerdo a ubicación, durabilidad de acuerdo a exposición a determinado sector, etc. Si generamos una buena data de toda la información posible nos podrán ayudar a predecir fallas y problemas futuros y tomar decisiones acertadas para nuestro negocio que es la perforación.

#### **4.5. Ventajas y desventajas**

Las ventajas y desventajas más importantes que se tienen al resolver una cimentación profunda a base de pilas, con respecto a una solución a base de pilotes son las siguientes:

##### **4.5.1. Ventajas.**

- Considerando que los micropilotes son elementos fabricados in situ, no requieren de área adicional para una planta de fabricación y para su almacenamiento como elementos terminados.
- Los micropilotes no están expuestas a sufrir daños estructurales ya que no se requiere de que sean maniobradas y golpeadas para su instalación como sucede con los pilotes prefabricados.
- Aplicación en áreas muy reducidas y con poca perturbación del terreno circundante en términos de vibración y ruido.
- Los decibeles generados durante la ejecución de micropilotes son inferiores a los que se generan al instalar un pilote prefabricado o en la perforación de pilotes de grande diámetro, sin embargo dependiendo del terreno muchas veces pueden ser mayores.
- La longitud de los micropilotes puede ser variable dependiendo de la profundidad de los estratos resistentes, pudiendo hacerse los ajustes correspondientes prácticamente en forma inmediata, lo cual no están versátil en el caso de los pilotes prefabricados.

- Los micropilotes pueden ser instalados en subsuelos con presencia de gravas y bolones, aplicando el procedimiento adecuado que permita la estabilización de la pared de las perforaciones, lo cual no es posible llevar a cabo para cimentaciones a base de pilotes, ya que el diámetro de las perforaciones es por lo general mayor a medio metro, dimensión que permite la extracción de los obstáculos fácilmente.
- Debido a que tienen secciones reducidas en planta perforan con relativa facilidad estratos de macizos rocosos, pedregosos o muy blandos.
- Solución extremadamente versátil, capaz de adaptarse a cualquier distribución de suelo
- Ideales para situaciones en que las cimentaciones tienen que funcionar por fricción lateral.
- La profundidad a la que se encuentra el estrato de suelo resistente no es condicionante pues puede variar entre los 5 y 40 metros.
- Por ser ejecutados a través de inyecciones de cemento a altas presiones, adquieren una elevada capacidad de carga por fricción lateral, lo que les permite resistir fuerzas de tracción.
- A pesar de que solo deben ser sujetas a esfuerzos axiales (bajo módulo de flexión), estas son capaces de absorber cargas en cualquier dirección espacial, pues pueden ser dispuestas en cualquier dirección.
- Soportan individualmente menores cargas que los pilotes, pero a de tensiones poseen mayor capacidad, debido a que tienen un área substancialmente menor que los pilotes.
- Mayor seguridad para el personal, ya que muchas veces no es necesario que los trabajadores se encuentren dentro de la excavación.

- Mejor estabilidad del terreno, al no ser necesario el uso de voladuras, el suelo no se deteriora y se obtienen superficies lisas.
- Mejores rendimientos de perforación, debido al menor tiempo de ejecución
- Menores costes, como consecuencia del aumento de la productividad. Aunque sea mayor la inversión inicial, esta se ve compensada por el ahorro en mano de obra y materiales que suponen estos métodos.

#### **4.5.2. Desventajas.**

- Cuando el terreno es muy rígido o tiene presencia en demasía de grandes bolones, los micropilotes requieren siempre de perforaciones previas, mientras que los pilotes en ocasiones pueden ser instalados desplazando el subsuelo en una sola perforación.
- Cuando existen estratos de subsuelo sin consistencia, no es posible realizar la construcción de micropilotes sin tuberías de revestimiento, ya que su sección puede llegar a deformarse, lo cual no sucede con un elemento prefabricado; se puede resolver este problema con tubería metálica perdida, lo cual origina un incremento en el costo.
- El procedimiento constructivo de los micropilotes sobre agua se complica, al tener que evitar el vaivén de la plataforma flotante donde se apoya el equipo de construcción, así como tener que aislar el cuerpo del micropilote en la zona donde no existen suelo que lo confine.
- El sistema y avance de las perforaciones requiere mayor control que en el caso de los pilotes, ya que de este depende en forma importante la calidad de los micropilotes como estructura conjunta.
- La capacidad de carga de los micropilotes es menor que la de los pilotes, debiéndose sin embargo considerar el efecto de escala.

## CAPÍTULO V

### PROBLEMAS CONSTRUCTIVOS

Una obra de pantalla de micropilotes presenta esencialmente dos problemas fundamentales:

- Un problema de resistencia de materiales
- Un problema de deformación de la pantalla y del terreno adyacente (asentamientos)

Si bien el primer problema está técnicamente resuelto, por lo menos desde el punto de vista de las aplicaciones prácticas, se debe reconocer que el segundo no se halla en esta situación. En la actualidad, es prácticamente imposible prever con una precisión exacta los asentamientos que sufrirán los terrenos circundantes de una gran excavación abierta al abrigo de una pantalla de micropilotes. Como máximo, se pueden indicar cualitativamente las medidas a adoptar para reducir estos asentamientos al mínimo. En efecto, los asentamientos están ligados directamente con el grado de deformación de la pantalla y del fondo de la excavación. Naturalmente dependerán de la naturaleza del terreno, pero también de la forma como se ejecuten las obras y sobre todo de las fases de excavación y de la ejecución de anclajes o apuntalamiento del muro. La utilización de los anclajes pretensados permite, si están situados correctamente, reducir al mínimo los asentamientos.

A nivel de estudio y cálculo será útil conocer que las deformaciones y los asentamientos del terreno serán tanto menos importantes cuanto más alejado se esté del equilibrio límite de las tierras (activo y pasivo). En cuanto a los problemas de resistencia, están totalmente condicionados por los empujes activos y pasivos que actúan sobre la pantalla. Una vez que se han determinado, el cálculo de la pantalla de micropilotes consiste en un simple cálculo de concreto armado. Es preciso subrayar la enorme importancia que tienen sobre los empujes los movimientos y las deformaciones de la pantalla. Es, por lo tanto, absolutamente necesario, antes de cualquier cálculo, considerar este aspecto cinemático y los estudios de mecánica de suelos, y tener en cuenta principalmente a la observación y la intuición profesional, que son a veces, más

fecundas que los desarrollos y cálculos matemáticos, por lo tanto será necesario recopilar todos los datos experimentales sobre el comportamiento elastoplástico efectivo del terreno y conseguir así nociones más precisas referentes al coeficiente de reacción del suelo.

A su vez los problemas que se suscitan en la ejecución de los micropilotes son:

- **Ubicación inadecuada del micropilote.** Esto es un problema de replanteo y su mantención durante la obra, dado que el tránsito de equipos y las condiciones de obra, ocasionan este error de ubicación. También se da por realizar los trabajos desde una plataforma de trabajo muy superior respecto de la cota superior del micropilote, debiendo tener mayor control sobre las tolerancias de ubicación y desviación.
- **Estrato de suelo de fundación inadecuado.** Las condiciones de diseño pueden establecer una longitud del micropilote, pero la misma a veces esta condicionada a encontrar un estrato resistente, el cual puede no estar a la profundidad determinada del proyecto. La supervisión de obra y el constructor deben estar al tanto de esta condición de diseño que hará variar la longitud inicialmente estimada de los micropilotes.
- **Rotura en cabeza.** Suelen estar producido por accidentes causados por el movimiento de maquinarias dentro de la obra o actividades de movimientos de tierra cercanos, también puede producirse por descuidos durante el descabezado de los micropilotes por el uso de herramienta o maquinaria excesivamente potente con mal direccionamiento, esto para realizar el armado y amarre de viga de coronación o encepado.
- **Estricciones o reducciones de sección.** Estas anomalías deben entenderse como una "reducción significativa" en el micropilote, pero que sin embargo no ocasionan una interrupción completa de la continuidad. Puede presentarse en micropilotes ejecutados con camisa recuperable cuando la superficie de la entubación que se extrae tiene una textura rugosa y produce un arrastre en el contacto, pudiendo coincidir también si el mortero o lechada presenta un falso fraguado en el contorno del micropilote.

En micropilotes perforados sin revestimiento, estas pérdidas de sección se producen por lo general si se trabaja con una lechada poco fluida debido a que no es capaz de arrastrar el lodo de perforación, especialmente, si este presenta un contenido elevado de arena, o el posible material desprendido de las paredes, formado inclusiones débiles en el micropilote.

- **Recubrimiento deficiente.** Reducciones de sección, aunque no tan significativas, se pueden producir por falta de recubrimiento de las armaduras en el contacto con el terreno, al estar el micropilote muy armado y además incorporarle tubos de auscultación o por trabajar con concreto, mortero y/o lechada de consistencia o trabajabilidad inadecuada.
- **Desprendimientos de material en el fondo de excavación o niveles intermedios.** Estos defectos se pueden producir por varias razones. Una de las situaciones comunes en las que pueden producirse desprendimientos es durante la excavación e inyección de micropilotes en seco sin empleo de entubación, especialmente cuando en terrenos arcillosos existen intercalaciones de arenas. También se pueden producir desprendimientos en el empleo inadecuado de lodos bentoníticos que no mantienen la estabilidad de las paredes.

Pueden producirse también en perforaciones con entubación recuperable, especialmente bajo el nivel freático y con empleo de trepano. En estas condiciones, al retirar la tubería recuperable pueden formarse inclusiones que afectan la integridad del pilote.

En el caso de perforación con hélice continua, en los cuales la armadura se hinca posteriormente, ésta puede rozar con las paredes de excavación, lo cual produce desprendimientos y las consiguientes inclusiones en el fondo del micropilote.

- **Los defectos en punta del micropilote.** Se pueden producir por varias de las causas ya mencionadas anteriormente (desprendimientos durante la colocación de armaduras, deslavado del primer vertido en contacto con el fluido, segregación del primer concreto vertido, sifonamiento del fondo,

decantación del material de suspensión en el agua o lodo de perforación, etc.). Sin embargo, los más frecuentes se deben a la falta de limpieza del fondo de la excavación o a sedimentos.

- **Zonas de micropilote no homogéneo.** Se trata de defectos producidos exclusivamente por la inyección. Los cambios de propiedades del relleno o la presencia de inclusiones pueden ser tanto progresivos como acusados. También pueden producirse por procesos de degradación del hormigón, ataque químico del hormigón o del acero o deslaves
  
- **Desplazamientos de armaduras.** En el caso de micropilotes con camisa recuperable, la armadura debe estar apoyada en el fondo de la perforación, pero durante el proceso de retiro de la camisa, el flujo puede inducir a desplazamientos verticales de la armadura, más si el material de inyección ha perdido fluidez y la arrastra consigo.
  
- **La remolienda.** La remolienda es un efecto que se produce cuando el detritus no es evacuado eficientemente del pozo y se deposita en el fondo del pozo produciendo desgastes prematuros en los aceros de perforación especialmente en la broca. Cuando se produce la remolienda el detritus sale del pozo de perforación de micropilote como una especie de polvillo, esto debido a que se produce una especie de molino en el fondo.  
Por lo general cuando se aumenta demasiado el espacio anular, se origina la disminución de la velocidad de barrido y se produce la remolienda, es por eso la importancia de mantener unas velocidades de barridos adecuadas. Otra razón de la remolienda es que el compresor no esté entregando el caudal de aire necesario por problemas mecánicos o filtros de admisión saturados.
  
- **Fallas en Sartas de Perforación.** El 85% del total de fallas por debajo de la resistencia mínima a la cedencia, se produce en los siguientes casos:
  - ✓ Falla por fatiga del tubo en la tubería de perforación
  - ✓ Falla por fatiga de la conexión del BHA
  - ✓ Fuga en la conexión
  - ✓ Caja rota

- ✓ Falla mecánica de herramientas especializadas
- ✓ Falla en soldadura

El 15% del total de fallas por encima de la resistencia mínima a la cedencia, se produce en los siguientes casos:

- ✓ Tensión
- ✓ Torque
- ✓ Combinación Tensión / Torque
- ✓ Colapso
- ✓ Estallido

Las señales de advertencia a tener en cuenta para evitar problemas mayores en las sarta de perforación son:

#### **Señales de mucho cuidado**

- ✓ Cuando una falla ocurre otras pueden ocurrir
- ✓ Se desconoce la historia de la sarta de perforación
- ✓ Halando o martillando en pega de tuberías
- ✓ Armandó equipo poco familiar.

#### **Señales de alto riesgo**

- ✓ Nivel alto de corrosión de todo
- ✓ Patas de perro están presentes (Giro, codo o cambio repentino de dirección y orientación)
- ✓ Torque, arrastre, vibración anormal
- ✓ Pozo de alto ángulo



**Figura N° 93. Falta de drenaje adecuado que impide continuar la perforación de micropilotes de manera segura**



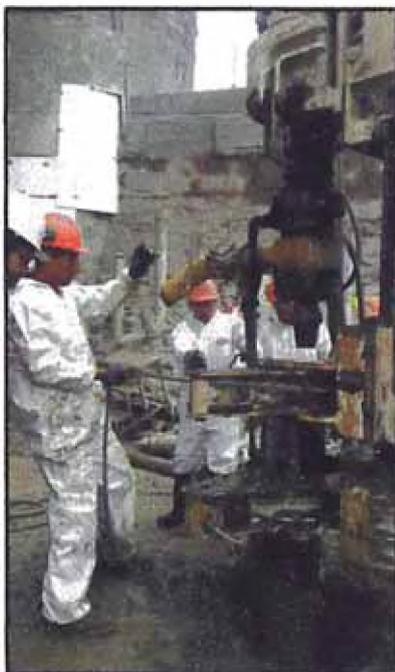
**Figura N° 94. Destrucción de material rocoso para evitar problemas en la ejecución de micropilotes como desviaciones y rotura de materiales**



**Figura N° 95. Martillo atrapado en pozo de perforación**



**Figura N° 96. Recuperación de martillo y broca**



**Figura N° 97. Rotura de tubería de revestimiento en el fondo**

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones

Los micropilotes son una técnica de cimentación profunda muy extendida tanto a nivel nacional como a nivel mundial. Se ha podido observar a través de este trabajo que esta tipología de cimentación profunda ya se extiende desde hace unos 60 años, los cuales empezaron a desarrollarse en recalces y refuerzos estructurales de edificios antiguos y con gran importancia histórica.

Se puede apreciar la similitud que encontramos entre una cimentación profunda ejecutada con pilotes de concreto armado y una cimentación ejecutada por micropilotes, pues los procedimientos de ejecución de los dos tipos de cimentación son realmente parecidos ya que se procede a la perforación del terreno, a la colocación de armadura y al relleno del pozo de perforación con concreto o lechada de cemento. Además, la función estructural de los dos tipos de cimentación es muy similar ya que hay muchas soluciones en gran variedad de estructuras que pueden ejecutarse tanto con un sistema de pilotes o de micropilotes. Sin embargo, el uso extendido de los micropilotes en las obras actuales se debe a la gran variedad de ventajas que la ejecución de estos conlleva. En primer lugar, la maquinaria para la ejecución tiene un tamaño más reducido que en el caso de pilotes y esto conlleva que se pueden ejecutar micropilotes en prácticamente cualquier localización específica en las diferentes obras de ingeniería civil como: sótanos, zonas de estacionamiento, debajo de líneas eléctricas, al lateral de carreteras o en la misma mediana de una autopista, debajo de puentes, dentro de túneles, al interior de edificaciones, en laderas, taludes con banquetas cortas y otras condiciones especiales.

Otra de las ventajas que el sistema de micropilotes aporta a la ingeniería civil actual es la extensa variedad de aplicaciones que se pueden conseguir con el mismo sistema de perforación, no solamente centrándose en la cimentación profunda. Este sistema nos ofrece aplicaciones como paraguas de micropilotes para sostener bóvedas, drenes californianos para poder mitigar los efectos del agua o recalces en estructuras existentes, ejecución de pantallas para

estabilización de taludes o sostenimiento de estructuras, mejora de terreno entre otras.

Por otro lado, la ejecución de micropilotes también comporta ciertas desventajas en contra de los pilotes. Una de estas desventajas sería el tiempo de ejecución de estos micropilotes. Sí que es verdad que el rendimiento de perforación podría ser similar a la perforación en pilotes de concreto armado pero la desventaja es que el número de micropilotes será mayor, esto conlleva más metros lineales de ejecución. Otra gran desventaja será el costo económico que repercute la ejecución de micropilotes, aunque el costo por metro lineal es inferior al metro lineal de los pilotes, a la larga tendrán un coste superior debido al aumento en la medición que comportan los micropilotes y el aumento de materiales involucrados en su ejecución.

En conclusión, hay que ser meticuloso a la hora de elegir qué tipo de cimentación usar en la ingeniería civil. Hay casos donde las condiciones de contorno nos limitan a la utilización de un tipo en particular. Pero hay otros muchos casos en que nos podemos encontrar con varias alternativas y será muy importante poder estudiar bien todas las variables (terreno, condiciones específicas de cada proyecto, plazos, costos, aspectos técnicos, propiedades geotécnicas del suelo, etc.) para poder tomar la solución geotécnica correcta

Igualmente habrá que calcular el empotramiento del micropilote bajo la superficie deslizada a fin de garantizar que no se produzca el arrancamiento del mismo.

En los casi 20 últimos años que se llevan utilizando los micropilotes en todo el mundo, la evolución que se ha observado a nivel de proyección e investigación se han centrado principalmente en los siguientes aspectos:

- El número de proyectos en los cuales se ejecuta micropilotes ha ido creciendo, debido a las muchas ventajas técnicas y económicas indiscutibles que ofrece este tipo de cimentación, así como en el campo de la fiabilidad.
- Se ha producido una mejora notable de los rendimientos de las maquinarias y equipos de ejecución.

- Adicionales pruebas de carga sobre micropilotes instrumentados de muy alta capacidad de carga, a compresión y tracción, han confirmado el método de cálculo elaborado por Lizzi en 1985, así como los comentarios ligados a la aplicación del dicho método.
- Los ingenieros proyectistas y los arquitectos, no solamente no dudan en aceptar una cimentación de estructuras importantes sobre micropilotes sino que han aprendido a optimizar su diseño.
- Es posible referirse a numerosas publicaciones con carácter reglamentario o relatando aplicaciones particulares que constituyen excelentes referencias cuando se trata de emprender nuevos proyectos.

Por otro lado la excavación profunda para la construcción del túnel debajo del río Rímac conlleva al retiro de pesos substanciales de suelo, modificando de manera importante las tensiones existentes en el espacio circundante. Estos cambios de tensiones producen en los suelos granulares gruesos el levantamiento imperceptible del fondo de las excavaciones y desplazamientos horizontales importantes hacia el interior de las paredes de la misma, para ocasionar finalmente derrumbes que podrían causar graves accidentes de trabajo y que muchas veces han cobrado vidas humanas y en otros caso han originado daños en las estructuras cercanas cuyo costo muchas veces se acerca y/o sobrepasa el costo de construcción de la misma cimentación, solución geotécnica o costo del proyecto.

Para evitar problemas y adoptar criterios geotécnicos bien fundados, es recomendable tomar en consideración el probable comportamiento del suelo, que por encontrarse en estado compacto y estar conformado por piedras y grava empacadas en arena gruesa, se ha confiado en el pasado demasiado en su resistencia y soporte lateral, sin estimar la magnitud de sus movimientos y las probables consecuencias que puede acarrear no prever estudios serios y bien documentados que establezcan valores confiables de los parámetros geotécnicos de resistencia al cortante de estos suelos, valores que por lo general se toman de referencias pasadas o en base a los pocos ensayos realizados,

para el caso particular de obra los parámetros geotécnicos según estudio definitivo de ingeniería muestran que el material gravoso con arena mal gradada de la zona de trabajo presenta un ángulo de fricción de  $36^\circ$ , cohesión nula, un peso unitario de  $21.5 \text{ KN/m}^3$  y un módulo de Young de  $200 \text{ MPa}$ , todo esto dentro de los parámetros característicos del conglomerado de Lima.

La conclusión final a la que llegamos es que para que la ejecución de grandes proyectos sea exitosa en cuanto a confiabilidad, durabilidad y calidad se requiere buenas obras de cimentación o soluciones geotécnicas seguras que permitan el desenvolvimiento normal, eficaz y eficiente de la construcción del proyecto a ejecutar. Dentro de todo esto se encuentran como una opción los micropilotes, que como vimos en el desarrollo de este trabajo son muy versátiles y tienen diversas aplicaciones, sin embargo cualquier ejecución de obras de construcción requiere indispensablemente de parámetros geotécnicos del suelo. Por lo tanto es necesario un mayor número de investigaciones en el corto y largo plazo en cuanto a caracterización y parametrización geotécnica del suelo, para poder evaluar empujes, soporte y capacidad de carga más cercanos a la realidad y con ello diseñar nuestras obras de ingeniería con mayor economía y seguridad, sea en excavaciones, calzaduras, cimentaciones, soluciones geotécnicas y cualquier otra obra en la que sea necesario utilizar los parámetros más relevantes de la resistencia del suelo (cohesión y ángulo de fricción interna)

Definitivamente el Perú requiere de muchas obras de gran envergadura como el proyecto Vía Parque Rímac, pues muy aparte de contribuir al desarrollo integral del país (social, económico, etc.) genera el desarrollo de la Ingeniería Civil y por lo tanto el adiestramiento continuo de diversos profesionales y técnicos, los cuales mediante un proceso de retroalimentación consiguen capacitarse y mejorar los procesos de construcción, fomentando la innovación e investigación.

## **6.2. Recomendaciones**

En la ejecución de micropilotes existen diversos sistemas de perforación y metodologías de trabajo las cuales influyen directamente en la productividad y eficiencia del sistema adoptado como solución geotécnica, por lo tanto las

recomendaciones que se puede aportar en este trabajo son que en la ejecución de micropilotes por lo general es menos dañino ejecutar la perforación con aire, pero siempre y cuando, evidentemente, se lleve una tubería de revestimiento y procurando que la tubería de revestimiento vaya por delante de la cabeza de rotación o del martillo de fondo del orden de 20 cm. Es decir que el aire es mucho más fácil que no penetre en el terreno que el agua. Con el agua podemos correr el riesgo de dañar o crear un perjuicio a edificaciones colindantes o estructuras adyacentes. Debido a esto es importante utilizar aire siempre que se pueda, pero llevando el revestimiento avanzado con respecto a la tubería de perforación del orden de 20 a 25 cm, con lo cual no habrá ningún riesgo para estructuras contiguas.

Por otro lado perforar con aire es más barato y, en principio, es mucho más cómodo. Una obra ejecutada donde el barrido se hace con agua es una obra muy sucia, donde los trabajadores lo pasan muy mal porque está toda la obra enfangada, mientras que una obra ejecutada con aire, en principio, es una obra mucho más limpia. Con lo cual, al menos teóricamente, el costo de obra que involucra las partidas de limpieza y acondicionamiento de plataformas de trabajo es mucho más barata al perforar con aire que con agua, pero siempre las ofertas técnico económicas deben realizarse lo más ajustadas al mercado. Sin embargo la perforación con aire involucra el uso de equipos y materiales adicionales como compresores, pulmones, mangueras, elementos de protección, otros; además la perforación con aires es más lenta que si se realizaría con agua.

Es importante llevar un control adecuado de los siguientes aspectos:

- La importancia de las uniones entre tubos de acero, las cuales se realizan normalmente mediante la rosca macho-hembra. Conviene que la armadura venga reforzada con un ensanchamiento en la zona de unión.
- La importancia de la colocación de conectores en las cabezas de los micropilotes para conseguir una buena adherencia entre estos y la viga o muro de atado de los mismos.

- Elección de un diámetro de perforación adecuado para la armadura que se vaya a utilizar. Los diámetros de perforación suelen variar de 150 a 300 mm y aunque las armaduras más usadas son de 90 y 114 mm de diámetro con 7 ó 9 mm de espesor existe una amplia gama que va desde los 15 cm<sup>2</sup> hasta los 50 cm<sup>2</sup> de área de acero como el 178-9mm.
- La inyección de los micropilotes se puede realizar mediante el sistema IU (Inyección Única Global) y el sistema IRS (Inyección Repetitiva Selectiva) con la que se alcanza un radio efectivo de inyección mayor.
- La observación constante en los trabajos de perforación es importante, sobre todo al momento de la expulsión de detritus del pozo de perforación, ya que estas pequeñas partículas entrega datos valiosos sobre el terreno perforado y lo que está pasando en el fondo de perforación, por lo tanto permite al operador y supervisor replantearse si se está realizando las cosas de la mejor manera, pues no todos los pozos de perforación son iguales, varían debido a muchos factores.

Pese a que los anclajes fueron dimensionados como anclajes permanentes tomando en cuenta que pueden estar actuando por un tiempo mayor a 2 años y además debido a la gran irregularidad del subsuelo y a las limitaciones de la teoría en cuanto al cálculo de la capacidad de anclas, estos anclajes serán considerados como anclajes provisionales y se recomienda, se realicen pruebas de arranque de anclas tipo, en los diversos sitios representativos donde se instalarán. Las pruebas se llevarán hasta 1.2 veces la carga de trabajo. Se recomienda que las pruebas reflejen diversas condiciones estratigráficas y de propiedades.

Es importante realizar la colocación de los anclajes inmediatamente después de la excavación del nivel correspondiente. De esta forma se limitan las deformaciones causadas y a su vez se garantiza la estabilidad de la pantalla. Se recomienda que no se excave más de un metro por debajo de una fila o nivel de anclajes hasta que éstos no hayan sido totalmente colocados y tesados.

## BIBLIOGRAFÍA

- Barba Garcia, Angel. "Micropilotes en Cimentaciones". Tesis para optar Título profesional. Escuela Universitaria Politécnica de Grado Ingeniería Civil. Universidad Católica San Antonio. Murcia, 2012.
- Benati, Juliano Bertelli. "Metologia de execução e determinação da capacidade de carga de estacas de pequeno diâmetro cravadas e injetadas (Metodología de ejecución y determinación de la capacidad de carga de pilotes de pequenó diâmetro perforadas e inyectadas)". Tesis para optar Título de Magister. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Federal de Viçosa. Minas Gerais, 2007.
- Ministerio de Fomento, Secretaria de Estado de Infraestructuras y Planificación, Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras. Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera. Madrid, 2005.
- MOTA ENGIL PERU S.A., División de Cimentaciones y Geotecnia. Documentos técnicos de trabajos en obra Vía Parque Rímac. Lima, 2013
- TÉCNICA Y PROYECTOS S.A. (TYPESA), Documento Técnico – Vía Expresa Línea Amarilla. Lima, 2013

## **ANEXOS**

### **A.1. Planos de proyecto Vía Parque Rímac**