

Cimentación mediante micropilotaje autoperforante *Titan* en la zona comercial de la ampliación de Port Adriano (Isla de Mallorca)

El presente artículo expone la construcción y, en especial, los trabajos de cimentación, para las obras de ampliación de Port Adriano en el término de Calvià (Baleares) con un gran dique exterior, nuevas plazas de aparcamiento y ampliación y reforma del muelle interior. La cimentación mediante micropilotes autoperforantes *Titan* ha sido ejecutada por *Dekon, técnicas de Perforación, S.L.*, como subcontratista de *FCC Construcción, S.A.*, adjudicataria del conjunto de la obra.

Palabras clave: ARMADURA, AUTOPERFORANTE, CARGA, CIMENTACIÓN, DIQUE, ENSAYO AXIAL, INYECCIÓN, MICROPILOTE, PERFORACIÓN, PUERTO, TRACCIÓN.



**Carlos ROCA CERDÁ, I.C.C.y P.
DEKON, Técnicas de Cimentación, S.L.**

En el año 1992 se construyó en la bahía sudoeste de la Isla de Mallorca, en Baleares, el Puerto Deportivo de Port Adriano, albergando un total de 404 amarres para embarcaciones de entre 6 y 18 metros de eslora y 4.500 m² de zonas comerciales. Este Puerto Deportivo ubicado en la Playa del Toro, Municipio de Calvià, concentra actualmente su actividad en el alquiler, venta y reparación de embarcaciones, además de albergar una Escuela Náutica, un Centro de Buceo y otras instalaciones y servicios derivados de dicha actividad.

La proximidad al Aeropuerto de Palma de Mallorca y las buenas conexiones terrestres y marítimas existentes han permitido que en tan sólo 15 años el Puerto se haya consolidado como una de las referencias náuticas deportivas más destacadas de Baleares. Por este motivo a finales del año 2007 comenzaron a ejecutarse las *Obras de Ampliación de Port Adriano*, consistentes en la construcción de un gran Dique Exterior para 82 nuevos amarres de embarcaciones de hasta 60 m de eslora, 470 nuevas plazas de aparcamiento y la ampliación



Arquitectura de la Zona Comercial (Edificio de Servicios) y decoración de las zonas comunes.

y reforma del Muelle Interior No Reflejante para albergar un Edificio de Servicios destinado principalmente a Locales Comerciales, Restaurantes y 2 Escuelas de Buceo y Vela.

Una vez ya finalizados los trabajos relativos al *Nuevo Dique Exterior* y gracias a la protección frente al oleaje aportada por esta construcción, la ampliación de la dársena así lograda ha permitido el comienzo de la remodelación del *Muelle Interior*. Inicialmente esta estructura actuaba como Antiguo Dique de Contención en la configuración previa del Puerto y tras la remodelación, consistente en una ampliación en anchura y disminución de la longi-

tud del mismo, su función principal será la de albergar el Edificio de Servicios y generar nuevos amarres exteriores.

Esta singular construcción de arquitectura vanguardista, proyectada por el diseñador industrial francés Philippe Starck, pretende dotar a las instalaciones de elevada funcionalidad, originalidad y respeto por el medio ambiente. La finalización de las Obras y con ello, la operatividad total del Puerto ha tenido lugar durante los primeros meses de este año 2012.

Cimentación inicialmente prevista

Hay que destacar que el Muelle Interior es el resultado de una ampliación en la anchura media del Antiguo Dique pasando de los 25 m de ancho en cabeza a los 50 m de que actualmente dispone entre extremos de las vigas cantil que sirven de amarre para las embarcaciones, una vez finalizada la remodelación. La longitud actual de Muelle tras los trabajos es de 275 m, reduciéndose ligeramente respecto de la antigua configuración con un dragado de material para facilitar el ensanche de la bocana del Puerto y con ello unas mejores condiciones de acceso para las embarcaciones.

La sección transversal del Antiguo Dique permitía distinguir claramente lo que suponía el manto externo de protección frente al oleaje del propio Dique, formado por grandes bolos de escollera de naturaleza caliza y con aparente matriz limo-arenosa, del material propio del Núcleo central del Dique, formado por rellenos todo-uno de matriz arenosa pero con una gra-



Vista del Nuevo Dique Exterior ya terminado y la plataforma en construcción del Nuevo Muelle Interior.

nulometría mucho más continua por la presencia de limos arcillosos y la ausencia total de escollera portuaria.

Para la cimentación de la *Zona Comercial* sobre terrenos del antiguo dique (terrenos ganados íntegramente al mar), el proyecto planteaba la solución de encepados para pilares con cimentación profunda por micropilotes, como la solución más adecuada dados los condicionantes del proyecto. Además la existencia de estos grandes bolos de escollera de roca caliza en gran parte de la superficie de la cimentación obligó a descartar la posibilidad de emplear cualquier tipología de pilote prefabricado o de pilote in situ, por la enorme dificultad que supone la hinca o la perforación de gran diámetro con la presencia de bolos de dimensiones incluso métricas y elevadísima dureza que obligaría al uso indiscriminado de útiles de perforación tipo trépano con los elevados costes y falta de rendimiento que ello implicaría.

La solución inicial para la cimentación de los pilares del *Edificio de Servicios* contemplaba la ejecución de 687 micropilotes de 21 m de longitud y 160 mm de diámetro en grupos de hasta 5 micropilotes por Encepado. La armadura del micropilote está prevista con perfil tubular de acero de calidad *TM-80* (5.600 kg/cm² de límite elástico), de dimensiones 88,9 mm de diámetro exterior y 9 mm de espesor, con revestimiento provisional recuperable para la perforación, de diámetro 152 mm e inyección *I.R.S.* a través de válvulas antirretorno (sistema de tubo-manguito) disponiendo una válvula cada metro en la zona de bulbo adherente. Precisamente la longitud de cada micropilote estaba condicionada por la necesidad de empotrar al menos 6 metros en el estrato de margas existente bajo el lecho marino a unos 15 m de profundidad. A nivel granulométrico, este estrato competente estaba formado por arcillas margosas marrones con abundantes niveles granulares de elevada dureza y valores medios en el ensayo presiométrico de 38 kg/cm² de presión límite, valor de importancia decisiva para el dimensionamiento del micropilotaje.

Para el cumplimiento de plazos que permitiera la entrega final de esta parte de la Obra por parte de la empresa constructora al propietario de las instalaciones a primeros del año 2.011, se establece un plazo máximo de 6 semanas para la ejecución del micropilotaje durante el período estival del año 2.010, debiéndose adecuar el horario de trabajo con objeto de causar las menores molestias posibles a los usuarios de la *Playa del Toro*, de las Instalaciones Portuarias y de los alrededores, que seguían a pleno funcionamiento a niveles correspondientes a temporada alta en Palma de Mallorca.

Resultados de las primeras pruebas efectuadas

Tras el estudio pormenorizado de los datos aportados por un extenso estudio Geotécnico con un total de 15 Sondeos a rotación con extracción de testigos a profundidades superiores a los 20 m, se decidió acometer una pequeña campaña de pruebas iniciales en 2 fases para conocer los posibles problemas que pudieran surgir durante las perforaciones y determinar la idoneidad del sistema a emplear.

Tras la ejecución de estas pruebas iniciales con el sistema de micropilotaje previsto en proyecto (micropilote convencional *I.R.S.* de armadura tubular), las dificultades a las que hubo que hacer frente fueron los siguientes:

- 1) Debido a la necesidad de encamisar provisionalmente los 15 primeros metros por la presencia de materiales inestables de relleno, se obtenía un muy bajo rendimiento por equipo de Perforación (de 20 a 30 ml/día) por la compleja maniobra de recuperación de la doble tubería (encamisado exterior y varillaje interior de perforación) y posterior introducción de la armadura estructural del micropilote.
- 2) La prácticamente nula admisión de lechada de cemento lograda en las válvulas de reinyección ubicadas en la zona de bulbo (arcillas margosas muy compactas), haciendo uso de obturadores dobles hinchables para garantizar la selectividad de la válvula, incluso a presiones de 60 bares claramente superiores a la presión límite del terreno (38 kg/cm²), ponía en cuestión si la consideración de micropilote con inyección *I.R.S.* con una fricción lateral de cálculo (rozamiento por el fuste) muy superior al micropilote con inyección *I.U.* se ajustaba al micropilote realmente ejecutado.
- 3) Tras completar la ejecución de varias unidades se observó un elevado desgaste y algunas roturas de los útiles de perforación (tallantes, espigas y vástagos, cabezales de inyección) por la elevada fricción lateral del revestimiento provisional exterior en el avance en la zona de escollera y la tremenda oposición a la perforación interior tanto con la técnica de martillo en fondo con tallante reforzado (perforación con aire comprimido) como con martillo en cabeza a rotoperusión (con agua como fluido de perforación) por la dureza de los bolos de origen calizo de los primeros metros. En alguna de las perforaciones se detectó pérdida de la tubería exterior de revestimiento por aplastamiento contra la escollera y la deformación de las roscas de las uniones de empalme entre distintos tramos de encamisado, lo cual alertaba del peligro de tener

que anular la ubicación de dicho micropilote en el punto inicialmente replanteado por imposibilidad de recuperación del material perdido.

- 4) Por último se comprobó la dificultad para lograr el sellado completo del micropilote por fugas y filtraciones de lechada en la zona superior, debido a la permeabilidad de los rellenos de escollera. Esta elevada permeabilidad venía dada por el lavado continuo durante años de la matriz intermedia limo-arenosa de los rellenos por el intenso oleaje a los que estuvo sometido el antiguo dique y a la necesaria ubicación de la plataforma de trabajo para las perforaciones a tan solo medio metro sobre el nivel del mar.

La resolución de los problemas y la toma de decisiones

Ante las dificultades surgidas, se adoptaron las siguientes decisiones de carácter técnico:

- 1) Debido al gran número de Sondeos realizados en el Dique y a la determinación de la cota variable de aparición del estrato resistente de fondo, se pudo establecer una discretización más ajustada de las longitudes previstas de las perforaciones para el cumplimiento de los criterios de empotramiento mínimo, que terminaron con la definición de micropilotes de 20 a 23 metros de profundidad según la zona del Muelle afectada, generando un ahorro económico producto de un ajuste de longitudes unitarias del micropilotaje.
- 2) Se decidió variar la tipología de micropilote prevista, sustituyendo la ejecución de micropilotes convencionales de 160 mm de diámetro con armadura tubular *TM-80* de 88,9 x 9 mm e inyección *I.R.S.* a micropilote autoperforante de 130 mm de diámetro *Ischebeck Titan 73/45* e inyección *I.C.S.* (inyección continua simultánea). La técnica autoperforante permite en una única maniobra perforar, armar e inyectar y no requiere encamisado provisional pues técnicamente facilita la estabilidad del terreno perforado por la saturación con partículas de cemento que supone la inyección continua durante la perforación con lechadas pobres en cemento (relación A/C = 1:1 o superior) y la mejora de la capacidad soporte del terreno circundante precisamente por esto. Aún así los desprendimientos de terreno muchas veces inevitables pueden ser apartados con una insistente limpieza de los taladros en fase de perforación, con maniobras ascendentes-descendentes del micropilote apoyadas por una rotoperusión en cabeza o incluso pasar a formar parte del producto final convirtiendo una



Acopio de armadura autopercutor autoinyectante.

lechada de cemento de alta calidad en un mortero por la adición de árido a la mezcla final.

Esta decisión vino avalada por la ejecución de un total de 10 micropilotes auto-perforantes en fase de pruebas y su correspondiente prueba de tracción para la comprobación de su capacidad de carga por el fuste.



Placa de reparto y lecho de arena para Ensayo de Tracción.

- 3) Fue necesario el empleo generalizado de bocas duras de perforación de cruz de acero templado de diámetro 130 mm, con óptima capacidad de corte y penetración en la zona de empotramiento en margas, y en algunos casos en combinación con bocas superduras de botones reforzadas con carburo de tungsteno, cuando la perforación se topaba con bollos calizos de gran dureza. Obviamente la selección de un diámetro de perforación menor al de proyecto permite concentrar la energía de rotoperCUSión en una zona más limitada, facilitando el avance pero, por el contrario, implica necesariamente una mayor longitud de bulbo para lograr una misma superficie lateral de contacto entre el micropilote y el terreno que garantice el no hundimiento del mismo. La correcta selección de la boca de perforación de partida fue un criterio decisivo para lograr un avance óptimo en las perforaciones.

- 4) Para solucionar los problemas de sellado de los últimos metros, y tras probar, entre varias técnicas posibles, el empleo de aditivos especiales para reducir la fluidez

de las mezclas de inyección, se decidió, en primer lugar, tratar de garantizar un nivel de inyección lo más elevado posible en las perforaciones, siempre a una distancia máxima inferior a 4,50 metros de las bocas de los taladros y combinado con el empleo de un Mortero M-35 especial con cemento SR de consistencia fluida, vertido por gravedad desde la boca de las perforaciones una vez terminado el micropilote correspondiente y dentro de la misma jornada de trabajo.

Este Mortero de sellado, con una dosificación de 400 kg/m³ de cemento Tipo I 52,5 N/SR, presentaba un contenido de arena caliza 0-4 mm de 1.700 kg/m³, con una relación Agua-Cemento-Arena en peso de 1-2-4,25 y en combinación con 2 aditivos plastificantes reductores de agua (Mira 56 y Daracem 200), permitió el sellado completo de los micropilotes de manera exitosa en la totalidad de los casos, tal y como pudo comprobarse tras varios rebajes de prueba efectuados incluso con cámaras sumergibles de filmación subacuática.

- 5) Con el objetivo de lograr el cumplimiento de plazos establecidos fue necesario emplear un total de hasta 6 equipos de Perforación de gran tonelaje con potentes martillos en combinación con 6 equipos compactos de Inyección (mezcladora, agitador y bomba de inyección), uno por cada Sonda de Perforación, de manera que se garantizara la autonomía de los Equipos en las maniobras de perforación e inyección, con un montaje de envergadura con grandes depósitos intermedios de almacenamiento de agua y un despliegue notable de medios materiales y humanos para coordinar los trabajos. Además la ejecución de la cimentación se solapaba con actividades de dragado de la punta del Dique y la construcción de la nueva viga cantil del lateral ampliado para los nuevos amarres.

- 6) Para validar el comportamiento final de los micropilotes se efectuaron un total de 9 ensayos Axiales de Compresión y más de 15 ensayos Axiales de Tracción (Ensayos de Aceptación) a niveles de Cargas de 90 toneladas, un 25% superiores a la carga de Servicio prevista de 72 t, con resultados plenamente satisfactorios en la totalidad de los casos y avalados por el Laboratorio externo de Control de Calidad.

La protección anticorrosión del micropilote

No hay duda de que uno de los aspectos que más atención requiere en cualquier obra que disponga de elementos sumergidos en ambiente marino es precisamente la protección anticorrosión de las estructuras, especialmente cuando existen armaduras metálicas pasivas susceptibles de debilitarse por pérdida de sección efectiva cuando esta corrosión es acentuada. La corrosión en sí supone la formación de zonas anódicas en el metal que terminan con su disolución y la pérdida parcial de las propiedades físico-químicas de las que el metal gozaba.

Para el Análisis de la Corrosión de las armaduras estructurales de los Micropilotes, se consideró como Documento de referencia la *Guía para el Proyecto y la ejecución de Micropilotes en Obras de Carreteras (2006)*, publicada por la Dirección General de Carreteras, dependiente del Ministerio de Fomento que denominaremos en adelante *La Guía*. Dicho Documento forma parte de una serie Normativa de Instrucciones de Construcción que trata de refundir en un único escrito todos los aspectos constructivos y de diseño de Obras de micropilotes en España, constituyendo actualmente uno de los pocos Documentos de referencia a este respecto.

La *Guía* establece la obligatoriedad de proteger frente a la corrosión tanto las armaduras de los micropilotes como el resto de elementos metálicos de los mismos, como pueden ser los manguitos externos roscados de unión entre



Detalle del Ensayo de Compresión: 2 micropilotes externos de reacción (traccionados), 1 micropilote central para el Ensayo (comprimido), comparadores digitales para medición de acortamientos, pistón del gato de tesado y vigas de reacción.

Cimentación

tramos de armadura, ya que esta misma venía modulada en tramos de 3 metros para su empalme posterior en obra.

Las consideraciones de la *Guía* a este respecto se materializan en garantizar un recubrimiento mínimo de lechada de cemento para protección de la armadura y la obligatoria consideración, ya desde proyecto, de una reducción efectiva del espesor nominal de la armadura por efecto de dicha corrosión, independientemente de las protecciones adicionales de las que se haga uso.

En cuanto al recubrimiento mínimo exigible en Micropilotes inyectados con lechada de cemento y sometidos a esfuerzos de compresión, el valor prescrito por la *Guía* es de 20 mm, debiéndose garantizar una diferencia mínima entre el diámetro de perforación del micropilote y el diámetro exterior de la armadura tubular de al menos dos veces este recubrimiento mínimo. En nuestro caso, siendo la armadura de diámetro exterior 73 mm ($\varnothing_{\text{perforación}} - \varnothing_{\text{armadura}} = 130 - 73 = 57 \text{ mm}$), se superaba así los 40 mm mínimos requeridos.

Por otra parte la *Guía* propone el empleo de cementos Especiales para ambientes agresivos, entre otras medidas adicionales. Ello se tradujo en el empleo de *Cemento 42,5*

con la característica *Sulforresistente SR* especial para ambientes marinos, tanto durante la perforación de los taladros con una relación A/C próxima a 1:1 en peso para la saturación del terreno como para la inyección principal con una relación A/C de 0,4. En el empleo de Mortero para el relleno superior del micropilote también se hizo uso de la característica *SR* en el cemento utilizado.

El segundo aspecto que considera la *Guía* es, a falta de una Justificación expresa del proyecto, la reducción del espesor de armadura por efecto de la corrosión, a través de los valores proporcionados por la **Tabla I**, en función de la vida útil exigible al micropilote y

la naturaleza de los terrenos en los que se ha perforado. De esta manera, la *Guía* propone adoptar las siguientes reducciones de espesor de la armadura a considerar, en mm.

Es evidente que a falta de más consideraciones, parece razonable adoptar una reducción de espesor correspondiente a un terreno con rellenos superiores (terreno ganado al mar) de naturaleza agresiva y con una compactación despreciable. Considerando una vida útil de la estructura por encima de los 50 años, se adoptaría un valor próximo a los 3.25 mm de reducción de espesor de armadura por efecto de la corrosión en ambiente marino.

Por otra parte, es importante destacar a

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

■ [TABLA I].- Reducción de espesor de la armadura del micropilote, en mm, por efecto de la corrosión.

este respecto el papel desempeñado por las roscas especiales continuas tipo *Titan* de las armaduras, que con una relación de 0,13 entre la altura de los nervios y la separación de los mismos en las armaduras, además de cumplir con la *Norma DIN 488* sobre aceros para hormigón armado, supone una alta adherencia entre lechada y armadura y la propia rosca proporciona un recubrimiento mínimo de lechada de protección frente a dicha corrosión por la presencia de estos nervios.

A este respecto, la *Norma UNE-EN 14199: 2006*, de *Ejecución de trabajos geotécnicos especiales: Micropilotes* prescribe la obligatoriedad de los tubos metálicos de sección hueca que se empleen para la ejecución de micropilotes de cumplir los requisitos exigidos en la Norma EN 10210, como así sucede con las armaduras *Titan*.



Detalle de la rosca especial continua tipo Titan y el elevado diámetro efectivo obtenido.

En cualquier caso, y dadas las especiales condiciones de la Obra en relación a la incertidumbre generada por la posible discontinuidad en la inyección en la zona superior del micropilote, el fabricante de las armaduras garantizó, a través del Certificado correspondiente, que en ambientes de máxima agresividad y sin recubrimiento alguno de lechada de cemento ni protección adicional, la armadura puede presentar una pérdida de diámetro efectivo a 60 años por corrosión máxima de 2.9 mm, que respecto de una armadura de área de acero de 2.240 mm² supone una pérdida de sección útil a 60 años inferior a un 13%, valor perfectamente asumible sin más que considerarlo en los cálculos estructurales de dicha armadura resistente. El motivo de esta alta resistencia al avance de la corrosión está basado en la calidad del acero especial de grano fino ST 550/750 empleado en la fabricación de las armaduras *Titan*.

Una aproximación al dimensionamiento de los micropilotes autoperforantes

Es evidente de cualquier proyecto de cimentación como la del edificio de Servicios de *Port Adriano* debe partir de considerar unas cargas Nominales por Micropilote, un diámetro de micropilote efectivo, una armadura necesaria para soportar dichas cargas con seguridad y una longitud de micropilote tal que permita transferir dichas cargas al terreno, sin provocar el hundimiento del mismo.

Así pues, dos son los análisis que deben considerarse en el cálculo de cualquier proyecto de micropilotes. El primer análisis es un *análisis estructural*, que implica la necesidad de que el micropilote, como elemento resistente aislado sea capaz de soportar las cargas para las cuales ha sido diseñado. El segundo análisis estudia la *vertiente geotécnica* del problema, que implica la necesidad de encontrar un terreno lo suficientemente competente para absorber la carga que el micropilote le transfiere. Ambos análisis, que aparentemente son independientes, en realidad no lo son del todo, como se verá a continuación, pues incluso la resistencia estructural de un micropilote sometido a esfuerzos de compresión depende, al menos en una pequeña porción, del nivel de coacción lateral que el terreno impone sobre el propio micropilote, por efecto de un posible pandeo del mismo.

Actualmente la Bibliografía a la que en España se recurre para estudiar el problema de qué diámetro de micropilote considerar, qué sección de armaduras debemos escoger y qué longitud debemos dar al micropilote para soportar con seguridad las cargas se concentra en la *Guía* a la que anteriormente se ha hecho referencia y *Un método para el Cálculo de los Anclajes y de los Micropilotes inyectados*, en adelante el *Método de Bustamante*, texto básico de referencia para abordar cualquier cálculo de esta naturaleza, publicado por *Michel Bustamante* en 1986 y ratificado por él mismo en publicaciones posteriores.

Análisis Estructural según "el Método de Bustamante"

En este tipo de análisis, el *Método de Bustamante* se limita exclusivamente a dar una única recomendación práctica que, para el caso de micropilotes permanentes sometidos a esfuerzos de compresión exclusivamente, como era el caso de *Port Adriano*, se basa en seleccionar una armadura resistente únicamente en función de la carga de servicio prevista para el micropilote. De esta manera, dicha carga no debiera superar el 50% de la carga en el límite elástico de la armadura. Nada se dice pues de otros factores como la carga de rotura, las condiciones de ejecución, la resistencia carac-

terística de la lechada de la inyección, el tipo de unión entre armaduras, etc.

Análisis Estructural según "la Guía"

En cambio es muy completo el estudio que hace *La Guía* a este respecto, obligando al cumplimiento de la condición de que la resistencia estructural del micropilote supere el valor del esfuerzo axil de cálculo, obtenido a partir de acciones mayoradas transmitidas al cimiento.

El esfuerzo axil de cálculo es una condición independiente del micropilote y exclusivamente de transmisión de los pilares de la estructura del Edificio a los encepados previstos, repartiéndose esta bajada de cargas a partes iguales entre el número de micropilotes previstos para cada encepado (reparto isostático de cargas, muy frecuente en cimentaciones). Una hipótesis ciertamente conservadora a tener en cuenta en los cálculos es suponer que la totalidad de la carga del pilar debe ser absorbida por los micropilotes y nada por el terreno de apoyo del encepado previsto, especialmente cuando se desconfiaba en el nivel de compacidad de los rellenos superiores. En el caso de los micropilotes estudiados, este esfuerzo axil de cálculo mayorado se cuantificó en 72 toneladas por micropilote.

Según la *Guía*, la resistencia estructural del micropilote depende de la resistencia a compresión de la lechada de las inyecciones, de la resistencia del acero de las armaduras estructurales, del grado de confinamiento lateral que el terreno impone sobre el micropilote y un factor de seguridad adicional que depende de la técnica de inyección del micropilote, la naturaleza del terreno atravesado y el sistema de



Detalle de zona de bulbo de un Micropilote Titan

Cimentación

perforación empleado. Además, incorpora penalizaciones a esta resistencia muy interesantes basadas en aspectos como la pérdida de sección efectiva por efecto de la corrosión de las armaduras, la debilidad que proporciona al micropilote disponer uniones entre tramos de armaduras de menor resistencia que la propia armadura base o las menores garantías de un correcto sellado de las inyecciones por falta de revestimiento de las perforaciones, entre otros aspectos.

La expresión pues para el cálculo de la resistencia estructural de un Micropilote sometido a esfuerzos de compresión, según la *Guía* es:

$$N_{c,d} = ((0,85 \cdot A_c \cdot f_{cd}) + (A_s \cdot f_{sd}) + (A_a \cdot f_{yd})) \cdot R / (1,20 \cdot Fe)$$

donde:

$N_{c,d}$ = Resistencia Estructural del micropilote sometido a esfuerzos de compresión. Deberá ser mayor o igual que el esfuerzo axial de cálculo, obtenido a partir de acciones mayoradas.

A_c = Sección neta de lechada o mortero, descontando armaduras. Se debe usar el diámetro nominal del micropilote.

f_{cd} = Resistencia de cálculo del mortero o la lechada de cemento = f_{ck} / F_c .

f_{ck} = Resistencia característica de la lechada de cemento o mortero a compresión simple a 28 días de edad.

F_c = Sección neta de lechada o mortero, descontando armaduras. Se debe usar el diámetro nominal del micropilote.

A_s = Sección total de las barras de acero corrugado longitudinales.

f_{sd} = Resistencia de cálculo del acero de las barras corrugadas = f_{ck} / F_s . Deberá tomarse un valor no superior a 400 Mpa.

f_{sk} = Límite elástico del acero de barras corrugadas. Deberá tomarse 400 ó 500 Mpa, según sea acero B-400-S ó B-500 S.

F_s = Coeficiente parcial de seguridad para el acero de las barras corrugadas. Se tomará $F_s = 1,15$.

f_{vd} = Resistencia de cálculo del acero de la armadura tubular. Se tomará $f_{vd} = f_v / F_a$

f_v = Límite elástico del acero de la armadura tubular. Valor proporcionado por el fabricante.

F_a = Coeficiente parcial de seguridad para el acero de la armadura tubular. Se tomará $F_a = 1,10$.

A_a = Sección de cálculo de la armadura tubular de acero, considerando la reducción de espesor por efecto de la corrosión, y la reducción por el tipo de unión entre tramos;

$$A_a = (\pi / 4) \cdot ((d_e - 2r_e)^2 - d_i^2) \cdot F_{u,c}$$

d_e = Diámetro exterior nominal de la armadura tubular.

d_i = Diámetro interior nominal de la armadura tubular.

$F_{u,c}$ = Coeficiente de minoración del área de armadura tubular en función del tipo de unión (compresión). Valor tabulado.

F_e = Coeficiente de influencia del tipo de ejecución que tiene en cuenta la naturaleza del terreno y el sistema de perforación. Valor tabulado por la Guía.

R = Factor empírico de pandeo, que depende de la compacidad del terreno.

$$R = 1,07 - 0,027 \cdot Cr \leq 1$$

C_r = Coeficiente adimensional que tiene en cuenta el tipo de coacción lateral del terreno. Valor tabulado por la Guía.

d_n = Diámetro nominal del micropilote.

Para un micropilote armado con un tubo **Ischebeck Titan 73/45**, de diámetro exterior/interior (mm), con una carga de rotura de 1.575 kN y una Carga en el límite elástico de 1.270 kN, considerando la lechada como de cemento Portland Tipo I con una resistencia característica de 300 kg/cm² y un coeficiente de sobreperforación de al menos un 20% adicional, asociado a la técnica de micropilote Autoperforante con inyección simultánea en una marga alterada (valor conservador), se obtiene:

$$N_{c,d} = 73,5 \text{ t} > 72 \text{ t}$$

Por tanto, la resistencia estructural de un micropilote Autoperforante **Titan 73-45**, con maniguillos externos roscados para empalme de armaduras y con un diámetro de perforación de 130 mm, si se inyecta con lechadas de cemento que rebasen los 300 kg/cm² de resistencia característica, supera las 72 t requeridas para la solicitud máxima mayorada prevista.

Análisis Geotécnico según “el Método de Bustamante”

Por todos es conocido que la potencia del *método de Bustamante* está precisamente justificada por la sistemática que desarrolla en cuanto al dimensionamiento de longitudes del micropilote, de acuerdo con las resistencias aportadas por el terreno. Su método, de naturaleza casi totalmente empírica, está basado en un total de 120 ensayos de arrancamiento de anclajes y de micropilotes en diferentes suelos en Francia, e incorporando a su estudio valores proporcionados por otros autores como Ostermayer, Koreck, Scheele, o Fujita.

La metodología, de análisis muy sencillo, consiste en estimar la resistencia por el fuste del terreno (también llamada fricción lateral unitaria o adherencia límite) en base a la tipología de inyección empleada para el micropilote (*I.U.* o *I.R.S.*), granulometría del terreno (rocoso, granular o cohesivo) y nivel de compacidad del mismo (Ensayos presiométricos o *SPTs*). Posteriormente se aplica un cierto coeficiente de Seguridad global. Todo ello, junto con el área prevista de contacto entre la inyección y el terreno, estima la Longitud necesaria de bulbo adherente L_s para resistir las solicitaciones previstas según la expresión:

$$L_s = (F_s \cdot T_L) / (\pi \cdot \alpha \cdot D_{\text{perf}} \cdot q_s)$$

donde:

- L_s = Longitud del bulbo adherente del micropilote, necesaria para absorber las cargas previstas.
- F_s = Coeficiente de Seguridad según el sentido de la solicitación (tracción o compresión), y según se trate de micropilote o anclaje.
- T_L = Capacidad máxima de Carga del Micropilote o Anclaje.
- α = Coeficiente de Sobreperforación del micropilote. Es un coeficiente adimensional que depende del tipo de inyección efectuada y la granulometría del terreno. Adopta valores desde 1,10 hasta 1,80.
- D_{perf} = Diámetro de perforación del micropilote.
- q_s = Fricción lateral unitaria (rozamiento por el fuste). Obtenida mediante tablas basadas en valores empíricos de ensayos, en función del tipo de terreno, la compacidad del mismo y la técnica de inyección empleada.

El *Método de Bustamante*, a diferencia de *La Guía*, a través del coeficiente α de Sobreperforación tiene en cuenta el efecto de incremento de diámetro efectivo respecto del diámetro de perforación del micropilote según la técnica de la inyección y para ello prescribe unos valores de volumen de lechada mínima necesaria aconsejable para lograr este deseable incremento de diámetro. Además da toda una serie de recomendaciones de presiones mínimas, máximas, caudales mínimos, máximos y número de pasadas por cada válvula de reinyección para poder considerar una inyección como *I.R.S.* a efectos de cálculo, con la mejora de fricción lateral unitaria que ello proporciona respecto a una inyección única *I.U.*

En cuanto a la técnica *Autoperforante*, es sabido que el hecho de efectuar la perforación

con una inyección simultánea de lechada pobre en cemento y a una cierta presión determina unos consumos de cemento globalmente similares a los que se obtienen con una inyección *I.R.S.* A este respecto existen estudios que avalan que en micropilotes autoperforantes-autoinyectantes se movilizan fricciones laterales del mismo orden que las que se logran pues con un micropilote con *I.R.S.*, que en la práctica suponen mejoras de entre un 15% a un 30% de la fricción lateral unitaria respecto de un micropilote *I.U.* que, junto con el efecto del incremento del diámetro efectivo proporcionan globalmente resistencias por el fuste de entre un 30% a un 60% mayor, dependiendo de los casos.

En el caso de *Port Adriano*, con un coeficiente de Seguridad de 2,00 para micropilotes permanentes a compresión, una carga unitaria prevista de 72 toneladas, un coeficiente de Sobreperforación de 1,20 (marga alterada e inyección *I.R.S.*), un diámetro de perforación de 130 mm y un valor de fricción lateral unitaria de 45 t/m², proporcionó una longitud necesaria de micropilote de 6,50 m de empotramiento en el estrato competente situado a profundidades medias de 16 m, lo cual determinó longitudes de micropilotaje necesarias de 21 a 24 m/ud.

Adicionalmente, el *Método de Bustamante* permite, con grandes reservas para ello, adoptar una resistencia posible por la punta del micropilote adicional a la resistencia por el fuste cuantificada en un 15% de este valor último, lo cual, debido a la linealidad del método propuesto, permitiría reducir un 13% más esta longitud de sellado prevista, hecho que no se tuvo en cuenta en el diseño del lado de la seguridad.

Análisis Geotécnico según “La Guía”

En este aspecto, la *Guía* supone una clara adaptación del *Método de Bustamante*, con algunas mejoras adicionales, como considerar reinyecciones repetitivas pero no selectivas (*I.R.*) a través de una interpolación media entre los valores de fricción lateral unitaria de un *I.R.S.* y los de un *I.U.*, el aspecto de considerar valores de fricción lateral superiores a los considerados por *Bustamante* y, además, fricciones constantes a partir de un cierto valor de alta compacidad del terreno. Por contra, no posibilita la adopción de coeficientes de sobreperforación respecto del diámetro nominal de la perforación.

Otro aspecto interesante de esta metodología es que además propone un *Método alternativo de Cálculo Teórico*, basado en la determinación del rozamiento por el fuste a partir de los parámetros geotécnicos del terreno (cohesión efectiva, ángulo de rozamiento del terreno, tensión horizontal efectiva a la cota del bulbo, etc.) ajenos a correlaciones de carácter empírico.

Por último, recomienda expresamente que el método de determinación de la longitud del

bulbo adherente se base en *Ensayos de Carga in situ*. A este respecto, en *Port Adriano* en fase de pruebas se ejecutaron 4 micropilotes Autoperforantes con 15 metros de longitud libre enfundada para salvar los rellenos superiores, 6 metros de bulbo adherente y con solicitaciones a axil de tracción de 90 toneladas que no produjeron arrancamiento del micropilote, lo cual validó el sistema de ejecución planteado, la armadura autoperforante prevista, la técnica de inyección probada y la longitud de micropilote resultante, a partir de un bulbo de 6,50 m. Además, del lado de la seguridad quedaban los 15 metros de rellenos superiores cuya resistencia por fuste no se consideró en los Ensayos iniciales y la resistencia por la punta ya comentada.



Panorámica general de los equipos de perforación

Finalmente se efectuaron un total de 9 ensayos adicionales de Compresión y 15 ensayos de Tracción, todos ellos por Laboratorio acreditado y según Procedimiento previamente aprobado por la D.F., con resultados plenamente satisfactorios en la totalidad de los casos. ♦

Nombre de la Obra:
Obras de Ampliación de Port Adriano, El Toro, Calvià, (Mallorca)
Promotor:
OCIBAR S.A.
Empresa Constructora:
F.C.C. CONSTRUCCIÓN S.A.
Empresa de Micropilotaje:
DEKON TÉCNICAS DE CIMENTACIÓN S.L.
Solución de Cimentación con Micropilotes para Edificio de Servicios:
721 uds (15.520 ml) de micropilote ISCHEBECK TITAN 73-45.
780 Tons de Cemento 42,5 SR en inyecciones.
267 m ³ de Mortero M-35 en sellados de micropilotes.
Rendimientos medios de Perforación de 130 ml / día x Equipo.

Ficha técnica de la Obra.

DEKON, TÉCNICAS DE CIMENTACIÓN, S.L.
 Sant Gervasi de Cassoles, 33-35.
 08022 Barcelona
 ☎: 934 186 005 • Fax: 932 111 729
 E-mail: dekon@dekon.es
 Web: www.dekon.es