

metros de profundidad por considerarse que, a partir de esta profundidad, los efectos de mejora en el terreno no son significativos o no se han producido.

Del análisis de los diagramas de penetración obtenidos se puede concluir que: (1) aquellos ensayos realizados alejados de los puntos de tratamiento no registran, en general, mejoras significativas; (2) los ensayos realizados sobre las zonas tratadas dan resultados con grado de satisfacción en función de la mayor o menor admisión de cemento o microcemento y el tiempo de fraguado, (3) los golpes se han duplicado o triplicado respecto a los obtenidos en la fase de investigación previa al tratamiento y (4) han desaparecido los golpes con valor nulo debido a huecos que sí se registraron en la fase previa.

### Conclusiones

Las inyecciones se efectuaron acorde al proyecto definido y las admisiones se mostraron adecuadas en las zonas inyectadas. Se han alcanzado los objetivos que se plantearon al inicio del tratamiento: rellenar los huecos existentes, impregnar y consolidar la parte del terreno en la que descansan los elementos de cimentación (zapatas y encepados) y mejorar la capacidad portante del mismo. Además, gracias a las propiedades de las lechadas de microcemento se ha conseguido regenerar la fábrica de hormigón de zapatas, encepados y parte superior de los pilotes [Figura 8], así como la regeneración completa de los despegues existentes en los contactos de las estructuras de cimentación con el terreno.



**[Figura 8] Testigos mostrando la regeneración de la fábrica de hormigón de algunas de las estructuras de cimentación tratadas.**

Por último, destacar que los trabajos han puesto de manifiesto nuevamente la alta capacidad de penetración de las lechadas a base de microcemento SPINOR y la idoneidad de las mismas para la realización de tratamientos de consolidación y mejora en terrenos de granulometría muy fina con o sin presencia de agua.

pues los resultados de la impregnación con microcemento se encuentran estrechamente relacionados con la granulometría del terreno y el contenido en microcemento. Por el contrario, sí sirven para poner de manifiesto la efectividad del tratamiento y la capacidad de transformación de un suelo areno-limoso, por simple impregnación, en una especie de mortero [Figura 7].

Aquellas muestras pertenecientes a niveles arenosos con menor contenido en finos y por tanto más permeables y fáciles de impregnar han sido las que han dado los resultados más destacables, entre los que se encuentra un valor de  $140 \text{ kg/cm}^2$  obtenido en una de las muestras ensayadas. Por su parte, las densidades obtenidas en las muestras han variado entre  $1,54$  y  $2,02 \text{ g/cm}^3$ .



**[Figura 7] Testigos de arenas impregnadas con microcemento Spinor A12.**

Los ensayos de penetración han puesto de manifiesto igualmente la efectividad del tratamiento. Las arenas inyectadas con microcemento producen, debido a su elevada resistencia, rechazo en estos ensayos. Para garantizar que los rechazos se debían a las arenas inyectadas y no a la presencia de otros elementos en el terreno, se han realizado extracciones de muestras dónde los penetrómetros. En esta fase del reconocimiento los ensayos de penetración no se han llevado más allá de los 6

Por su parte, en la fase de inyecciones de consolidación se emplearon lechadas de cemento (como las arriba descritas) y microcemento. El microcemento empleado fue tipo SPINOR A12, suministrado en palets de sacos de 25 kg [Figura 5].

Las lechadas a base de A12 eran especialmente indicadas para este tipo de tratamiento por la finura del microcemento (formado por partículas de diámetro máximo 12 micras) y por sus propiedades, caracterizándose por: (1) una ausencia total de elementos contaminantes o agresivos con el medio ambiente; (2) una inyectabilidad muy superior a la de las lechadas clásicas (arenas de granulometría comprendida entre 0,1 y 0,3 mm); (3) unos límites de penetrabilidad próximos a los de las lechadas químicas; (4) la obtención de resistencias mecánicas elevadas en el terreno tratado y (5) resistencia a los terrenos y agentes agresivos, esta última característica muy importante, dadas las condiciones en las que se enmarca el tratamiento.

Las lechadas de microcemento han sido de tipo estándar, con relaciones agua/cemento de 3:1 y ocasionalmente 2:1. Para alcanzar sus propiedades óptimas de inyectabilidad las lechadas de microcemento requieren la adición de un superplastificante dispersante (Plast SP 355) que permite la floculación de las partículas ultrafinas del ligante y evitan la formación de grumos que impedirían la penetración de la lechada en el terreno (ver nº 139 IngeoPres de julio 2005). Este aditivo líquido se dosificó a un 4% del peso de microcemento SPINOR A12.

### Comprobación de la efectividad del tratamiento

Para el control de los resultados del tratamiento se realizaron perforaciones a rotación de 56 mm de diámetro y de hasta 5 m de profundidad, con la ayuda de coronas de diamante. Estas perforaciones se complementaron nuevamente con ensayos de penetración dinámica DPSH y Stump, realizados durante y tras el tratamiento [Figura 6].



**[Figura 6] Realización de ensayos ligeros de penetración tipo Stump en la zona de tanques de almacenamiento de ácidos.**

En las perforaciones se realizó extracción continua de testigo y se tomaron muestras para su ensayo en laboratorio. En concreto se recuperaron 4 muestras de terreno mejorado con microcemento, de una de las líneas de encepados tratados. Sobre estas 4 muestras se realizaron ensayos de identificación, estado y resistencia del material.

Los ensayos de resistencia a compresión simple realizados sobre aquellas muestras que presentaron una buena recuperación y pudieron ser tallados, han dado valores comprendidos entre 14 y 40 kg/cm<sup>2</sup>, con formas de rotura de las probetas características de testigos de roca o mortero. Estos elevados valores de resistencia, quizás no deban tomarse como representativos de todo el tratamiento y hacer pensar que se pueden llegar a obtener en cualquiera de los puntos tratados,

m<sup>3</sup> por operación. Los caudales de inyección manejados fueron muy bajos, de 10 a 15 l/min para favorecer la impregnación.

En el transcurso del tratamiento aparecieron importantes huecos en los propios elementos de cimentación, los cuales se procedieron a inyectar con cemento, mediante el empleo de un obturador neumático bajo la zapata o uno mecánico en superficie. Transcurridas 11 horas se procedió a la perforación del elemento reparado en cuestión para instalar los tubos manguitos y realizar la inyección de consolidación a través de los mismos.

A diferencia de otros tratamientos de impregnación, dadas las dificultades ya comentadas para la realización de las perforaciones, la gestión de la inyección (volúmenes, presiones, dosificaciones, composición de la lechada...) en cada uno de los taladros fue muy cuidadosa.

La zona de tanques de almacenamiento de ácidos fue tratada con 54 taladros de 8 metros de profundidad y 45° de inclinación alrededor de las estructuras de cimentación, más 22 taladros con profundidad máxima 6 m e inclinación de 0° a 10° atravesando las zapatas de los pilares principales.

En las naves industriales se ejecutaron un total de 169 taladros, todos ellos de 6 m de profundidad. De estos, 24 se realizaron en una línea de encepados de una de las dos naves industriales objeto del tratamiento y el resto (141 taladros) se distribuyeron entre tres líneas de encepados de la segunda nave industrial. La inclinación de los taladros se situó entre 0 y 10° en la primera nave, llegando hasta los 20° de inclinación en algunos casos en la segunda nave.

En conjunto se totalizaron unas admisiones de 146 t de cemento y 125 t de microcemento.

#### **Lechadas empleadas en el tratamiento**

En la fase previa de inyecciones de relleno y preconsolidación se emplearon lechadas a base de cemento sulfuresistente II/A-S 42,5 N/SR, suministrado a granel. Las relaciones agua/cemento en peso oscilaron entre 1:1, 1,5:1 y 2:1, adaptándose a las propias necesidades de la actuación.



[Figura 5] Vista del silo de cemento de 45 t con palets de microcemento Spinor A12 al lado (imagen de la izquierda) y mezcladora de alta turbulencia AC-83 Domine con palets de microcemento delante (imagen derecha).



**[Figura 3] Trabajos de perforación en zona de tanques e interior de nave respectivamente con equipos ligeros HILTI.**

En los taladros se instalaron tubos manguitos de PVC provistos cada metro lineal con 3 válvulas de inyección tipo antirretorno, para poder hacer las inyecciones repetitivas. Los diámetros de los tubos manguitos de inyección vinieron dados por las limitaciones de los diámetros interiores de los varillajes de perforación. Así, en el caso de los taladros perforados con el carro KLEMM se instalaron tubos de 2" y en los perforados con los equipos ligeros, tubos de 3/4" [Figura 4].



**[Figura 4] Tubos manguitos de PVC de 3/4" de diámetro listos para inyectar.**

En todos los casos, los tubos manguito fueron instalados en el terreno mediante un sellado, denominado "gaine", consistente en rellenar el espacio anular existente entre el terreno y el exterior del tubo manguito, con la inyección de una lechada de muy baja resistencia a base de cemento y bentonita que, después puede ser atravesada por la inyección propiamente.

Para llevar a cabo las inyecciones se emplearon dos tipos de obturadores: neumáticos, en profundidad y de tipo mecánico, en superficie. Las presiones de inyección no superaron los 3 kg/cm<sup>2</sup> en boca de taladro. De alcanzarse este valor se probaba modificando la dosificación de cemento y si no, se pasaba a lechadas de microcemento. En las zonas en que las admisiones de cemento eran muy limitadas desde el primer momento se pasaba directamente a inyectar microcemento. Los volúmenes de inyección de lechada a base de microcemento se limitaron a 1 o 2

Los ensayos de penetración fueron de dos tipos: DPSH y Stump, en función de la accesibilidad a las zonas de trabajo. Ambos ensayos permiten obtener una medida continua de la consistencia del terreno en función de la profundidad, diferenciándose entre ellos en la energía aplicada para medir la resistencia del terreno.

Así, mientras el DPSH corresponde a un ensayo superpesado, con caída de una maza de 63,5 kg desde una altura de 75 cm, el penetrómetro Stump corresponde a un equipo ligero, con una maza de peso 30 kg que cae desde 25 cm de altura, lo que permite su empleo en lugares con paso de hombre únicamente. En algunos casos se tuvieron que realizar perforaciones de avance para permitir el paso del varillaje de ensayo en los ensayos penetrométricos a través de las soleras y elementos de hormigón existentes.

De los reconocimientos previos se concluyó que: (1) el terreno presentaba abundantes huecos, de génesis diversa, bajo las estructuras de cimentación (soleras, zapatas y encepados), (2) en los primeros 4 m de espesor medio de terreno natural la compacidad era muy baja y (3) elevado grado de degradación del hormigón de las estructuras de cimentación [Figura 2]. Seguidamente se estableció el tratamiento a realizar, definiendo las fases, zonas de actuación y técnicas a emplear.



**[Figura 2] Testigos recuperados en la fase previa de reconocimiento en los que se observa la degradación del hormigón de las estructuras de cimentación.**

#### **Trabajos realizados durante el tratamiento: perforaciones e inyecciones.**

Cómo se ha indicado anteriormente, las técnicas empleadas para tratar el terreno areno-limoso, fueron: en primera fase, inyecciones de relleno y preconsolidación para rellenar los huecos y cavidades de mayor tamaño existentes bajo los elementos de cimentación y, en segunda fase, inyecciones de impregnación y consolidación en los 4-6 m más superficiales para mejorar la capacidad portante del terreno sobre el que se apoyan estos elementos.

Todas las técnicas empleadas y equipos asociados a éstas, se adecuaron a las características y limitaciones impuestas por la zona de trabajo. En la zona de tanques de almacenamiento de ácidos, aún encontrándose en el exterior y siendo menores las limitaciones espaciales, tuvo que emplearse un carro de perforación de pequeño tamaño del tipo KLEMM 701, especialmente concebido para trabajos en espacios reducidos como recalces o similares.

En el interior de las naves, la todavía más restringida capacidad de movimiento, hizo necesario el uso de perforadoras muy ligeras tipo HILTI DD-750 [Figura 3] e incluso de menor tamaño, como la TALPA o la DD-250 de accionamiento eléctrico. Las baterías de perforación con longitudes de 0,5 a 1,0 m, y el resto de los útiles, estaban adaptados igualmente a las limitaciones.

El equipo principal se completaba con una agitadora de alta turbulencia, una mezcladora de homogeneización, dos bombas para inyección con regulación hidráulica (presión y caudal) que permiten una gran precisión en el tratamiento, un silo de cemento de 45 t con dosificador automático y un sistema de pesaje.

construyó la factoría el terreno presentaba una topografía muy suave, con cotas entre 0,00 y +3,00 m.

En los metros superiores, el terreno se encontraba formado por depósitos de arenas de grano fino con contenidos variables en finos de baja o nula plasticidad, limos distribuidos irregularmente, abundante materia orgánica y restos de organismos marinos.

En profundidad estas arenas pasaban a ser más gruesas, con gravillas y gravas, llegando a estar cementadas en algunos puntos. En otros puntos del terreno aparecen unos niveles de arcillas arenosas de baja a media plasticidad también con materia orgánica y potencias reconocidas de entre 3 y 16 metros sin que se llegara a establecer, durante los estudios geotécnicos realizados en 1971 para la concepción de la factoría, la base de los mismos; las arcillas siempre aparecieron por debajo de los 27 m de profundidad, contados desde la superficie.

Desde un punto de vista genérico, se trata de sedimentos de origen continental (fluvial) y marino que se intercalan dando lugar a abundantes cambios de facies. La disposición corresponde a los episodios regresivos y transgresivos del mar. Los sedimentos continentales, de color amarillento y marrón, los forman arenas, limos, gravillas y gravas, arrastrados por los ríos que desembocan en la bahía y los sedimentos marinos, de color grisáceo y con abundantes restos de fauna, fueron originados por la acción erosiva del mar. Todos ellos tienen edad cuaternaria y se asientan sobre un sustrato terciario de "flysch" (depósitos marinos profundos, mayoritariamente turbidíticos, depositados en regiones orogénicas antes de su deformación).

En lo que a características geomecánicas se refiere, el terreno presentó también una gran variabilidad, aún dentro de estratos similares. De forma resumida, las resistencias a la penetración dinámica en las arenas (campana 1971) mostraban resultados desiguales, con valores de golpeo muy bajos en los 3 primeros metros de terreno, golpes de 30 a 50 hasta los 14 m y rechazos en profundidades comprendidas entre 14 y 20 m, respecto a la superficie del terreno natural.

Los ensayos SPT en las arenas presentaban una dispersión enorme de valores, situándose en un 70% entre 10 y 50 golpes, aunque con una tendencia más clara a aproximarse al primer valor. Se obtuvieron también valores aislados muy altos que correspondían a zonas de cimentación parcial de dichas arenas. En las arcillas los valores de  $N_{SPT}$  también eran muy dispares (de 5 a 15 golpes) en función del mayor o menor contenido de arenas presente en éstas.

El freático se encontraba a 2 metros de profundidad desde la superficie; a partir de los análisis efectuados no se consideró que el agua presentara agresividad al hormigón.

### **Características de la cimentación**

Las tipologías de cimentación que se emplearon en la construcción de la factoría fueron diferentes en función del elemento estructural en cuestión. Así, en la zona en la que se encuentran siete tanques de almacenamiento de ácido (de 15 y 20 m<sup>3</sup> de capacidad) la cimentación es de tipo superficial a base de zapatas cuadradas apoyadas en el terreno natural a profundidades comprendidas entre 2 y 3 metros.

Por su parte, las naves industriales integrantes de la factoría presentan en general, una cimentación mediante pilotes de características muy similares entre ellas. Únicamente se pueden encontrar algunas pequeñas variaciones en las dimensiones de los encepados y en las distancias entre éstos. Los encepados pueden ser de dos tipos: (1) los principales que normalmente recogen seis pilotes y se sitúan cada 15 metros, y (2) los secundarios que se intercalan cada 5 metros entre los principales y los integran un único pilote.

### **Reconocimientos previos para identificación del problema**

Para determinar el estado en que se encontraba la zona a tratar y establecer el alcance de los tratamientos se realizaron perforaciones con recuperación de testigos, con la ayuda de equipos ligeros tipo HILTI, y diversos ensayos de penetración dinámica.

## INYECCIONES DE LECHADAS DE MICROCEMENTO PARA TRATAMIENTO DEL TERRENO DE CIMENTACIÓN EN PLANTA INDUSTRIAL

**Ignasi JARAUTA BRAGULAT**

INGENIERO INDUSTRIAL  
DIRECTOR DE SUMSERT (Suministros y Servicios Tecnológicos, S.C.P.)

### Introducción

En este artículo se describen los trabajos de inyección de lechadas a base de microcemento SPINOR A12 llevados a cabo para mejorar el terreno de cimentación de algunos elementos estructurales en la factoría de ACERINOX en la Bahía de Algeciras (Cádiz). Dichos elementos estructurales corresponden a dos naves y una zona de tanques de almacenamiento de ácidos construidos en los años setenta e integrantes de la planta industrial, en una zona dedicada al tratamiento y laminación de acero inoxidable [Figura 1].

Estas inyecciones de relleno y consolidación a base de microcemento, realizadas con la técnica del tubo manguito, formaban parte de un tratamiento más amplio en el que también se incluía inyecciones de consolidación con cemento. Los trabajos de inyección fueron desarrollados por la sociedad KRONSA INTERNACIONAL, S.A. en el periodo comprendido entre los meses de mayo y noviembre de 2004.

El tratamiento se proyectó tras detectarse socavaciones, bajas compacidades y síntomas de degradación en los suelos de algunas zonas de la factoría, como consecuencia de las vibraciones producidas por la maquinaria, circulación de agua, fugas y filtraciones.



[Figura 1] *Vista general de la factoría.*

En total se realizaron 219 perforaciones destinadas a inyección en las que se dispusieron tubos manguitos de PVC equipados con 3 válvulas de inyección por metro lineal. Los taladros se distribuyeron en el terreno de forma casi aleatoria, adaptándose a las limitaciones y peculiaridades impuestas por cada zona a tratar. Al final del tratamiento se habían inyectado 125 t de microcemento y 146 t de cemento, lo que supone en conjunto (en función de las diferentes relaciones agua/cemento manejadas) más de 580 m<sup>3</sup> de material inyectado.

Una vez concluidas las inyecciones, se realizaron nuevamente una serie de reconocimientos geotécnicos complementados con ensayos de control, que pusieron de manifiesto la efectividad del tratamiento.

### Terreno original de cimentación

El terreno sobre el cual se realizó la cimentación de la factoría presentaba una gran heterogeneidad y una fuerte variabilidad en lo que a características geotécnicas se refiere. En el momento en que se