

Soluciones alternativas a retos geológicos en estructuras de cimentación

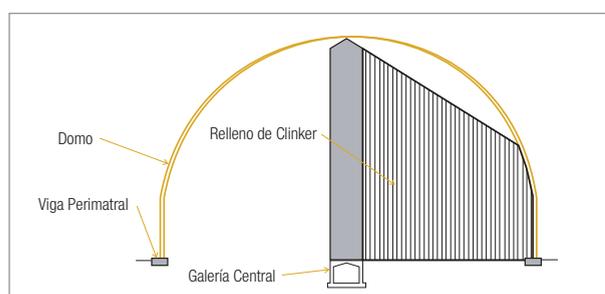
Antoine Charles Verrouil. Soletanche Bachy Cimas y Menard.



→ Foto 1. Domo de almacenamiento de Clinker.
ULTRACEM

El sector industrial está en pleno desarrollo en Colombia; la producción aumenta y, en consecuencia, se necesita construir nuevas plantas y/o ampliar las existentes. En su desarrollo, las empresas pueden encontrarse frente a un desafío importante en el momento de construir sus nuevas instalaciones. De hecho, las estructuras comúnmente presentes en el sector industrial combinan dos características que deben estar estrictamente ligadas, son: unas cargas importantes y una alta sensibilidad a las deformaciones. Además, la mayor parte de los suelos en Colombia tiene características muy blandas y reúne los ingredientes para presentar grandes retos ingenieriles. La solución habitual es el sistema de cimentación profunda a través de pilotes de concreto armado la cual, si bien funciona, puede resultar onerosa y afectar en ocasiones la factibilidad económica de todo un proyecto. Ante esta realidad, empresas del sector de la construcción optaron por implementar técnicas de cimentación usadas y comprobadas en contextos similares en Europa y Estados Unidos mediante mejoramiento del suelo. Son técnicas novedosas y, ante todo, más económicas, ya que se adaptan “a la medida” a cada tipo de estructura y de suelo.

Los métodos constructivos que pertenecen a la familia de tecnologías de mejoramiento de suelo apuntan a aumentar ciertos parámetros intrínsecos del terreno existente. Aunque las técnicas aplicadas en la actualidad son de nuestros días, el concepto técnico tiene más de 1.500 años. Las famosas *vías stratas*, por ejemplo, que permitieron la rápida expansión del Imperio Romano, se construyeron gracias a técnicas rudimentarias de mejoramiento de suelos, tales como agregar cal al terreno para mejorar su resistencia. La filosofía general detrás de todas las técnicas de mejoramiento de suelo es la misma: mejorar el terreno en su globalidad y no solamente en zonas específicas. Es por esto que los sistemas de cimentaciones especiales de mejoramiento de suelo funcionan muy bien cuando hay cargas repartidas como tanques, patios de almacenamientos, bodegas y, en general, para construcciones industriales.



↑ Figura 1. Perfil Domo de almacenamiento de Clinker.
ULTRACEM

Sin embargo, ya que existe una gran variedad de metodologías de mejoramiento de suelos, debe escogerse la tecnología óptima para el contexto particular del proyecto, no solo teniendo en cuenta la estructura que se va a construir, su forma y su peso, sino también las características geotécnicas del suelo. Se presentan a continuación dos ejemplos claros de aplicación de metodologías de mejoramiento de suelo novedosas para el país, atendiendo a las desafiantes necesidades estructurales, geotécnicas y económicas de cada obra.

Una estructura exigente en cargas y deformaciones

En el año 2015 se inició la construcción del primer domo de almacenamiento para 90.000 toneladas de clinker en Colombia, una imponente estructura de 60 m de diámetro y 36 m de alto que debía reposar sobre una viga perimetral de 1,15 m de espesor. Por debajo del nivel del suelo debía haber una galería subterránea de servicio de 5 m x 5 m para evacuar el clinker mediante bandas transportadoras. Dentro del domo, el Clinker, con peso de 1,6 t/m³, debía estar almacenado hasta una altura de 35 m, descargando sobre el suelo un peso masivo de 56 t/m² en su centro. Al tener en cuenta la sumatoria de los esfuerzos, se generaba una carga adicional cercana a 62 t/m² en el borde.

La forma de domo de la estructura presentaba muchas ventajas, como un incremento significativo de la capacidad de almacenamiento frente a estructuras de tipo silos. Los asentamientos diferenciales del suelo causados por el peso mismo del domo podían generar, a largo plazo, esfuerzos de torsión, los cuales podrían afectar la estructura con fisuras del revestimiento del domo o de la misma galería subterránea, por ejemplo. Ante este riesgo, el diseño de la cimentación del domo debía contemplar la reducción de asentamientos del suelo, dentro de los rangos admisibles definidos por el constructor.

La solución básica presentada por los diseñadores del proyecto se basó en un sistema de cimentación profunda compuesto por pilotes de concreto armado conectados a una losa maciza, lo cual representaba un costo importante. Sin embargo, mediante el estudio de los diferentes aspectos del proyecto, llegaron a una solución alternativa

→ Foto 2. Cimentación en construcción del Domo.
ULTRACEM



de mejorar el suelo mediante columnas de módulo controlado (CMC), con la óptica de reducir los costos de obra y asegurar la reducción óptima de los asentamientos del suelo.

Las Columnas de Módulo Controlado - CMC

La técnica CMC consiste en incluir en el suelo blando una multitud de elementos de concreto según una malla geométrica. La imagen que podemos usar es la del “tapete” del faquir, quien se levanta indemne luego de recostarse sobre una cama llena de clavos. Las columnas de módulo controlado interpretan el truco en que el prestidigitador reparte el peso de su cuerpo sobre todas las puntas, pero cada esfuerzo es tan pequeño que no lastima la piel. Trasladando este ejemplo al caso del proyecto, los elementos de concreto comparten la esbeltez de los clavos, las columnas tienen un diámetro comprendido entre 20 a 40 cm y pueden llegar a una profundidad de hasta 40 m. Las inclusiones se reparten según una malla geométrica que debe imitar la forma de la estructura en superficie; se puede usar una malla radial en el caso de mejorar el suelo para un elemento de aspecto circular como un tanque, una malla rectangular si las formas son cuadradas como una bodega o, finalmente, mallas triangulares para figuras asimétricas como carreteras. La clave está en respetar una repartición homogénea sobre toda la superficie del tratamiento. Si se llega a tener un contexto geotécnico que presenta esfuerzos cortantes —en las zonas de actividad sísmica, por ejemplo— las columnas pueden ser armadas con acero hasta la profundidad requerida; sin embargo, esas inclusiones de concreto no están conectadas a un sistema de cimentación superficial como puede ser el caso con un pilotaje tradicional, ya que el peso de la estructura se transmite a través de un relleno de material granular llamado “plataforma de transferencia de carga”. Los esfuerzos aplicados al relleno se dirigen naturalmente hacia los elementos del suelo de mayor rigidez, es decir, hacia las CMC de concreto, mediante un fenómeno físico llamado “efecto arco”. Gracias a ello, la carga aplicada en superficie está recuperada en su mayor parte por la malla de inclusiones y el suelo recibe una fracción suficientemente pequeña para no generar asentamientos.

El desafío principal de una estructura tipo domo era el almacenamiento piramidal, lo que implicaba que la carga iba a ser diferente entre el centro y los extremos. La implicación directa era que el suelo podía presentar deformaciones mayores en las zonas más cargadas y menores en las de menor carga. Para evitar esos asentamientos diferenciales, el diseño de mejoramiento de suelos tuvo que adaptarse a esos cambios: las columnas de 40 cm de diámetro y de 22 m de profundidad fueron organizadas según una malla radial con distancia entre ejes desde 1,25 m x 1,25 m en las zonas de mayor carga, hasta 1,45 m x 1,45 m donde la carga estaba más reducida, para un total de 1.700 columnas. De esta manera, la repartición geométrica de las columnas se podría considerar como un espejo de la de los esfuerzos.

Detalles sobre el concreto

El concreto utilizado en la construcción de inclusiones rígidas tipo CMC debe tener las siguientes especificaciones con el fin de garantizar el máximo desempeño en su instalación: tamaño nominal de la grava entre 3/8” y 1/2”, asentamiento de 9” y tolerancia de 1”, viscosidad con tiempo final de extensión de flujo menor a 7 segundos y manejabilidad de 2 horas desde su llegada a obra. Para la comprobación de estas características, antes de iniciar la obra se hace una prueba industrial en la planta de fabricación, con un

volumen mínimo de 3 m³, al que se mide durante 3 h tomando registros de los ensayos de asentamiento, viscosidad y temperatura cada 30 min. Durante la ejecución de la obra, a cada camión mezclador se le deben hacer, en el momento de su llegada a la obra o máximo en un plazo de 15 min, una inspección visual y un ensayo de asentamiento y toma de cilindros, teniendo como muestra representativa un máximo de 40 m³, con el fin de realizar ensayos de compresión por cilindro a diferentes edades.

Control de calidad y ensayos

Como todo proceso, el mejoramiento de suelo responde a un riguroso plan de control de calidad. Además de los parámetros controlados sobre el concreto, se tiene que verificar la buena ubicación topográfica de cada elemento y su profundidad y, además, comprobar que el volumen de concreto usado en obra no sea menor al volumen teórico. Este control se realiza para cada una de las 1.700 columnas en tiempo real. Durante la ejecución de una inclusión, una batería de sensores diversos envía información al operador quien puede monitorear parámetros de producción, entre ellos la profundidad de la punta de la herramienta de perforación, su velocidad de subida, la presión de inyección de concreto en el suelo, etc. Esos registros se compilan y analizan durante toda la obra y se entregan al cliente al finalizar el proyecto.

El diseño alternativo permitió reducir los volúmenes de concreto y de acero, así como gastos y tiempos de ejecución, ya que las 1.700 columnas fueron instaladas en menos de dos meses de trabajo. Además, el diseño del sistema de cimentación superficial también pudo ser optimizado, ya que se reemplazó la losa de concreto armado con una viga perimetral mucho más liviana y económica. En total, el diseño alternativo propuesto permitió al cliente ahorrar más del 50% sobre el costo total del diseño básico.



↑ Foto 3. Centro de distribución logístico Contecar.
CONTECAR

Una bodega a caballo entre dos tipos de suelo

El terminal marítimo Contecar, parte del grupo puerto de Cartagena, aplica tecnologías de punta para permanecer en la vanguardia y ofrecer a sus clientes servicios de altísima calidad. En 2018, el puerto quiso construir una bodega para un centro de distribución logístico. Al contrario de nuestro primer ejemplo, la bodega de 22.000 m² iba a generar cargas moderadas sobre el terreno. El peso del relleno de puesta a la cota arquitectónica, al cual se le debía agregar el peso de la bodega, sumaba 7 t/m² que se aplicarían al suelo existente.

En este caso particular, el reto provino más de la geotecnia del sitio que de los esfuerzos: la presencia de un canal ocasionó una variación de la estratigrafía debajo de la huella del futuro edificio, dividiendo el suelo en dos áreas con características geológicas opuestas. Los sondeos más cercanos al canal reportaban la presencia de depósitos aluviales de arcillas arenosas muy blandas que poco a poco dejaban lugar a unas capas de arcillas más compactas, a medida que se iban alejando. El desafío del proyecto fue adaptar el mejoramiento de suelo a la variación de dureza del suelo.

Drenes verticales tipo mecha

Para esta obra, el mejoramiento de suelo se realizó en dos etapas y aplicando dos técnicas distintas:

En primer lugar, se instalaron drenes verticales tipo mecha (*Wick Drains*) y un relleno para precargar el suelo durante la etapa temprana del proyecto. El método de

mejoramiento de suelo mediante la instalación de drenes verticales tipo mecha se aplica en suelos cohesivos poco permeables como arcillas finas consiste en la introducción de cintas drenantes sintéticas en el suelo para aumentar su permeabilidad. Cada mecha está compuesta de un núcleo central en polietileno de alta densidad que forma pequeñas canaletas por las cuales se conduce el agua, esos canales están protegidos por un sobre en geotextil que deja pasar el agua pero no las partículas finas del suelo para evitar el taponamiento del dren.

Las mechas están instaladas en el suelo mediante una camisa metálica que baja hasta la profundidad recomendada en el diseño, generalmente los drenes se instalan sobre todo el espesor de la capa compresible (la profundidad de instalación máxima alcanzada en el mundo es de 40 m). Una vez la cinta anclada, la camisa sube hasta el nivel de la superficie donde se corta el dren y se repite la operación en otro punto. Esta operación se demora en promedio 1 minuto por punto, lo que permite tener rendimientos de instalación muy altos del orden 5.000 metros lineales a 10.000 metros lineales por día de trabajo dependiendo de la dureza del suelo.

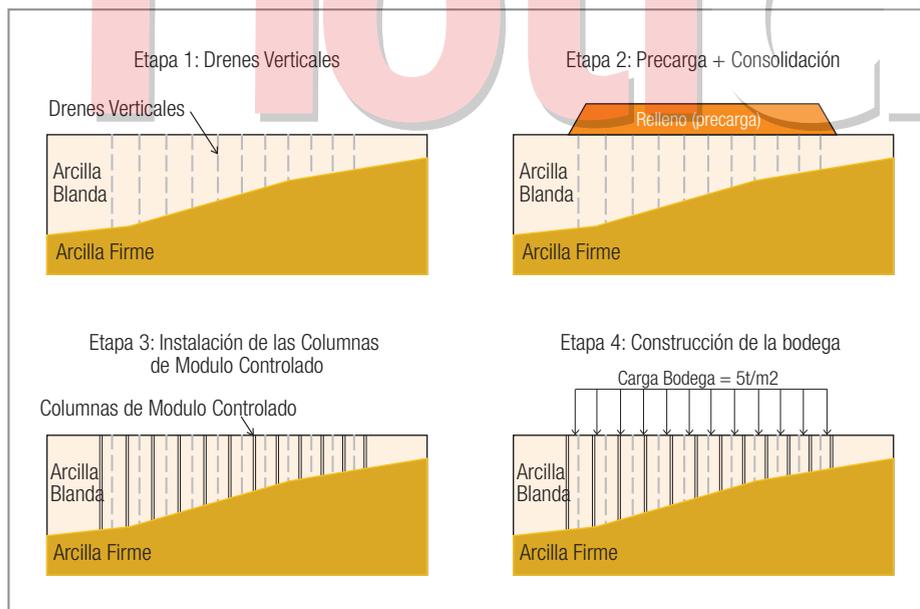
↓ Foto 4. Instalación de drenes verticales tipo mecha.
SOLETANCHE BACHY CIMAS Y MENARD





← Foto 5. Dren vertical tipo mecha instalado.
SOLETANCHE BACHY CIMAS Y MENARD

Siempre se usa combinado con un relleno de precarga, que tiene el papel de simular la carga final que se va a aplicar al terreno. Una vez cargado, el suelo va a empezar el proceso de consolidación. Con el tiempo, el agua se escapa del terreno ocasionando deformaciones verticales en el proceso y las mechas drenantes instaladas permiten mejorar la permeabilidad vertical del suelo y acelerar el tiempo de consolidación. Durante el proceso se debe realizar un monitoreo topográfico para medir los asentamientos del suelo y de esta manera garantizar que se llevó a cabo el tratamiento del suelo en su totalidad. Adicionalmente, se pueden adjuntar instrumentos como piezómetros para medir el nivel del agua e inclinómetros para hacer un seguimiento de las deformaciones horizontales del suelo. Terminada la consolidación se puede remover el relleno de precarga. Esta fase permite reducir los asentamientos residuales del suelo y reducir de manera importante los costos del sistema de cimentación.



↑ Figura 2. Perfil de la Bodega.
SOLETANCHE BACHY CIMAS Y MENARD

En la segunda etapa se instaló una red de columnas de módulo controlado (CMC): las inclusiones, de 30 cm de diámetro, se instalaron según una malla rectangular de 2,4 m x 2,4 m con una profundidad de instalación de 13 a 17 metros adaptada a la variabilidad del suelo: es decir, más larga cuando el suelo era más blando y más corta cuando el suelo era más duro.

Otra característica importante de la técnica de instalación de las columnas de módulo controlado es el uso de un tornillo que posee una forma especial para desplazar lateralmente el suelo. Esto permite evitar la extracción del material durante la penetración de la herramienta en el terreno, lo que minimiza la generación de escombros y los costos del manejo de los mismos. Adicionalmente, el empuje lateral del tornillo compacta el material de suelo entre las columnas, mejorando sus parámetros geotécnicos. Se puede considerar esta mejora en los cálculos al nivel de diseño, lo que ofrece la posibilidad de reducir las cantidades de concreto usado. Finalmente el uso del tornillo de desplazamiento lateral de suelo reduce de manera significativa la expansión del concreto en el momento de la inyección, ya que el suelo en los bordes de la excavación es más compacto y por lo tanto menos permeable. Esto reduce los riesgos de fugas y pérdidas de concreto durante la ejecución, permitiendo que en promedio se reduzca el porcentaje del sobreconsumo dependiendo de la geología del suelo.

Para garantizar la calidad del trabajo ejecutado se pueden realizar ensayos a escala real sobre las columnas de modulo controlado, el ensayo de carga estática rápida se aplica sobre columnas hechas a propósito. El ensayo consiste en aplicar gradualmente a la cabeza de la inclusión una carga similar a la que va a recibir el elemento y medir las deformaciones del suelo para confirmar que se respetaron los requisitos del diseño.

Con el diseño alternativo propuesto, se pudieron optimizar las cantidades de concreto y de acero usados en la obra y reducir significativamente los gastos del proyecto.

Conclusión

Los grandes desafíos que presentan los parámetros del suelo en Colombia, acompañados de los altos costos que representan las técnicas tradicionales de cimentación, incentivan constantemente a empresas del sector de la construcción a implementar técnicas de mejoramiento de suelo, novedosas para el país y menos onerosas. Los ejemplos presentados, mediante el uso de CMC con una repartición geométrica que reflejara el peso diferencial del domo, y la combinación de drenes verticales tipo mecha y de una red de CMC adaptados a las condiciones cambiantes de dureza del suelo, muestran que cada obra es única y que no se puede aplicar siempre la misma solución. Es importante adaptarse a las necesidades del suelo y de las estructuras, pensar más allá de las técnicas comunes y proponer metodologías “a la medida” como única solución para brindar ingeniería de valor que responda a las necesidades de cada proyecto y de cada cliente.