



Sociedad Mexicana de  
Ingeniería Geotécnica, A.C.



XXVIII REUNIÓN NACIONAL DE  
INGENIERÍA GEOTÉCNICA

23 y 26 de Noviembre de 2016; Mérida, Yucatán

# MEJORAMIENTO DE SUELOS MEDIANTE INCLUSIONES RÍGIDAS DE DESPLAZAMIENTO COMO SOLUCIÓN PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE SITIO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS PLANTAS DUBA EN LA REFINERÍA FRANCISCO I. MADERO

SOIL-DISPLACEMENT TYPE RIGID INCLUSIONS USED AS A SOIL IMPROVEMENT SOLUTION FOR THE CONDITIONING OF THE SITE BEFORE THE CONSTRUCTION OF THE DUBA PLANTS INTO THE 'FRANCISCO I. MADERO' REFINERY

**Juan Carlos Martínez Rojas** ([juan.carlos.martínezro@pemex.com](mailto:juan.carlos.martínezro@pemex.com))

Especialista Técnico Civil  
PEMEX Transformación Industrial

**Alfredo Cirión Arana** ([cirion.alfredo@menard.com.mx](mailto:cirion.alfredo@menard.com.mx))

Gerente de Ingeniería y Desarrollo Comercial  
Menard México

**RESUMEN:** En este artículo se presenta información relacionada con la ejecución del trabajo de mejoramiento de suelos realizado mediante Inclusiones Rígidas de Desplazamiento en el sitio de construcción de las nuevas plantas del Proyecto de Calidad de Combustibles (PCC) Fase Diésel Ultra Bajo Azufre (DUBA) para la refinería Francisco I. Madero, en Ciudad Madero, Tamaulipas. Debido al poco espacio disponible con el que cuenta una de las refinerías más antiguas del Sistema Nacional de Refinación, se efectuaron los trabajos para acondicionar una zona destinada al acopio de desechos industriales, lo que requirió resolver diversos problemas, desde los de índole medioambiental, hasta los de carácter geotécnico, los cuales se abordan en este documento. Se presentan los principios básicos de diseño y análisis de las inclusiones rígidas, su método constructivo y las bondades que ofrecen en términos de disminución de asentamientos, aumento de la capacidad de carga, reducción de tiempos y costos de construcción, optimización en el diseño de cimentaciones, además de evitar la extracción de materiales producto de la perforación, los cuales tendrían que ser tratados para su disposición. Se describe también, el control de calidad llevado a cabo en el sitio para verificación del diseño, y se presentan los resultados de las pruebas de campo ejecutadas. Por último, se presentan algunas conclusiones importantes respecto a las ventajas en la utilización de este método en proyectos de gran envergadura, como son las relacionadas con el actual PCC DUBA.

**ABSTRACT:** This paper presents the information about the execution of the soil improvement solution implemented by means of soil-displacement rigid inclusions in the site of construction of new plants into the 'Francisco I. Madero' refinery. The new plants to be constructed are part of the project "PCC" (Fuel Quality Project) phase DUBA" (Ultra-Low Sulfur Diesel) developed in Ciudad Madero in Tamaulipas State. Due to the reduced available areas in the actual facilities of the refinery as it is one of the oldest refineries of the National Refinery System of Mexico, it was necessary to make some conditioning works in a zone that was used in the past for the disposal of the industrial spoil, so, several problems had to be solved from the environmental ones and going to the geotechnical ones, which are addressed in this paper. Some basic analysis and design principles for rigid inclusions are presented, its construction method and the advantages this system offers in terms of settlement reduction, bearing capacity increase, reduction of times of construction, optimization of the dimensions of the foundation and the elimination of the spoil produced during drilling and the consequent and necessary disposal of this spoil. The quality control carried out during the construction and the tests performed on site to verify design parameters is also described. Finally, some important conclusions about the advantages that this soil improvement method can provide to large projects such as current DUBA, are presented.

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Descripción general del Proyecto DUBA en la Refinería "Francisco I Madero"

Dentro de los planes de desarrollo y modernización de PEMEX, se incluye el Proyecto de Calidad de

Combustibles, el cual, acorde a la política ambiental del país, establece la producción de diésel ultra bajo azufre, mediante la construcción de diversas Plantas Hidrosulfuradoras dentro del Sistema Nacional de Refinación (SNR) de la República Mexicana y así dar cumplimiento con la Norma Oficial Mexicana NOM-086-

SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, que lo obliga a producir y suministrar diésel con un contenido máximo de azufre de 10 partes por millón (ppm). En una primera etapa se incluye la distribución de este diésel a las áreas metropolitanas de la Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey, y, en una segunda, al resto del país.

Con el objeto de cumplir con lo anterior y de forma particular en la refinería “Francisco I. Madero”, en Ciudad Madero, Tamaulipas, PEMEX ejecutó los trabajos del Acondicionamiento del Sitio en las áreas de la refinería donde se construyen las plantas nuevas, las cuales son: Hidrodesulfuradoras de Destilados Intermedios U-503 y U-504, Tratamiento de Aguas Amargas MT-5, Recuperadora de Azufre T-500 y sus Servicios Complementarios (Torre de Enfriamiento, Subestaciones Eléctricas y sus Cuartos de Control Satélite).

## 1.2 Principales problemáticas a vencer.

La refinería “Francisco I Madero” es la segunda refinería más antigua del SNR la cual data de 1914, por lo que la disponibilidad de áreas libres para la construcción de plantas nuevas es muy reducida.

Por lo anterior, se estudiaron diversas soluciones, encontrando como la más viable, la utilización de un área de aproximadamente 7 hectáreas, la cual contaba con los siguientes problemas a vencer:

- El área se encontraba saturada de materiales de desecho, toda vez que albergaba un antiguo Centro de Almacenamiento de Desechos Industriales (CADI) y una serie de Ex-Presas de asfalto, razón por la cual se encontraban en el área de materiales impactados por hidrocarburo, principalmente hidrocarburo intemperizado, y de residuos de hidrocarburo fracción pesada.
- Superficialmente la zona tenía una topografía totalmente errática debido a la forma en la que se habían depositado los materiales de desecho industrial, lo que se traducía en un desnivel de hasta 5 m de un extremo a otro, siendo el nivel +7.0 el más alto en la zona sur y el nivel +2.0 el más bajo en la zona norte. Esta erraticidad implicaba, por ende, una historia de cargas muy diferentes en el área, lo que conducía de forma indirecta a un perfil de preconsolidación diferente para cada una de las áreas del terreno en el cual se efectuarían los trabajos. (Ver figura 1),
- Con base en la información geotécnica obtenida de la campaña de exploración de estudios previos, se determinó la existencia de una unidad geotécnica con un espesor de 10 m de arcilla de alta compresibilidad y una resistencia variable, pero con un valor de

resistencia a la penetración estándar medio de 4 golpes, lo que representaba un gran reto para la solución de cimentaciones ya que, aún para descargas bajas, se tendrían asentamientos de gran magnitud, lo cual significaría tener que recurrir a cimentaciones profundas aún hasta para bases de equipos ligeros. Esto, evidentemente significaría, además de la complejidad técnica constructiva y plazos importantes de ejecución, un costo asociado también de importancia.

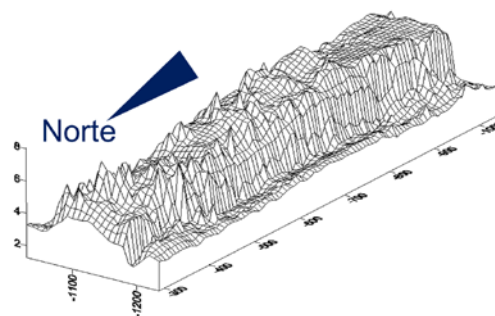


Figura 1. Configuración topografía inicial de las áreas del Ex-CADI y Ex -Presas de Asfalto en la refinería ‘Francisco I. Madero’ en Cd. Madero, Tamaulipas.

## 2 CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO

### 2.1 Topografía

Como se mencionó antes, la topografía del terreno previo a la ejecución de los trabajos de Acondicionamiento del Terreno era sumamente errática: en el área norte del sitio se encontraban residuos de hidrocarburo intemperizado e hidrocarburo fracción pesada, en la parte central, una gran cantidad de hidrocarburos fracción pesada y residuos de desechos industriales, mientras que en la parte sur, se alojaba propiamente el antiguo CADI, que contenía una área de desechos industriales mejor controlada. Por esto último, la zona sur tenía las mayores elevaciones topográficas y era la única que tenía una superficie relativamente plana.

Debido a la contaminación de terreno, se debió contar con el apoyo de especialistas en materia medioambiental, propiamente el área de la Subdirección de Auditoría en Seguridad Industrial y Protección Ambiental (SASIPA) de Pemex, con los que se trabajó de la mano a fin de vigilar las disposiciones correctas en términos medioambientales. Mediante una serie de evaluaciones y estudios entre los que se consideró la compensación de materiales de corte, las medidas de protección posterior al corte para vigilar el riesgo a la salud de los trabajadores que posteriormente trabajarían en la construcción de cimentaciones, el retiro

de materiales impactados por hidrocarburos, así como el menor costo para el proyecto de compensación de cortes y rellenos, se llegó a la conclusión de que la elevación para el corte de materiales, sería el nivel +2.5; es decir, en algunos casos, se debería efectuar cortes de hasta un máximo de 4.5 m.

## 2.2 Exploración geotécnica

Con base en la información del Estudio geotécnico del proyecto, (Ver Ref. 1) se determinó el modelo geotécnico de cada una de las áreas de las futuras plantas. De forma particular y para el caso del área del Ex-CADI, a continuación, se describe su perfil estratigráfico.

Superficialmente se encontró un Relleno (R) compuesto por arena arcillosa negra contaminada por hidrocarburos y escombros, resistencia a la penetración estándar con un valor medio del orden de 11 golpes y un contenido de agua del 17 %.

Unidad Geotécnica 1. Compuesta por una arena arcillosa gris oscuro moteada con café claro, contaminada con hidrocarburos, en algunas zonas presentó, arena bien graduada negra, con arcilla de baja plasticidad negra moteada con tonos grises, con resistencia a la penetración estándar con un valor medio del orden de 10 golpes y un contenido de agua medio del 17 %.

Unidad Geotécnica 2. Constituida de una arcilla de alta plasticidad gris moteada con café en tonos claros y oscuros, presentando en ciertas zonas, arena arcillosa gris oscuro con gravas aisladas y arena mal graduada negra. La resistencia a la penetración estándar con un valor medio de 4 golpes y un contenido de agua medio del 46 %.

Unidad Geotécnica 3a. Compuesta por arena arcillosa gris moteada con tonos claros y oscuros, en algunas zonas se detectó, arena mal graduada gris parduzco y arcilla de alta plasticidad verde olivo moteada con tonos claros y oscuros. Con valores medios de resistencia a la penetración estándar de 31 golpes y con contenido de agua del 19 %.

Unidad Geotécnica 3b. Constituida por arena arcillosa café, marmoleada con gris y amarillo con gravas aisladas, adicionalmente presentó arena mal graduada café amarillento en tonos claros y oscuros y arcilla de alta plasticidad café amarillento claro. Esta unidad presenta resistencia a la penetración estándar con un valor medio de 48 golpes y un contenido de agua de 15 %.

Unidad Geotécnica 4. Compuesta por arcilla de baja y alta plasticidad café, marmoleada con amarillo y gris, en algunos sitios con lentes de arena bien graduada café amarillento claro. Esta unidad presenta una resistencia a la penetración estándar con un valor medio del orden de 37 golpes y un contenido de agua medio de 19 %.

Unidad Geotécnica 5. En esta unidad se encontró arcilla de baja y alta plasticidad café, marmoleada con gris, amarillo y rojo; también se detectaron gravas mal graduadas de compacidad muy densa, con resistencia a la penetración estándar con un valor medio mayor a 50 golpes y un contenido de agua medio del 26 %.

Unidad Geotécnica 6. Compuesta de arcilla de alta plasticidad marmoleada con café verdoso, gris, café rojizo y café amarillento, con una resistencia a la penetración estándar con un valor medio de 28 golpes y contenido de agua de 31 %.

Unidad Geotécnica 7. Constituida por arcilla de alta plasticidad café y gris verdoso, marmoleada con tonos gris claro y amarillo. Esta unidad presentó una resistencia a la penetración estándar con un valor medio de 49 golpes y un contenido de agua medio de 14 %.

El Nivel de Aguas Freáticas (NAF) no se detectó de forma adecuada, ya que no se instalaron piezómetros expofeso para tal efecto en la primera etapa de estudios; sin embargo, de información reciente y determinada en etapas posteriores, se sabe que el nivel freático en esta zona se encuentra aproximadamente al nivel +1.35 en época de lluvias.

La figura 2 presenta de forma esquemática la estratigrafía generalizada en esta área del sitio de estudio.

## 2.3 Propuestas de mejoramiento del terreno.

La solución mediante columnas de desplazamiento o columnas de módulo controlado no fue la única opción estudiada para acondicionar el sitio; sin embargo, después de estudiar las alternativas que se tenía, se concluyó que la era la mejor solución para el proyecto. A continuación, se da una breve descripción de las soluciones estudiadas.

### Solución mediante Consolidación acelerada y Precarga

Se estudió una solución consistente en la consolidación previa del terreno mediante la instalación de drenes verticales prefabricados en el terreno y de una precarga hecha con material de relleno que aplicaran al terreno una presión vertical mayor a la que ejercerían las cargas de servicio del proyecto. Para ello, se consideraba realizar las siguientes actividades:

- a) Limpieza del área y desmonte,
- b) Despalme de al menos 20 cm,
- c) Conformación de la superficie de trabajo a la elevación +5.8, mediante la Compensación y retiro de materiales con hidrocarburos: a los cuales se tendría que dar un tratamiento especial, con objeto de emplearlos como rellenos, con el fin de evitar la utilización de materiales de banco.

- d) Instalación de drenes verticales prefabricados,
- e) Instalación de la instrumentación necesaria para verificar el progreso de los asentamientos y el fin del proceso de consolidación,
- f) Corte de Material a la elevación +2.2,
- g) Formación del terraplén hasta el Nivel Terminado de Terracerías, NTT+3.85.

De forma general esta metodología se descartó debido a que el tiempo que debía dejarse que actuara la precarga era un lapso de hasta 6 meses, considerando una malla de drenes de 1.5 m x 1.5 m. Debido a los programas propuestos para la ejecución de los proyectos, este tiempo resultaba excesivo, y representaba un retraso para la ejecución del proyecto, por lo que fue descartado.

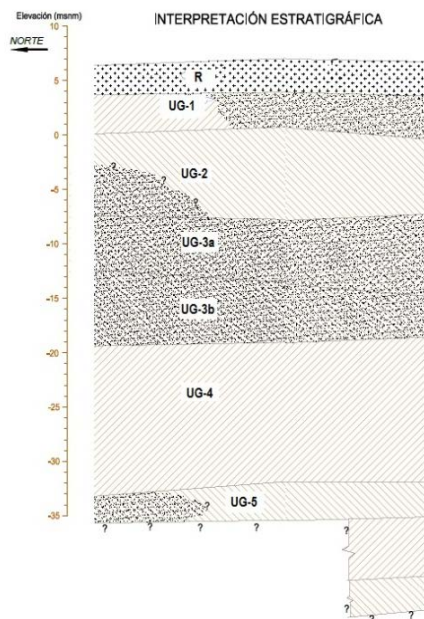


Figura 2. Estratigrafía general de zona de Plantas. Ref. 1.

#### Otras soluciones

Se revisaron otras propuestas de solución, entre ellas, columnas de grava y consolidación por vacío; sin embargo, debido a la dificultad de encontrar materiales granulares en la zona, a la estratigrafía errante, y, en todos los casos por los rendimientos propios de ejecución, estas soluciones también se descartaron.

Por lo anteriormente descrito, y siendo que los tiempos de ejecución eran limitados, se eligió como técnica de mejoramiento de suelos, la instalación de inclusiones rígidas construidas con la técnica de desplazamiento -columnas de desplazamiento-, las cuales se construyen con equipos que consiguen tener rendimientos industriales, por lo que se aseguraba una producción acorde a los programas de obra. Los trabajos se ejecutarían de tal

manera que se fueran liberando zonas específicas para continuar con los trabajos que venían después. Por otro lado, la técnica de desplazamientos de suelo aportaba la gran ventaja adicional de que, durante su construcción, prácticamente no se generaban desechos en la superficie. Esto, además de eliminar los costos de acarreo, se eliminaba también el tratamiento que eventualmente tendría que dársele a los suelos existentes en esta antigua zona de desechos.

### 3 DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA CON COLUMNAS DE DESPLAZAMIENTO

#### 3.1 Descripción del proyecto

Como se ha mencionado, debido a la poca disponibilidad de espacio dentro de la refinería, la zona elegida para ubicar estas nuevas plantas fue el predio que era ocupado por el Centro de Acopio de Desechos Industriales (CADI), predio localizado en la zona poniente del recinto, ver Figura 3. Con el fin de optimizar recursos y para realizar un tratamiento solo a los suelos que recibirían descargas superficiales importantes, y según la ubicación de las vialidades de circulación vehicular, se definieron 4 grandes zonas a mejorar que corresponderían a la posición que ocuparían los equipos y plantas del proyecto, ver Figura 4. En total se trataron 60,000 m<sup>2</sup>.

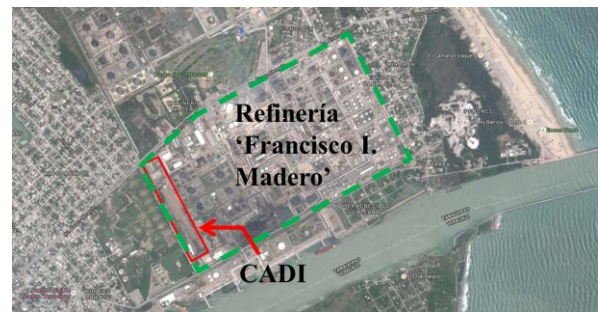


Figura 3. Ubicación del CADI dentro del recinto de la refinería 'Francisco I. Madero' en Cd. Madero, Tamaulipas.

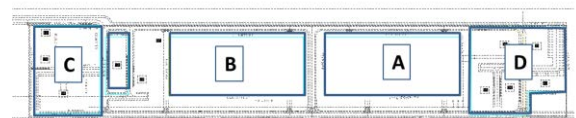


Figura 4. Zonas A, B, C y D definidas para el tratamiento.

Según las características del proyecto, la magnitud máxima de las descargas superficiales en condiciones de servicio fue establecida en 100 kPa.

Como se ha mencionado, el sistema de mejoramiento de suelos basado en la instalación en sitio de columnas rígidas de concreto construidas con la técnica de desplazamiento es la solución mejor adaptada considerando los puntos anteriormente descritos, pues posee las siguientes ventajas:

- Las inclusiones rígidas refuerzan el estrato arcilloso blando, convirtiéndolo en un suelo mejorado con una capacidad de carga mayor y lo hacen menos deformable.
- Se controlan los asentamientos totales y diferenciales de tal manera que se cumplen con los requerimientos de deformación de los equipos y plantas que conforman el proyecto.
- El método de construcción tipo ‘desplazamiento de suelos’ logra evitar la generación de desperdicios producto de la instalación de las inclusiones, por lo que se simplifican los procesos de manejo de residuos y se cumplen con los requerimientos medioambientales del proyecto.
- La alta eficiencia en la producción de los elementos de forma masiva (altos rendimientos industriales) hace el sistema apto para cumplir con el programa de construcción general y con los tiempos de entrega de las zonas tratadas.

### 3.2 Características de las inclusiones tipo desplazamiento de suelos

Las inclusiones rígidas tipo desplazamiento de suelos son elementos de concreto que son construidas in situ con un equipo que perfora el suelo mediante una hélice hueca llamada de *desplazamiento lateral*, debido a que, precisamente, a su paso, los suelos circundantes que penetra quedan desplazados y comprimidos lateralmente. Esto se logra utilizando equipos que aplican a la barrena un par rotor alto y una fuerza vertical descendente muy elevada. Con ello la técnica muestra ventajas importantes frente a otras similares ya que la construcción de los elementos se realiza de manera continua, sin producción de vibraciones y, además de que se realiza sin prácticamente generar desechos en la plataforma de trabajo, que en este proyecto era una condición prioritaria. En la Figura siguiente se muestran los pasos de construcción de una columna de desplazamiento:

- Inserción de la barrena en el sitio haciendo el desplazamiento lateral de los suelos a su alrededor,
- Colocación del concreto mediante bombeo al interior de la barrena al momento en que ésta se extrayendo del terreno,

- Cuando la barrena es extraída completamente del terreno y el concreto colocado hasta el nivel de plataforma, el elemento es finalizado.

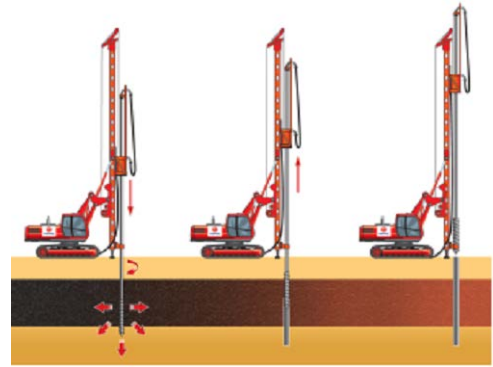


Figura 5. Construcción de inclusiones.

### 3.3 Descripción de la solución del mejoramiento de suelos mediante las inclusiones de desplazamiento.

Para la magnitud de carga superficial definida en 100 kPa fue necesaria la instalación, en arreglo *tres bolillo*, de inclusiones de 400 mm de diámetro, con 2.0 m de separación centro a centro, a 10 m de profundidad y con concreto de resistencia a la compresión simple a los 28 días de  $f'c=15$  MPa. El concreto se colocó hasta el nivel de plataforma de trabajo, misma que estaba compuesta de material granular de hasta 3" de espesor. Un relleno final compactado que alcanza el nivel final de la plataforma desde donde se construirán las cimentaciones de los equipos de las plantas, funcionará como la capa de repartición de cargas necesaria para completar el sistema de mejoramiento de suelos al nivel +3.85 m. Ver figuras 6 y 7.

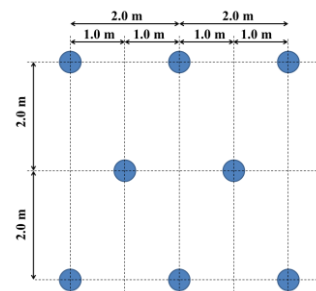


Figura 6. Arreglo a tres bolillo de inclusiones de desplazamiento

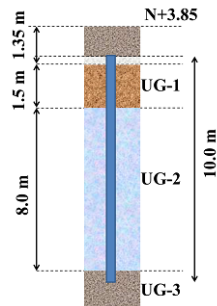


Figura 7. Corte general esquemático de la solución de mejoramiento de suelos blandos mediante inclusiones rígidas de desplazamiento.

### 3.4 Control de calidad en la ejecución

### 3.5 Registro de parámetros en tiempo real.

Con el fin de asegurar la calidad de la construcción del mejoramiento masivo de suelos, se llevó a cabo el registro en tiempo real de los parámetros de ejecución de todas y cada una de las inclusiones construidas. La instrumentación de la barrena y de los equipos de construcción permiten llevar a cabo el seguimiento de dichos parámetros en tiempo real por parte del operador, el cual tiene acceso a ellos directamente mediante un monitor instalado en su cabina, esto con el fin de tener certeza en que la calidad de las inclusiones sea la correcta. El mismo equipo almacena los datos obtenidos en una memoria digital para luego obtener los registros físicos impresos a través de un ordenador personal.

Dos grandes grupos de parámetros son medidos, verificados y registrados: los obtenidos durante la penetración de la barrena en el suelo y los obtenidos durante la colocación del concreto para formar la inclusión. Con los primeros es posible verificar que el tipo de terreno que se penetra corresponda sensiblemente a la estratigrafía esperada del sitio, según los reportes de mecánica de suelos; mientras que los segundos sirven para asegurar y verificar la calidad de construcción de la columna de concreto, obteniendo un perfil de la inclusión en toda la profundidad. En la figura siguiente se muestra un registro típico de ejecución.

Entre los parámetros de registro durante la penetración de la barrena se encuentran: Velocidad de rotación, par rotor, velocidad de penetración. Por otro lado, durante la colocación del concreto se registran, entre otros, la

velocidad de avance, la presión del concreto, el volumen del concreto, etc.

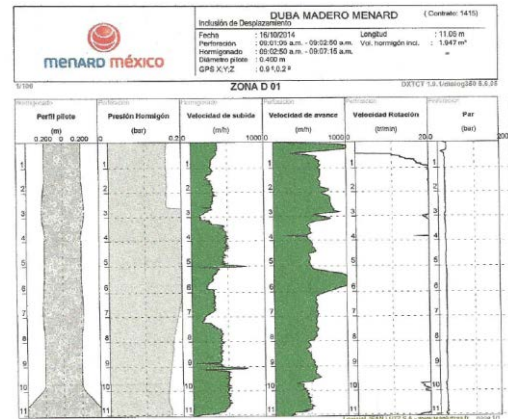


Figura 8. Registro de ejecución de una inclusión de desplazamiento de suelos.

### 3.6 Instrumentación de inclusiones y terraplén y ejecución de pruebas de placa.

Como parte de la verificación del correcto desempeño del sistema capa de reparto (terraplén)-inclusiones, se decidió ejecutar un programa de instrumentación el cual consistió en lo siguiente:

- Instalación de celdas de presión en la cabeza de las inclusiones,
- Instalación de celdas de presión horizontales en el fondo de la capa de reparto,
- Instalación de celdas de presión verticales en una zona intermedia entre las inclusiones y
- Ejecución de pruebas de placa a diferentes profundidades del terraplén.

Los 3 arreglos propuestos para la instrumentación de las cabezas de las inclusiones, se programaron con objeto de conocer con mayor amplitud cómo trabaja el sistema terraplén-inclusiones y determinar los incrementos de presión a los que se sometían las inclusiones cuándo a éstas se les aplica en primer lugar un incremento de carga debido a las pruebas de placa y en segundo lugar durante la etapa de construcción de cimentaciones e incluso durante la etapa de operación propiamente de la planta, para lo anterior, se escogieron diferentes lugares cercanos a la cimentación de futuras estructuras que podrían resolverse mediante cimentación profunda. En las figuras

9 a 911 se observan los diferentes arreglos tipo que fueron implementados.

Como se puede observar de dichas figuras, el objetivo principal fue lograr captar las variaciones de las presiones en el terraplén e inclusiones debido a las cargas que se aplicarán debido a las futuras cimentaciones.

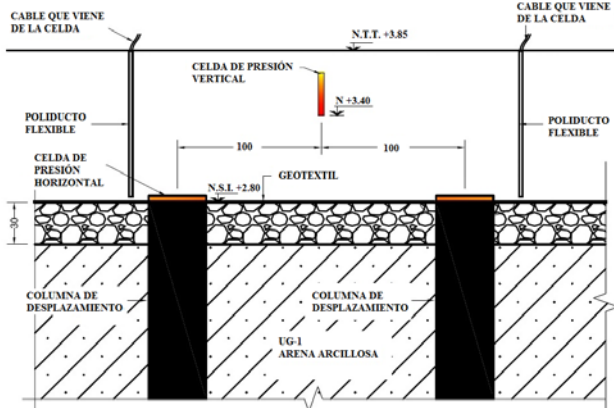


Figura 9. Arreglo Tipo 1. Celdas de presión en inclusiones y celda vertical intermedia.

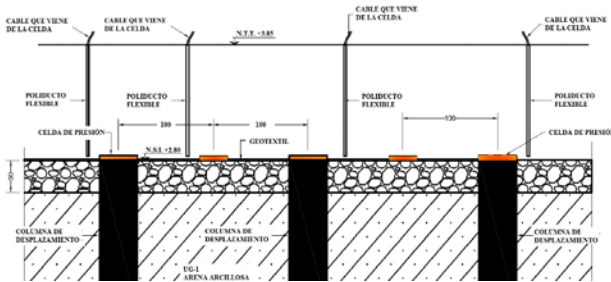


Figura 10. Arreglo Tipo 2. Celdas de presión en inclusiones y celdas horizontales intermedias. Arreglo de 5 celdas.

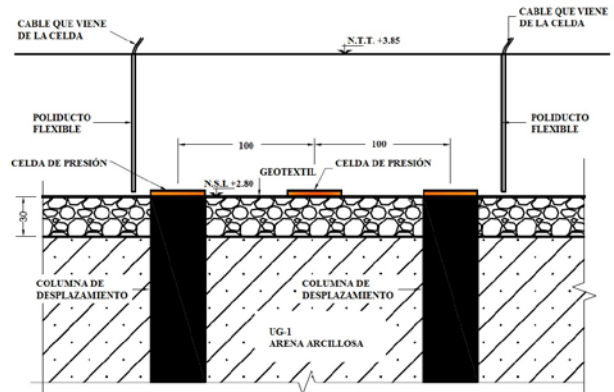


Figura 11. Arreglo Tipo 3. Celdas de presión en inclusiones y celdas horizontales intermedias. Arreglo de 3 celdas.

Por otra parte, se ejecutaron 10 pruebas de placa a fin de determinar los valores de capacidad de carga asociados al sistema terraplén-inclusiones. La profundidad de localización de las placas para la ejecución de dichas pruebas fue a nivel superficial, 0.2, 0.35 y 0.5 m, lo anterior con objeto de identificar la influencia debida a la profundidad propia del espesor del terraplén. En la figura 10 se observa la localización de las pruebas de placa ejecutadas.

Los resultados de la instrumentación y las pruebas de carga, se describen en el numeral 5, toda vez que dichos resultados se tomaron en consideración para determinar la verificación del diseño en sitio.

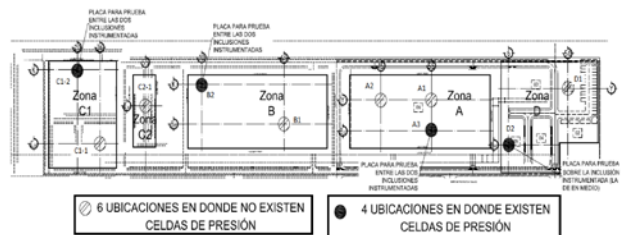


Figura 10. Arreglo Tipo 2. Celdas de presión en inclusiones y celdas horizontales intermedias. Arreglo de 5 celdas.

#### 4 DISEÑO

Se realizaron múltiples modelos analíticos para verificar la eficacia del sistema suelo - inclusión CMC propuesto. Parte fundamental del diseño del mejoramiento de suelo, consistió en definir el diámetro de las CMC, la separación que guardarán entre ellas y el arreglo en planta,

así como el espesor y características de la capa de repartición, y el tipo y dimensiones de la losa superficial.

En los párrafos siguientes se describe algunos de los modelos axisimétricos realizados para lograr estas definiciones y los resultados obtenidos.

#### 4.1 Modelos axisimétricos

Se generaron algunos modelos del tipo axial-simétrico con el fin representar el comportamiento de una CMC embebida en el suelo y poder definir el sistema de mejoramiento en condiciones óptimas. Así pues, en el eje de cada modelo se colocó la inclusión CMC de radio  $r=21\text{cm}$  y el suelo que lo circunda en un radio equivalente al área de influencia máxima teórica, y se colocaron también la capa de repartición en la cabeza de la inclusión, así como la losa de concreto. El suelo se modela con un comportamiento elastoplástico tipo Mohr-Coulomb y la CMC como elemento elástico lineal. Se consideraron como cargas, el peso de la losa de concreto de 30 cm de espesor en la parte superior -con comportamiento elástico lineal-, así como sobrecargas de servicio de hasta 100 kPa actuando en la superficie.

La figura siguiente muestra la geometría del modelo tipo.

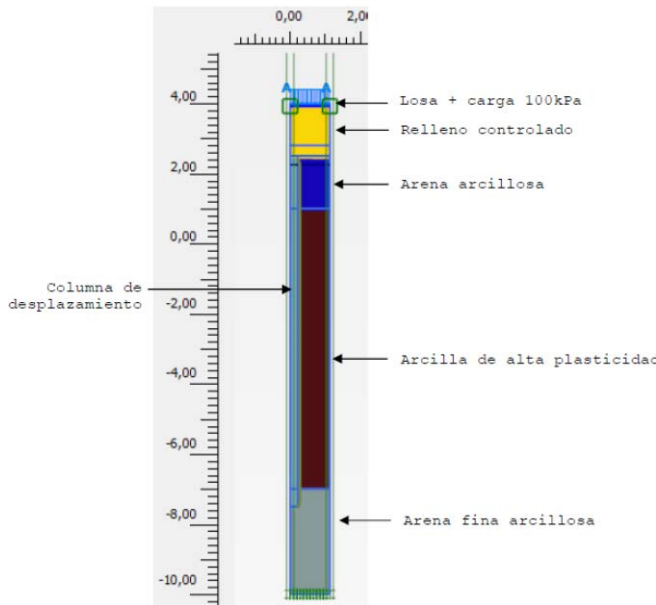


Figura 11. Modelo axi-simétrico de elementos finitos del sistema suelo-inclusión de desplazamiento tipo CMC.

#### 4.2 Resultados de los modelos

Con este tipo de modelos se verificaron entonces los asentamientos y esfuerzos ocurridos durante todas y cada una de las fases de construcción, y bajo las cargas de servicio actuantes sobre la losa. Se revisaron los arcos de descarga formados en la capa de repartición que lograban transportar la mayor parte de la carga superficial directamente hacia la cabeza de las inclusiones, al tiempo que se descargaba el suelo blando a tratar. En la figura siguiente se muestran los resultados de asentamientos bajo la carga de servicio: se observa la repartición uniforme de deformaciones bajo la losa, lo cual es una de las señales de que los asentamientos son uniformes en superficie.

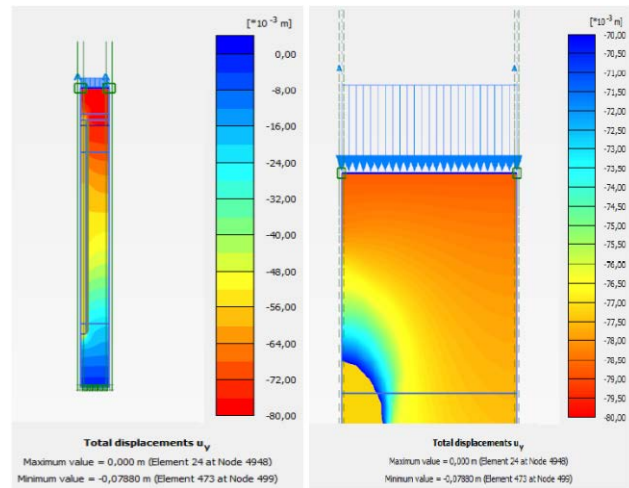


Figura 12. Distribución de deformaciones verticales en el sistema suelo-inclusión y detalle sobre la capa de repartición.

Algunos otros aspectos del diseño se verificaron, como son los esfuerzos en la capa de repartición, la fricción suelo-CMC, las presiones de poro, los esfuerzos en las columnas y suelos, entre otros.

### 5 PRUEBAS DE CAMPO

Parte importante de los alcances de los trabajos efectuados, fue la realización de pruebas de campo, los cuales tienen la intención de verificar el comportamiento real del sistema instalado en el sitio contra las hipótesis que se consideraron en el diseño, de tal manera que se pudiera validar la solución y poder tomar decisiones en cuanto a la cimentación de los equipos de la planta.

Se efectuaron entonces, algunas pruebas de placa, en posiciones estratégicas definidas con oportunidad,



colocando también elementos de instrumentación que refiriera datos de los esfuerzos ocurridos en las inclusiones y la capa de repartición, antes de proceder con los rellenos finales o la construcción de las cimentaciones de los equipos de la refinería.

Dentro de las 10 pruebas de placa efectuadas se obtuvieron presiones de contacto de hasta 294 kPa (30 t/m<sup>2</sup>), registrándose deformaciones limitadas menores a los 9.00 mm. En la Tabla 1 se presenta el resumen de los resultados principales, mientras que la Figura 13 muestra las curvas esfuerzo-deformación obtenidas en cada una de las pruebas.

Tabla 1. Tabla resumen de resultados de las Pruebas de Placa ejecutadas para el proyecto.

No. Prueba	Zona *	Prof. plac a (m)	Carga máx. (t)	Esfuerzo aplicado (t/m <sup>2</sup> )	Deformación máx. (mm)
1	C <sub>1-1</sub>	0.0	4	8	2.88
2	C <sub>2-1</sub>	0.0	5	10	2.73
3	C <sub>1-2</sub>	0.0	7.5	15	7.83
4	B <sub>1</sub>	0.5	7.5	15	8.31
5	B <sub>2</sub>	0.0	7.5	15	4.16
6	A <sub>2</sub>	0.0	7.5	15	3.98
7	A <sub>1</sub>	0.2	7.5	15	7.16
8	D <sub>1</sub>	0.35	7.5	15	8.85
9	A <sub>3</sub>	0.0	15	30	8.91
10	D <sub>2</sub>	0.0	15	30	8.29

\*El subíndice referido es solo la designación de la prueba, pudiendo haberse realizado en diferente orden cronológico., según el No. Prueba indicado

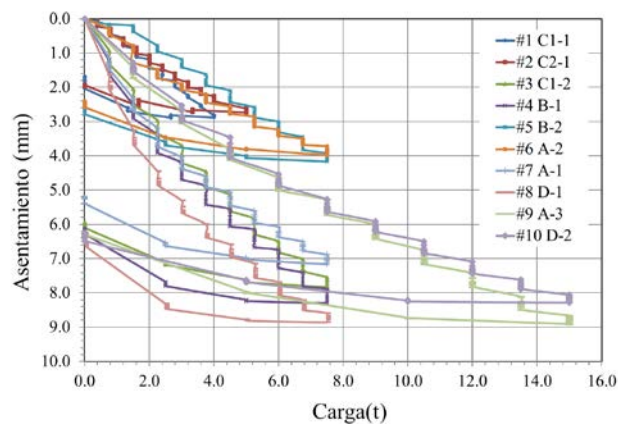


Figura 14. Curvas Esfuerzo-deformación de las 10 pruebas de placa efectuadas.

Las pruebas se realizaron colocando la placa a diferentes profundidades observándose que existe una clara influencia del espesor del terraplén en los resultados. Nótese por ejemplo la diferencia entre las pruebas A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, B<sub>1</sub> y B<sub>2</sub>, pues fueron realizadas colocando la placa a diferentes profundidades. Puede observarse claramente que las deformaciones ocurridas en la prueba B<sub>1</sub> son el doble de las producidas en la B<sub>2</sub>, y esto es solo consecuencia del espesor del terraplén que existía entre la placa y las cabezas de las inclusiones.

De los resultados presentados en la figura 13, también se observa que la programación de las cargas y su sistema de aplicación de carga, es de suma relevancia, puesto que, partiendo de la experiencia obtenida en las primeras pruebas, es posible realizar ajustes en campo en las subsiguientes de manera que las nuevas pruebas permitan obtener información más relevante o más específica.

Por otra parte, los registros de las celdas de presión en los sitios de prueba mostraron, efectivamente, los incrementos paulatinos de carga y en al menos uno de los casos de estudio pudo verificarse el fenómeno de arqueado. Un caso singular es el que se presenta en la prueba de carga D<sub>2</sub>, cuyo arreglo de celdas de presión puede observarse en la Figura 13. De acuerdo con la información obtenida de los registros de estas celdas, y que se muestran en la Figura 14, se observa que las celdas alojadas horizontalmente entre dos inclusiones, y en la interfaz de la capa de reparto y el terreno natural, prácticamente no se registra un incremento de carga, mientras que las celdas de presión instaladas en la cabeza de las inclusiones, sí se ve un incremento de presiones al aumentar la carga en la placa de carga superficial; esto es, para las tres celdas de carga instaladas en la cabeza de las inclusiones, las presiones máximas registradas en las celdas durante la prueba oscilan en valores que van desde los 10 kPa y los 15 kPa, lo cual representa apenas entre el 3.9% y el 5.1% del total de 294 kPa aplicados en superficie. Sin embargo, aun cuando el resultado parece lógico, la información obtenida no resulta concluyente para definir el efecto de arqueado. Esto se atribuye a que la ubicación que se dio a las placas de carga respecto a la ubicación de las celdas de carga, pudo haber repercutido en una distribución asimétrica de la carga. Se considera que es necesario seguir investigando respecto a este tema y aplicar diferentes arreglos para lograr una clara definición del arqueado; sin embargo, queda claro que el instalar celdas de presión para tal efecto es una excelente alternativa para verificar la transmisión de esfuerzos en el suelo y las inclusiones.

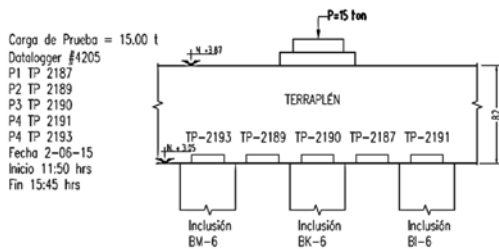


Figura 15. Arreglo de celdas de presión en el emplazamiento de la prueba de placa D<sub>2</sub>.

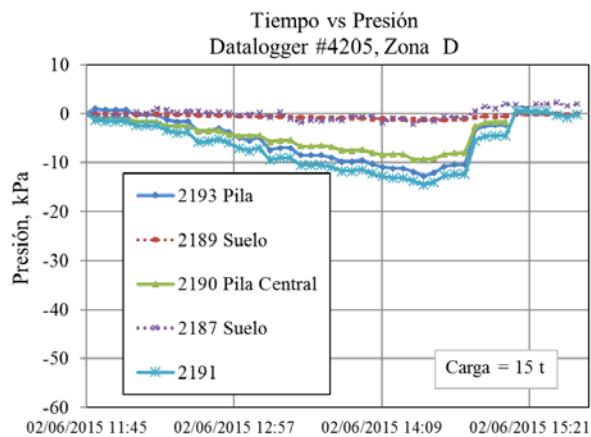


Figura 16. Gráfica Presiones versus tiempo obtenida a partir de los registros de las celdas de presión en el emplazamiento de la prueba de placa D<sub>2</sub>.

## 6 CONCLUSIONES

El mejoramiento de suelos mediante inclusiones rígidas de desplazamiento, resultaba una solución idónea ante el tipo de acondicionamiento requerido para la zona que anteriormente estaba destinada al acopio de desechos industriales y que contaba con condiciones geotécnicas muy poco favorables para la edificación de las futuras plantas PCC DUBA. Esta solución, que además de aumentar la capacidad de carga general de la zona, era compatible con la solución de los problemas de índole medioambiental, ya que la construcción de este tipo de inclusiones de desplazamiento, prácticamente no genera desechos en la plataforma de trabajo.

Con base en el diseño teórico del sistema de mejoramiento con inclusiones de 40 cm colocadas a 2.0 m de separación centro a centro, se llevó a cabo la construcción de inclusiones tipo Columnas de Módulo Controlado, CMC, de manera masiva, con rendimientos industriales, lo cual fue compatible con los plazos

estrictamente limitados del programa de construcción de PEMEX.

Finalmente, parte importante de los trabajos realizados en estos trabajos de acondicionamiento fue la verificación del diseño teórico mediante la realización de pruebas de campo, obteniéndose resultados favorables; no obstante, como lección aprendida se resalta que es de suma relevancia considerar un sistema de carga adecuado y que permita aplicar acciones correctivas según se vayan dando los resultados, en este caso particular, se reflexiona que quizá las pruebas pudieron llevarse a mayores niveles de carga. De igual forma, la geometría de la placa respecto a las dimensiones de cimentaciones reales y su relación ancho-profundidad de influencia, es un tema que queda abierto. Como parte de la ingeniería de detalle se llevaron a cabo algunos análisis que tomando como base la información de la referencia 10, consideró análisis y diseños que pronostican los asentamientos de cimentaciones reales y los cuales aún no han podido verificarse dado el estado actual del proyecto.

Respecto la instrumentación considerada para verificar de forma alterna las hipótesis de diseño, se considera que el contar con celdas de carga que permitan medir las distribuciones de presiones en la capa de repartición es de gran utilidad.

De los resultados mostrados en este trabajo se verifica que, a menor espesor en la capa de reparto, las deformaciones se incrementan, por lo que contar con un espesor adecuado de esta capa es de suma relevancia para el correcto desempeño del sistema inclusiones-terraplén.

Una conclusión interesante es que, para fines de verificación de ciertos efectos como el arqueado de cargas, conviene tener un arreglo de celdas de presión tales que se garantice una distribución de presiones simétrica, pero también, se concluye que será interesante explorar arreglos alternos a los presentados en este trabajo a fin de verificar cómo se presentan realmente las distribuciones de presiones en la capa de reparto y en la propia masa de suelo; de igual forma, se reitera que se considera que es necesario seguir investigando respecto a este tema y de acuerdo con los resultados se presume que el instalar celdas de presión para tal efecto puede ser una excelente alternativa para ahondar en el tema.

Dado el avance del proyecto no fue posible verificar de forma física cuál es el comportamiento del sistema inclusiones-terraplén ante cargas de una cimentación real y propia de un equipo del proyecto, como se mencionó, la ubicación de las celdas de presión fue tal que se permite tener mediciones ante tales acciones; sin embargo, al no haberse construido dichas cimentaciones, queda la posibilidad de reportar posteriormente los registros de tal evento.

Es de suma relevancia mencionar también, que se pudo ratificar que el sistema inclusiones-terraplén aumenta la capacidad de carga del terreno al tiempo que reduce las deformaciones de éste, lo cual permite tener cimentaciones superficiales y evitar, en muchos casos, la construcción de cimentaciones profundas, por lo cual se el sistema logró el objetivo de optimizar el proyecto. Por otro lado, entrando en el campo de la ingeniería de detalle del proyecto, debido a que este tipo de proyecto necesita de la instalación de sistemas enterrados, como son drenajes pluviales, drenajes aceitosos, ductos eléctricos, etc., una lección aprendida es que, si bien es cierto que el espesor del relleno que funciona como capa de repartición viene de un dimensionamiento del sistema de mejoramiento, a veces parar poder alojar las instalaciones mencionadas, deberá de preverse un espesor mayor.

## 7 REFERENCIAS

1. Campos, Hinojosa. (2011). “Estudio Geotécnico Informe 11-51-SGM/S”, Estudio elaborado para PEMEX, Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil, Comisión Federal de Electricidad, México D. F.
2. Ciri3n, Paul3n, Racinais, Glandy (2013) “Displacement rigid inclusions” 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris.,\_volume3
3. Ciri3n, Chatte, Racinais, Paulin (2012)., “Construcci3n de inclusiones r3gidas de desplazamiento tipo Columnas de M3dulo Controlado (CMC)”., XXVI Reuni3n Nacional de Mec3nica de Suelos e Ingenier3a Geot3cnica.
4. Auvinet, G. (2006). “Rigid inclusions in Mexico City soft soils: history and perspectives”, International Symposium “Rigid inclusions in difficult soft soil conditions”, Instituto de Ingenier3a, UNAM, Cd. de M3xico.
5. Combarieu, O. (1988). “Am3lioration des sols par inclusions rigides verticales – Application 3 l’3dification des remblais sur sols m3diocres”. Revue Fran3aise de G3otechnique N3 44, 5779.
6. ASIRI National Project (2012). “Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusion ground improvements”.
7. Cassan Maurice., Les essais in situ en m3canique des sols. 1. R3alisation et interpr3tation., Paris, Francia., 1988
8. Bureau Veritas. “Cahiers des charges CMC”.
9. Bureau Veritas. “Cahiers des charges Refsol”.
10. Monroy, Clavellina. (2015). “Reporte de Pruebas de Placa y Celdas de Presi3n”, Reporte elaborado para PEMEX, M3xico D. F.
11. ASTM D-1194-94 “Standard Test Method for Bearing Capacity of Soil for Static Load and Spread Footings”, USA, 1994.