

Cimentación de una planta industrial empleando dos técnicas de mejoramiento de suelos: Drenes Verticales Prefabricados (DVP) y Columnas de Módulo Controlado (CMC)

Foundation for an industrial facility using two soil improvement techniques: Prefabricated Vertical Drains (DVP) and Controlled Modulus Columns (CMC).

[Gabriel] [Lira] & [Juan Alfredo] [Carmona]

[Gerencia de ingeniería], [Mejoramiento de suelos Menard México], [México], [lira.gabriel@menard.com.mx]

RESUMEN: Para la construcción de una planta industrial, cuyo fin es el manejo y procesamiento de gas, es necesaria la colocación de un terraplén de relleno para la sobreelevación del nivel de plataforma final del proyecto para su protección contra inundación, lo anterior dada su ubicación dentro de la franja costera del estado de Veracruz, al oriente de México. El terraplén de relleno alcanzará poco más de 2.0 m de altura y dada la presencia de estratos de arcillas blandas de baja resistencia en el perfil del subsuelo, provocará asentamientos a largo plazo de magnitud importante. Referente a las estructuras, el proyecto contempla la construcción de múltiples elementos de proceso que transmitirán al terreno descargas de magnitudes y en geometrías variables, lo cual inducirá en la generación de asentamientos diferenciales. Para la mitigación, tanto de asentamientos diferenciales importantes a corto plazo, así como la generación de asentamientos residuales a largo plazo, que pongan en riesgo la operación de la instalación, se propuso la ejecución de dos técnicas de mejoramiento de suelo para el proyecto: la instalación de Drenes Verticales Prefabricados (DVP), los cuales acelerarán el desarrollo de los asentamientos por consolidación de los estratos arcillosos blandos atribuidos a la instalación del terraplén relleno, así como la instalación de Columnas de Módulo Controlado (CMC) debajo de las zapatas de cimentación de todas las estructuras que componen la infraestructura de la planta, para mitigar los asentamientos diferenciales a largo plazo derivado la variación de las descargas.

ABSTRACT: For the construction of an industrial plant, whose purpose is the handling and processing of gas, is required to realize a fill embankment to raise the final platform elevation of the project for protection against flooding, given its location in the coastal state of Veracruz, in the east of México. The fill embankment will reach just over 2.0 m high and due to presence of low-resistance soft clay strata in the subsoil profile, it will cause significant long-term settlement. Regarding the structures, the project contemplates the construction of different structural bodies that will transmit discharges of variable magnitudes and geometries to the ground, which would induce the generation of differential settlements. To mitigate both important differential settlements in the short-term, as well as generation of residual settlements in the long term, which put the operation of the facility at risk, the execution of two soil improvement techniques was proposed for the project: the installation of Prefabricated Vertical Drains (DVP), which will accelerate the development of settlements by consolidation process of the soft clay strata attributed to the installation of the fill embankment itself, as well as the execution of Controlled Modulus Columns (CMC) under the foundation footings of all the structures that make up the plant infrastructure, to mitigate long-term differential settlements consequent from irregular discharges.

KEYWORDS: Mejoramiento, suelos blandos, asentamiento residual, drenes verticales, inclusiones, mitigación.

1 INTRODUCCIÓN

El proyecto de referencia se trata de una planta industrial la cuál consta de diferentes instalaciones para el procesamiento y manejo de gas natural, entre ellas: compresores, enfriadores, bombas, chimeneas, racks de tuberías, etc. los cuales estarán distribuidos en una superficie sensiblemente rectangular. La instalación industrial se ubica al norte del estado de Veracruz, zona costera del Golfo de México. Ver Figura 1.

El perfil del subsuelo muestra la presencia de estratos de arcillas blandas de propiedades mecánicas bajas lo cual llevó a proponer la aplicación de un mejoramiento de suelos mediante la colocación de Drenes Verticales Prefabricados (DVP). Los DVP se insertaron en el terreno atravesando los estratos de arcilla blanda, lo anterior con el objetivo de acelerar la generación de

asentamientos por consolidación durante la etapa constructiva, así como los asentamientos totales, debidos al relleno mencionado. En complemento a los DVP, por debajo de las zapatas de cimentación de las estructuras se instalaron Columnas de Módulo Controlado (CMC) también conocidas como inclusiones, las cuales permitirán reducir los asentamientos provocados por las acciones verticales propias de los equipos y de su operación, además de aumentar la capacidad portante del suelo de cimentación, garantizando con ello la estabilidad global de la planta.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto ocupa un área de poco más de 60,000 m², y para su operación contará de cuatro compresores, los cuales son las



estructuras principales del proyecto que forma parte de los proyectos estratégicos del país. La planta la distribución de las estructuras principales proyectadas es la que se muestra en la Figura 2.
 Figura 1. Ubicación de la planta industrial, al norte de Veracruz.

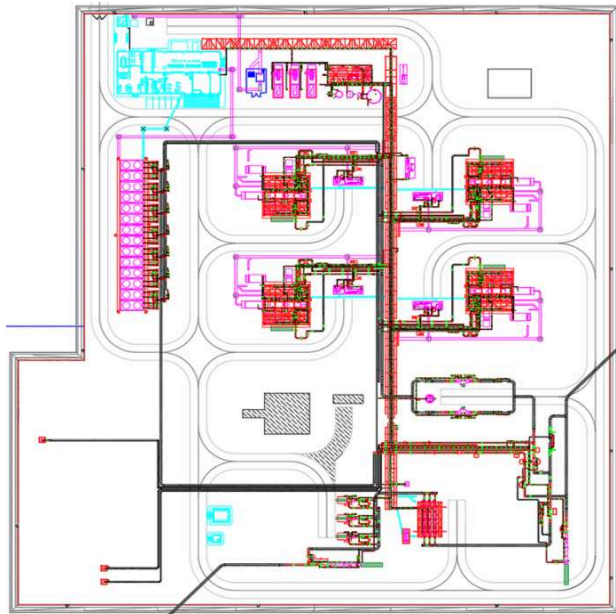


Figura 2. Distribución de estructuras dentro de la planta industrial.

Debido a que la zona donde se localiza el proyecto es potencialmente inundable, se determinó la necesidad de instalar un terraplén de relleno de poco más de 2.0 m de altura. El objetivo es garantizar la operación de la instalación estratégica aún bajo condición hidrometeorológicas adversas.

3 EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

De la información geotécnica, (Ref. 4), la campaña de exploración consistió en la ejecución de los siguientes trabajos y los cuales se ilustran en la Figura 3.

- Siete sondeos de piezocono “CPTu” (CPTu-1 a 7) a una profundidad de 7.5 m

- Cinco sondeos de penetración estándar “SPT” (B-01 a 05) a una profundidad de 50 m
- Dos tubos de observación (TO-1 y TO-2)
- Ocho pozos a cielo abierto

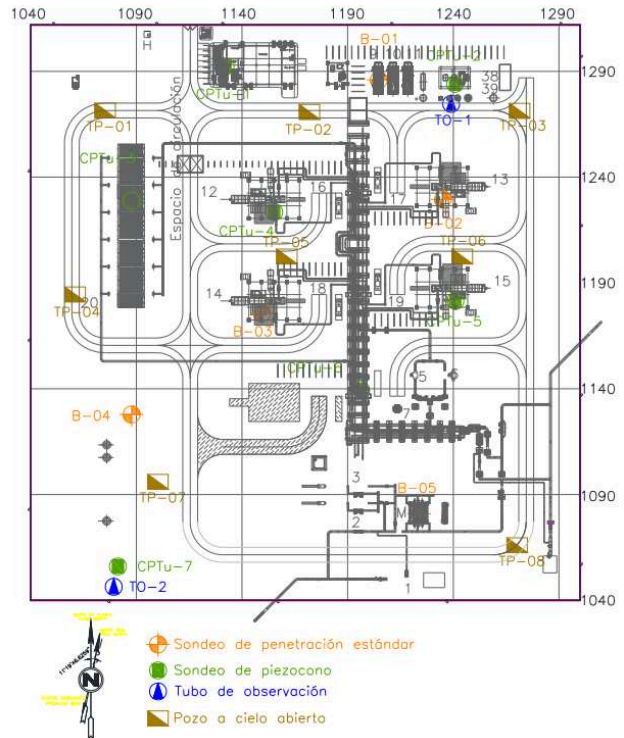


Figura 3. Trabajos de exploración realizados para el proyecto.

Adicionalmente a los trabajos antes mencionados se ejecutaron 16 pruebas con piezómetro de Menard y 5 ensayos de permeabilidad tipo Lefranc.

3.1 Modelo geotécnico

A partir de los trabajos de exploración y de las propiedades geomecánicas obtenidas del estudio, se determinó un modelo geotécnico de diseño para todo el proyecto, tanto para los análisis de asentamientos como de capacidad de carga del suelo mejorado con las columnas (CMC). Ver Tabla 1.

Tabla 1. Modelo geotécnico de diseño.

Unidad	Descripción	H_e m	γ kN/m ³	E_{oed} MPa	E_s MPa	c kPa	ϕ °
U1	Arcilla blanda	0.0 – 2.5	16.0	4.0	2.7	20	0
U2	Arcilla blanda	2.5 – 5.0	16.5	8.0	6.2	45	0
U3	Limo arenoso	5.0 – 6.0	17.0	31.0	22.9	45	23
U4	Arena limosa	6.0 – 7.0	17.5	55.0	40.8	33	35
U5	Arena con limo compacta	7.0 - i_2 ?	18.0	75.0	57.3	60	32

Donde: H_e = Profundidad del estrato; γ = Peso volumétrico; E_{oed} = Módulo odométrico; E_s = Módulo de deformación; c = Cohesión del material; y ϕ = ángulo de fricción interna.

El nivel de aguas freáticas (NAF) fue identificado a 2.0 m de profundidad y los valores de permeabilidad asignados para las unidades geotécnicas, son los siguientes: 1.43×10^{-9} m/s para las

unidades U1 y U2, 2.7×10^{-8} m/s para las unidades U3 y U4, y 3.3×10^{-7} m/s para la unidad U5.

Del modelo geotécnico se destaca las propiedades geomecánicas bajas de las unidades U1 y U2, predominantemente materiales finos (arcillas blandas). Dichos estratos presentarán los asentamientos de mayor magnitud, no solo al aplicar las cargas de servicio sino por el propio peso del relleno del predio. De ahí que se determinó la realización de un mejoramiento de suelos que permita acelerar el proceso de consolidación y transferir las cargas a estratos de características geomecánicas favorables (CMC) y así, reducir los asentamientos durante la vida útil del proyecto además de incrementar la capacidad de carga de la cimentación.

Para ello, la solución óptima es un mejoramiento de suelos

combinado por una instalación masiva de Drenes Verticales Prefabricados en toda la superficie más la ejecución de Columnas de Módulo Controlado, puntualmente bajo las estructuras.

4 SOLUCIÓN DE MEJORAMIENTO

4.1 Drenes verticales prefabricados

El sistema de DVP tiene como función acelerar la consolidación de los suelos finos blandos, lo cual permite preparar al terreno para mitigar asentamientos residuales importantes a largo plazo. Lo anterior bajo el principio de disipación de las presiones intersticiales del terreno al insertar múltiples elementos en el suelo que faciliten el flujo de agua de forma horizontal (radial).

La instalación de los DVP se realiza con un equipo especial que monta un mástil dentado, el cual hinca estáticamente en el suelo cada dren también conocido como mecha drenante, a través de un tubo metálico o "casing". Cuando el DVP o mecha ha sido colocada hasta la profundidad requerida, se extrae el "casing" dejando el dren anclado al suelo mediante una placa de acero colocada en su base. Una vez que el tubo ha sido completamente extraído del suelo, el DVP se corta unos 20 cm por encima de la plataforma de trabajo, ver Figura 4. Al concluir la instalación masiva de los DVP, se colocan los rellenos o terraplenes finales o si fuera el caso de prearga.

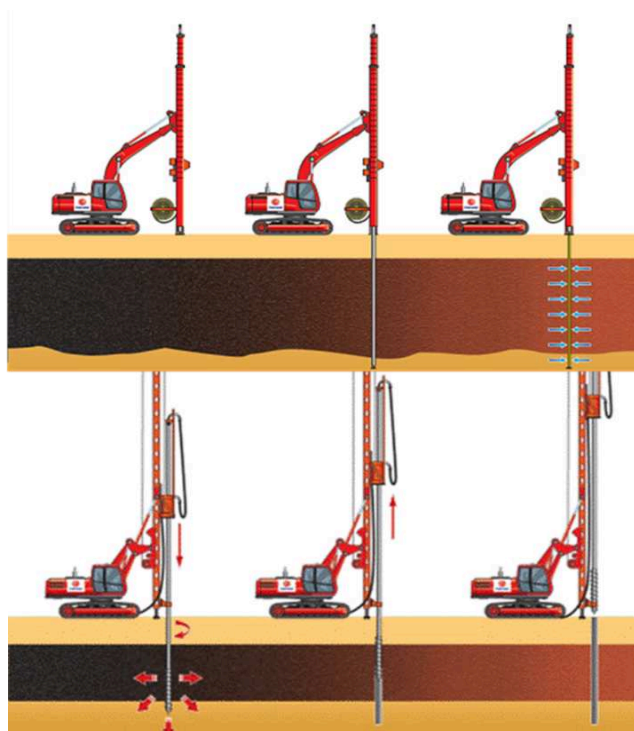


Figura 4. Secuencia de ejecución de la técnica de drenes verticales prefabricados.

4.2 Columnas de módulo controlado (CMC)

Las CMC reforzarán el terreno circundante para mejorar el comportamiento global del suelo, rigidizándolo y con ello incrementando su capacidad de carga y disminuyendo también las deformaciones.

Su ejecución se realiza mediante el uso de una barrena de desplazamiento, para este caso de un diámetro de 320 mm, la cual se introduce en la masa de suelo y hasta la profundidad de diseño mediante la aplicación simultánea de una fuerza de empuje de alta presión "pull-down" y de un par de rotación.

Una vez alcanzada la profundidad de diseño, se incorpora mediante bombeo, el mortero o concreto por la punta de la herramienta, según se asciende y con una presión controlada; de esta manera se crea una inclusión continua de diámetro constante. El bombeo de mortero o concreto se detiene durante el ascenso de la herramienta a una profundidad correspondiente a la sección superior de la zona de interfaz o zona de contacto, o bien se asciende hasta la plataforma de trabajo, según sea necesario. Ver Figura 5.

La máquina perforadora está equipada con un sistema de monitoreo de los parámetros de ejecución en tiempo real. Se obtienen de forma continua los parámetros de: fuerza aplicada, par de rotación, velocidades de rotación de la herramienta durante la penetración y el colado.

Figura 5. Secuencia constructiva de las CMC.

4.3 Capa de transferencia o reparto

En el caso de las CMC, debe colocarse una capa superior de material granular por encima de éstas, al menos de 20 cm de espesor, misma que servirá como capa de transferencia o de

repartición de cargas entre el material de mayor rigidez, que en este caso son las CMC y el suelo, así como para no generar un contacto directo entre la cimentación y las inclusiones ya que ello podría generar una transmisión de elementos mecánicos entre los elementos; cabe señalar que para este caso no se requiere un espesor mayor debido a que la falla por punzonamiento no se desarrollará dada la rigidez de la zapata de cimentación al conformarse de concreto reforzado.

Instalada la capa de reparto o "LTP" por sus siglas en inglés, se instalará la cimentación superficial. La capa de repartición será de un material de banco que pueda ser compactado, preferentemente con las características de un material de una base. No se permite el uso de materiales orgánicos (O), ni turba (Pt), ni arcilla (C), ni materiales producto de despalme.

4.4 Propuesta de mejoramiento para el proyecto

Del análisis de la información del proyecto se establecen como soluciones: Drenes Verticales Prefabricados (DVP) y precarga, así como Columnas de Modulo Controlado (CMC). Estas técnicas fueron realizadas según las etapas de construcción siguientes:

- Despalme de 40 cm de espesor a partir del nivel de terreno natural (por otros)
- Construcción de plataforma de trabajo, al menos 40 cm de espesor, para los equipos de DVP (por otros)
- Instalación de DVP
- Construcción del relleno (por otros)
- Instalación de las CMC bajo la ubicación de zapatas
- Excavación en las huellas de las zapatas hasta su nivel de desplante y colocación de la LTP (por otros)
- Construcción de las zapatas (por otros)

Es importante mencionar que, tanto el terraplén como el mejoramiento con drenes, se extendieron por fuera de la huella del proyecto en una franja perimetral de 5 m de ancho, con la intención de proteger la zona limítrofe de la planta, y en específico el muro perimetral, ante la consolidación de los estratos arcillosos en la transición del área de mejoramiento y el suelo sin mejorar, así como ante los cambios de las presiones intersticiales en la masa de suelo, dado que se sabe que el área es potencialmente inundable y con variación importante del nivel freático.

El espaciamiento de los drenes verticales se determinó en una malla regular cuadrada de 1.5 x 1.5 m y a una profundidad de 6.0 m con respecto al nivel de plataforma de trabajo (nivel similar al terreno natural).

Referente a las CMC, éstas tuvieron una profundidad de desplante promedio de 6.5 m desde el nivel de terreno natural, considerando 50 cm de empotramiento en la unidad estratigráfica U4, justo debajo de las arcillas blandas, (ver Tabla 1). El descabece necesario de cada CMC o grupo de éstas, fue definido en función del nivel de desplante de las zapatas de cimentación y determinado por el proyecto estructural.

Las CMC se realizarán con concreto tipo MENARD de resistencia a la compresión simple a los 28 días de 15 MPa y con un revenimiento de 18-22 cm.

5 ANÁLISIS Y DISEÑO DEL MEJORAMIENTO

5.1 Diseño del sistema de drenes verticales prefabricados

El diseño del sistema de consolidación acelerado con Drenes Verticales fue calculado empleando las propiedades de permeabilidad del suelo, así como la malla y longitud mencionados en el apartado anterior.

Inicialmente se consideró un coeficiente de consolidación vertical, C_v , de la arcilla blanda de $1.46 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y un coeficiente de consolidación horizontal del orden de tres veces el valor vertical, este valor fue obtenido a partir de la siguiente ecuación:

$$C_v = \frac{k_v}{m_v \cdot \gamma_w} \quad (1)$$

Donde: k_v = coeficiente de permeabilidad vertical; m_v = coeficiente de compresibilidad volumétrica; y γ_w = peso volumétrico del agua.

El cálculo del grado de consolidación se hace a partir de la expresión siguiente:

$$(1-U) = (1-U_v) (1-U_r) \quad (2)$$

Donde: U =grado de consolidación total; U_v =grado de consolidación vertical; y U_r = grado de consolidación radial.

DATA input			
Soil parameters	Value	Unit	Definitions
Vertical consolidation coefficient	C_v 1.5E-07	m ² /s	$F(n) = \frac{n^2}{n^2-1} \ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2}$, et $n = \frac{D}{d}$
Radial consolidation coefficient	C_r 4.5E-07	m ² /s	
Drained sides (1 ou 2)	1		$T_v = \frac{C_v \times t}{H_{dr}^2}$
Drained thickness	h 5	m	
Vertical drains parameters			
	Value	Unit	
Mesh	L 1.5	m	$U_v = \left(1 + \frac{1}{2T_v} \right)^{-\frac{1}{6}}$
Triangular (1.05); Squared (1.13)	1.13		
PVD diameter	d 0.06	m	$U_r = 1 - e^{\left(\frac{-8C_r \times t}{D^2 F(n)} \right)}$

Tal expresión toma en consideración la consolidación radial debida a la malla de drenes verticales instalado en el sitio más la consolidación vertical, como un problema tridimensional. El cálculo analítico de la consolidación con DVP se obtuvo empleando los datos y expresiones mostradas en la Figura 6. (Carrillo, Nabor 1942)

Donde: T_v = factor tiempo; T = tiempo; H_d = espesor efectivo del suelo; C_r = coeficiente de consolidación radial; D = diámetro de influencia equivalente; y d = diámetro vertical del dren.

En la Figura 7 se muestra el tiempo en días para alcanzar el 95 % de consolidación con DVP y sin drenes. El tiempo para alcanzar dicho grado de consolidación pasa de más de 2 años a tan sólo 3 meses, notándose el gran beneficio de la instalación de los DVP. En la Figura 8 se muestra la gráfica de tiempo vs grado de consolidación sin mejoramiento de suelos y con DVP.

Figura 6. Datos de entrada y expresiones para el cálculo de consolidación con DVP.

Figura 7. Tiempo necesario para alcanzar 95% de consolidación total.

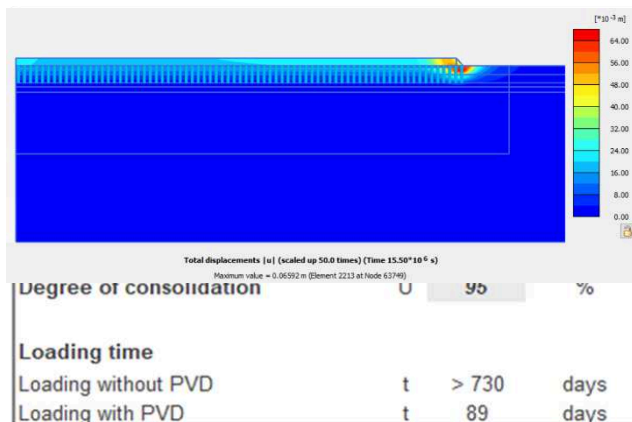
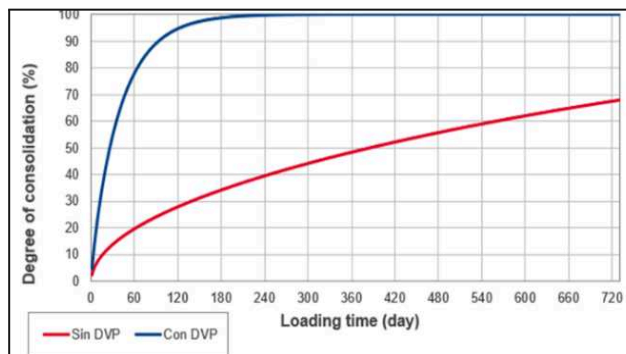


Figura 9. Desplazamientos totales (asentamientos) transcurridos seis meses de construido el terraplén.

Figura 8. Gráfica tiempo vs grado de consolidación.



Otra metodología para estimar los datos de consolidación y confirmar los valores obtenidos con el cálculo analítico, es mediante un análisis de elemento finito, para ello, se realizó un análisis con el programa comercial Plaxis 2D, empleando el modelo geotécnico de la Tabla 1 y las propiedades drenantes del suelo definidas. Se usó el elemento tipo “well” o dren, dentro del modelo geométrico, actuando como un reductor de las presiones intersticiales en todos los nodos del elemento simulando el efecto de los DVP.

A continuación, se describen las etapas constructivas analizadas en el programa, en la Figura 9 se presenta el resultado del análisis de elementos finitos de la etapa final del cálculo y en la tabla 2 se presenta la comparativa de resultados con el cálculo analítico y con análisis de Plaxis 2D, para el terraplén de 2.2 m de altura.

- Despalme de 40 cm de espesor del terreno
- Conformación de plataforma de trabajo $e = 40$ cm espesor
- Hincado de los DVP a una profundidad de 6.0 m
- Conformación de terraplén de 2.2 m de altura y asentamiento al primer mes
- Asentamiento transcurridos dos meses
- Asentamiento transcurridos tres meses
- Asentamiento transcurridos seis meses

Tabla 2. Comparativa de asentamientos y grado de consolidación debidos al terraplén de 2.2m de altura

Mes	Cálculo analítico		Análisis elemento finito	
	Consolidación U%	Asentamiento cm	Consolidación U%	Asentamiento cm
1	67	4.6	63	4.2
2	88	6.0	83	5.5
3	95	6.5	92	6.1
6	99	6.8	99	6.6

6 DIMENSIONAMIENTO DE LAS CMC

6.1 Hipótesis de trabajo de las CMC

Para el diseño del mejoramiento con CMC se asume que las cargas de la estructura se reparten entre el suelo y las CMC según los mecanismos siguientes:

- Por difusión de los esfuerzos a través de la LTP en el caso de losas (efecto arco), y por la transmisión directa de las cargas al suelo y columnas bajo zapatas.
- Mediante la transferencia de cargas entre el suelo y las columnas, bajo el efecto de los desplazamientos relativos debido a su diferente acortamiento.
- La capacidad de carga de las CMC está limitada por el efecto del asentamiento en la capa de apoyo del pie de la columna y por el efecto de la penetración de la CMC en la capa de transferencia (eventual comportamiento elasto-plástico en el contacto de las columnas en el

nivel de empotramiento y el contacto capa de transferencia-CMC, respectivamente). Se considera que, gracias a la "LTP", no se transmite ninguna sollicitación horizontal o momento hacia la sección inferior rígida, dado que no hay conexión estructural de los elementos. El coeficiente de fricción entre la plantilla de concreto y la capa de transferencia de carga es el que se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\mu = \tan \left(\frac{2}{3} \varphi \right) = 0.47 \quad (3)$$

Donde: μ = coeficiente de fricción; y φ = ángulo de fricción interna de la capa de transferencia igual a 38° .

6.2 Proceso de dimensionamiento de las CMC

Debido a que el mejoramiento de suelo mediante CMC será sólo debajo de las cimentaciones, se realiza el cálculo del modelo "suelo mejorado - zapata", para un número definido de elementos CMC y una zapata de dimensiones definidas, en donde la carga puntual (V_d) es distribuida a la cimentación superficial y ésta, a través de la capa de transferencia distribuye la mayoría del esfuerzo a los elementos rígidos o CMC por efecto de arco y la carga restante es tomada por el suelo (Q_{soil}).

La distribución de cargas se obtiene relacionando las deformaciones globales de todos los elementos hasta encontrar un punto de convergencia entre todos (compatibilidad de deformaciones). Mediante este cálculo iterativo se encuentran los asentamientos superficiales, las deformaciones del suelo y de las columnas, así como, la distribución de fuerzas de fricción positiva y negativa en toda la longitud de las columnas, además de la carga en la punta. Ver Figura 10.

6.3 Capacidad de carga del suelo mejorado con CMC

La capacidad de carga admisible del suelo sin mejoramiento, Q_{adm} , en este proyecto ronda entre 63 a 84 kPa, en función de la geometría y profundidad de desplante de la cimentación, dicha capacidad se estima con la siguiente expresión. (Menard L. 1975)

$$Q_{adm} = k_p P_{le} / FS \quad (4)$$

Donde: k_p = factor de capacidad de carga; P_{le} = Presión límite promedio del terreno ($P_{le} = N_{SPT} / F_{pl}$); coeficiente de fricción; FS = factor de seguridad, igual a 3; N_{SPT} = número de golpes de la prueba de penetración estándar; y F_{pl} = factor que depende del tipo de terreno.

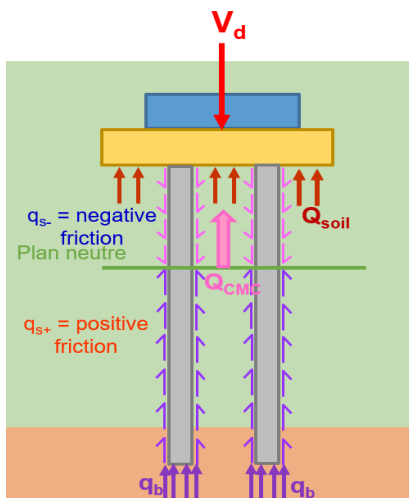


Figura 10. Mecanismo de transferencia de carga de un sistema de cimentación-suelo mejorado CMC

Para el terreno mejorado se tiene, además de la capacidad portante del suelo, la aportación de las CMC que, al estar embebidas en el terreno, adicionan su capacidad de carga por punta y fricción (tanto fricción positiva como la negativa), de acuerdo con las expresiones siguientes:

Capacidad por punta de CMC, q_b , se estima mediante la ecuación siguiente:

$$q_b = k_p P_{le} \quad (5)$$

Donde: k_p = factor de capacidad de carga igual a 1.65

Capacidad por fricción positiva de CMC, q_s , que se estimará mediante la ecuación 6.

$$q_{sCMC} = N_{SPT} \quad (6)$$

De igual modo, se estima también la fricción negativa, q_{sn} , que existe en la CMC por efecto de su comportamiento dentro de la masa de suelo, mediante la ecuación 7.

$$q_{snCMC} = \sigma'(z) K \tan \delta \quad (7)$$

Donde: $\sigma'(z)$ = esfuerzo efectivo a la profundidad considerada; y $K \tan \delta$ = factor de fricción negativa que depende del tipo de suelo (O. Combarieu) valor que oscila entre 0.15 a 1.0 para arcillas blandas y arenas densas, respectivamente.

La carga que es capaz de tomar cada CMC, q_{CMC} , se calcula como la suma de las fricciones (positiva y negativa) y la punta, a través de la siguiente ecuación:

$$q_{CMC} = A_{punta} (q_{bCMC}) + A_{fuste} (q_{sCMC} - q_{snCMC}) \quad (8)$$

Donde: A_{punta} = área de punta; A_{fuste} = área del fuste

Para obtener la capacidad de carga admisible que toma cada CMC, $q_{CMC-adm}$, se emplea la ecuación 9.

$$q_{CMC-adm} = q_{CMC} / FS \quad (9)$$

Finalmente, para obtener la capacidad de carga total, Q_{Eadm} , se deberá sumar la capacidad de carga del suelo más la carga de las CMC, de acuerdo con la ecuación indicada a continuación:

$$Q_{Eadm} = Q_{adm} + q_{CMC-adm} \quad (10)$$

Los factores de seguridad para la determinación de la capacidad de carga admisible estática y pseudo-estática se emplearon los valores de 3 y 2, respectivamente.

6.4 Capacidad de carga, asentamientos y módulos de reacción

Como se mencionó inicialmente las geometrías de las cimentaciones y magnitud de las descargas de las estructuras que conforman la planta industrial presentan una amplia variabilidad, de lo anterior se realizaron análisis paramétricos de la capacidad de carga, estimación de asentamientos y módulos de reacción.

En la Tabla 3, se muestra la capacidad de carga para anchos de zapata de 2.0 a 8.0 m de geometría cuadrada ($B/L=1$) y para un nivel de desplante $D_f=0.5$ m, a manera de ejemplo; no obstante, es importante mencionar que la capacidad de carga se estimó variando los niveles de desplante de 0.5 a 2.0 m a intervalos de cada 0.5 m y también para relaciones ancho-largo, $B/L=1.5$ y

zapatas corridas obteniendo un total de 84 valores de capacidad de carga.

Tabla 3. Capacidad de carga zapatas cuadradas Df=0.5m

B/L=1 m	A m ²	CMC piezas	Q _{Eadm} kPa	q _{Eadm} kN	Q _{s adm} kPa	q _{s adm} kN
2.0	4.0	2	198	793	297	1190
3.0	9.0	4	183	1651	275	2247
4.0	16.0	6	164	2621	246	3932
5.0	25.0	9	158	3955	237	5933
6.0	36.0	9	130	4697	196	7046
7.0	49.0	16	148	7265	222	10897
8.0	64.0	16	129	8241	193	12361

Donde: A= área de la zapata o cimiento, Q_{Eadm}= capacidad de carga admisible estática; q_{Eadm}= carga admisible estática; Q_{s adm}= capacidad de carga admisible psuedo-estática; q_{s adm}= carga admisible pseudo-estática.

Referente a los asentamientos se realizaron las gráficas asentamientos versus ancho de zapata, para relaciones B/L=1, B/L=1.5 y zapatas corridas, niveles de desplante a 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 m, así como para presiones de contacto de 20, 40, 60 y 80 kPa. En la figura 11 se muestra los asentamientos para cimentaciones con relación B/L=1 y nivel de desplante a 0.5 m.

Para el modelado estructural o modelo matemático de la planta industrial, un dato relevante es el módulo de reacción vertical, K_v, el cual representa la condición de apoyo de cada una de éstas para el análisis, es por ello por lo que se definió para cada relación B/L antes mencionadas y niveles de desplante indicados los módulos de reacción correspondientes. En la tabla 4, se presentan los módulos de reacción para las condiciones indicadas.

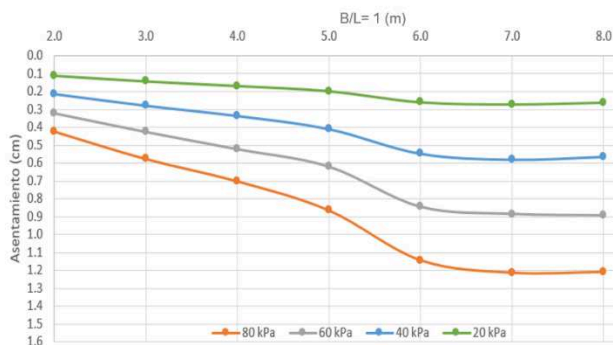


Figura 11. Gráfica de asentamiento versus ancho de cimentación.

Tabla 4. Módulos de reacción vertical, K_v, para zapatas con relación B/L=1 y Df=0.5m.

B/L=1 m	A m ²	K _v (kPa/m)			
		20 kPa	40 kPa	60 kPa	80 kPa
2.0	4.0	17945	18682	18750	18923
3.0	9.0	13962	14317	14119	13867
4.0	16.0	11821	11884	11501	11393
5.0	25.0	10094	9760	9683	9248
6.0	36.0	7648	7310	7105	6991
7.0	49.0	7346	6887	6780	6587
8.0	64.0	7625	7083	6720	6612

Finalmente es importante mencionar que existieron casos particulares dentro del proyecto que obligaron a realizar un análisis individualizado para la definición de la capacidad de carga, asentamientos y módulo de reacción respectivos.

7 CONCLUSIONES

Para la construcción de la planta industrial de referencia y debido a que el sitio es potencialmente inundable, se requiere la colocación de un terraplén de sobreelevación de 2.2 m de espesor que servirá como plataforma final del proyecto; asimismo derivado de la variación de geometrías de equipos y magnitudes de cargas que transmitirán al suelo de cimentación, se determina que la solución óptima para la cimentación del proyecto es empleando un mejoramiento de suelos masivo mediante las técnicas de drenes verticales prefabricados (DVP) para aceleración de los asentamientos producto de la colocación del terraplén de plataforma, así como Columnas de Módulo Controlado (CMC) bajo las zapatas de cimentación para mitigar asentamientos totales y diferenciales e incrementar capacidad de carga.

El área total tratada con DVP es aproximadamente de 6.7 ha, tomando en consideración un sobreancho de 5 m fuera de la barda perimetral del proyecto, para que esta misma no se vea afectada por el fenómeno de consolidación de los estratos arcillosos y/o la afectación del área de la planta ante una eventual inundación de la zona.

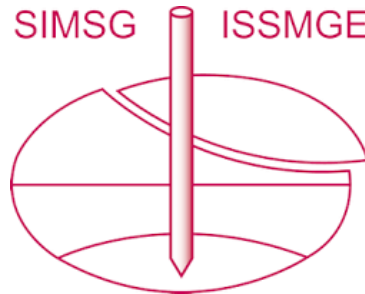
El espaciamiento de los drenes verticales para el proyecto ejecutivo fue de 1.5 m en malla cuadrada y a una profundidad de 5 m con respecto a la plataforma de trabajo (nivel similar al terreno natural). Con esto se calculó obtener un porcentaje de consolidación del 95% en 3 meses.

Por debajo de estructuras se propuso realizar un mejoramiento con CMC, que se conforma por con concreto tipo Menard de resistencia a la compresión simple a los 28 días de 15 MPa con un revenimiento de 18–22 cm. La longitud en promedio de las CMC fue de 6.5 m, empotradas en la unidad estratigráfica U-4

8 REFERENCIAS

- ASIRI National project (2012). Recommendations for the design construction and control of rigid inclusion ground improvements.
- Bowles J.E. (1997) Foundation Analysis and Design 5th edition.
- Cassan M. (1998) Les essais in situ en mécaniques des sols 1. Réalisation et interpretation. Editions Eyrolles.
- Combarieu O. (2006) Use of deformation moduli in geotechnical practice. Revue française de Géotechnique no. 114.
- Gonin H. and al. (1992) Etudes sur les correlations entre le standard penetratioj test et le presiometre. Revue française de Géotechnique no. 58.
- Magnan Jean-Pierre. (2000), Théorie et Pratique des drains verticaux. Technique et Documentation Lavoisier.
- Menard, Louis (1975), The interpretation and application of Pressurimetr test Results to Foundation desing, Sol Soils No. 26.
- Plaxis 2D 2023.1 (2023) Bentley Systems / Infrastructure Engineering Software
- Racinais J. (2017). Colonnes à module contrôlé CMC cahier des charges.
- Transportadora de Gas Natural de la Huasteca (2023). “Estudio geotécnico para el gasoducto extensión sureste/ Geotechnical study for south east extensión pipeline”.
- Transportadora de Gas Natural de la Huasteca (2023). “Análisis geotécnico del mejoramiento de suelos para la estación de compresión Veracruz Norte”

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.