



GERDAU

CORSA

El futuro se moldea

ANÁLISIS NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DE PILOTES DE ACERO IR EN ZONA DE TRANSICIÓN DE LA CIUDAD DE MÉXICO

ANÁLISIS NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DE PILOTES DE ACERO IR EN ZONA DE TRANSICIÓN DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Flores F.A.,
IGM Ingenieros Geotecnistas Mexicanos

Santos D.,
Graduado, ESIA U Zacatenco, IPN

Torres R.,
Gerdau Corsa

RESUMEN: En la actualidad, el uso de modelos numéricos bidimensionales y tridimensionales es más frecuente en la práctica para determinar el comportamiento de una cimentación profunda sometida a diversos escenarios de carga y a fenómenos físicos complejos. Sin embargo, su uso debe ser racional y estar sustentado con base en resultados experimentales. En este trabajo, se muestra un análisis numérico detallado de pilotes de acero IR desplantados en suelos de la zona de Transición de la Ciudad de México. Se estudia el efecto de la interfaz entre el suelo y el pilote, el tipo de elemento estructural con el que se simula el pilote (i.e. elementos placa o elementos sólidos). Todo ello se evalúa a través de su comparación con resultados de pruebas de carga estática a compresión y tensión. Finalmente se presentan las recomendaciones prácticas para una adecuada simulación de interacción suelo-estructura en modelos 3D para cimentaciones profundas a base de pilotes de acero IR, en suelos areno-arcillosos de la Ciudad de México.



1. INTRODUCCIÓN

Es una práctica común emplear métodos analíticos y semi-empíricos para calcular la capacidad de carga de cimentaciones profundas. En particular, cuando se trata de pilotes es fundamental calibrar la respuesta carga-desplazamiento, tanto para carga axial como lateral, y definir el mecanismo de transferencia de carga en la punta del pilote y a lo largo del fuste.

Estas calibraciones permiten reducir las incertidumbres y diseñar cimentaciones más seguras y menos costosas. El objetivo de este trabajo es simular la respuesta mecánica obtenida de pruebas de carga axial y lateral realizadas en un pilote de acero hincado in situ a escala real, utilizando un modelo 3D de diferencias finitas.

En la literatura técnica están disponibles varios métodos convencionales para el diseño de cimentaciones de pilotes, que incluyen cargas axiales y laterales, tanto para materiales granulares como arcillosos (por ejemplo, Eurocode 3 2007, Reese et al., 1970, Tomlinson y Woodward, 2007). Aunque estos métodos han demostrado a lo largo de los años proporcionar soluciones conservadoras, buscando tanto la seguridad como la economía, es una práctica común revisar e incluso ajustar las capacidades de carga estimadas utilizando los resultados obtenidos directamente de las pruebas de carga in situ. En este caso en particular, se evalúa la respuesta de un pilote ante cargas axiales y laterales a partir de pruebas de carga realizadas en los límites de las zonas de Transición y de Lago (ver Figura 1). La zona de estudio se ubica dentro de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco. Este artículo presenta la modelación numérica de una de las pruebas realizadas, comparando las respuestas medidas y calculadas.

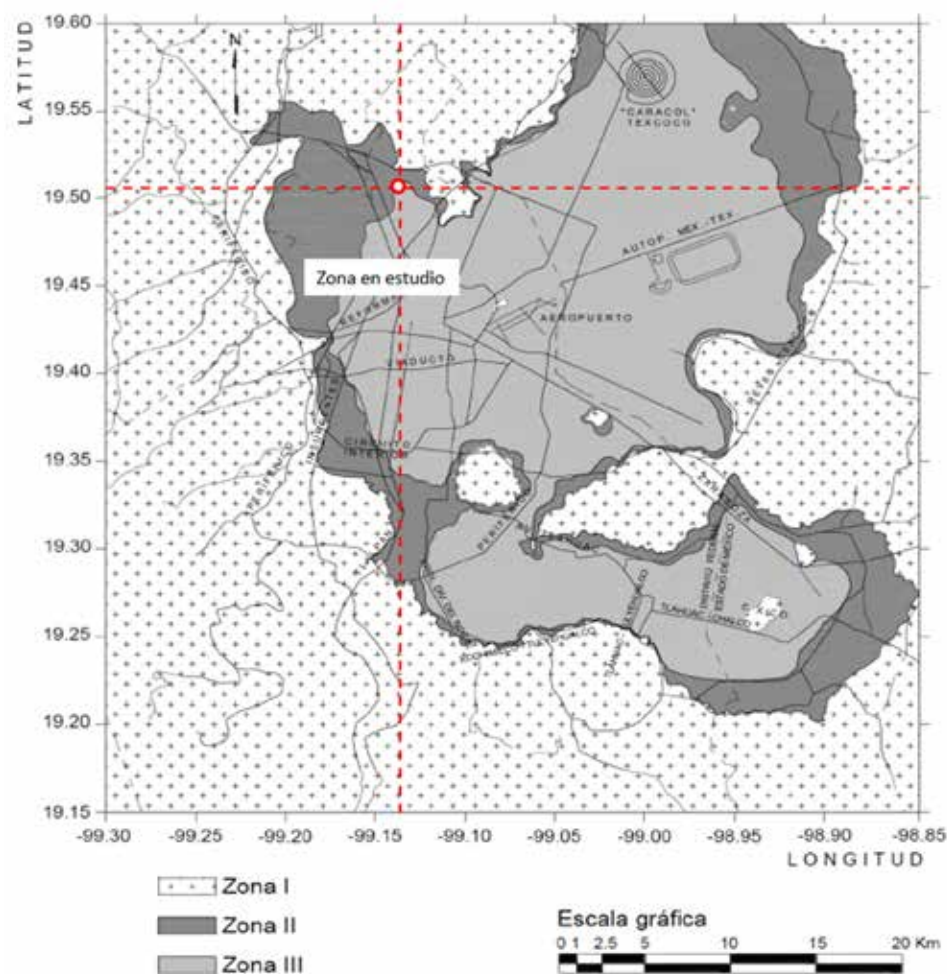
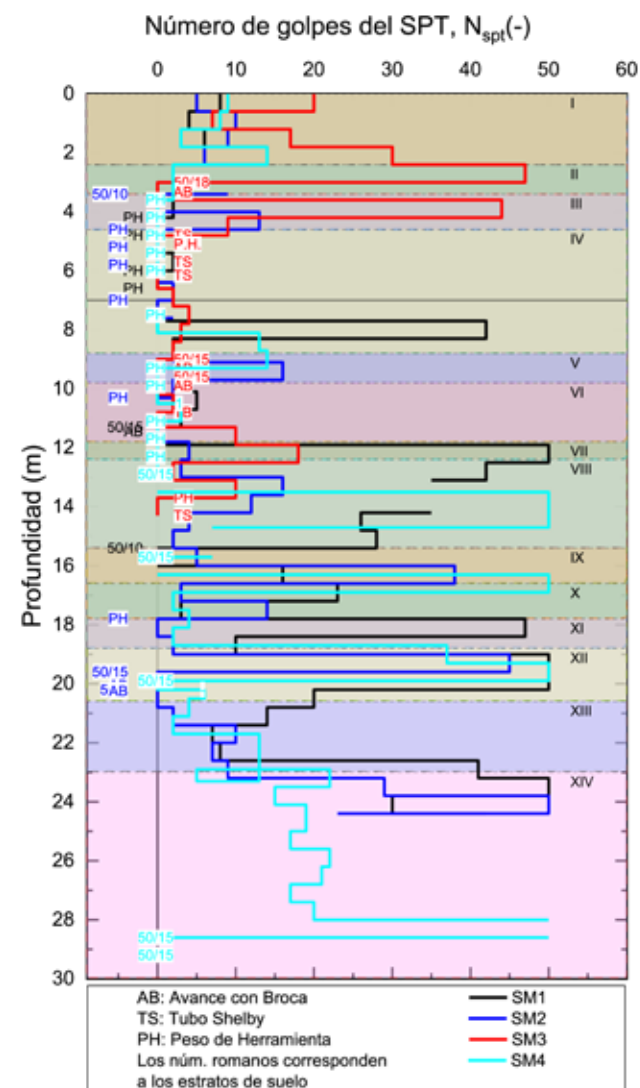


Figura 1. Ubicación del sitio de pruebas en el mapa de zonificación geotécnica de la Ciudad de México (NTC, 2017).

2. CONDICIONES DEL SUBSUELO

El sitio en estudio se caracterizó mediante la ejecución de sondeos mixtos de entre 15 y 30 m de profundidad, combinando la prueba de penetración estándar (SPT) y la obtención de muestras inalteradas mediante el uso de un tubo de pared delgada o tubo Shelby, además de pruebas de laboratorio tanto mecánicas (triaxiales UU) como índice. Los perfiles de SPT con la profundidad de cuatro sondeos cercanos, de entre 25 m (SM3) y 290 m (SM4) de distancia al sitio en estudio, se presentan en la Figura 2.

Se identificó un relleno de material superficial de 2.4 m. Posteriormente se tienen intercalaciones de arcillas y arenas fina con limos, hasta los 4.6 m de profundidad. Por debajo de este material se encontró arcilla blanda (peso de herramienta en la prueba de SPT) con espesores de hasta 7.4 m, con intercalaciones de arena limosa a los 10m de profundidad. A partir de los doce metros en adelante se tienen intercalaciones de arenas de grano fino con limos, y limos arenosos. Haciendo uso de la información obtenida de la etapa de exploración geotécnica, la interpretación de la resistencia a la penetración del suelo por medio la prueba de penetración estándar, y los resultados de las pruebas de laboratorio, se definió la estratigrafía del sitio de estudio (ver Tabla 1).



ID	Descripción	De-a (m)	γ_m (t/m^3)	S_u (t/m^2)	ϕ (°)	E_{50} (t/m^2)
I	Material de relleno	0 - 2.4	1.50	0	28	420
II	Arcillas	2.4 - 3.4	1.71	2.0	0	860
III	Arenas finas con limos	3.4 - 4.6	1.61	0	30	1080
IV	Arcillas	4.6 - 8.8	1.18	5.5	0	810
V	Arenas de grano fino con limos	8.8 - 9.8	1.50	0.0	30	1980
VI	Arcillas	9.8 - 11.8	1.22	6.0	0	1410
VII	Limo de color café claro	11.8 - 12.4	1.50	8.0	0	2070
VIII	Arcillas de color gris oscuro	12.4 - 15.4	1.34	5.5	0	1800
IX	Arenas de grano fino	15.4 - 16.6	1.58	0	32	1935
X	Limos con arenas finas	16.6 - 17.8	1.28	6.1	0	900
XI	Limos con pocas arenas	17.8 - 18.8	1.68	0	27	4350
XII	Arenas muy finas	18.8 - 20.6	1.66	0	34	2800
XIII	Limo con arenas	20.6 - 23.0	1.60	0	16	3060
XIV	Limo con arenas finas	23.0 - 24.8	1.50	0	16	1260

donde: γ_m = peso volumétrico del suelo; S_u = resistencia no drenada; ϕ = ángulo de fricción interna; E_{50} = Módulo elástico secante del suelo.

Tabla 1. Parámetros geotécnicos del sitio de estudio para análisis a corto plazo.

Figura 2. Gráfica del número de golpes del SPT contra la profundidad.

Para conocer las condiciones dinámicas del sitio se realizaron pruebas geofísicas de vibración ambiental, VA, y mediante el método de autocorrelación espacial, SPAC. Se ejecutaron tres pruebas de VA, con las cuales se registró un periodo del suelo, T_s , promedio de 1.17 s. Con la ejecución del SPAC se estimó la variación de la velocidad de propagación de las ondas de corte, V_s , con la profundidad. Las V_s obtenidas a partir de 2 a 18 metros son de 198 m/s, asociadas a arcillas limosas y limos de alta plasticidad. De 18 a 24 metros la velocidad medida fue de 230 m/s, correspondiente a materiales limosos con intercalaciones de arenas finas. A profundidades de entre 24 a 35 metros, la velocidad de onda de cortante presenta un valor de 456 m/s.

Para el análisis de la cimentación profunda se realiza una revisión de pilote de acero tipo IR W12x40 A992 desplantado a una profundidad de 13 metros respecto al nivel de terreno natural, con la finalidad de determinar su capacidad de carga en punta y fuste. La sección transversal del pilote de acero se muestra en la Figura 3.

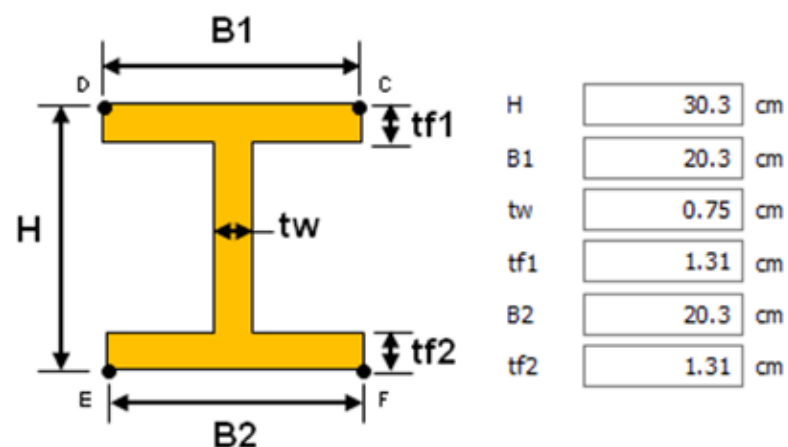


Figura 3. Geometría del pilote empleado en las pruebas de carga.

Las propiedades del pilote que se consideraron se muestran en la Tabla 2.

Descripción	γ (t/m ³)	E (t/m ²)	f_y (kg/cm ²)
Pilote de acero	7.85	20389018	3515

donde: γ = peso volumétrico del acero;
E = módulo elástico del acero;
 f_y : esfuerzo de fluencia.

Tabla 2. Propiedades del pilote de acero.

Es importante mencionar que solo se realizaron ensayos triaxiales UU, y en dos muestras se tenían grados de saturación del orden del 70%, posiblemente atribuibles a una deficiente protección de los tubos shelby, lo que ocasionó la pérdida de humedad. Lo que hizo que el laboratorio reportara ángulos de fricción aparente, por lo que se tomó la resistencia al corte S_u , resultante del esfuerzo de confinamiento medio.

3. PRUEBAS DE CARGA

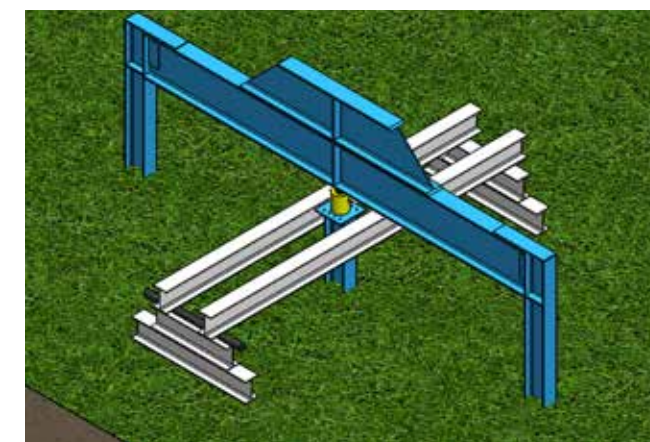
3.1 SISTEMA DE REACCIÓN Y APLICACIÓN DE CARGAS

El sistema de reacción está conformado por dos pilotes de acero W12X40, separados 3.15 metros del pilote de prueba, cada uno sobresaliendo dos metros respecto al nivel de terreno. Estos pilotes están unidos mediante una viga de reacción de acero W24X104 de seis metros de longitud, a la cual se le adicionó al centro, un perfil de misma dimensión con longitud de 3 metros y cortes en los extremos a 45°, teniendo como sección final una sección compuesta de tipo trapezoidal, esto con la finalidad de reducir las deformaciones al centro de la viga.

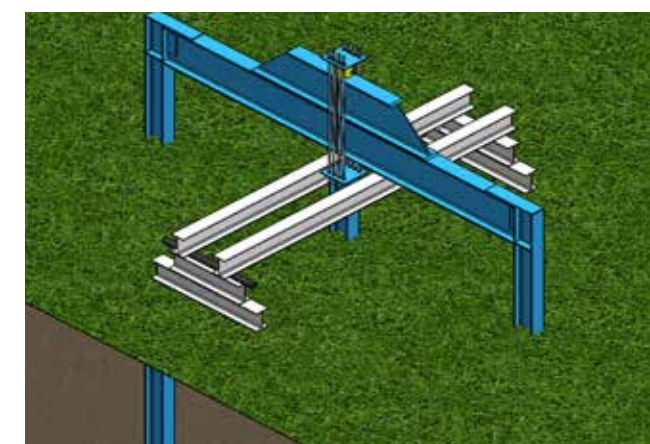
En la Figura 4a se muestra el sistema de reacción empleado para ejecutar una prueba de compresión. La Figura 4b muestra el arreglo del sistema de reacción para la ejecución de la prueba a tensión, donde se aprecian unas barras de alta resistencia unidas a una placa en la cabeza del pilote para poder aplicar carga de tensión. El sistema de reacción para ejecutar la prueba de carga lateral se desarrolló colocando una viga en sentido horizontal apoyada en uno de los pilotes de reacción y mediante un gato hidráulico se aplicó la carga al elemento (Figura 4c). Los pilotes de reacción y de prueba fueron hincados mediante un equipo de impacto. Para el hincado de los perfiles de acero, se realizó una excavación de 40 cm de profundidad que fungió como guía de hincado. Los dos pilotes de reacción y el pilote de prueba fueron hincados con un equipo de impacto de baja capacidad que consiste en un marco de acero y un malacate que levanta una masa golpeadora de 300 kg que se deja caer a diferentes alturas de caída (Santos, 2020).

El pilote de reacción 1 presentó un número de golpes altos, con alturas de caída máximas de 0.70 m, por lo que paró el hincado a los 10.2 m. El pilote de reacción 2 y el pilote de prueba se llevaron a los 13 metros de profundidad empleando alturas de caída entre los 0.70 y 1.40 m. En general, se registraron 50 golpes cada 30 cm, y en algunas zonas se aplicaron cerca de 100 golpes cada 30 cm.

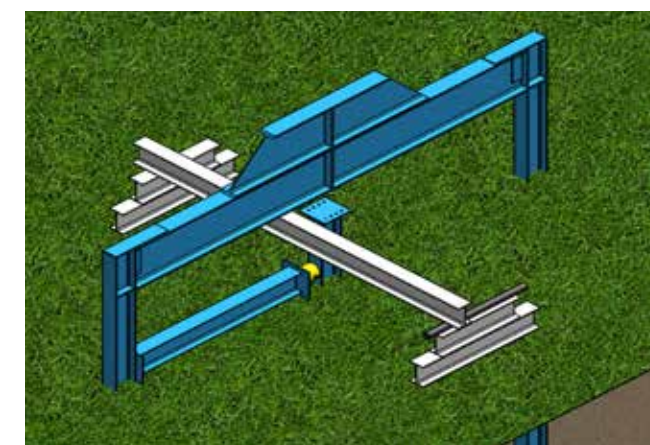
La Figura 5 muestra los registros de hincado con la profundidad para los tres pilotes, así como las alturas de caída empleadas en los hincados de cada uno de los pilotes. Los registros de hincado confirman que se tiene un estrato blando de menor resistencia entre los 5 m y los 10 m de profundidad.



(a)



(b)



(c)

Figura 4. Metodología de Estimado de Asentamiento para Dos Capas, Superior e Inferior.

La Figura 5 muestra los registros de hincado con la profundidad para los tres pilotes, así como las alturas de caída empleadas en los hincados de cada uno de los pilotes. Los registros de hincado confirman que se tiene un estrato blando de menor resistencia entre los 5 m y los 10 m de profundidad.

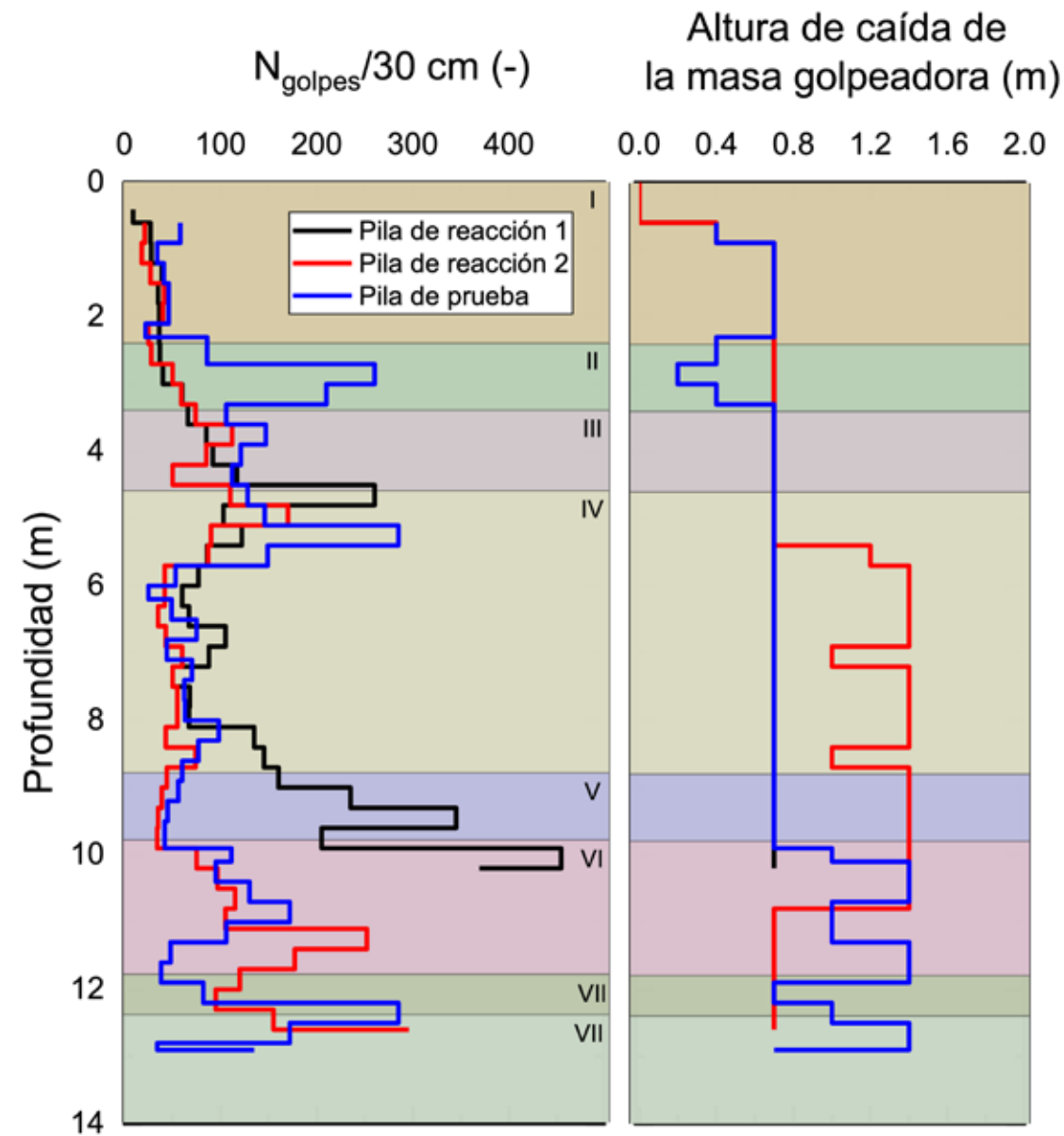


Figura 5. Registros de hincado con la profundidad y alturas de caída de la masa golpeadora. Los números romanos corresponden a las capas de suelo de la Tabla 1.

3.2 EQUIPO UTILIZADO E INSTRUMENTACIÓN

El equipo utilizado para la aplicación y medición de las cargas aplicadas y sus respectivos desplazamientos se describen a continuación.

a) Cilindro de émbolo hueco. Se hizo uso de un gato hidráulico, con capacidad de 100 toneladas, para inducir la carga constante en un tiempo determinado al pilote de prueba mediante el contacto de una placa de acero soldada en la cabeza del pilote. Debido a que no se contaba con una celda de carga, la medición de la presión fue mediante el uso de un manómetro recién calibrado con capacidad de 10,000 PSI (700 kg/cm²); conociendo el área útil se permitió conocer el valor aproximado de la carga aplicada.

b) Vigas de referencia. Se emplearon dos perfiles de acero W12x40 como vigas de referencia, los cuales se encontraban apoyados a una distancia de 3 metros respecto al centro del pilote de prueba, con la finalidad de estar fuera de la zona de influencia del pilote de prueba y el marco de reacción para poder medir únicamente el desplazamiento que presenta el pilote de prueba.

c) Sistema de medición de desplazamientos. La medición del desplazamiento se realizó con micrómetros digitales y análogos con precisión de 0.01mm, así como medidores de desplazamiento electrónico LVDT, los cuales se colocaron en los extremos de la placa de la cabeza del pilote para poder medir los desplazamientos inducidos por las cargas aplicadas. Esto con la finalidad de tener equipos de redundancia.

3.3 PRUEBA DE CARGA ESTÁTICA DE COMPRESIÓN AXIAL

Durante la prueba de carga de compresión axial se aplicaron ocho incrementos de 9.2 toneladas a cada 15 minutos y un último de 4.6 toneladas durante 15 min, para poder construir una curva carga desplazamiento con un mayor número de puntos. Así como la aplicación de un segundo ciclo de carga, donde se aplicaron los mismos intervalos de carga y se midieron sus respectivos desplazamientos, ver Figura 6.



Figura 6 Ejecución de prueba de carga a compresión axial.

La curva carga-desplazamiento de la primera etapa de carga se muestra en la Figura 7a. En el primer ciclo de aplicación de carga, los datos presentaron una anomalía en las dos últimas lecturas. Durante el proceso de descarga no se realizaron lecturas, por lo que solo se presenta la fase de carga. Posteriormente se aplicó un segundo ciclo de carga, obteniéndose la curva de la Figura 7b. Debido a las complicaciones mencionadas en las últimas dos aplicaciones de carga de la primera etapa, se decidió únicamente mostrar el comportamiento de la segunda etapa de carga sin tomar en cuenta el desplazamiento permanente de causado por el primer ciclo de carga. La carga máxima aplicada en ambos ciclos fue de 78.2 ton y el desplazamiento máximo medido fue de 25 mm.

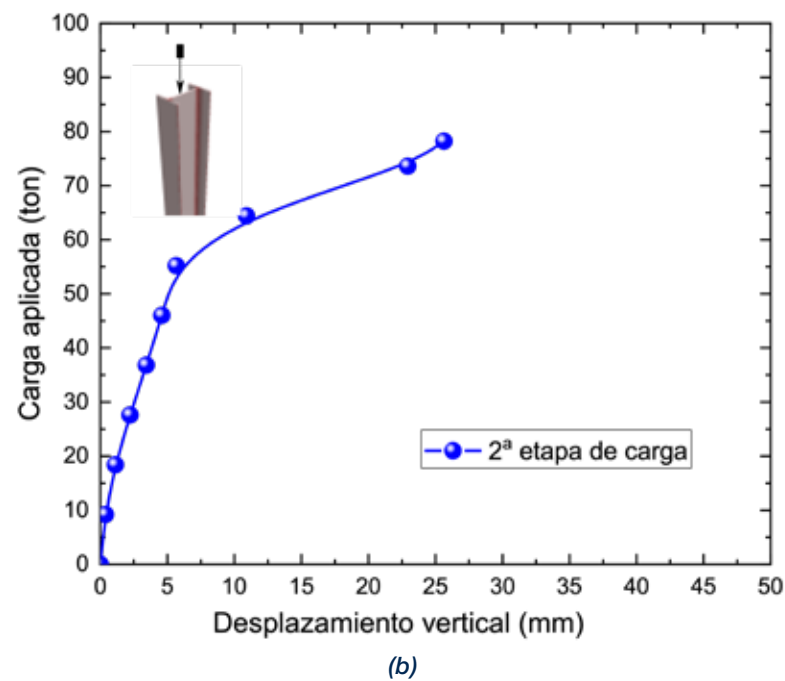
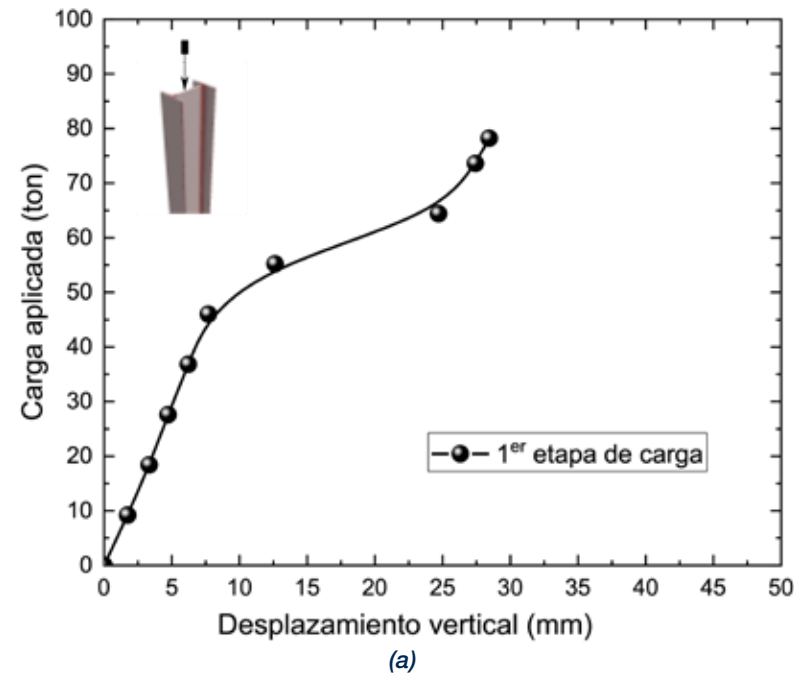


Figura 7. Curva carga-desplazamiento de prueba de carga a compresión axial.

3.4 PRUEBA DE CARGA ESTÁTICA DE TENSIÓN AXIAL

Para la ejecución de la prueba de carga a tensión axial, se aplicaron seis incrementos de 9.2 toneladas a cada 15 minutos considerando el sistema de reacción de la Figura 8. Este sistema cuenta con un arreglo en el cual, el cilindro de émbolo hueco se coloca en la parte superior de la viga de reacción y la carga de tensión se transmite por medio de varillas ligadas a la cabeza del pilote mediante una placa base. Mediante la ejecución de la prueba de tensión axial se pudo obtener la curva de carga de tensión vs desplazamiento vertical del pilote de prueba como se observa en la Figura 9. La carga máxima aplicada en tensión fue de 46 ton con un desplazamiento medido de 30 mm.



Figura 8. Ejecución de prueba de carga a tensión axial.

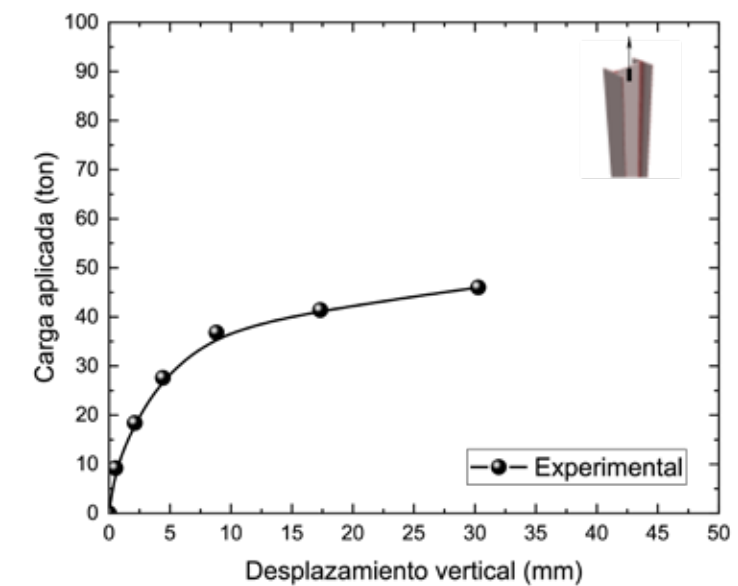


Figura 9. Curva carga-desplazamiento de prueba de carga a tensión axial.

3.5 PRUEBA DE CARGA LATERAL

Durante la ejecución de la prueba de carga estática lateral se midió el desplazamiento lateral en la cabeza del pilote, aplicando la carga mediante el cilindro de émbolo hueco colocado de forma horizontal con el arreglo del sistema como se muestra en la Figura 10. Se definieron 6 incrementos de carga con magnitud de 4.6 toneladas, de 15 minutos de duración cada uno. La curva de carga lateral-desplazamiento medida, se indica en la Figura 11. Se puede observar que no se define un valor de carga al que tienda la curva, por lo que se decidió finalizar la prueba al tener un desplazamiento máximo de 57 mm, asociado a una carga lateral de 27.6 ton y un desplazamiento muy evidente de los pilotes de reacción.



Figura 10. Ejecución de prueba ante carga lateral.

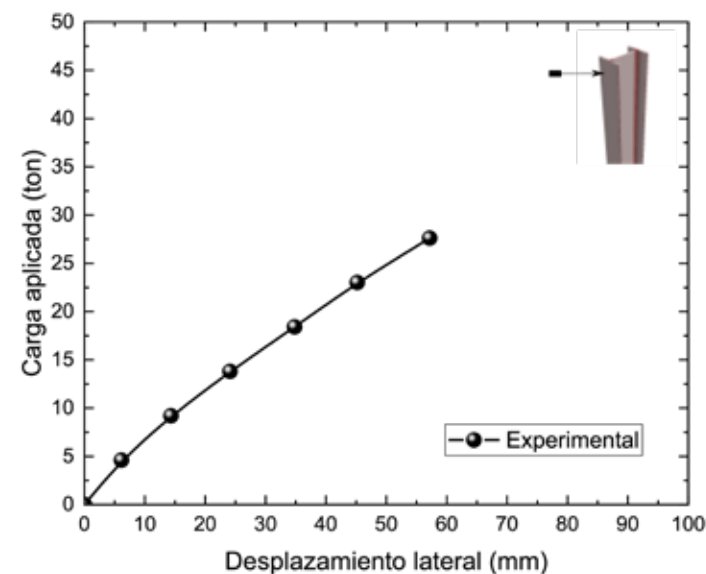


Figura 11. Curva carga-desplazamiento de la prueba de carga lateral.

4. ANÁLISIS NUMÉRICO

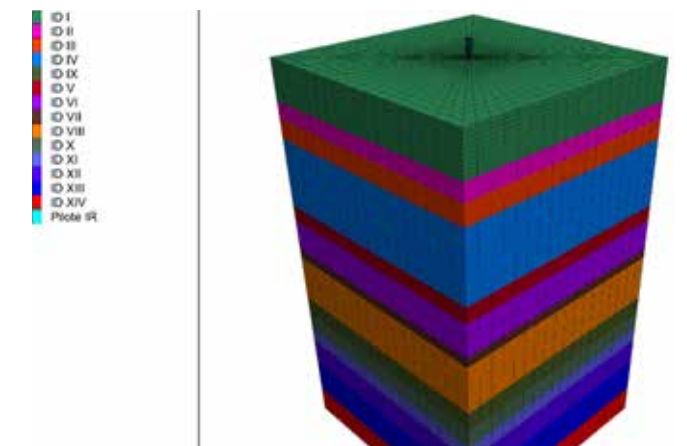
4.1 INTRODUCCIÓN

La mayoría de los métodos de diseño para pilotes hincados se desarrollaron para pilotes tubulares hincados en suelos francamente arcillosos o arenas limpias. Por lo general, estos métodos también se utilizan para el diseño de pilotes IR o H, aunque la respuesta de carga axial de los pilotes H es diferente a la de pilotes tubulares. Mas aún, los perfiles de suelo a menudo consisten en múltiples capas de suelo que pueden contener arena, arcilla, limo o una mezcla de estos tres. Por lo tanto, la adecuada predicción de la capacidad de carga última de los pilotes IR hincados en un suelo estratificado es un importante desafío. Aunque se dispone de resultados de pruebas de carga bien documentadas en pilotes tubulares o de concreto reforzado, la literatura contiene información limitada sobre pruebas en IR para aplicar en el diseño (Seo *et al.*, 2009). Es aún más escasa la bibliografía referente a la calibración de modelos numéricos que pueda representar el comportamiento del sistema suelo pilote IR ante diferentes condiciones de carga. Sin embargo, el uso de pruebas de carga para evaluar la robustez y precisión de los métodos numéricos mediante simulaciones numéricas que incluyan pilotes sometidos a cargas verticales o laterales es una práctica cada vez más común (e.g. Misir y Laman 2020, Raddatz y Taiba 2016).

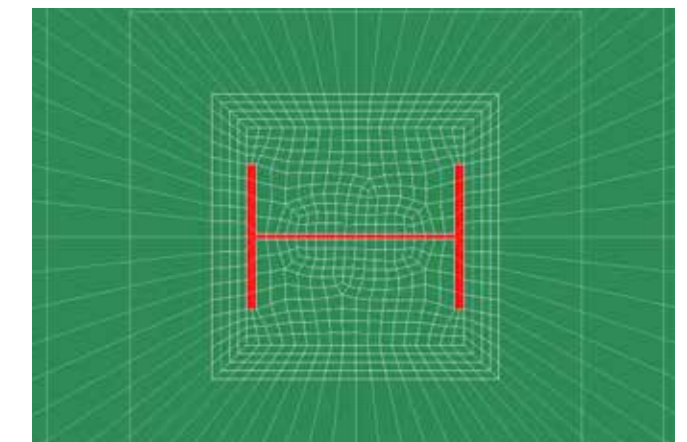
4.2 MODELO NUMÉRICO 3D

4.2.1 MALLA DE DIFERENCIAS FINITAS

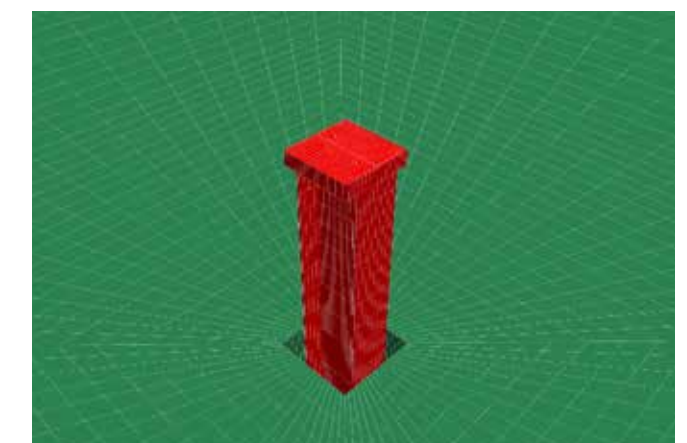
El sistema suelo-pilote IR se representó mediante un modelo de diferencias finitas tridimensional en el programa FLAC3D, como se muestra en la Figura 12. Las dimensiones del modelo son de 15 m de ancho por 15 m de largo y 25 m de profundidad. Se usaron un total de 380,086 elemento sólidos 3D, incluyendo al suelo y al pilote. La Figura 12c muestra un acercamiento de la malla en la zona entre el contacto del suelo y el pilote de acero.



(a)



(b)



(c)

Figura 12. Modelo numérico 3D desarrollado.

Hay una basta información en la literatura especializada sobre la influencia de la malla en los resultados numéricos, por lo que es importante revisar la idoneidad de una malla 3D incluyendo las dimensiones del modelo, relación de aspecto de los elementos sólidos considerados, la cantidad y calidad de los elementos, así como la repetibilidad de los resultados con diferentes configuraciones de elementos. Para evaluar los aspectos antes mencionados, se compararon resultados haciendo uso de la malla de diferencias finitas de la Figura 12 y con una modelo de elementos finitos, MEF, desarrollado en el programa MIDAS GTS considerando las mismas propiedades y dimensiones que el modelo de diferencias finitas MDF. Como se puede ver en la Figura 13, el MEF se generó con geometrías de los elementos sólidos muy diferentes a los de del MDF. Se simuló una prueba de carga a compresión incrementando cargas en la cabeza del pilote. Se emplearon los parámetros del suelo y del pilote indicados en Santos (2020). Para la comparación de resultados se usó una ley de resistencia Mohr-Coulomb en los suelos, y el pilote se simuló suponiendo un comportamiento elástico. Los resultados de la comparación entre el MDF desarrollado en este trabajo para la simulación de las pruebas de carga y el MEF se muestran en la Figura 14. En esta gráfica se puede observar que los resultados mediante ambos modelos, en términos prácticos son los mismos, siendo consistente y robusta la malla diferencias finitas 3D empleada en este trabajo, aun considerando que las geometrías de los elementos sólidos muy diferentes entre los modelos indicados. Todos los análisis se realizaron con los parámetros del suelo de la Tabla 1, considerando análisis a corto plazo (condición no drenada) en término de esfuerzos totales.

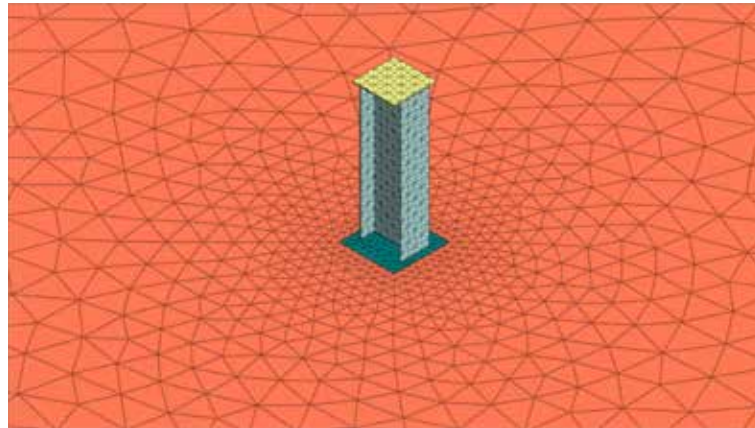


Figura 13. Modelo 3D de elementos finitos empleado para comparar la repetibilidad de resultados.

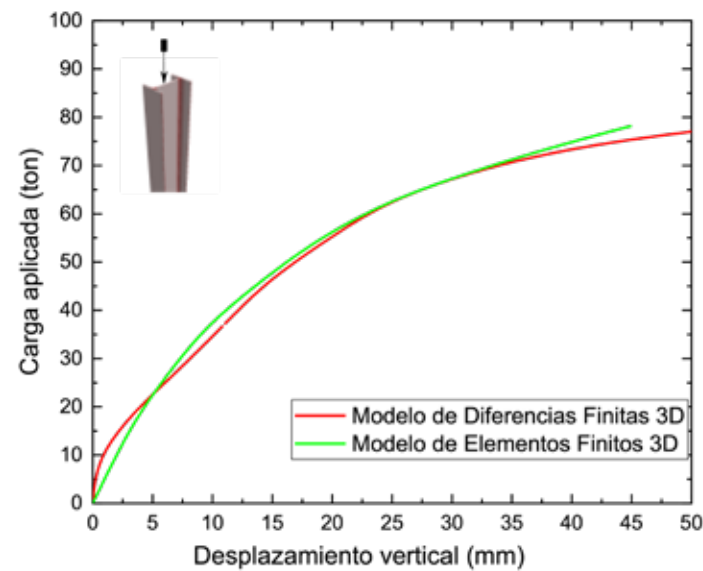


Figura 14. Evaluación de la calidad de la malla mediante la comparación con un modelo de elementos finitos.

4.2.2 INTERFASE CONTACTO PILOTE - SUELO

FLAC3D representa interfaces mediante conjuntos de elementos triangulares (elementos interfase), cada uno de los cuales está definido por tres nodos (nodos de interfase). Generalmente, los elementos interfase se unen a la cara de una zona; se definen dos elementos interfase triangular para cada cara de una zona cuadrilátera. Los nodos de interfase se crean automáticamente en cada vértice del elemento interfase. Cuando otra superficie de la malla entra en contacto con un elemento interfase, el contacto se detecta en el nodo interfase y se caracteriza con rigideces normales y de cortante, así como propiedades de deslizamiento. Cada elemento de la interfase distribuye su área a sus nodos de forma ponderada. Por lo tanto, cada nodo de interfase tiene un área representativa asociada (Itasca, 2020). La Figura 15 ilustra la relación entre los elementos y los nodos de la interfase, y el área representativa asociada a un nodo individual.

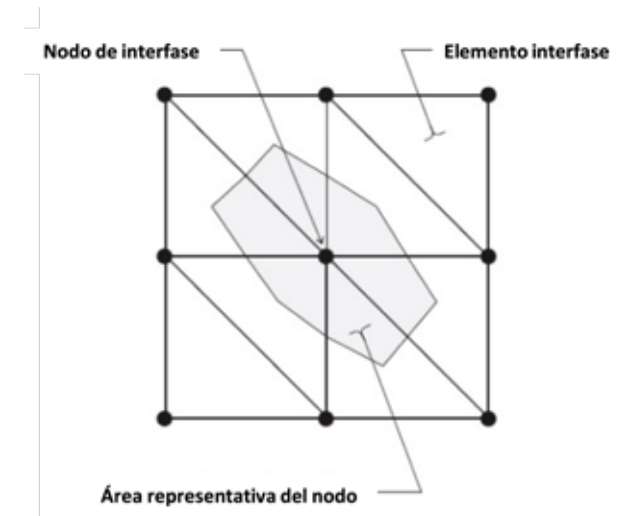


Figura 15. Nodos y elementos de los elementos interfase.

El modelo constitutivo se define mediante un criterio lineal de resistencia al cortante de Coulomb que limita la fuerza cortante que actúa en un nodo de interfase, las rigideces normales y cortantes, las resistencias de unión a tensión y cortante, y un ángulo de dilatación que provoca un aumento de la fuerza normal efectiva sobre la cara objetivo del elemento después de que se alcanza la resistencia al corte límite. La Figura 16 ilustra los componentes del modelo constitutivo que actúan en el nodo de interfase (P):

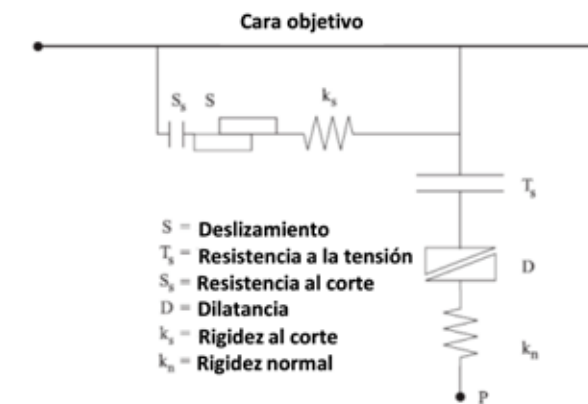


Figura 16. Componentes del modelo constitutivo de la interfase (Itasca, 2020).

Para evaluar la interacción entre el contacto suelo-pilote y el posible deslizamiento en el suelo pilote, se usaron elementos interfase en a lo largo del perímetro del pilote. La interfase suelo-pilote se simuló mediante resortes acoplados (Ver Figura 17) con resistencia al corte con el modelo constitutivo mencionado en los párrafos anteriores. La resistencia al corte se estableció en función de los parámetros de resistencia de cada geo-material en contacto con el pilote IR. En los análisis numéricos, la reducción de los parámetros de resistencia entre el contacto suelo-pilote debido al proceso de hincado de los pilotes se evalúa a partir de una reducción de la resistencia del elemento interfase. Se evaluó la influencia de la interfase en los resultados, a partir de un factor de adherencia, F_a , que se define como un valor proporcional a los parámetros de cohesión y de la tangente del ángulo de fricción interna de los materiales de la Tabla 1.

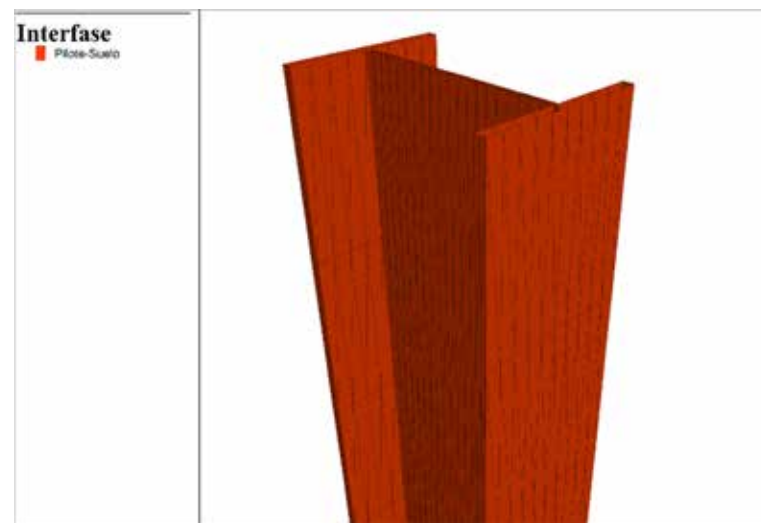


Figura 17. Interfase entre el suelo y el pilote empleada en los análisis numéricos.

La Figura 18 muestra la influencia del factor de adherencia en el modelo propuesto a partir de la ejecución de varios análisis numéricos simulando la prueba de carga a compresión y haciendo una variación del factor F_a , iniciando con un valor de 1 hasta un valor de 0.6, donde un valor de 1 indica que no hay reducción de la resistencia en el contacto, y el valor de 0.6, indica que existe una reducción de la resistencia del 40% en el contacto.

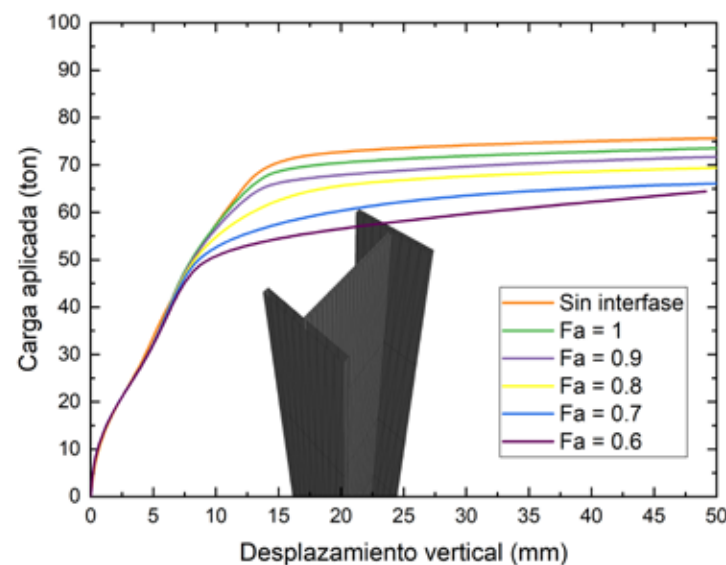


Figura 18. Evaluación del factor de adherencia en el modelo numérico desarrollado.

4.2.3 SIMULACIÓN DE LAS PRUEBAS DE CARGA

El modelo numérico desarrollado incluye la aplicación de cargas con la finalidad de simular lo más apegado posible la ejecución de pruebas de carga indicadas en la sección 3, es por ello que los análisis se desarrollaron por etapas, iniciando con la aplicación de la primera etapa de carga a compresión axial, posteriormente se descargó el modelo para aplicar la segunda etapa de carga, de igual manera se descargó se aplicó la carga en tensión. Las cargas aplicadas al modelo fueron en término de esfuerzos sobre un área, implícitamente el programa calcula las fuerzas equivalentes para aplicarlas en cada nodo del área cargada. La Tabla 3 indica las etapas de análisis de la simulación numérica de las pruebas de carga. El Factor de adherencia, F_a , de la interfase suelo-pilote empleado en los análisis fue de 0.7. El comportamiento esfuerzo-deformación del suelo se simuló mediante una ley constitutiva Mohr-Coulomb bilineal con los parámetros de la Tabla 1. El pilote se consideró como un material elástico. Debido al desplazamiento que sufrieron los pilotes en la prueba de carga lateral y a que no se llevó un monitoreo mediante micrómetros, se decidió no incluir la simulación para esa prueba de carga lateral. Cabe señalar que las etapas que se muestran en la Tabla 3, incluye la realización de la prueba de tensión en la misma secuencia de cargas de la prueba de compresión. Es decir, se descarga el pilote, y posteriormente se aplican incrementos de carga a tensión en el mismo modelo.

Las curvas carga - desplazamiento de la simulación de las dos etapas de compresión axial se muestran en la Figura 19. Se observa una buena correspondencia de la simulación numérica con los datos medidos, para el rango elástico, así como el inicio del comportamiento plástico. La simulación numérica de la prueba a tensión también fue comparada con los datos experimentales (Ver Figura 20). En la ejecución de la prueba de compresión se observó un comportamiento anómalo en los dos últimos incrementos de carga de la etapa 1, sin embargo, se decidió realizar la comparativa con la simulación partiendo del desplazamiento permanente medido al descargar la primera etapa de carga y de ahí partir con los incrementos de carga de la etapa 2. Con la finalidad de tener un único modelo con las dos etapas de pruebas de compresión y la prueba de tensión.

ID	Etapas de análisis
I	Estado inicial de esfuerzos (modelo elástico)
II	Asignación de ley constitutiva al suelo
III	Colocación de pilote IR e interfase
IV	Aplicación de cargas de compresión axial (etapa 1)
V	Descarga (etapa 1)
VI	Aplicación de incrementos de cargas de compresión axial
VII	Descarga (etapa 2)
VIII	Aplicación de incrementos de cargas de tensión axial
IX	Descarga de fuerzas a tensión mediante decrementos

Tabla 3. Etapas de análisis de la simulación numérica 3D.

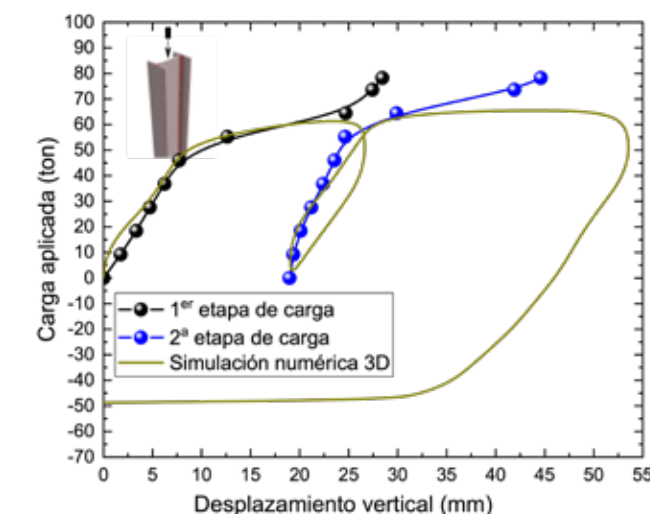


Figura 19. Curvas carga-desplazamiento de la carga a compresión axial para ambos ciclos de carga, además de la prueba de tensión.

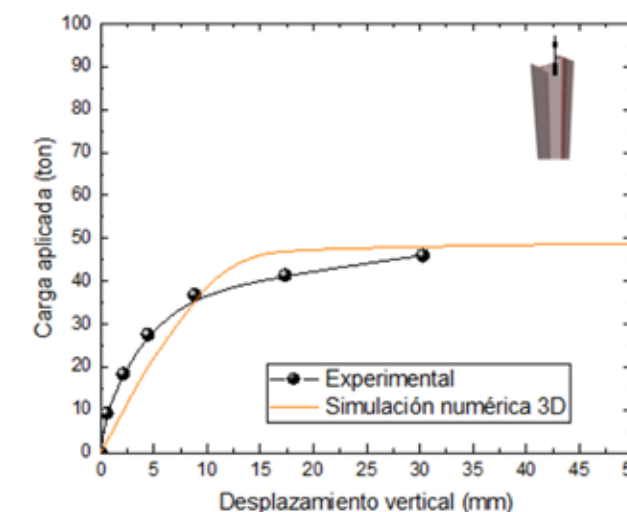
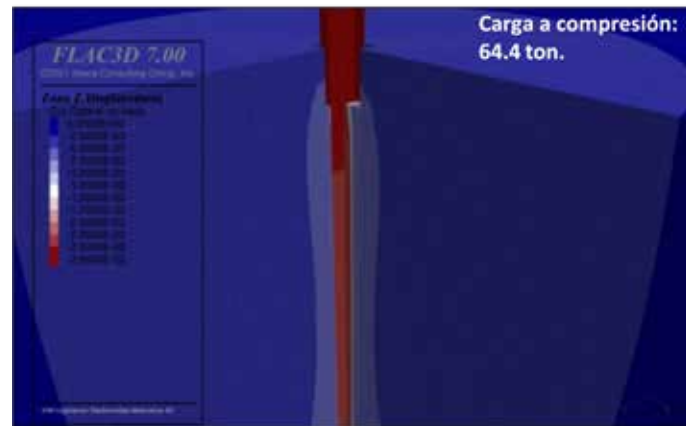
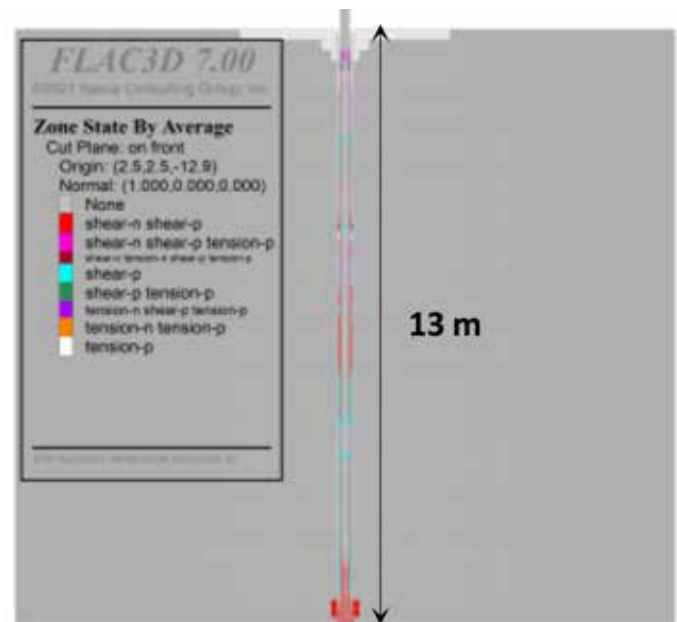


Figura 20. Curvas carga-desplazamiento de la carga a tensión experimental y numérica.

Una vez que se determina la aproximación del modelo numérico, es posible analizar otros factores que son difíciles de cuantificar u observar físicamente. Para la carga máxima a compresión aplicada en el modelo, se pueden observar los contornos de desplazamientos verticales a lo largo del perfil de acero, identificando en el contacto del alma del perfil y el suelo (ver Figura 21a). Por otro lado, recordando que el perfil estratigráfico indica que hay capas de diferentes materiales, los puntos de plastificación a lo largo del pilote indican las zonas que alcanzaron la plastificación las diferentes capas, así como la punta del pilote (ver Figura 21b).



(a) Desplazamientos verticales



(b) Zonas plásticas en el contacto suelo -suelo a lo largo del pilote



(c) Vista en planta de la zona de plastificación alrededor del pilote

Figura 21. Resultados en términos de desplazamientos y zonas de plastificación alrededor del pilote para el último incremento de carga a compresión axial de la 1ra etapa.

Las zonas de plastificación indicadas en el párrafo anterior son más evidentes y pueden observarse en la Figura 21c, donde se muestran los puntos de plastificación en tres elevaciones diferentes del pilote, a 1 m, 6.5 m de profundidad y cerca de la punta. Esta Figura muestra como los puntos de plastificación en el pilote no se dan directamente en el perímetro del perfil IR, si no, en una línea que forman los patines del perfil. Este punto también se observa con los contornos de desplazamientos verticales y las tasas de deformación al corte de la Figura 22. Esto confirma que la falla del pilote en el fuste se da principalmente en el rectángulo que se forma con el perfil IR y no sigue la geometría del perfil. Una conclusión similar se obtiene al analizar los desplazamientos verticales de la prueba de extracción, ver Figura 23.

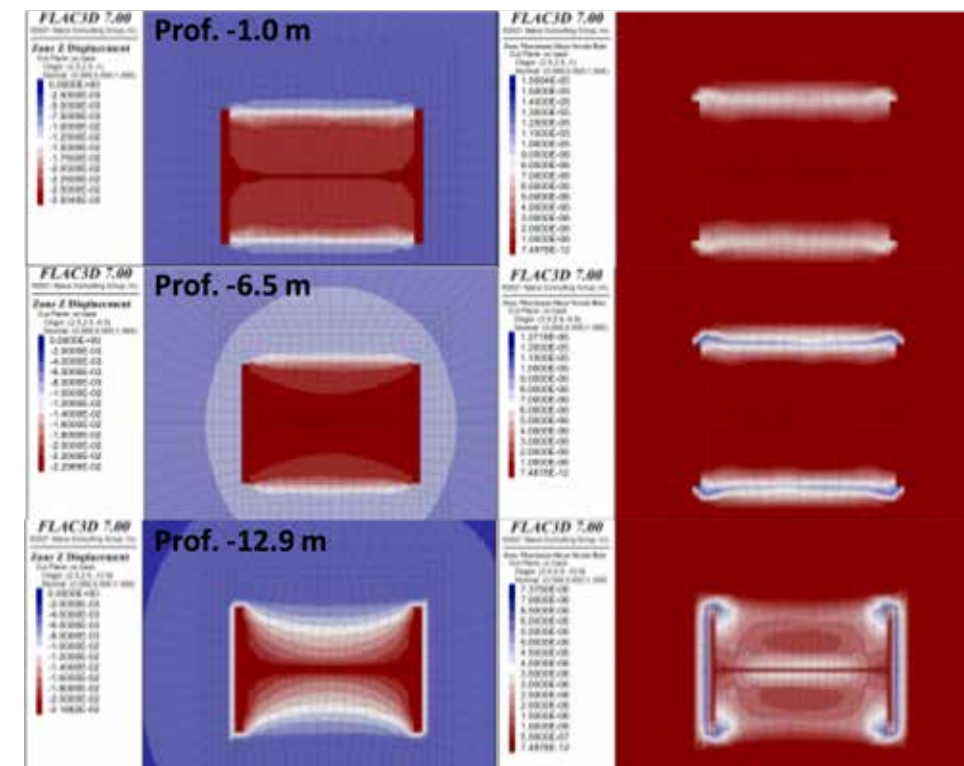
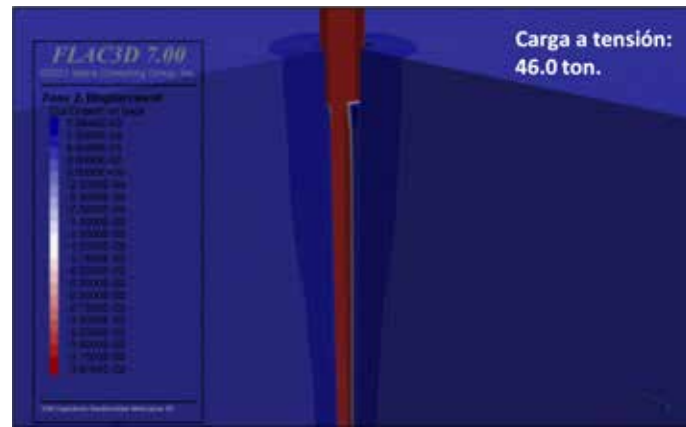
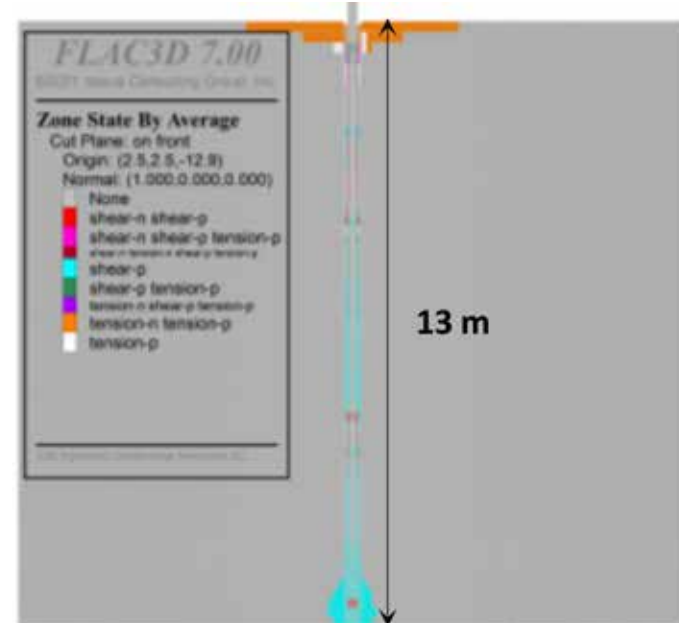


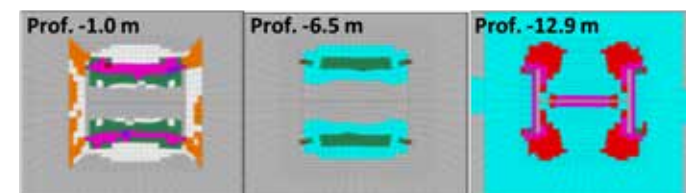
Figura 22. Desplazamientos verticales y tasa de deformación a corte para el último incremento de carga a compresión axial de la 1ra etapa.



(a) Desplazamientos verticales



(b) Zonas plásticas en el contacto suelo -suelo a lo largo del pilote



(c) Vista en planta de la zona de plastificación alrededor del pilote

Figura 23. Resultados en términos de desplazamientos y zonas de plastificación alrededor del pilote para el último incremento de carga a tensión.

Al emplear los elementos interfase es posible observar la distribución de esfuerzos cortantes en el alma y los patines del perfil, como se muestra en la Figura 24. Se observa la concentración de los esfuerzos en los cortantes máximos en los patines del perfil, siendo menores en el alma, nuevamente confirmando que la falla se da entre el área de los patines y no en el alma del perfil.

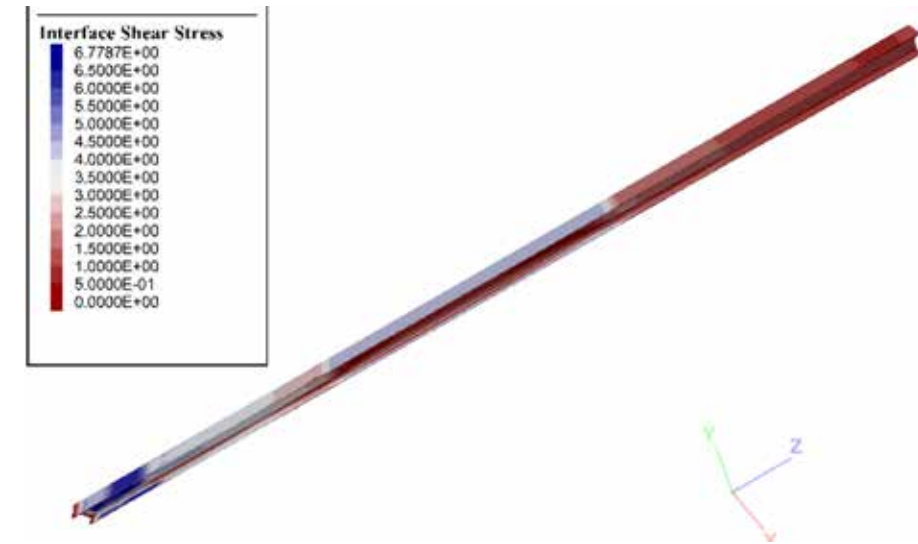


Figura 24. Esfuerzos de cortante en la Interfase durante el último incremento de carga a tensión axial.

5. CONCLUSIONES

Las simulaciones numéricas expuestas en este trabajo permitieron establecer que el uso de elementos interfase es importante para representar adecuadamente el comportamiento de la interacción suelo-pilote, siendo un valor de 0.7 adecuado como factor de adherencia.

Tanto las simulaciones a compresión como a tensión permitieron visualizar las zonas de plastificación y el mecanismo de falla entre el suelo y el perfil de acero, que, dada la configuración geométrica de este último, requiere un análisis más detallado para la compresión del área transversal que debe usarse en el cálculo de la capacidad de carga de estos elementos.

El uso de un modelo constitutivo simple en conjunto con un modelo 3D que incluye explícitamente la configuración geométrica del pilote y los elementos interfase entre el contacto suelo-pilote considerando factores de adherencia es posible representar el comportamiento mecánico de pilotes de acero IR ante carga axial.

Hace faltan más estudios experimentales en pilotes IR mediante pruebas de carga lateral, esto ayudará a realizar calibraciones de los modelos numéricos empleados en los diseños haciéndolos más eficientes.

REFERENCIAS

Duncan, O., Rojiani y Barker (1991). "Design of Piles for Lateral Loading, Chapter 5", TRB #343, page. 80-97.

Eurocode 3. (2007). EN 1993-5: Design of Steel Structures. Parte 5: Piling Section 4, Durability. Bruselas.

Itasca Consulting Group. (2020). "FLAC, fast langragian analysis of continua." User's Guide. Minneapolis, Minnesota, USA.

Gerdau Corsa (2018). Manual de pilotes metálicos.

Misir G. Y Laman M. (2020). Numerical modelling of full scale lateral load test. European Journal of Science and Technology (18), 454-564.

Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de cimentaciones del Reglamento de Construcción del Distrito Federal, NTCDCC-DF (2017). México: Gobierno del Distrito Federal.

Raddatz D., Taiba O. Modelling of a lateral load test on piles using simplified and numerical methods. J. S. Afr. Inst. Civ. Eng. 2016;58(3), Art. #1195, 8 pages.

Reese, L. C., Cox, W. R. y Smith, R. E. (1970). "Analysis of laterally Loaded Piles in Sand." Proc. 6th Offshore Tech. Conf., Houston, paper OTC 2080: 473-483.

Santos D. (2020). Comportamiento de un pilote de acero IR a partir de pruebas de carga en zona de transición. Tesis de Maestría. IPN. ESIA, UZ.

Seo H., Zeynep I. Y Prezzi M. (2009). Assessment of the axial load response of an H pile driven in multilayered soil.

Tomlinson, M., & Woodward, J. (2007). Pile Design and Construction Practice. New York: Taylor & Francis.

CREAMOS SOLUCIONES INTEGRALES CON PILOTES DE ACERO PARA CIMENTACIONES PROFUNDAS

VENTAJAS DE CONSTRUIR CON PILOTES DE ACERO



Calidad desde su fabricación



Fabricación y ejecución sustentable



Simplificación logística



Idóneo para trabajar en espacios reducidos



Facilidad y rapidez en el hincado



Optimización de la mano de obra



Alta resistencia pilote vs. terreno



Inicio inmediato con la superestructura



DIRECTORIO

OFICINAS COMERCIALES

T. +52 55 5262 7300 / Av. Ejército Nacional 216 P.2, Anzures, Miguel Hidalgo, CDMX, 11590.

ÁREA DE DESARROLLO DE MERCADO

desarrollodemercado@gerdau.com

PLANTAS

CD. SAHAGÚN

T. +52 791 913 8105 / Km. 3 Ctra. Mex - Cd. Sahagún, Zona Ind. Tepeapulco, Cd. Sahagún, Hidalgo, 43990

TULTITLÁN

T. +52 55 5894 0044 / 2487 2065 / Primera Sur S/N, Independencia, Tultitlán, Edo. de México, 54915

LA PRESA

T. +52 55 5003 4030 / 5062 1916 / Av. La Presa 2, Zona Industrial La Presa, Tlalnepantla, Edo. De México, 54187

DISTRIBUCIÓN

CDMX

T. +52 55 5089 8930 / Año 1857 8, Ticomán, Gustavo A. Madero, CDMX, 07330

MONTERREY

T. +52 81 8748 7610 / Blvd. Carlos Salinas de Gortari 404, Centro Apodaca, Nuevo León, 66600

PATIOS DE CHATARRA Y CENTROS DE RECOLECCIÓN

CD. SAHAGÚN

T. +52 791 9138 105 / Km. 3 Ctra. Mex - Cd. Sahagún, Zona Ind. Tepeapulco, Cd. Sahagún, Hidalgo, 43990

LA PRESA

T. +52 55 5003 4030 / 5062 1916 / Av. La Presa 2, Zona Industrial La Presa, Tlalnepantla, Edo. de México, 54187

LOS REYES

T. +52 55 5856 1651 / Tepozanes Los Reyes, Acaquilpan, México, 56428

GUADALAJARA

T. +52 33 3668 0285 / 36702769 / Av. 18 de Marzo 531, La Nogalera, Guadalajara, Jalisco, 44470

SAN JUAN

T. +52 55 2603 3275 / 5262 7359 / San Juan 669, Granjas Modernas, CDMX, 07460

TULTITLÁN

T. +52 55 5894 0044 / 2487 2065 / Primera Sur S/N, Independencia, Tultitlán, Edo. de México, 54915

VERACRUZ

T. +52 229 923 1359 / Ctra. Fed. Aluminio L. 7 o Camino Puente Roto Km. 1.5, Nuevo Veracruz, Veracruz, 91726

gerdaucorsa.com.mx



Gerdau Corsa. El futuro se moldea.



GERDAU CORSA

El futuro se moldea

gerdaucorsa.com.mx

