



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**“ESTUDIO COMPARATIVO DE PROCEDIMIENTOS PARA LA OBTENCIÓN DE LA
CARGA ÚLTIMA EN PRUEBAS DE CARGA ESTÁTICA PARA PILAS Y PILOTES”**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN GEOTECNIA

PRESENTA:

ING. BRENDA JANETTE MORALES GRANDE

DIRECTOR DE TESINA: M.I. WALTER IVÁN PANIAGUA ZAVALA

CIUDAD DE MÉXICO,

AGOSTO 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Quiero expresar mis agradecimientos a todas aquellas personas y entidades que de manera directa o indirecta contribuyeron y colaboraron en el desarrollo de la presente tesina.

De manera especial a mis padres y hermana por el apoyo incondicional en mi decisión de realizar mis estudios de posgrado.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por el respaldo y apoyo durante mis estudios de licenciatura y estudios de posgrado.

Al M.I. Walter Paniagua y a Pilotec, por guiarme durante la realización de este trabajo.

A mis amigos y compañeros, por brindarme su apoyo y enseñanzas durante esta etapa de mi vida.

*A mi madre Marina, a mi hermana
Yunuen, a Jaime S. y a Cesar Q. por
brindarme su apoyo incondicional.*

"El sueño es una divinidad sumamente caprichosa, y justamente se hace del rogar más cuando más se le invoca."

Alexandre Dumas

Contenido

| | |
|---|----|
| Resumen | 4 |
| Introducción | 5 |
| Objetivos | 6 |
| 1. Conceptos Generales..... | 6 |
| 1.1. Definiciones de cimentaciones profundas | 6 |
| 2. Tipos de cimentaciones profundas | 7 |
| 2.1. Según la forma de como transmiten las cargas al subsuelo..... | 7 |
| 2.1.1. Pilotes o pilas de punta:..... | 8 |
| 2.1.2. Pilotes de fricción..... | 9 |
| 2.1.3. Anclaje por fricción | 10 |
| 2.1.4. Pilas y Pilotes inclinados | 11 |
| 2.2. Según el material de fabricación | 11 |
| 2.3. Según el procedimiento constructivo..... | 12 |
| 3. Pruebas de Carga para pilas y pilotes..... | 12 |
| 3.1. Tipos de pruebas..... | 13 |
| 4. Diseño de las pruebas de carga..... | 14 |
| 4.1. Caracterización geotécnica en sitios de pruebas..... | 14 |
| 4.2. Predicciones teóricas para el diseño de pruebas de carga | 15 |
| 4.3. Procedimientos de prueba de carga axial | 15 |
| 4.3.1. Procedimiento A: Quick Test (Ensayo rápido) | 16 |
| 4.3.2. Procedimiento B: Maintained Test (Ensayo de carga sostenida) | 17 |
| 4.3.3. Procedimiento C: Loading in Excess of Maintained Test | 18 |
| 4.3.4. Procedimiento D: Constant Time Interval Loading Test | 18 |
| 4.3.5. Procedimiento E: Constant Rate of Penetration Test | 19 |
| 4.3.6. Procedimiento F: Constant Movement Increment Test | 19 |
| 4.3.7. Procedimiento G: Cyclic Loading Test | 20 |
| 4.4. Sistemas de reacción de pruebas de carga estática..... | 22 |
| 4.4.1. Plataforma con lastre: | 22 |

| | | |
|--------|--|----|
| 4.4.2. | Sistemas hidráulicos, y marcos de reacción..... | 23 |
| 4.5. | Instrumentación | 26 |
| 4.6. | Interpretación de resultados | 28 |
| 5. | Métodos para obtener la carga ultima en pruebas de carga. | 29 |
| 5.1. | Método de Davisson (1972) | 30 |
| 5.2. | Hirany y Kulhawy (1989) | 31 |
| 5.3. | De Beer (1967) | 32 |
| 5.4. | Método de Chin y Kondner (1970) | 33 |
| 5.5. | Método de Decourt (1999; 2008) | 34 |
| 5.6. | Tabla resumen | 35 |
| 6. | Casos de estudio..... | 35 |
| 6.1. | Información del proyecto | 36 |
| 6.2. | Procedimiento constructivo..... | 37 |
| 6.3. | Sistemas de reacción..... | 38 |
| 6.4. | Sistemas de instrumentación | 39 |
| 6.5. | Equipo de carga | 39 |
| 6.6. | Procedimiento de la prueba de carga..... | 40 |
| 6.7. | Programa de carga | 41 |
| 6.8. | Gráficas carga-desplazamiento..... | 43 |
| 6.9. | Métodos para obtener la carga última | 46 |
| 6.9.1. | Método de Davisson..... | 46 |
| 6.9.2. | Método de Hirany y Kulhawy | 49 |
| 6.9.3. | Método de Beer..... | 51 |
| 6.9.4. | Método de Chin y Kondner | 54 |
| 6.9.5. | Método de Decourt | 56 |
| 6.10. | Tabla resumen..... | 59 |
| 7. | Conclusiones..... | 59 |
| 8. | Anexos..... | 61 |
| 9. | Bibliografía..... | 63 |

Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 Criterio de clasificación de pilas y pilotes, Manual de diseño y construcción de pilas y pilotes, SMMS, 1983. | 7 |
| Figura 2.2 Clasificación de pilas y pilotes, según como transmiten la carga al suelo, Manual de diseño y construcción de pilas y pilotes, SMMS, 1983..... | 7 |
| Figura 2.3 Pilotes de punta, Manual de diseño y construcción de pilas y pilotes, SMMS, 1983..... | 8 |
| Figura 2.4 Pilas de punta, Manual de diseño y construcción de pilas y pilotes, SMMS, 1983. | 8 |
| Figura 2.5 Pilas y pilotes empotrados en el estrato resistente, Manual de diseño y construcción de pilas y pilotes, SMMS, 1983. | 9 |
| Figura 2.6 Pilas y pilotes de fricción, Manual de diseño y construcción de pilas y pilotes, SMMS, 1983..... | 9 |
| Figura 2.7 Curva carga-desplazamiento típica de una sujeta a carga axial..... | 10 |
| Figura 2.8 Pilote de anclaje, Manual de diseño y construcción de pilas y pilotes, SMMS, 1983..... | 10 |
| Figura 2.9 Pilotes inclinados, Manual de diseño y construcción de pilas y pilotes, SMMS, 1983..... | 11 |
| Figura 2.10 Clasificación de pilas y pilotes según su procedimiento constructivo, Manual de Diseño y Construcción de Pilas y Pilotes, SMMS, 1983. | 12 |
| Figura 3.1 Tipos de pruebas de carga de pilotes y pilas, Ingeniería de cimentaciones profundas, SMIG, 2017. | 13 |
| Figura 4.1 Procedimientos de carga recomendados por la norma ASTM D1143/D1143M-07, Ingeniería de cimentaciones profundas, SMIG, 2017..... | 21 |
| Figura 4.2 Plataforma con lastre, Manual de Diseño y Construcción de Pilas y Pilotes, Modificado de SMIG 1983. | 22 |
| Figura 4.3 Plataforma con lastre, pruebas de carga en pilotes, GERDAU CORSA. | 23 |
| Figura 4.4 Pilotes inclinados, Manual de Diseño y Construcción de Pilas y Pilotes, Modificado de SMIG 1983..... | 24 |
| Figura 4.5 Sistema de reacción con 4 pilotes en línea, Ingeniería de cimentaciones profundas, SMIG, 2017..... | 24 |
| Figura 4.6 Sistema de reacción, Viaducto Carlos Hank González, Circuito Exterior Mexiquense, (Pilotec, 2007) | 25 |
| Figura 4.7 Sistema de reacción vista en planta, Viaducto Carlos Hank González, Circuito Exterior Mexiquense, (Pilotec, 2007).... | 25 |
| Figura 4.8 Ejemplo de arreglo general de gatos hidráulicos, celdas de carga, indicadores de carátula y transductores de desplazamiento en el cabezal de la pila de prueba..... | 27 |
| Figura 4.9 Colocación de la instrumentación en el cuerpo de la pila y la instalación de la celda de carga en la punta, cortesía de Pilotec..... | 28 |
| Figura 4.10 Curvas típicas Carga-Desplazamiento, presentadas en pruebas de carga axial en pilas. | 29 |
| Figura 5.1 Grafica de carga-desplazamiento según el método de Davisson, Basics of Foundation Design, Bengt H. Fellenius, 2017. | 30 |
| Figura 5.2 Regiones de la curva carga-desplazamiento, Evaluation of Side Resistance Capacity for Drilled Shafts, Journal of Marine Science and Technology (2011)..... | 31 |
| Figura 5.3 Grafica de la curva carga-desplazamiento con doble logaritmo según el criterio De Beer, Basics of Foundation Design, Bengt H. Fellenius, 2017..... | 32 |
| Figura 5.4 Metodo de Chin-Kondner, Basics of Foundation Design, Bengt H. Fellenius, 2017..... | 33 |
| Figura 5.5 Método de extrapolación de Decourt, Basics of Foundation Design, Bengt H. Fellenius, 2017. | 34 |

Resumen

Las cimentaciones son elementos indispensables para cualquier construcción estructural, por ello es importante comprender y calcular la capacidad de carga, especialmente cuando la solución a la cimentación de una estructura es profunda basada en pilas o pilotes debido a la magnitud de las cargas, o al tipo de suelo en las que están soportadas.

Para conocer las propiedades mecánicas del entorno de interés, es común realizar ciertas suposiciones basados en postulados teóricos que simplifican el diseño de una cimentación, sin embargo no se considera la presencia de una amplia gama de incertidumbres.

Las metodologías de análisis tradicional, según diferentes autores, basados en la teoría de plasticidad, sustentan que la capacidad de carga en elementos profundos como los pilotes es obtenida por la sumatoria de la fricción lateral y la resistencia por punta en el instante de carga máxima. Sin embargo, cabe anotar que dicha carga no necesariamente es igual a la suma de la carga en punta más la carga por fricción lateral, ya que puede ocurrir que no se movilicen simultáneamente y el estado de desplazamientos para alcanzarlas difiera, por lo que conviene realizar pruebas de cargas en los elementos de cimentación (pilas o pilotes), pues básicamente estas pruebas no son más que experimentar en escala real y por medio de instrumentación estar midiendo y observando el comportamiento del sistema cimentación- suelo.

Una de las cuestiones más importantes de las pruebas de carga es su correcta interpretación, ya que por lo costoso que es la cimentación se procura que las pilas o pilotes de prueba sean parte de la cimentación de la estructura por lo que no siempre se lleva a su capacidad última.

Este trabajo presenta siete criterios para determinar la carga última en pruebas de carga estáticas en pilas o pilotes, según los autores Davisson, Hirany, Kulhawy, De Beer, Decourt, Chin y Kondner, los cuales se aplicarán y compararán en las pruebas de carga estáticas (cortesía de Pilotec) para estimar la capacidad última.

Introducción

De los retos y problemáticas a los que se enfrentan los ingenieros encargados del diseño de cimentaciones profundas es poder estimar adecuadamente la capacidad de carga de las pilas o pilotes que conforman la cimentación de la estructura, la experiencia más reciente ha mostrado que los modelos tradicionales están siendo rebasados por la complejidad de respuesta de los sistemas suelo-estructura. Las incertidumbres generadas por factores que intervienen en la construcción, los materiales que conforman la cimentación, los parámetros e hipótesis que se consideraran para el sistema cimentación-suelo, además de las consideraciones del comportamiento mecánico de los suelos en el sitio, lo que con lleva a recomendar la ejecución de pruebas de carga.

Por lo anterior, es necesario confirmar que el comportamiento de las pilas o pilotes en el suelo y la estructura esté respondiendo de acuerdo con las suposiciones del diseño, la manera más común para evaluar el comportamiento de la cimentación profunda es mediante el ensayo de carga estática, cuyo objetivo principal es la determinación de la capacidad de carga, desplazamiento al aplicar carga, módulo de rigidez, etc.

En este trabajo se busca evaluar y comparar diferentes métodos para estimar la carga última de un pilote o pila individual por medio de pruebas de carga estática que como requisito mínimo el ensayo debe realizarse y reportarse de acuerdo con las recomendaciones ASTM (D 1143 y D 3689) para carga axial (compresión y tracción, respectivamente), teniendo en cuenta que las recomendaciones se refieren a ensayos de rutina. Los ensayos para propósitos especiales pueden necesitar reglas de ejecución más estrictas. Para ello se analizarán diferentes pruebas de carga estática para pilas situados bajo condiciones estratigráficas diversas, utilizando métodos y criterios para interpretar sus resultados.

La información empleada fue producto de una recopilación de datos suministrados por la empresa Pilotec, que durante su trayectoria ha tenido una gran experiencia en el campo.

Objetivos

Estudiar cinco metodologías propuestas por diferentes autores para calcular la capacidad de carga última mediante resultados de pruebas de carga estáticas, basados en la norma ASTM, realizadas a pilas en diferentes partes de la República Mexicana de tal forma que se evalúen y comparen los resultados obtenidos para guiar a los participantes de los proyectos en la toma de decisiones más acertadas y acotadas.

1. Conceptos Generales

1.1. Definiciones de cimentaciones profundas

El uso de cimentaciones profundas surge a partir de dar una adecuada solución para soportar las solicitaciones impuestas por la estructura que involucra diferentes factores como: el tipo de estructura, la naturaleza de las cargas, las condiciones del suelo, etc.

En el diseño y construcción de una cimentación se busca que el suelo sobre el cual está apoyada cumpla con dos requisitos fundamentales:

- Que tenga la capacidad suficiente para soportar adecuadamente las cargas provenientes de la estructura (estado límite de falla)
- Que la compresibilidad del suelo permita soportar esas cargas sin rebasar los asentamientos que para el proyecto se marquen como admisibles (estado límite de servicio)

Generalmente el primer criterio rige el diseño de la cimentación más eficiente, al desplantarla en estratos lo más superficiales posible, buscando un proyecto económico, sin embargo, cuando ninguno de los requisitos se cumplen en estratos superficiales es necesario cimentarse en estratos más profundos cuya resistencia y compresibilidad sean más adecuadas, generando lo que se conoce como cimentación profunda.

2. Tipos de cimentaciones profundas

Según el Manual de diseño y construcción de pilas y pilotes de SMMS de 1983 las cimentaciones profundas se pueden clasificar según la forma de como transmiten la carga al subsuelo, el material de fabricación y por el procedimiento constructivo; a continuación se presenta una breve descripción de la clasificación.

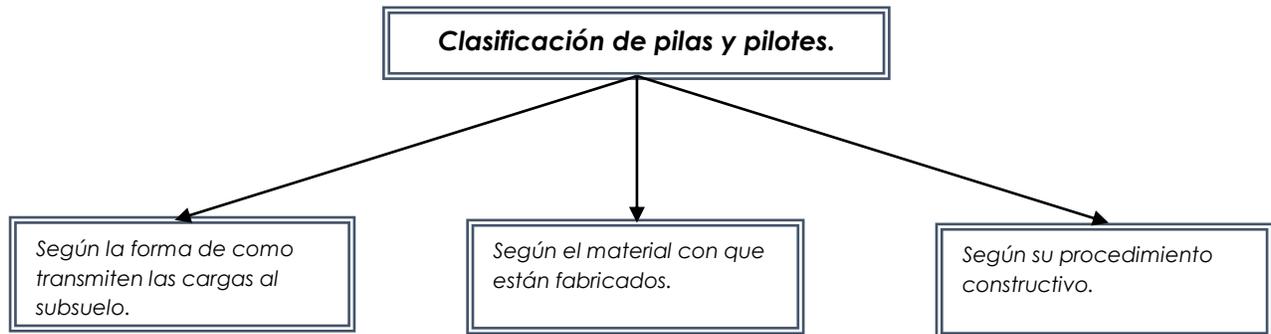


Figura 2.1 Criterio de clasificación de pilas y pilotes, Manual de diseño y construcción de pilas y pilotes, SMMS, 1983.

2.1. Según la forma de como transmiten las cargas al subsuelo.

Las pilas o pilotes generalmente se diseñan y se construyen para poder transmitir las cargas verticales a estratos más resistentes, se pueden transmitir ya sea por fricción o por punta, también pueden ser utilizados para anclar estructuras en suelos expansivos y para resistir cargas horizontales.

En condiciones de trabajo normal las pilas o pilotes están sujetas a carga axial, carga lateral y momentos de flexión y/o torsión, la aplicación de pruebas de carga estáticas en este trabajo versa únicamente en fuerza axial a compresión.

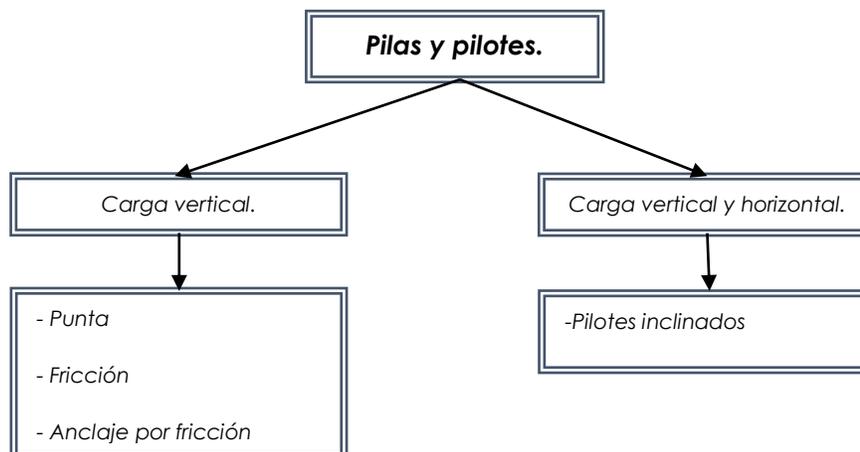


Figura 2.2 Clasificación de pilas y pilotes, según como transmiten la carga al suelo, Manual de diseño y construcción de pilas y pilotes, SMMS, 1983.

2.1.1. Pilotes o pilas de punta:

Se utilizan cuando el suelo superficial es de baja resistencia al esfuerzo cortante, si se trata de suelos compresibles.

Utilizando pilotes o pilas de punta desplazados en un estrato resistente, las cargas de la superestructura pueden transmitirse a estratos más competentes e incluso aumentar la capacidad de carga por fricción positiva si el pilote o la pila se empotrara a cierta profundidad del estrato resistente, en el caso de pilotes se recomienda que sea a una profundidad de 4 a 10 veces la dimensión horizontal, para el caso de pilas se puede acampanar su base y empotrarse a la profundidad que sea posible constructivamente.

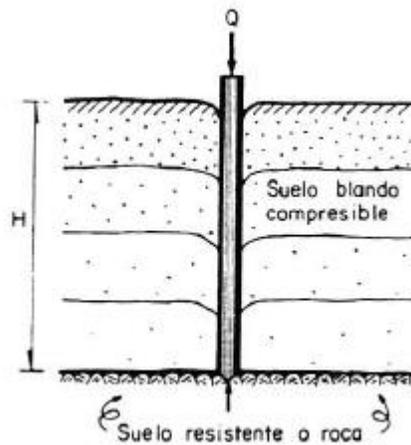


Figura 2.3 Pilotes de punta, Manual de diseño y construcción de pilas y pilotes, SMMS, 1983.

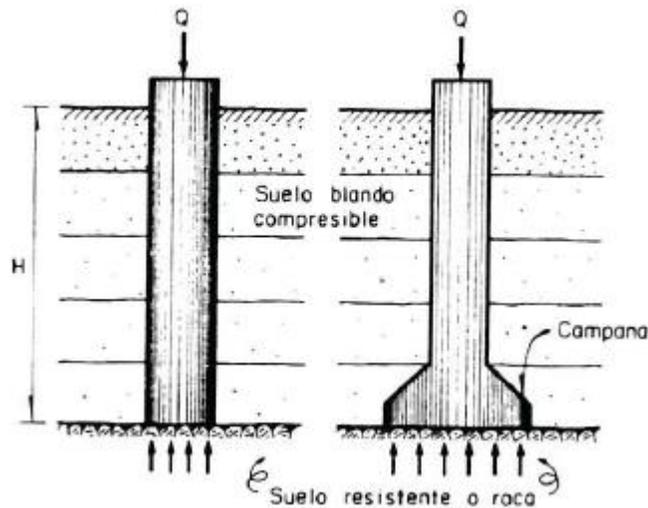


Figura 2.4 Pilas de punta, Manual de diseño y construcción de pilas y pilotes, SMMS, 1983.

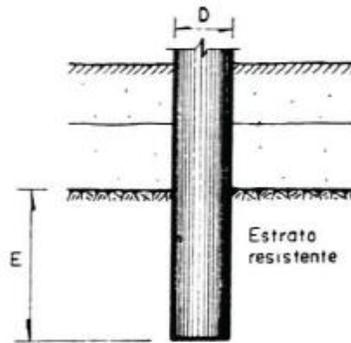


Figura 2.5 Pilas y pilotes empotrados en el estrato resistente, Manual de diseño y construcción de pilas y pilotes, SMMS, 1983.

2.1.2. Pilotes de fricción

Se utilizan para transmitir la carga de la superestructura al suelo que los rodea, esta solución normalmente se da cuando no se encuentra con ningún estrato resistente o cuando el sitio sufre de asentamientos regionales.

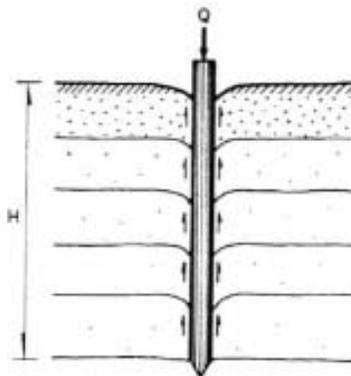


Figura 2.6 Pilas y pilotes de fricción, Manual de diseño y construcción de pilas y pilotes, SMMS, 1983.

Como se ha comentado anteriormente, el comportamiento general de pilas o pilotes depende de varios factores, entre estos la capacidad de carga, la cual se define como el aporte total desarrollado por la punta del elemento más la fricción que genera el fuste de la pila o pilote como se presenta en las siguientes expresiones.

$$Q_{ult} = Q_{punta} + Q_{fuste}$$

$$Q_{punta} = (A_p)(q_p)$$

$$Q_{fuste} = (A_f)(q_f)$$

Donde:

A_p = área de la base de los pilotes

A_f = área de la fricción positiva

Q_p = resistencia de punta

Q_f = resistencia por fricción lateral

A continuación se presenta la gráfica carga-desplazamiento de una pila cargada axialmente. La curva superior representa la respuesta a la carga total aplicada en la cabeza de la pila, mientras que las otras dos curvas corresponden a las componentes de la carga de fuste y de punta.

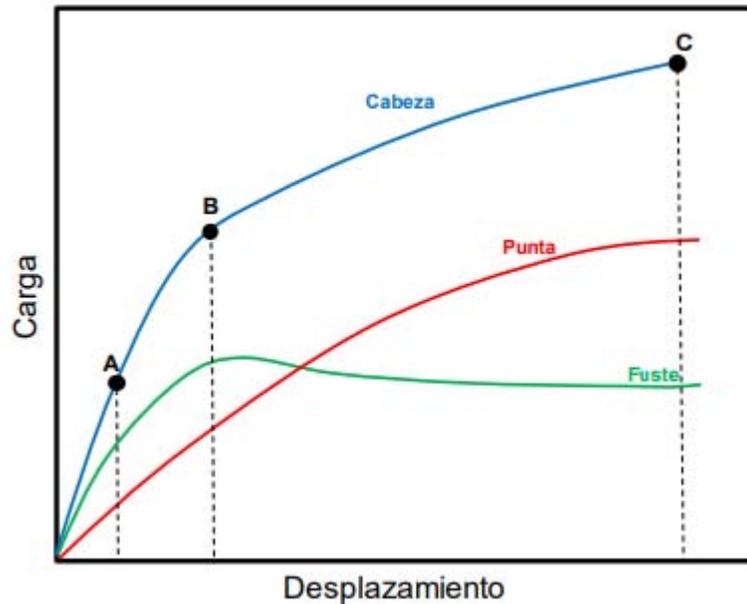


Figura 2.7 Curva carga-desplazamiento típica de una sujeta a carga axial, (Chen y Kulhawy, 1994).

2.1.3. Anclaje por fricción

Se utilizan en suelos arcillosos que por su espesor no pueden ser removidos; con estos elementos se pueden controlar los movimientos que ocurren en la superficie de este tipo de suelos, también se utilizan para controlar el bufamiento por excavación en suelos arcillosos.

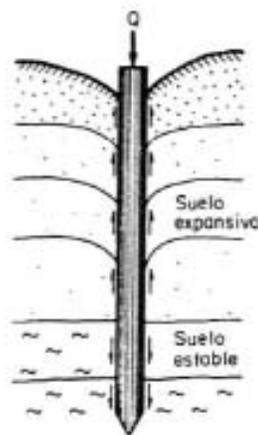


Figura 2.8 Pilote de anclaje, Manual de diseño y construcción de pilas y pilotes, SMMS, 1983.

2.1.4. Pilas y Pilotes inclinados

Los pilotes inclinados se utilizan para tomar las cargas horizontales ya sea cargas permanentes o temporales, para un correcto funcionamiento se orientan según la dirección de la fuerza horizontal, aunque también se puede dar un acomodo en varias direcciones para soportar las fuerzas horizontales.

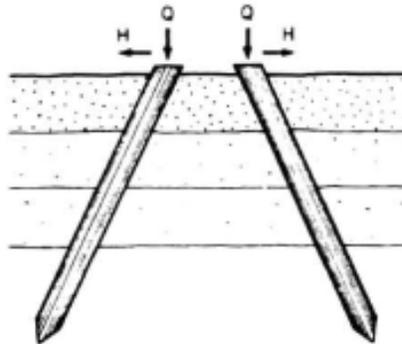


Figura 2.9 Pilotes inclinados, Manual de diseño y construcción de pilas y pilotes, SMMS, 1983.

2.2. Según el material de fabricación

La clasificación de acuerdo al material únicamente aplica para pilotes, ya que las pilas son coladas en sitio, puede ser concreto simple (pilas cortas) o concreto reforzado.

Los materiales con que se fabrican los pilotes normalmente son: de concreto reforzado, presforzado o postensado, de acero o mixtos debido a la facilidad que se tienen al ligar con la superestructura, en la literatura técnica se menciona la utilización de pilotes de madera, aunque en nuestros días los pilotes de madera están en desuso, el problema principal es que hay que estar seguro que la calidad estructural de la madera es uniforme y alta para que no haya peligro de que los pilotes se rompan durante el hincado; debido a su carácter orgánico, los pilotes de madera aguantan mal las variaciones de humedad, por lo que deben quedar completamente embebidos en un nivel freático estable, o por el contrario con carencia absoluta de agua, además de generar un daño ambiental causado por la deforestación masiva que implica su fabricación.

2.3. Según el procedimiento constructivo

Con los avances tecnológicos se han desarrollado numerosos procedimientos constructivos tanto para la fabricación como para la instalación de pilas y pilotes, la característica fundamental que debe evaluarse para su clasificación son los desplazamientos del suelo que los rodea.

Como se mencionó anteriormente las pilas son coladas in situ, realizando una perforación para que posteriormente se coloque el armado y el concreto, por ello las pilas son clasificadas del tipo sin desplazamiento.

Por otra parte, los pilotes pueden ser clasificados con desplazamiento, con poco desplazamiento.

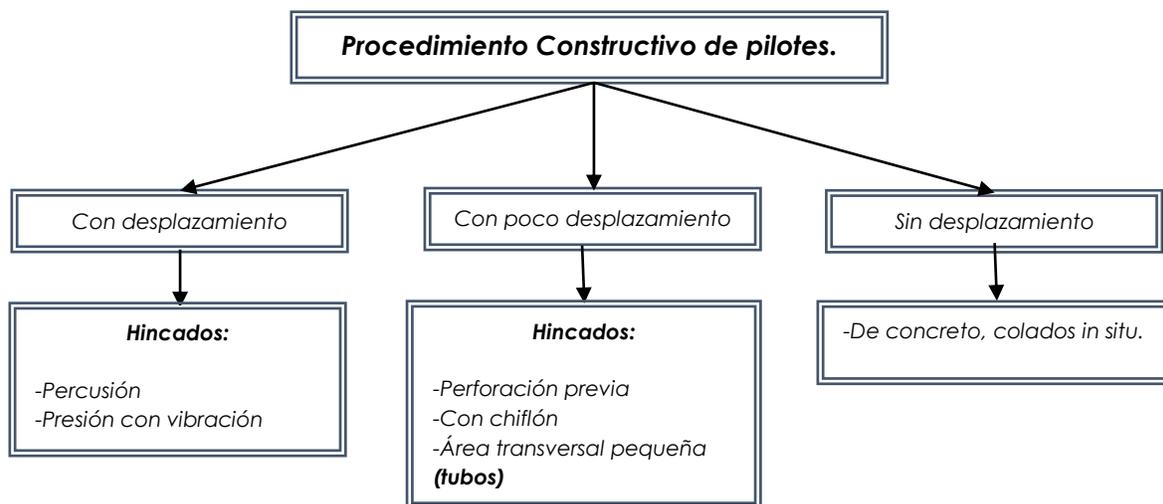


Figura 2.10 Clasificación de pilas y pilotes según su procedimiento constructivo, Manual de Diseño y Construcción de Pilas y Pilotes, SMMS, 1983.

3. Pruebas de Carga para pilas y pilotes.

Las solicitaciones actuales para la construcción de una obra civil son cada vez más estrictas, por lo que al realizar pruebas de carga en los sistemas de cimentaciones profundas (pilas o pilotes) se puede evaluar la respuesta carga - desplazamiento en condiciones representativas de la solución de cimentación en el medio y conocer un mejor comportamiento del sistema.

Es importante hacer el estudio del suelo de desplante y pruebas necesarias en el laboratorio para obtener datos acertados y menor incertidumbre en los análisis a realizarse, sin embargo existen otras variables constructivas de la cimentación que puede cambiar completamente el modelo.

Las pruebas de carga deben establecerse durante el diseño de la cimentación, sin embargo en algunos proyectos únicamente se utiliza para validar el diseño antes de la construcción o verificar que se cumplan las especificaciones del proyecto.

3.1. Tipos de pruebas

Existe gran variedad de pruebas de carga que estudian diferentes objetivos, las pruebas de carga pueden realizarse en pilotes o pilas convencionales y en elementos instrumentados, con cargas estáticas axiales o de extracción, con cargas estáticas laterales o cargas estáticas combinadas, en el primer caso los elementos que se persiguen son:

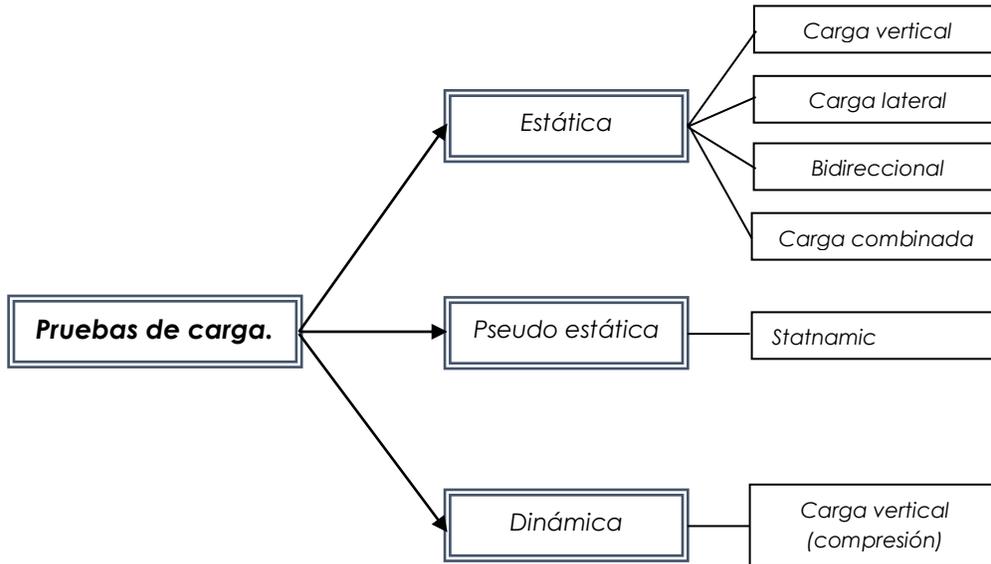


Figura 3.1 Tipos de pruebas de carga de pilotes y pilas, Ingeniería de cimentaciones profundas, SMIG, 2017.

La estrategia de las pruebas de carga debe dirigirse a objetivos claros y específicos, entre lo que se busca:

- Minimizar el riesgo de la incertidumbre del medio, sobre experiencia del contratista y de nuevos procedimientos constructivos que pudieran emplearse.
- Optimizar el diseño de pilas y pilotes en cuanto a su dimensionamiento, geometría, factor de seguridad y procedimiento constructivo.
- Confirmar los criterios de diseño y construcción de la cimentación.
- Verificar que el comportamiento de las pilas o pilotes cumplan con los requerimientos del proyecto (estado límite de servicio y estado límite de falla).
- Evaluar la factibilidad del procedimiento constructivo, problemas particulares del suelo (expansibilidad, subsidencia, remoldeo durante la construcción o cambios de esfuerzos, etc.)
- Determinar o verificar la capacidad de carga de diseño del cimiento (se puede distinguir la capacidad de carga por fuste y por punta)
- Conocer la curva carga-desplazamiento en la cabeza de la pila.

Para alcanzar los objetivos mencionados una prueba de carga puede diseñarse simulando las condiciones carga-tiempo, considerando la información geotécnica y el diseño preliminar de la cimentación. Es importante destacar que cada proyecto deberá evaluar el tipo de prueba que mejor se adapte a sus objetivos.

4. Diseño de las pruebas de carga

Para el diseño de pruebas de carga es necesario tener claridad de sus alcances y objetivos buscados para el proyecto, es importante destacar que las pruebas de carga se pueden requerir en etapas tempranas del proyecto de cimentación con la finalidad de determinar el diseño y el comportamiento del sistema, mientras que, también se pueden requerir como mecanismo para verificar y controlar los elementos de cimentación previamente diseñados y construidos.

Es conveniente mencionar que una prueba de carga no instrumentada dará resultados muy limitados, por lo que según los objetivos establecidos es recomendable considerar instrumentación en la cabeza de la pila o pilote o incluso en el cuerpo de los elementos sujetos a la prueba.

Cuando se requiere ensayar pilas o pilotes que deban soportar cargas muy altas, normalmente se ensayan pilas de menor diámetro y se extrapola los resultados a los elementos originales mediante un modelado numérico.

Por otra parte, una prueba de carga aplicada a un elemento individual, no da información sobre el trabajo en grupo de pilas o pilotes, por lo que se tendrán que la información obtenida se tendrá que calibrar a modelos numéricos con el fin de extrapolar el comportamiento a los grupos de pilas o pilotes de la cimentación definitiva.

Es importante considerar que el elemento de prueba debe ser representativo de los elementos de cimentación definitivos, incluyendo materiales y procedimientos de construcción, por lo que se evitara métodos o especificaciones excesivas para las pilas o pilotes de pruebas para contar con resultados extrapolables y aplicables a todo el proyecto.

4.1. Caracterización geotécnica en sitios de pruebas

El conocimiento a detalle de las condiciones stratigráficas, las condiciones hidráulicas y el comportamiento mecánico del sitio de prueba es fundamental para el diseño e interpretación de resultados.

Además de permitir una buena predicción del comportamiento del sistema de cimentación se puede elegir el procedimiento de carga adecuado y programar la instrumentación de la pila o pilote.

Se recomienda conocer por lo menos 10 B bajo la punta de la pila o pilote, donde B es el diámetro del elemento.

4.2. Predicciones teóricas para el diseño de pruebas de carga

Es indispensable que para el diseño de pruebas de carga se realice una predicción teórica del comportamiento de la pila o pilote, de tal forma que se puedan establecer cargas de diseño (Q_d), cargas esperadas (Q_u), procedimiento de carga, magnitud de los incrementos de carga, las deformaciones esperadas en el sistema pila-suelo, etc.

De no considerarse el análisis y el cálculo predictivo, puede conducir a una prueba mal programada, de tal forma que los incrementos de carga muy grandes o muy pequeños pueden causar una interpretación errónea de la prueba o incluso alcanzar una condición de falla geotécnica.

La predicción teórica del comportamiento no solo se ocupa para programar la prueba, sino para el diseño estructural de los elementos de reacción y el marco de carga.

4.3. Procedimientos de prueba de carga axial

Los procedimientos para pruebas de carga en compresión estática analizados para este trabajo son las descritas en la Norma ASTM D1143 (2013), la cual presenta 7 procedimientos para elaborar las pruebas.

- Procedimiento A: Quick Test (Ensayo rápido)
- Procedimiento B: Maintained Test (Ensayo de carga sostenida - opcional)
- Procedimiento C: Loading in Excess of Maintained Test (Ensayo de carga en exceso sostenida - opcional)
- Procedimiento D: Constant Time Interval Loading Test (Ensayo de carga con intervalo de tiempo constante - opcional)
- Procedimiento E: Constant Rate of Penetration Test (Ensayo de tasa constante de penetración opcional)
- Procedimiento F: Constant Movement Increment Test (Ensayo con incremento constante de desplazamiento - opcional)
- Procedimiento G: Cyclic Loading Test (Ensayo de carga cíclica - opcional)

4.3.1. Procedimiento A: Quick Test (Ensayo rápido)

Los incrementos que se aplican en la carga rápida son incrementos iguales al 5% de la carga prevista como carga última (Q_u) en intervalos de tiempo constantes, normalmente de 4 a 15 minutos, cada incremento debe de aplicarse inmediatamente después de la lectura del incremento anterior llevado a la pila o pilote a la falla geotécnica sin dañar o rebasar la capacidad estructural del sistema de reacción o el sistema de carga. La descarga debe realizarse con 5 a 10 decrementos usando el mismo intervalo de tiempo de la etapa de carga.

Las lecturas deben tomarse a los 0.5min, 1 min, 2 min y 4 min después de la completa aplicación de cada incremento de carga, y a 8 min y 15 cuando los incrementos de carga sean prolongados. En los decrementos de carga las lecturas serán de 1 min y 4 min después de aplicar la descarga y de igual manera si el tiempo es prolongado, se tomaran las lecturas a 8min y 15 min. Finalmente se tomaran las lecturas a 1 min, 4 min, 8 min y 15 min después de la descarga total.

La ventaja de la utilización de este procedimiento, es que con los intervalos de tiempo constantes pequeños y los incrementos de carga pequeños permite definir la curva carga desplazamiento, este procedimiento parece ser idóneo para cubrir gran variedad de proyectos y es el único procedimiento de la norma ASTM que no es calificado como *opcional*.

4.3.2. Procedimiento B: Maintained Test (Ensayo de carga sostenida)

A no ser que ocurra primero la falla geotécnica se deberá aplicar una carga acumulada del 200% de la carga de diseño (Q_d), o una carga acumulada de 150% de Q_d para un grupo de pilas de prueba. En ambos casos se aplicara incrementos de carga del 25% de Q_d . Cada incremento debe mantenerse hasta que la velocidad de desplazamiento vertical sea igual o menor que 0.25 mm/h con una recomendación de 1 h. Se procederá con la descarga si en el periodo de 1 h no se ha excedido el desplazamiento de 0.25 mm, de no ser el caso se mantendrá la carga máxima durante 12 h y posteriormente se procederá con la descarga del 25% de la carga máxima (Q_{max}) cada hora.

Las lecturas para los procedimientos B, C, D, y G se deben tomar de manera inmediata después de la aplicación del incremento correspondiente y a 5 min, 10 min y 20 min, y posteriormente a cada 20 min mientras sea necesario.

Tras la aplicación total de la carga (si la pila no ha fallado) se tomaran lecturas en los primeros 5 min, 20 min y 40 min y posteriormente a cada 20 min hasta las 2 h, posteriormente se tomaran lecturas a cada 2 h hasta sumar 12 h o 24 h con la carga máxima sostenida. Si la pila falló previamente, se tomarán lecturas inmediatamente antes de la aplicación del primer decremento de carga. Durante la descarga los intervalos de lectura serán de 20 min y las lecturas finales se realizarán después de la descarga total.

La desventaja principal de este procedimiento es que si se sobreestima o si se subestima Q_d se corre el riesgo de tener una prueba mal programada en la magnitud de incrementos de carga, por lo que los puntos de la curva carga vs asentamiento pueden ser muy pocos para definir la curva o habría una reserva de carga importante que no fue movilizada.

4.3.3. Procedimiento C: Loading in Excess of Maintained Test

(Ensayo de carga en exceso sostenida)

Si no se alcanzó la falla geotécnica al cabo de 8 incrementos del procedimiento B, y el sistema de reacción aún tiene capacidad, se puede aplicar carga en exceso a la máxima alcanzada ($2Q_d$).

Una vez descargada la pila, se recarga con incrementos del 50% de Q_d , con tiempo de espera de 20 min hasta alcanzar la capacidad del sistema o hasta presentarse la falla geotécnica. Si la falla ocurre, debe mantenerse la carga máxima posible hasta alcanzar un desplazamiento vertical de 15% el diámetro, si la falla no ocurre debe mantenerse la carga máxima durante 2 h, para que posteriormente se realice la descarga con cuatro decrementos de 20 min entre ellos.

4.3.4. Procedimiento D: Constant Time Interval Loading Test

(Ensayo de carga con intervalo de tiempo constante)

La carga se aplicada de manera similar al procedimiento B, con la diferencia de emplear incrementos de carga de 20% la carga de diseño Q_d con 1 h entre incrementos y 1 h entre decrementos, utilizando una magnitud de decrementos semejantes de la etapa de carga.

Para la carga máxima igual a 200% de Q_d , se tendrían 10 puntos en la curva carga vs asentamiento, si es que no alcanza la falla antes. La etapa de carga y descarga tendrá una duración aproximada de 20 h.

4.3.5. Procedimiento E: Constant Rate of Penetration Test

(Ensayo con velocidad constante de penetración)

Este procedimiento solo es recomendable cuando el sistema de aplicación de la carga es mediante gatos hidráulicos con un sistema que permita aplicar de manera controlada la presión o despresuración del sistema. La variación de la carga del sistema hidráulico permite mantener una velocidad de penetración constante de 0.25 a 1.25 mm/min en suelos finos o 0.75 a 2.5 mm/min en suelos granulares. Se aplicara la carga hasta alcanzar una velocidad de penetración constante, posteriormente se mantiene la carga máxima aplicada hasta que exista un desplazamiento vertical de 15% del diámetro de la pila.

Las lecturas se tomaran a cada 30 s o con la frecuencia que se requiera para determinar la velocidad instantánea la velocidad de penetración. Las lecturas durante la descarga son después de cada decremento y 1 h después de la descarga total.

4.3.6. Procedimiento F: Constant Movement Increment Test

(Ensayo con incremento constante de desplazamiento)

Las cargas se aplican de manera controlada para producir un desplazamiento aproximadamente de 1% del diámetro de la pila, se varia la carga de tal forma que se conserva constante el incremento de desplazamiento y no se incrementa la carga hasta que su variación sea menor que 1% de la carga total aplicada por hora. El criterio de falla es que se produzca un desplazamiento equivalente al 15% del diámetro o ancho de la pila.

La descarga debe realizarse con 4 decrementos de igual magnitud después de la variación de la carga en el último incremento sea menor al 1% de la carga total aplicada por hora. Después de realizar el primer decremento no se continuara con el segundo hasta que la variación del desplazamiento vertical sea menor que el 0.3% del diámetro o ancho de la pila por hora.

Para este procedimiento se realizan lecturas antes e inmediatamente después de la aplicación del incremento de carga o descarga, obteniendo las suficientes lecturas para determinar la carga necesaria para mantener el incremento de desplazamiento, además de tomar lecturas 12 h después de la descarga total.

4.3.7. Procedimiento G: Cyclic Loading Test

(Ensayo de carga cíclica)

Los incrementos de carga se realizan de manera semejante al procedimiento B, después de la aplicación de cargas equivalentes al 50%, 100%, y 150% de la carga de diseño (Q_d), se mantiene el último incremento de carga durante 1 h. Los decrementos se realizan de la misma manera que los incrementos, pero con una duración de 20 min entre ellos. Una vez que se terminó la descarga, se recarga ahora con cargas de 50% de Q_d en intervalos de 20 min, siguiendo el procedimiento B, se pueden realizar incrementos adicionales.

A continuación se presenta un resumen de forma esquemática de los procedimientos establecidos por las normas ASTM D1143 (2013), Figura 4.1.

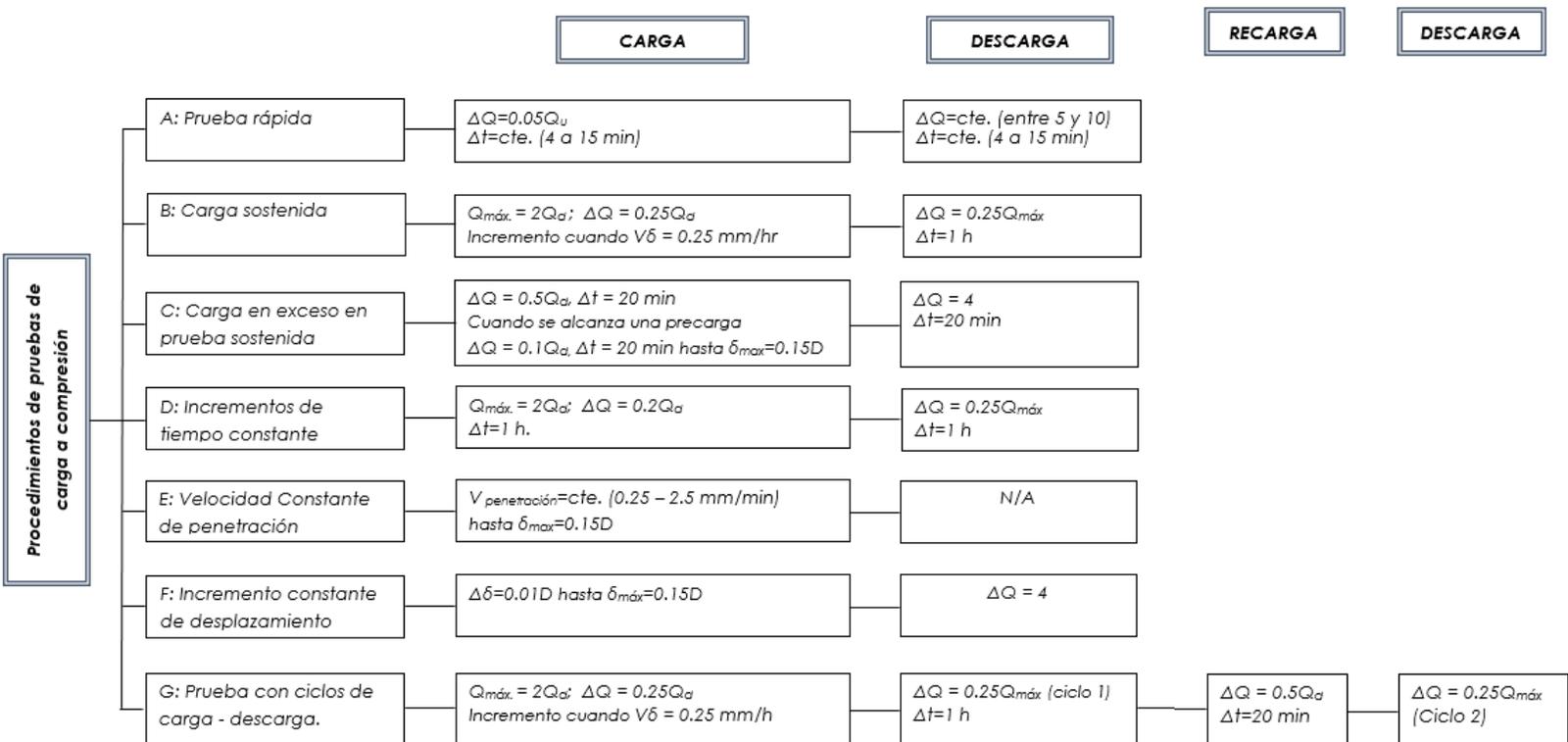


Figura 4.1 Procedimientos de carga recomendados por la norma ASTM D1143/D1143M-07, Ingeniería de cimentaciones profundas, SMIG, 2017.

4.4. Sistemas de reacción de pruebas de carga estática.

En la ejecución de pruebas de carga estáticas se tiene una gran variedad de diseños de reacción, según las condiciones de sitio y el espacio disponible en campo, entre otros aspectos.

Los sistemas de reacción, se pueden clasificar en aquellos que usan una plataforma con lastre, los que usan pilas, pilotes o anclas que trabajan a tensión empleando una viga metálica o viga de concreto. Estos sistemas deben ser estables y seguros en todo momento, cuidando que las cargas que transmite al suelo no influyan en el comportamiento de la pila o pilote de la prueba.

4.4.1. Plataforma con lastre:

Es un sistema que se basa en peso muerto como reacción, compuesta por vigas de acero que soportan el lastre, normalmente se utiliza cuando no se pueden instalar elementos como pilas o pilotes de reacción.

Su instalación se basa en una plataforma estable colocando apoyos laterales a una distancia mínima de $H_{\min} = B + 3.5 D$, recomendada por el Manual de Diseño y Construcción de pilas y pilotes, para mantener la estabilidad, Figura 4.2.

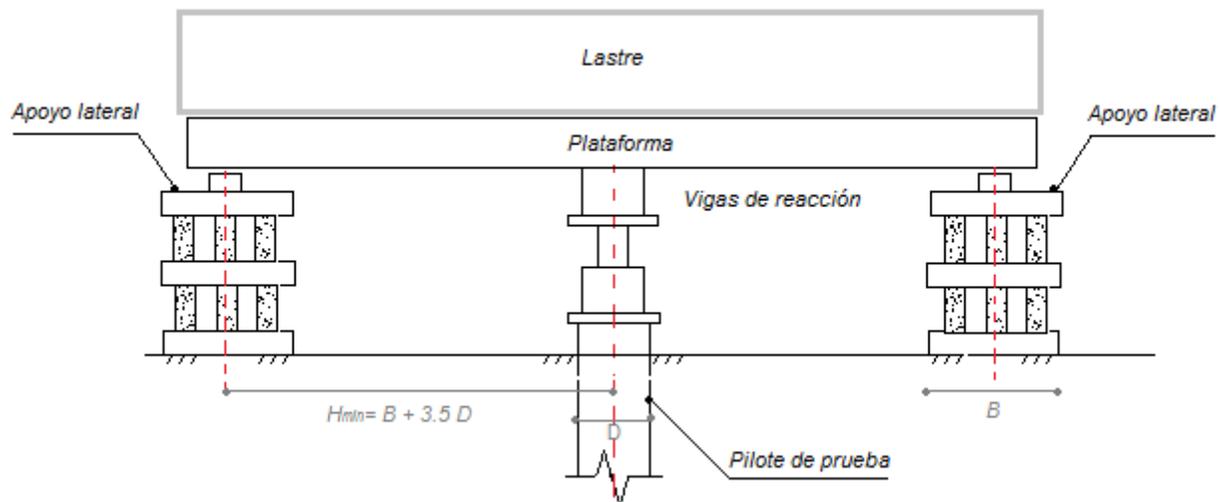


Figura 4.2 Plataforma con lastre, Manual de Diseño y Construcción de Pilas y Pilotes, Modificado de SMIG 1983.

La plataforma se coloca sobre el cabezal de la pila o pilote de prueba, a la cual se le van colocando pesos muertos de geometría regular, simétrica, y equilibrada, se debe operar con precaución, por el peligro de volteo que se presenta cuando falla el pilote o cuando el lastre es insuficiente y tiende a levantarse, normalmente se colocan bloques de concreto, vigas metálicas, etc. hasta acumular un peso de al menos 110% a 120%, según el libro de Ingeniería de cimentaciones profundas, 2017.

De las desventajas en este sistema de reacción, es la necesidad de abarcar grandes áreas debido a la plataforma, se recomienda un área de 15m x 15m, además de requerir maquinaria y transporte para la colocación y desmonte del peso muerto.



Figura 4.3 Plataforma con lastre, pruebas de carga en pilotes, GERDAU CORSA.

4.4.2. Sistemas hidráulicos, y marcos de reacción.

Los sistemas hidráulicos permite aplicar cargas de mayor magnitud y de forma controlada, es común utilizar sistemas de reacción conformados por pilas, pilotes o anclas que trabajan a tensión, los sistemas hidráulicos se colocan entre las vigas de reacción y el pilote, en cuyo caso la reacción proviene de lastre o de piezas ancladas.

Para absorber la reacción se pueden seguir dos criterios: utilizar pilotes inclinados o verticales; la primera solución es más recomendable porque se reduce la interacción entre los pilotes de reacción y el pilote de prueba.

4.4.2.1. Pilotes inclinados.

Los sistemas de reacción inclinados, conformados por pilotes que trabajan como anclas, se unen con vigas metálicas a través de barras de alta resistencia (dywidag), placas metálicas y tuercas, como se muestra en la Figura 4.4

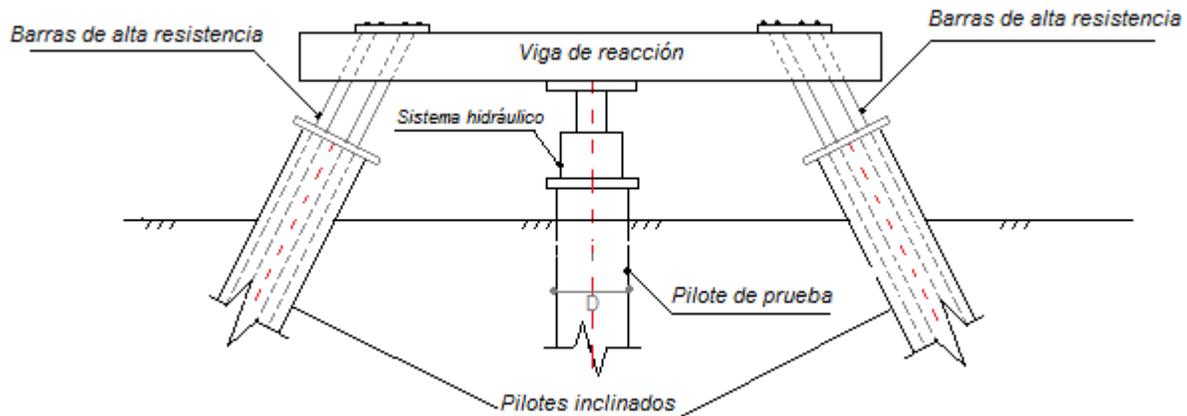


Figura 4.4 Pilotes inclinados, Manual de Diseño y Construcción de Pilas y Pilotes, Modificado de SMIG 1983.

4.4.2.2. Pilotes verticales.

El sistema con pilotes verticales es ventajoso económicamente porque se pueden aprovechar como anclaje los pilotes que formarán parte de la cimentación; en este caso debe cuidarse que estén alineados para que no existan excentricidades en la carga, además de rehincarlos para evitar una reducción de su capacidad por punta.

Conforme se requiera aumentar la capacidad de carga de reacción, se deberá aumentar la capacidad del sistema hidráulico de aplicación de cargas, además de aumentar la capacidad de carga de marco o incluso incrementar el número de elementos de reacción. Figura 4.5.

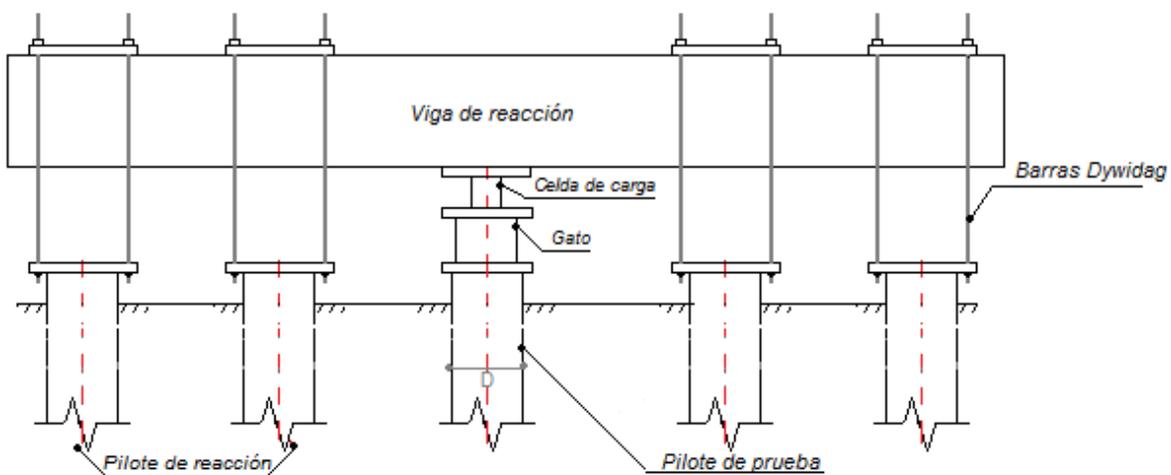


Figura 4.5 Sistema de reacción con 4 pilotes en línea, Ingeniería de cimentaciones profundas, SMIG, 2017



Figura 4.6 Sistema de reacción, Viaducto Carlos Hank González, Circuito Exterior Mexiquense, (Pilotec, 2007)

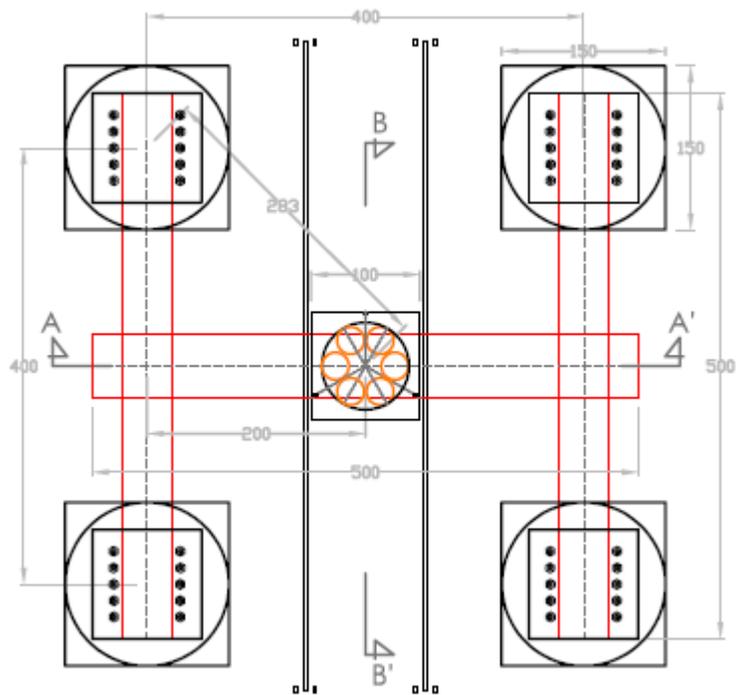


Figura 4.7 Sistema de reacción vista en planta, Viaducto Carlos Hank González, Circuito Exterior Mexiquense, (Pilotec, 2007)

Según el manual de Diseño y Construcción de Pilas y Pilotes, la distancia mínima entre los pilotes de anclaje inclinados y el de prueba se determina a partir de un estudio de cada caso particular. Si se usan pilotes verticales, la separación recomendable entre centros es de 10 veces el diámetro, aunque la norma ASTM admite una separación de 5 veces el diámetro de paño a paño (entre pila de prueba y pila de reacción), sin embargo se debe decir que la distancia de separación es un aspecto que pocas veces se cumple debido a los claros requeridos y en consecuencia los sistemas de reacción resultarían ser más robustos e imprácticos en la construcción y el montaje.

Es preferible tener un arreglo simétrico, lo ideal es tener en planta un cuadrado o un rectángulo formado por las pilas de reacción, ya que un arreglo de ese tipo garantiza mayor estabilidad y permite incrementar la distancia entre elementos de reacción, lo que permite minimizar el campo de esfuerzos generado entre elementos trabajando a extracción o a compresión.

4.5. Instrumentación

Como se ha explicado anteriormente, la instrumentación debe ser diseñada con el enfoque que se está buscando en la prueba, normalmente en las pruebas de carga convencionales únicamente se registra la carga aplicada en la cabeza y el desplazamiento asociado, sin embargo para pruebas de carga más sofisticadas, se busca tener mayor información del comportamiento de la pila, por lo que al registrar el comportamiento del cuerpo de la pila se pueden conocer los mecanismos de transferencia de carga de la pila al suelo adyacente y distinguir claramente el aporte que da la fricción y el que da la punta a la capacidad de carga del sistema pila-suelo.

La instrumentación puede ser tan sencilla como para medir, en el cabezal de la pila de prueba, únicamente la carga aplicada y el desplazamiento asociado, adicionalmente se pueden colar sensores embebidos en el cuerpo de la pila y en su punta, para obtener las cargas en secciones de diferentes profundidades de la pila.

A continuación se enlistan algunos instrumentos más comunes en las pruebas de carga.

| INSTRUMENTACIÓN | |
|---|---|
| Equipo | Descripción |
| Transductores de desplazamiento | Se colocan en el cabezal, diametralmente opuestos |
| Indicadores de carátula | De manera alternativa o complementaria se instalan en extremo del cabezal |
| Referencias topográficas | Como medida de seguridad es conveniente llevar un registro topográfico de precisión en el cabezal de la pila y en el sistema de reacción. |
| Deformímetros resistivos o Deformímetros de cuerda vibrante | Para registrar deformaciones del concreto o el acero, se colocan en diferentes secciones de la pila para registrar cada etapa de la pila |
| Extensómetros | Se pueden medir deformaciones a diferentes profundidades, se introducen en un barreno en la pila de prueba. |
| Celdas de carga para la punta | Se colocan directamente en la punta de la pila para registrar de forma directa la carga de punta durante la prueba. |



Figura 4.8 Ejemplo de arreglo general de gatos hidráulicos, celdas de carga, indicadores de carátula y transductores de desplazamiento en el cabezal de la pila de prueba.



Figura 4.9 Colocación de la instrumentación en el cuerpo de la pila y la instalación de la celda de carga en la punta, cortesía de Pilotec.

4.6. Interpretación de resultados

Los resultados de pruebas de carga requieren de una interpretación cuidadosa por lo que conviene utilizar graficas donde se represente la siguiente información:

- Gráficas carga-asentamiento-tiempo
- Capacidad de carga última
- Curvas de distribución de carga-profundidad
- Curva de Trabajo en el fuste
- Curva de trabajo en la punta

Un criterio de interpretación es la gráfica de la curva “carga vs asentamiento”, la Figura 4.10 muestra tres diferentes trayectorias de curvas conocidas como A, B y C.

En las curvas carga-desplazamiento del tipo A y tipo B se pueden identificar claramente la carga última (Q_{ult}) alcanzada en la prueba de carga, sin embargo se pueden presentar trayectorias como la curva C con tendencia creciente con un desplazamiento que no tiene un límite definido, para estos casos y aun cuando se pueda identificar visualmente, existen criterios de falla que permiten extrapolar la carga última o determinarla a partir de los datos de la curva, como los métodos presentados en este trabajo.

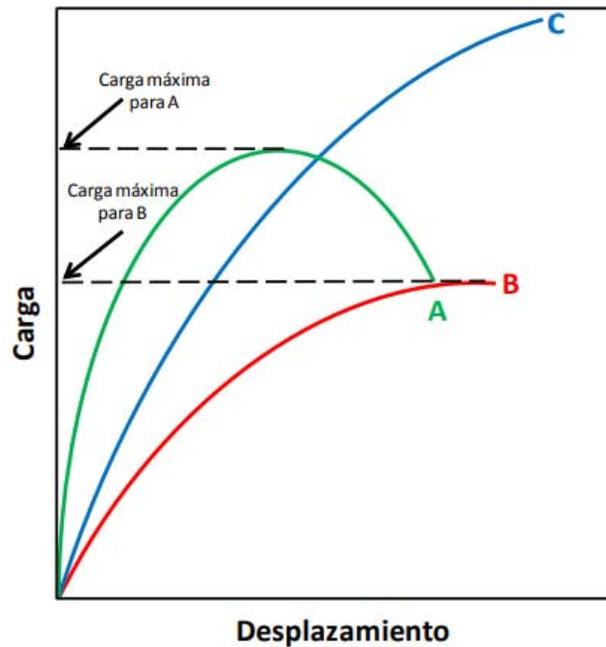


Figura 4.10 Curvas típicas Carga-Desplazamiento, presentadas en pruebas de carga axial en pilas.

5. Métodos para obtener la carga última en pruebas de carga.

Según el Dr. Bengt H. Fellenius, la capacidad se entiende como la carga (carga última) aplicada al pilote cuando el desplazamiento medido en la cabeza del pilote ocurre bajo una carga sostenida, o cuando el pilote se hunde debido a un ligero aumento de la carga aplicada.

En la mayoría de los casos no se obtiene una carga última de hundimiento distintiva en el ensayo y, por lo tanto, la carga última debe determinarse mediante una definición basada en los datos de carga-desplazamiento registrados durante el ensayo.

A veces, se define la capacidad como la carga en la intersección de dos líneas rectas, aproximándose a una porción inicial pseudo-elástica de la curva de carga-movimiento y a una porción final pseudoplástica, esta definición resulta en valores de capacidad interpretados, que dependen en gran medida de criterio y, sobre todo, de la escala del gráfico. (Basics of Foundation Design, Fellenius BH, 2017)

Al cambiar las escalas, cambian también los valores de capacidad percibidos, por lo que para obtener la capacidad de carga última a partir de la curva de carga-desplazamiento debe basarse en alguna regla matemática independiente de la escala o la observación del intérprete.

5.1. Método de Davisson (1972)

También conocido como "The Offset Limit Load", fue propuesto por Davisson en 1972, utilizó resultados de pruebas de cargas en pilotes con un diámetro de 12 in, además de las mediciones de los parámetros dinámicos y análisis de las ecuaciones de onda.

Se basa en la definición de carga de falla, la cual se expresa como "carga límite de desplazamiento" y se define como la carga correspondiente al desplazamiento que excede la compresión elástica del pilote por un valor de 0.15 in (3.8 mm) más un factor designado como Q_{tip} y se define como el desplazamiento requerido para causar la fluencia del suelo cercano a la punta de la pila.

El criterio de "The Offset Limit Load" está representado por una línea recta en la curva de carga-desplazamiento Figura 5.1 y la intersección entre ellas indica la carga límite de la prueba.

$$\Delta M < \frac{PL}{AE} + 0.15 + Q_{tip}$$

Donde:

ΔM pendiente desfasada para obtener la carga ultima

P carga aplicada

L longitud de la pila

A Área de la sección transversal de la pila

E Módulo de elasticidad

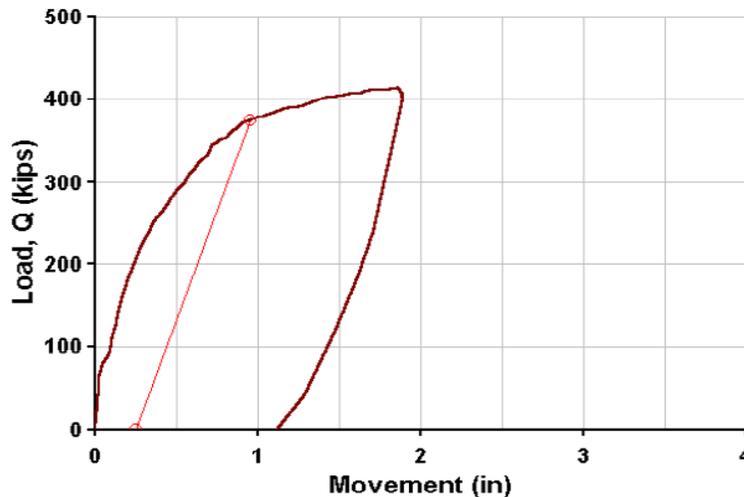


Figura 5.1 Grafica de carga-desplazamiento según el método de Davisson, Basics of Foundation Design, Bengt H. Fellenius, 2017.

5.2. Hirany y Kulhawy (1989)

Sugirieron el uso de la interpretación de la carga de falla o carga ultima para pilas coladas *in situ*, correspondiente a la "falla limite", gráficamente se define como el punto en el cual la curva carga- desplazamiento se vuelve nuevamente lineal, después de una región inicial lineal seguida de una curva denominada región de "transición" como se muestra en la Figura 5.2.

La falla limite ocurre cuando el desplazamiento de la cabeza de la pila es 4% su diámetro.

Punto L_1 (límite elástico) corresponde a la carga (Q_{L1}) y al desplazamiento de (ρ_{L1}) al final de la región lineal inicial, mientras que L_2 (umbral de falla) corresponde a la carga (Q_{L2}) y el desplazamiento (ρ_{L2}) en el inicio de la región lineal final.

Q_{L2} se define como la "carga de falla" porque más allá de Q_{L2} , un pequeño aumento en la carga da un aumento significativo en el desplazamiento.

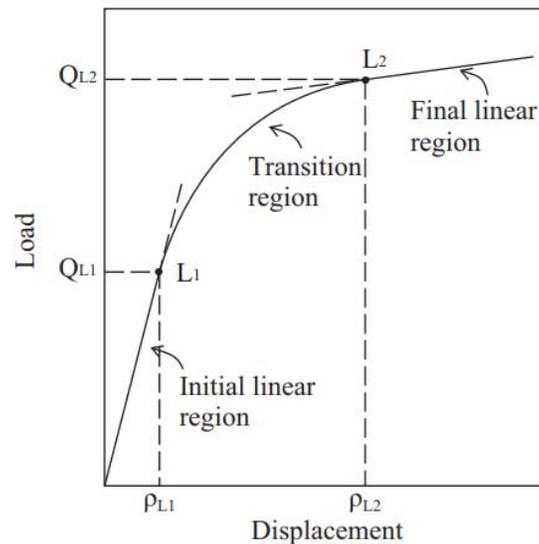


Figura 5.2 Regiones de la curva carga-desplazamiento, *Evaluation of Side Resistance Capacity for Drilled Shafts, Journal of Marine Science and Technology (2011)*.

5.3. De Beer (1967)

Este criterio se aplica para pruebas lentas, con el fin de obtener la carga última de los datos registrados durante la prueba. Este procedimiento interpreta la carga de falla o carga última como la carga en la que se intersecan dos líneas rectas al graficar la curva carga-desplazamiento por medio de un mapeo de doble escala logarítmica, si dos líneas diferentes que conectan los datos antes y después de un cierto punto, este "punto de intersección" es la carga última, siempre que el número de puntos permitan que se desarrollen tendencias lineales como se muestra en la Figura 5.3.

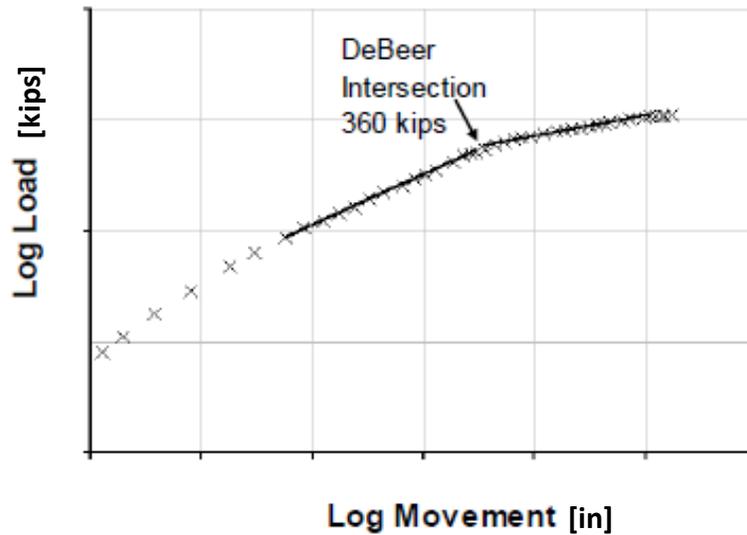


Figura 5.3 Grafica de la curva carga-desplazamiento con doble logaritmo según el criterio De Beer, *Basics of Foundation Design*, Bengt H. Fellenius, 2017.

5.4. Método de Chin y Kondner (1970)

Propusieron un método de extrapolación para encontrar la carga de falla, para aplicar el procedimiento se debe dividir cada desplazamiento entre su propia carga correspondiente y trazar el valor resultante en función al desplazamiento, como se muestra en la Figura 5.4.

La pendiente inversa de la línea que se forma al graficar los valores, es la extrapolación Chin-Kondner de la carga última.

La carga máxima o última es la carga alcanzada asintóticamente para un desplazamiento infinitamente grande. El método puede utilizarse para extrapolar una tendencia hasta un valor final. Sin embargo, un principio y requisito primordial de una capacidad evaluada a partir de un ensayo de carga estática y combinada con un factor de seguridad o de resistencia, es que no debe ser mayor a la carga máxima aplicada en el ensayo.

$$Q_u = \frac{1}{C_1}$$

Q_u = Carga pico o carga última

C_1 = Pendiente de la línea recta en el diagrama $\frac{\delta}{Q}$ vs desplazamiento

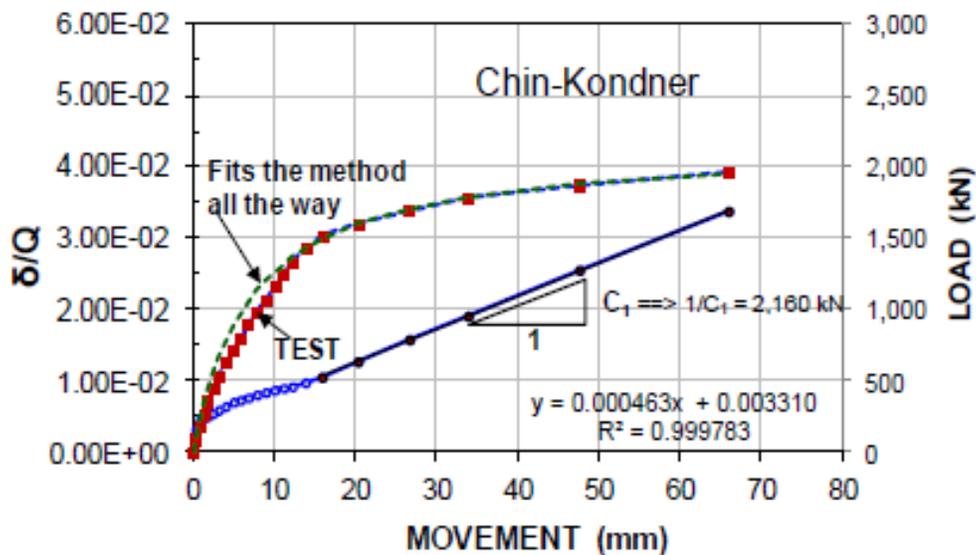


Figura 5.4 Metodo de Chin-Kondner, Basics of Foundation Design, Bengt H. Fellenius, 2017.

5.5. Método de Decourt (1999; 2008)

Este método consiste en dividir cada carga entre su desplazamiento y graficar el valor resultante en función de la carga aplicada, como se muestra en la Figura 6.7.

Se observa que al graficar la curva se presenta una línea y se puede realizar una extrapolación para determinar el límite de la carga, la cual es representada gráficamente con la intersección de la línea con el eje de las abscisas, como se ve en la figura 5.5.

El límite de carga de extrapolación de Decourt es igual al cociente entre la intersección con las ordenadas, y la pendiente de la línea como se da en la siguiente ecuación.

$$Q_u = \frac{C_2}{C_1}$$

En esta ecuación se presenta la curva ideal.

$$Q_u = \frac{C_2 \delta}{1 - C_1 \delta}$$

Q = Cualquier carga aplicada

δ = Desplazamiento asociado a la carga Q

Q_u = Carga pico o carga última

C_1 = Pendiente de la línea recta en el diagrama $\frac{Q}{\delta}$ vs desplazamiento

C_2 = interseccion con el eje Y de la línea recta en el diagrama $\frac{Q}{\delta}$ vs desplazamiento

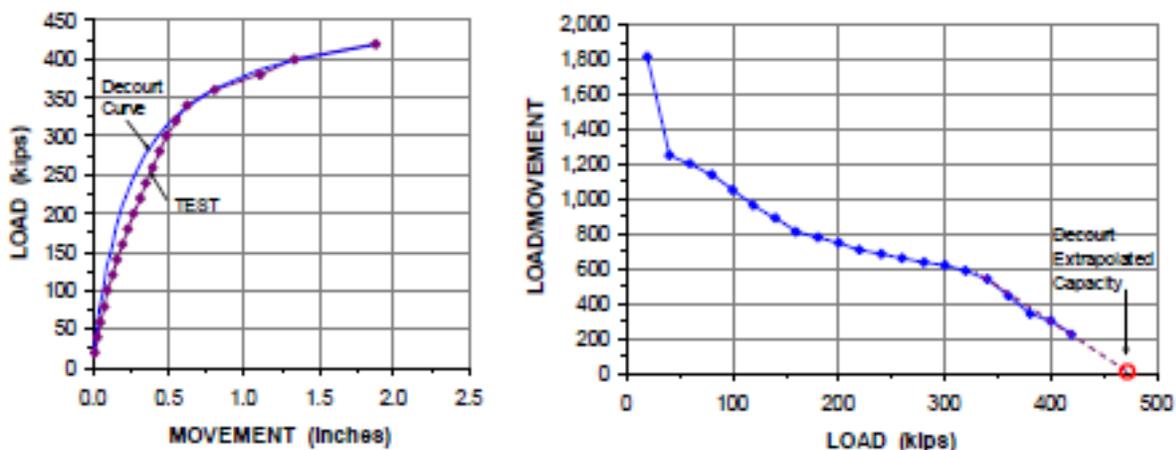


Figura 5.5 Método de extrapolación de Decourt, Basics of Foundation Design, Bengt H. Fellenius, 2017.

5.6. Tabla resumen

| Criterio | Descripción | Método |
|-------------------------|--|---------------|
| Davisson (1972) | Considera los desplazamientos requeridos para causar la fluencia del suelo en la punta de la pila. | Analítico |
| Hirany y Kulhawy (1989) | La carga de falla está definida por el punto en el cual la curva carga-desplazamiento vuelve a ser lineal después de la región lineal inicial, seguida de la región de transición curva. | Analítico |
| De Beer (1967) | La carga de falla corresponde a la intersección de dos líneas rectas en doble escala logarítmica de la curva esfuerzo deformación. | Gráfico |
| Chin y Kondner (1970) | Relación hiperbólica esfuerzo deformación, donde la carga última se define como la inversa de la pendiente de la curva desplazamiento/carga vs desplazamiento. | Extrapolación |
| Decourt (1999; 2008) | Relación hiperbólica esfuerzo deformación, donde la carga última se define como la intersección de la curva carga/desplazamiento vs carga y el eje de las abscisas. | Extrapolación |

6. Casos de estudio

A continuación se aplicaran los métodos antes descritos para obtener la carga última a seis diferentes pruebas de carga, cortesía de la empresa Pilotec y obtener las comparaciones de los resultados.

6.1. Información del proyecto

| PROYECTO | LOCALIZACIÓN | DESCRIPCIÓN |
|---------------------------------|--|---|
| INTERPUERTO ARTHUR | Municipio de Salinas Victoria, Nuevo León. | En abril de 2014, se llevó a cabo la construcción de un complejo industrial, en las primeras etapas de desarrollo. Como parte del control de calidad para las pilas de cimentación se llevan a cabo pruebas de carga estática. |
| INDUSTRIA VIDRIERA COAHUILA | Municipio Nava, Piedras Negras, Coahuila. | En junio de 2015, se llevó a cabo la construcción de Horno 1, perteneciente a la empresa cervecera de Coahuila, el cual será cimentado sobre una retícula de pilas coladas <i>in situ</i> . Se utilizó una pila de cimentación del proyecto para obtener el control de calidad. |
| CENTRAL TERMOELÉCTRICA PESQUERA | Municipio de Pesquería, Nuevo León. | En noviembre de 2011, se llevó a cabo la construcción de una central de generación de energía, la cimentación está resuelta con pilas coladas <i>in situ</i> . Para realizar la prueba se construyó una pila para este fin. |
| REFINERÍA MIGUEL HIDALGO | Refinería Miguel Hidalgo, Sección PID-PAD 4 | En julio de 2015, PEMEX REFINACIÓN a fin de incrementar la producción de combustibles y eliminar la producción actual de combustóleo amargo de la refinería Miguel Hidalgo, se desarrolla el proyecto de aprovechamiento residual de la refinería Miguel Hidalgo. Se realizó la prueba de una pila que construyo para este fin, es decir no formara parte de la cimentación. |
| VIADUCTO CARLOS HANK GONZÁLEZ | Circuito Exterior Mexiquense, Viaducto Carlos Hank González, Estado de México. | En septiembre de 2013, CONMEX realizó la construcción de vialidades de cuota al Norte del Valle de México, conocidas como el Circuito Exterior Mexiquense, su objetivo es evitar que vehículos de carga crucen a la Ciudad de México para llegar a sus destinos. El proyecto consta de una vialidad de 4 carriles, el viaducto Carlos Hank González será cimentado sobre zapatas apoyadas en pilas. |

6.2. Procedimiento constructivo

| PROYECTO | PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO |
|---------------------------------|---|
| INTERPUERTO ARTHUR | <p>La cimentación en estudio, consta de pilas construidas <i>in situ</i> con un diámetro de 1.80 m y con una longitud de 10.30 m, construidas con perforadoras hidráulicas y con herramienta de perforación broca helicoidal hasta llegar a la longitud de proyecto.</p> <p>Posteriormente se colocó el acero de refuerzo con una grúa para poder izar el acero en una sola pieza.</p> <p>Después se inició el colado de la pila por medio del sistema tremie.</p> |
| INDUSTRIA VIDRIERA COAHUILA | <p>La cimentación en estudio, consta de pilas construidas <i>in situ</i> con un diámetro de 0.80 m y con una longitud de 4.3 m, construidas con perforadoras hidráulicas y con herramienta de perforación broca helicoidal hasta llegar a la longitud de proyecto.</p> <p>Posteriormente se colocó el acero de refuerzo con una grúa para poder izar el acero en una sola pieza.</p> <p>Después se inició el colado de la pila por medio del sistema tremie.</p> |
| CENTRAL TERMOELÉCTRICA PESQUERA | <p>La cimentación consta de pilas coladas <i>in situ</i> con un diámetro de 0.60 m y con una longitud de 9 m, la pila de prueba no forma parte de la cimentación, será construida para realizar la prueba.</p> <p>Las pilas se construyeron utilizando perforadoras hidráulicas, y como herramienta de perforación broca helicoidal hasta llegar a la longitud de proyecto.</p> <p>Posteriormente se colocó el acero de refuerzo con una grúa para poder izar el acero en una sola pieza.</p> <p>Después se inició el colado de la pila por medio del sistema tremie.</p> |
| REFINERÍA MIGUEL HIDALGO | <p>La cimentación consta de pilas coladas <i>in situ</i> con un diámetro de 1 m y con una longitud de 30 m, la pila de prueba no forma parte de la cimentación, será construida para realizar la prueba.</p> <p>Las pilas se construyeron utilizando perforadoras hidráulicas, y como herramienta de perforación broca helicoidal hasta llegar a la longitud de proyecto.</p> <p>Posteriormente se colocó el acero de refuerzo con una grúa para poder izar el acero en una sola pieza.</p> <p>Después se inició el colado de la pila por medio del sistema tremie.</p> |

| PROYECTO | PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO |
|-------------------------------|---|
| VIADUCTO CARLOS HANK GONZÁLEZ | <p>La cimentación de los apoyos, se resolvió mediante zapatas rectangulares de concreto apoyadas en pilas coladas <i>in situ</i> de 1.5 m de diámetro y longitudes aproximadas de 32 m. El puente cuenta con un total de 332 pilas dispuestas en los apoyos; el número mínimo de pilas por apoyo es de 12 pilas y el máximo de 36.</p> <p>La pila de prueba no forma parte de la cimentación, será construida para realizar la prueba.</p> <p>Las pilas se construyeron utilizando perforadoras hidráulicas, y como herramienta de perforación broca helicoidal hasta llegar a la longitud de proyecto.</p> <p>Posteriormente se colocó el acero de refuerzo con una grúa para poder izar el acero en una sola pieza.</p> <p>Después se inició el colado de la pila por medio del sistema tremie.</p> |

6.3. Sistemas de reacción

| PROYECTO | SISTEMAS DE REACCIÓN |
|---------------------------------|---|
| INTERPUERTO ARTHUR | Como parte del arreglo para la aplicación de la carga en el elemento de prueba, se utilizó un sistema de 4 pilas adyacentes de reacción y se construyeron dados en la cabeza de cada pila y dos vigas secundarias que descansan sobre una viga principal, todas de acero estructural. |
| INDUSTRIA VIDRIERA COAHUILA | Consistió en un arreglo de 4 pilas adyacentes a la pila de prueba, y se construyeron dados en la cabeza de cada pila, el sistema de reacción consta de una viga principal y dos vigas secundarias que descansan sobre una viga principal de acero estructural. |
| CENTRAL TERMOELÉCTRICA PESQUERA | Se utilizó un arreglo de 4 pilas adyacentes a la pila de prueba, y se construyeron dados en la cabeza de cada pila, el sistema de reacción consta de una viga principal y dos vigas secundarias que descansan sobre una viga principal de acero estructural. |
| REFINERÍA MIGUEL HIDALGO | Consistió en un arreglo de 4 pilas adyacentes a la pila de prueba, y se construyeron dados en la cabeza de cada pila, el sistema de reacción consta de una viga principal y dos vigas secundarias que descansan sobre una viga principal de acero estructural. |
| VIADUCTO CARLOS HANK GONZÁLEZ | Consistió en un arreglo de 4 pilas adyacentes a la pila de prueba, y se construyeron dados en la cabeza de cada pila, el sistema de reacción consta de una viga principal y dos vigas secundarias que descansan sobre una viga principal de acero estructural. |

6.4. Sistemas de instrumentación

| PROYECTO | SISTEMAS DE INSTRUMENTACIÓN |
|---------------------------------|--|
| INTERPUERTO ARTHUR | Se emplearon tres micrómetros, colados sobre la cabeza de la pila, distribuidos a cada 120° entre sí. |
| INDUSTRIA VIDRIERA COAHUILA | Se emplearon tres micrómetros, colados sobre la cabeza de la pila, distribuidos a cada 120° entre sí. |
| CENTRAL TERMOELÉCTRICA PESQUERA | Se emplearon tres micrómetros, colados sobre la cabeza de la pila, distribuidos a cada 120° entre sí. |
| REFINERÍA MIGUEL HIDALGO | Se emplearon tres micrómetros, colados sobre la cabeza de la pila, distribuidos a cada 120° entre sí. Además se colocaron cuatro micrómetros para registrar las deformaciones del concreto. |
| VIADUCTO CARLOS HANK GONZÁLEZ | Se emplearon 20 deformímetros eléctricos, 8 celdas de carga y 2 transductores de desplazamiento. |

6.5. Equipo de carga

| PROYECTO | EQUIPO DE CARGA |
|---------------------------------|---|
| INTERPUERTO ARTHUR | La carga se aplicó por medio de un sistema hidráulico conformado por seis cilindros de 200 t, conectados a una bomba electrohidráulica con manómetro de resolución de 100 psi. |
| INDUSTRIA VIDRIERA COAHUILA | La carga se aplicó por medio de un sistema hidráulico conformado por dos cilindros de 200 t, conectados a una bomba electrohidráulica con manómetro de resolución de 100 psi. |
| CENTRAL TERMOELÉCTRICA PESQUERA | La carga se aplicó por medio de un sistema hidráulico conformado por dos cilindros de 200 t, conectados a una bomba electrohidráulica con manómetro de resolución de 100 psi. |
| REFINERÍA MIGUEL HIDALGO | La carga se aplicó por medio de un sistema hidráulico conformado por cuatro cilindros de 200 t, conectados a una bomba electrohidráulica con manómetro de resolución de 100 psi. También se instalaron cuatro celdas de carga. |
| VIADUCTO CARLOS HANK GONZÁLEZ | La carga se aplicó por medio de un sistema hidráulico conformado por siete cilindros de 200 t, conectados a una bomba electrohidráulica con manómetro de resolución de 200 psi, además de contar con otro manómetro cercano a la ubicación de las cargas. |

6.6. Procedimiento de la prueba de carga

| PROYECTO | PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA |
|---------------------------------|--|
| INTERPUERTO ARTHUR | Se utilizó el procedimiento de carga controlada, norma ASTM D 1143. Cada incremento se aplicó una vez que la velocidad de desplazamiento del cabezal fuera menor que 0.25 mm/hr, y sin que la duración de cada incremento fuera mayor que 60 min. |
| INDUSTRIA VIDRIERA COAHUILA | Se utilizó el procedimiento de carga controlada, norma ASTM D 1143. Cada incremento se aplicó una vez que la velocidad de desplazamiento del cabezal fuera menor que 0.25 mm/hr, y sin que la duración de cada incremento fuera mayor que 120 min. |
| CENTRAL TERMOELÉCTRICA PESQUERA | Se utilizó el procedimiento de carga controlada, norma ASTM D 1143. Cada incremento se aplicó una vez que la velocidad de desplazamiento del cabezal fuera menor que 0.25 mm/hr, y sin que la duración de cada incremento fuera mayor que 120 min. |
| REFINERÍA MIGUEL HIDALGO | Se utilizó el procedimiento de carga controlada, norma ASTM D 1143. Cada incremento se aplicó una vez que la velocidad de desplazamiento del cabezal fuera menor que 0.25 mm/hr, y sin que la duración de cada incremento fuera mayor que 120 min. |
| VIADUCTO CARLOS HANK GONZÁLEZ | Se utilizó el procedimiento de carga controlada, norma ASTM D 1143. Cada incremento se aplicó una vez que la velocidad de desplazamiento del cabezal fuera menor que 0.25 mm/hr, y sin que la duración de cada incremento fuera mayor que 120 min. |

6.7. Programa de carga

| PROGRAMA DE CARGA | | | |
|-------------------------------------|---|------------------|-----------------------|
| INTERPUERTO ARTHUR | | | |
| SALINAS VICTORIA, NUEVO LEÓN | | | |
| Etapa | ΔQ, en % Q_a | Carga [t] | Criterio |
| Primera etapa Carga de pila | 12.5 % Q_a | 123.88 | d<0.25 mm/hr |
| | 12.5 % Q_a | 247.75 | |
| | 12.5 % Q_a | 371.63 | |
| | 12.5 % Q_a | 495.5 | |
| | 12.5 % Q_a | 619.38 | |
| | 12.5 % Q_a | 743.25 | |
| | 12.5 % Q_a | 867.13 | |
| | | 12.5 % Q_a | 991 |
| Segunda etapa Descarga de pila | -25% Q_a | 743.25 | 1 hora/ decremento |
| | -25% Q_a | 495.5 | |
| | -25% Q_a | 247.75 | |
| | -25% Q_a | 0 | |

| PROGRAMA DE CARGA | | | |
|---------------------------------------|---|------------------|-----------------------|
| REFINERÍA MIGUEL HIDALGO | | | |
| TULA, HIDALGO | | | |
| Etapa | ΔQ, en % Q_{ult} | Carga [t] | Criterio |
| Primera etapa Carga de pila | 12.5 % Q_{ult} | 87.5 | d<0.25 mm/hr |
| | 12.5 % Q_{ult} | 175 | |
| | 12.5 % Q_{ult} | 262.5 | |
| | 12.5 % Q_{ult} | 350 | |
| | 12.5 % Q_{ult} | 437.5 | |
| | 12.5 % Q_{ult} | 525 | |
| | 12.5 % Q_{ult} | 612.5 | |
| | 12.5 % Q_{ult} | 700 | |
| Segunda etapa Mantener la carga | 100% Q_{ult} | 700 | 12 horas |
| Tercera etapa Descarga de la pila. | -25% Q_{ult} | 525 | 1 hora/ decremento |
| | -25% Q_{ult} | 350 | |
| | -25% Q_{ult} | 175 | |
| | -25% Q_{ult} | 0 | |

| PROGRAMA DE CARGA | | | |
|--|---|------------------|-----------------------|
| CENTRAL TERMOELÉCTRICA PESQUERA PESQUERÍA, NUEVO LEÓN | | | |
| Etapa | ΔQ, en % Q_{ult} | Carga [t] | Criterio |
| Primera etapa Carga de pila | 12.5 % Q_{ult} | 40 | d<0.25 mm/hr |
| | 12.5 % Q_{ult} | 80 | |
| | 12.5 % Q_{ult} | 120 | |
| | 12.5 % Q_{ult} | 160 | |
| | 12.5 % Q_{ult} | 200 | |
| | 12.5 % Q_{ult} | 240 | |
| | 12.5 % Q_{ult} | 280.5 | |
| | 12.5 % Q_{ult} | 320 | |
| Segunda etapa Mantener la carga | 100% Q_{ult} | 320 | 12 horas |
| Tercera etapa Descarga de la pila. | -25% Q_{ult} | 240 | 1 hora/ decremento |
| | -25% Q_{ult} | 160 | |
| | -25% Q_{ult} | 80 | |
| | -25% Q_{ult} | 0 | |

| PROGRAMA DE CARGA | | | |
|---|---|------------------|-----------------------|
| INDUSTRIA VIDRIERA COAHUILA PIEDRAS NEGRAS, COAHUILA | | | |
| Etapa | ΔQ, en % Q_{ult} | Carga [t] | Criterio |
| Primera etapa Carga de pila | 12.5 % Q_{ult} | 10 | d<0.25 mm/hr |
| | 12.5 % Q_{ult} | 20 | |
| | 12.5 % Q_{ult} | 30 | |
| | 12.5 % Q_{ult} | 40 | |
| | 12.5 % Q_{ult} | 50 | |
| | 12.5 % Q_{ult} | 60 | |
| | 12.5 % Q_{ult} | 70 | |
| | 12.5 % Q_{ult} | 80 | |
| Segunda etapa Mantener la carga | 100% Q_{ult} | 80 | 12 horas |
| Tercera etapa Descarga de la pila. | -25% Q_{ult} | 75 | 1 hora/ decremento |
| | -25% Q_{ult} | 50 | |
| | -25% Q_{ult} | 25 | |
| | -25% Q_{ult} | 0 | |

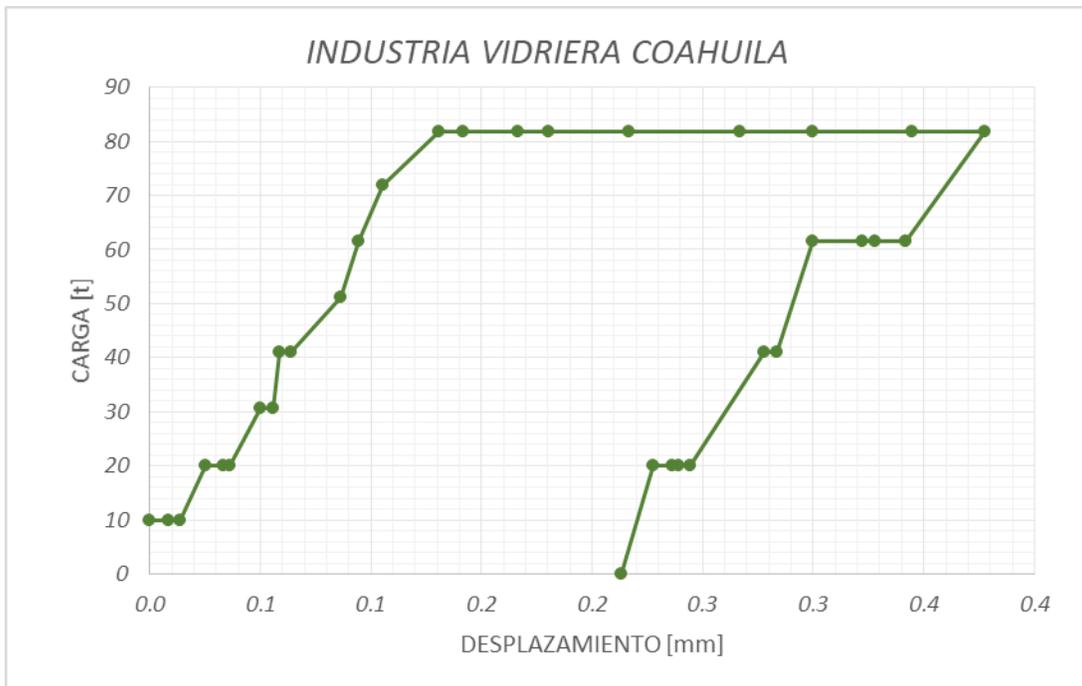
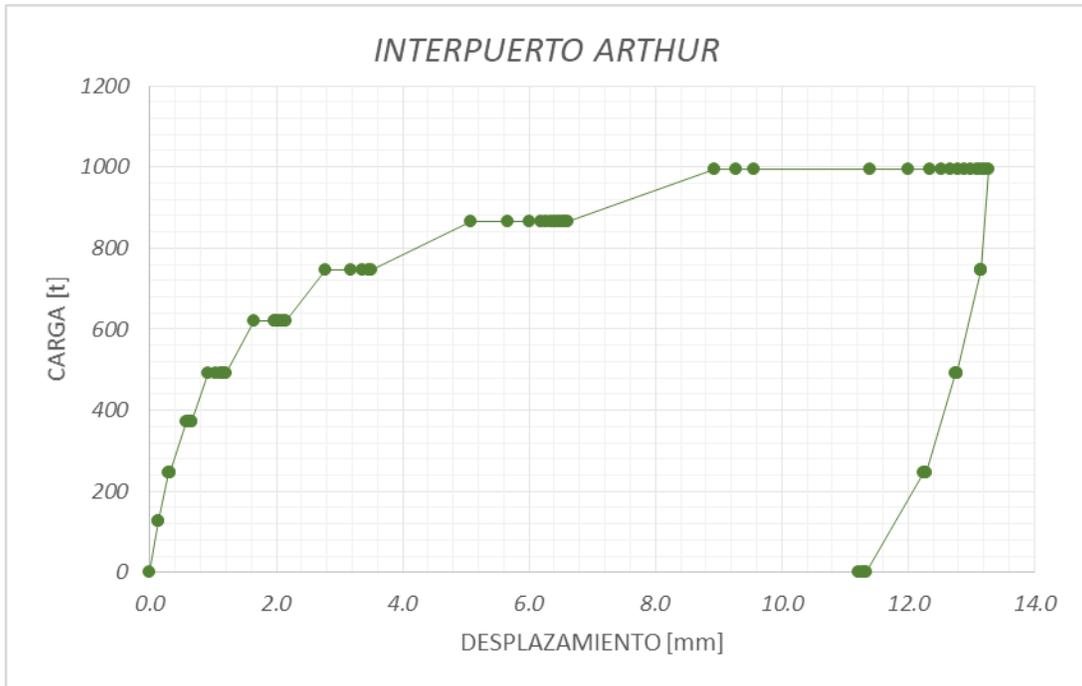
| PROGRAMA DE CARGA | | | |
|---|---|------------------|-----------------------|
| VIADUCTO CARLOS HANK GONZÁLEZ | | | |
| CIRCUITO EXTERIOR MEXIQUENSE, ESTADO DE MÉXICO | | | |
| Etapa | ΔQ, en % Q_{ult} | Carga [t] | Criterio |
| Primera etapa Carga de pila | 12.5 % Q_{ult} | 150 | d<0.25 mm/hr |
| | 12.5 % Q_{ult} | 300 | |
| | 12.5 % Q_{ult} | 450 | |
| | 12.5 % Q_{ult} | 600 | |
| | 12.5 % Q_{ult} | 750 | |
| | 12.5 % Q_{ult} | 900 | |
| | 12.5 % Q_{ult} | 1050 | |
| | 12.5 % Q_{ult} | 12000 | |
| Segunda etapa Descarga de la pila. | -25% Q_{ult} | 900 | 1 hora/ decremento |
| | -25% Q_{ult} | 600 | |
| | -25% Q_{ult} | 300 | |
| | -25% Q_{ult} | 0 | |

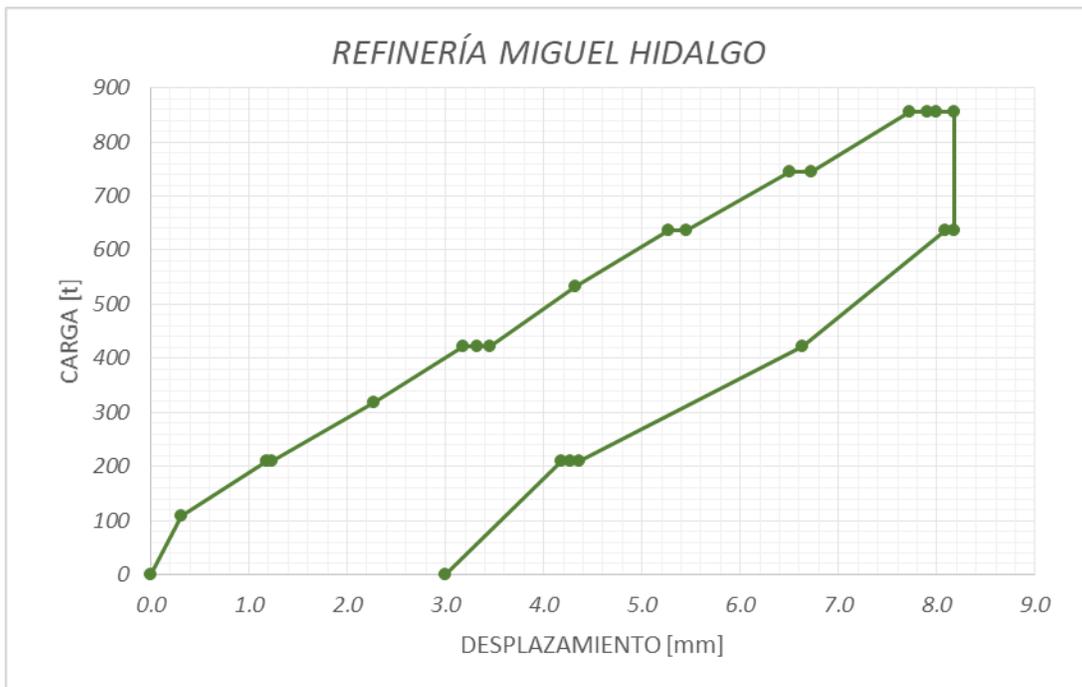
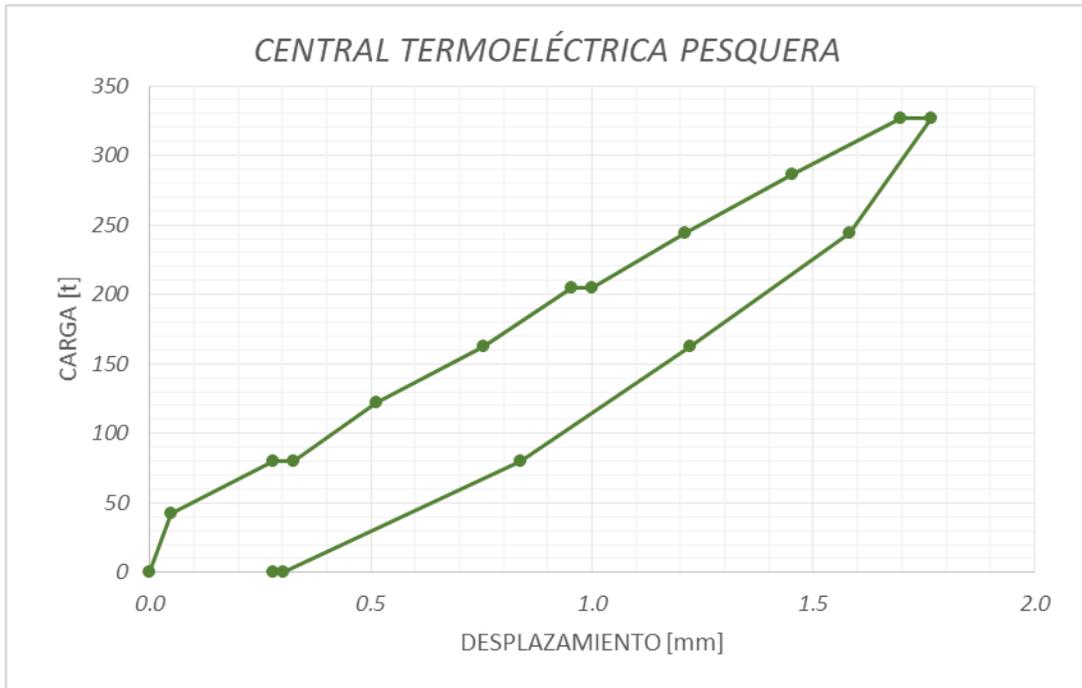
6.8. Gráficas carga-desplazamiento

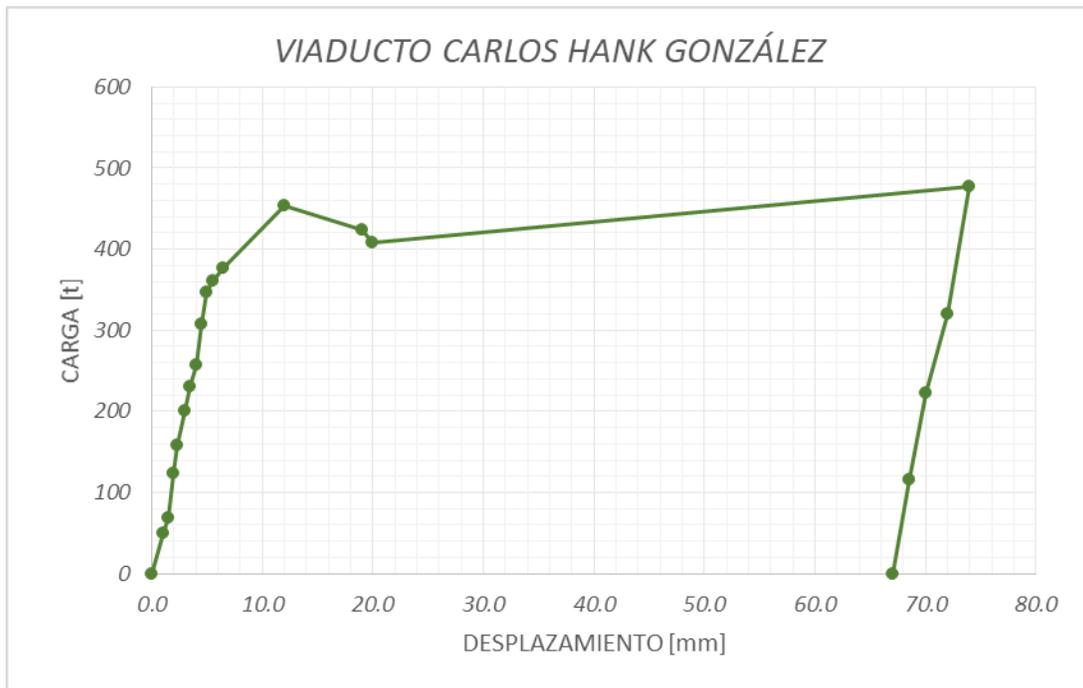
A continuación se presentan las gráficas carga-desplazamiento de los casos en estudio y se presentan las características de las pilas de prueba de cada caso, así como los criterios anteriormente explicados para determinar la carga última.

Nota: Si se requiere revisar los datos de las gráficas se pueden consultar en el Anexo.

| CASO | D [m] | l[m] | A [m²] | f'c [kg/cm²] | E [kg/cm²] |
|---------------------------------|--------------|-------------|--------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| INTERPUERTO ARTHUR | 1.8 | 10.3 | 2.54469 | 350 | 261916 |
| INDUSTRIA VIDRIERA COAHUILA | 0.8 | 4.3 | 0.502655 | 350 | 261916 |
| CENTRAL TERMOELÉCTRICA PESQUERA | 0.6 | 9 | 0.282743 | 350 | 261916 |
| REFINERÍA MIGUEL HIDALGO | 0.8 | 30 | 0.502655 | 350 | 261916 |
| VIADUCTO CARLOS HANK GONZÁLEZ | 1.5 | 32 | 1.767146 | 350 | 261916 |

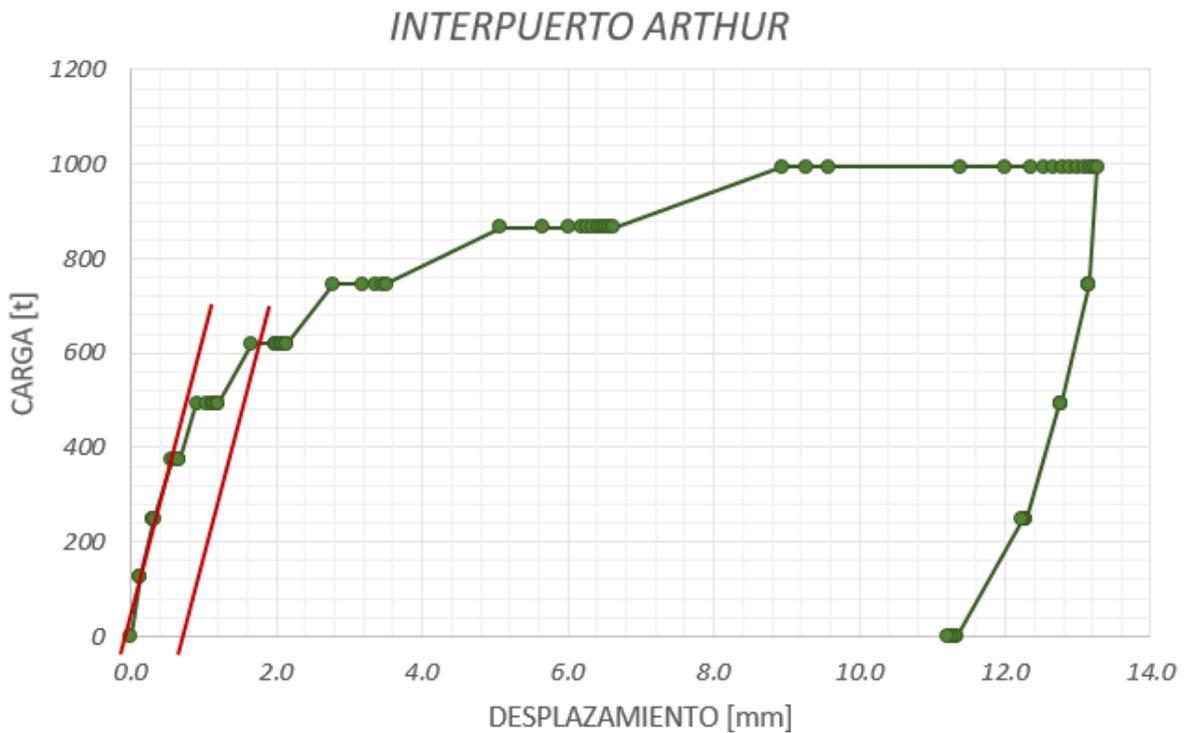




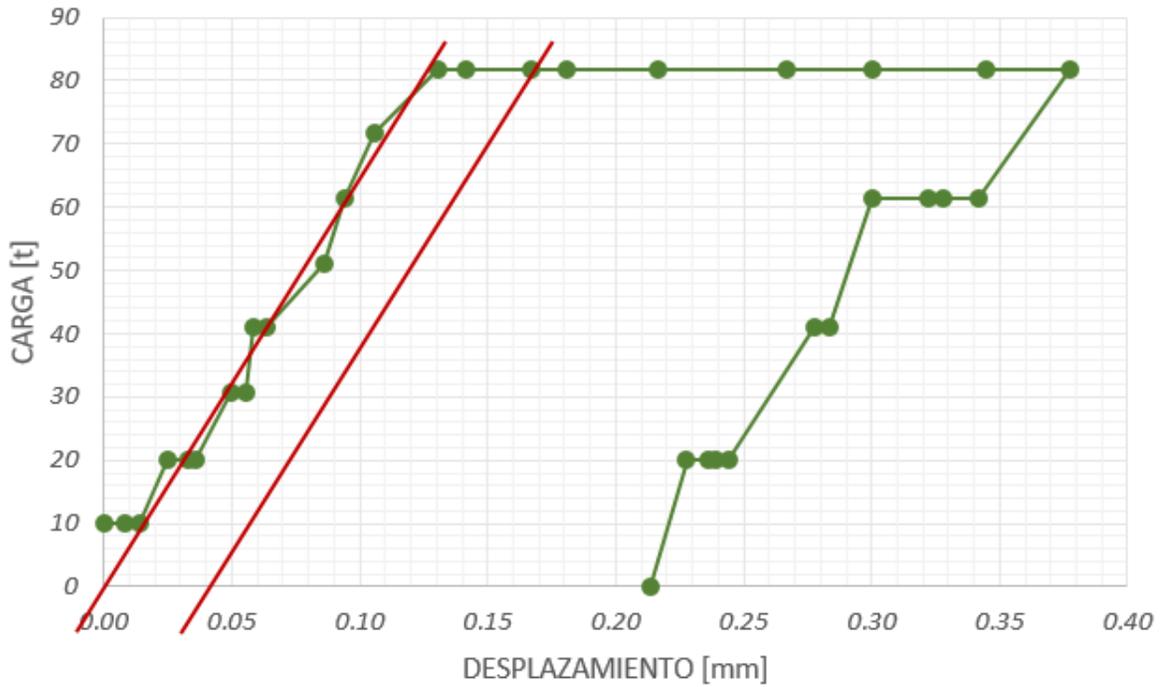


6.9. Métodos para obtener la carga última

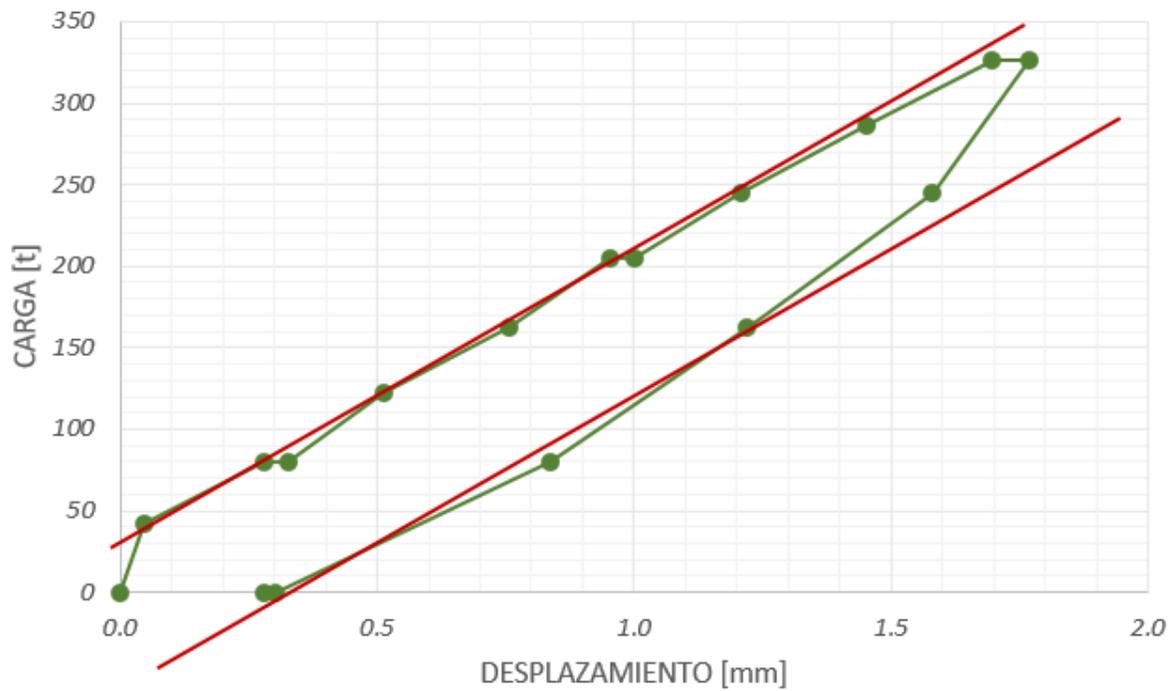
6.9.1. Método de Davisson



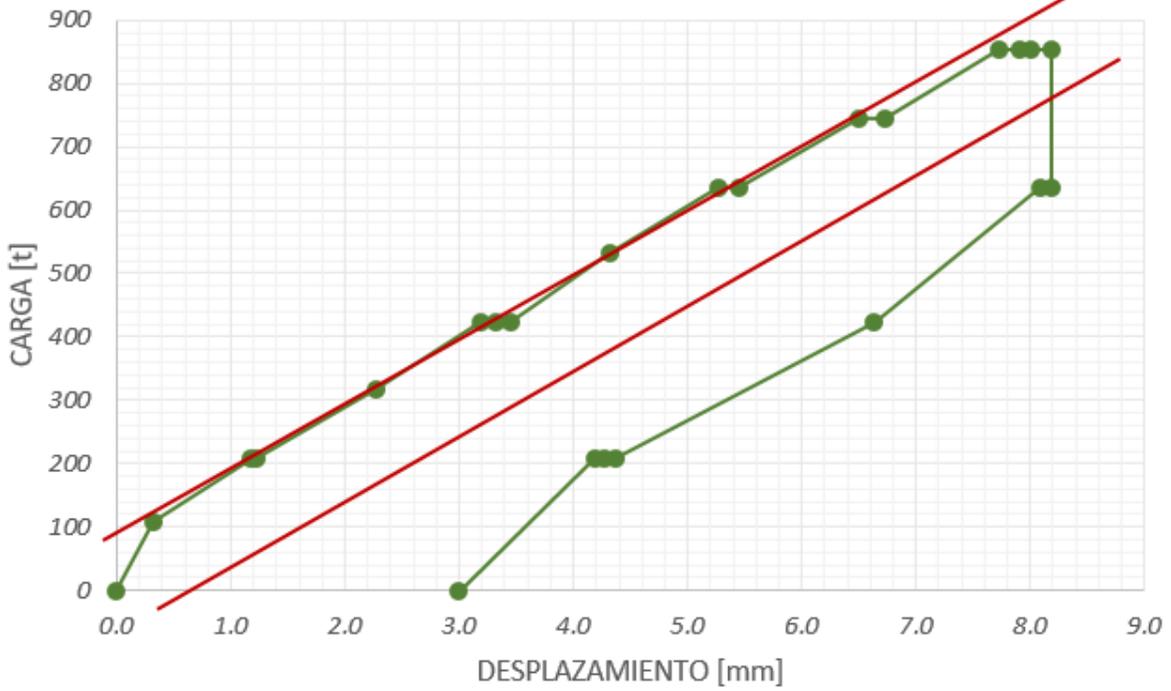
INDUSTRIA VIDRIERA COAHUILA



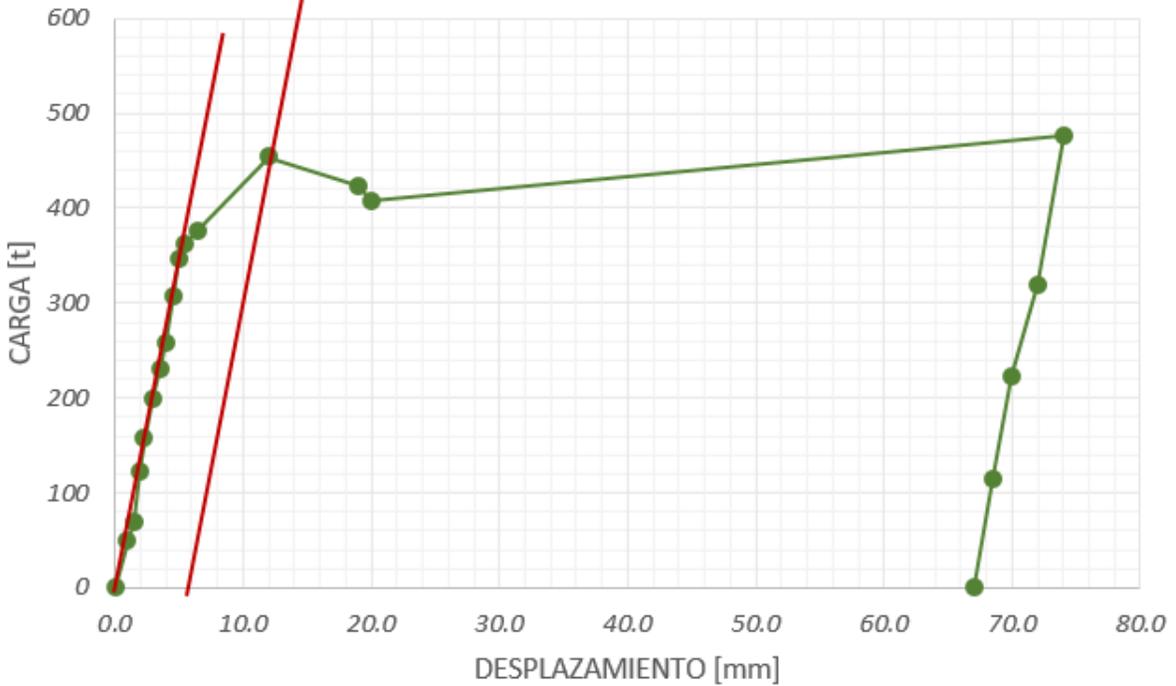
CENTRAL TERMOELÉCTRICA PESQUERA



REFINERÍA MIGUEL HIDALGO

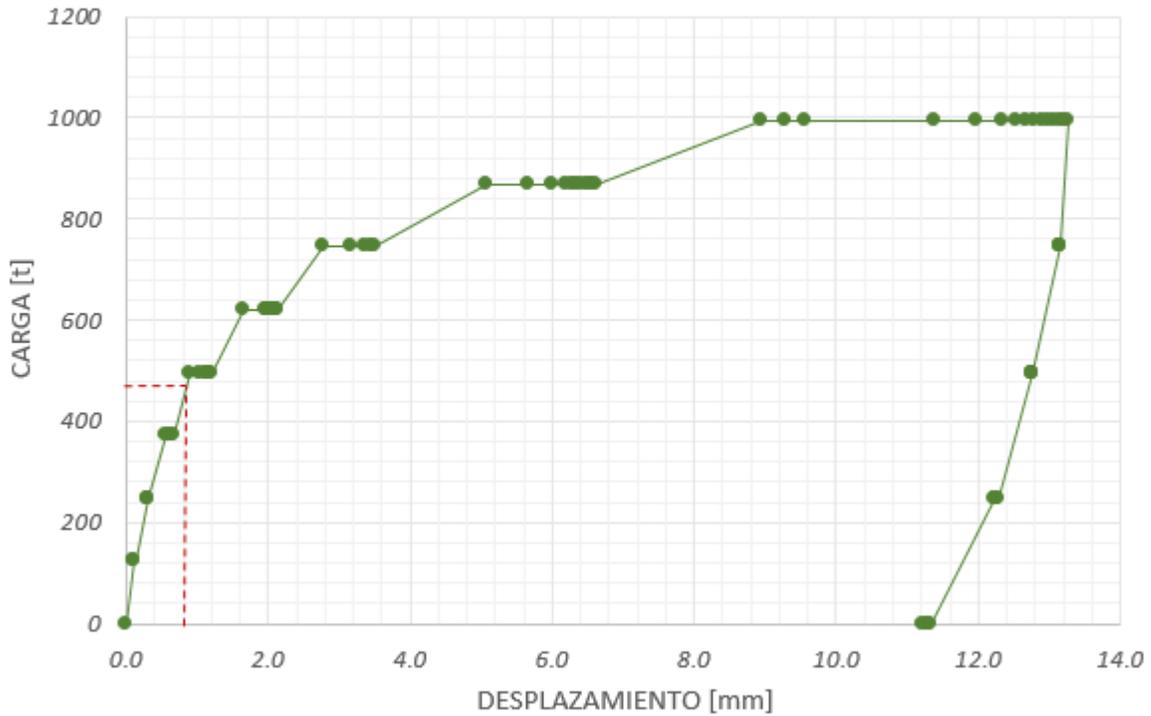


VIADUCTO CARLOS HANK GONZÁLEZ

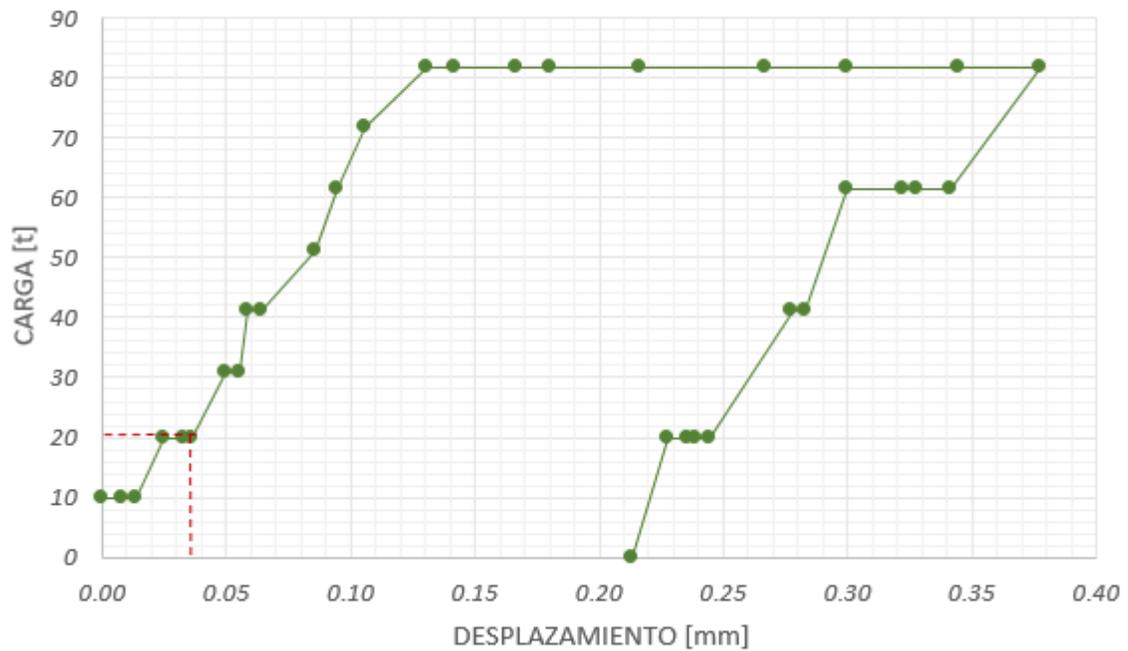


6.9.2. Método de Hirany y Kulhawy

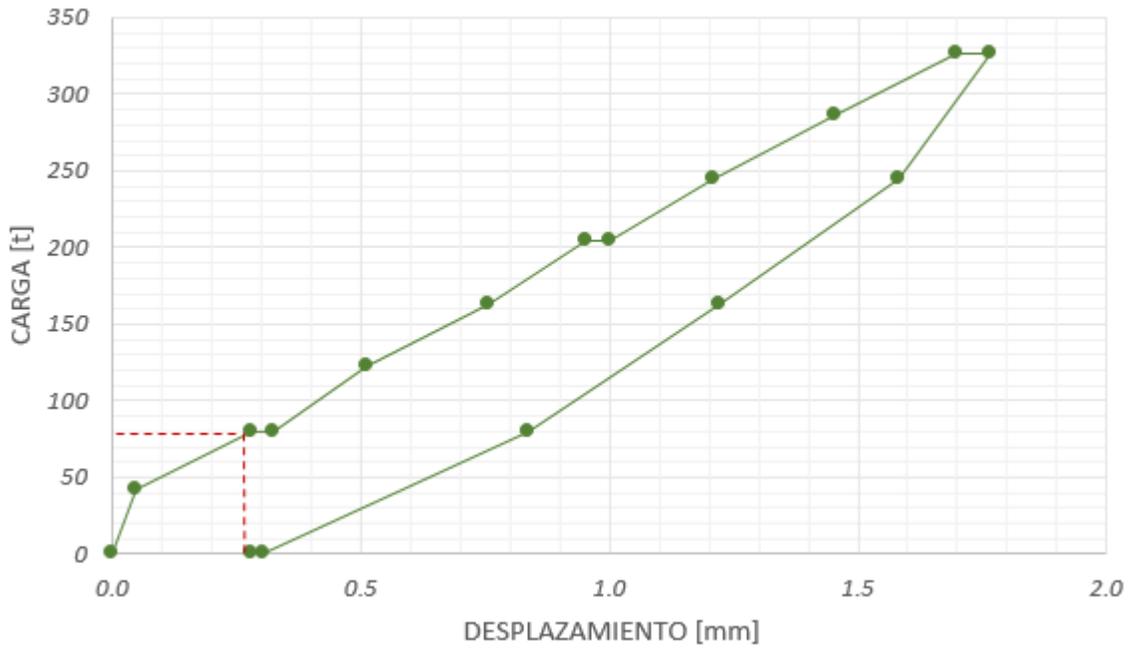
INTERPUERTO ARTHUR



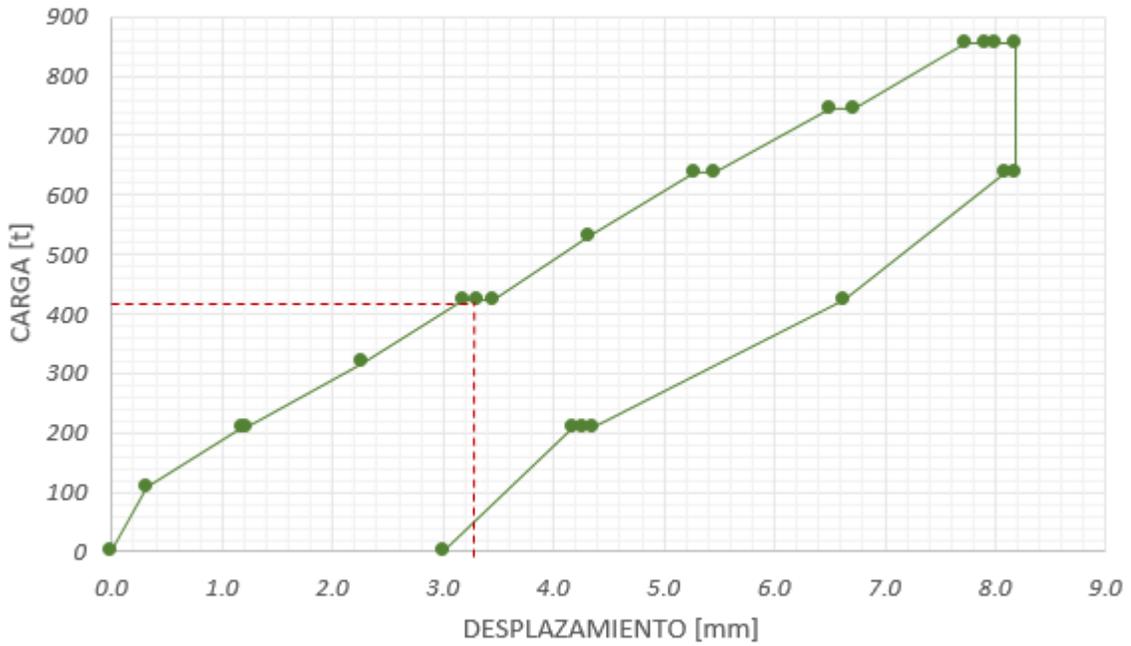
INDUSTRIA VIDRIERA COAHUILA



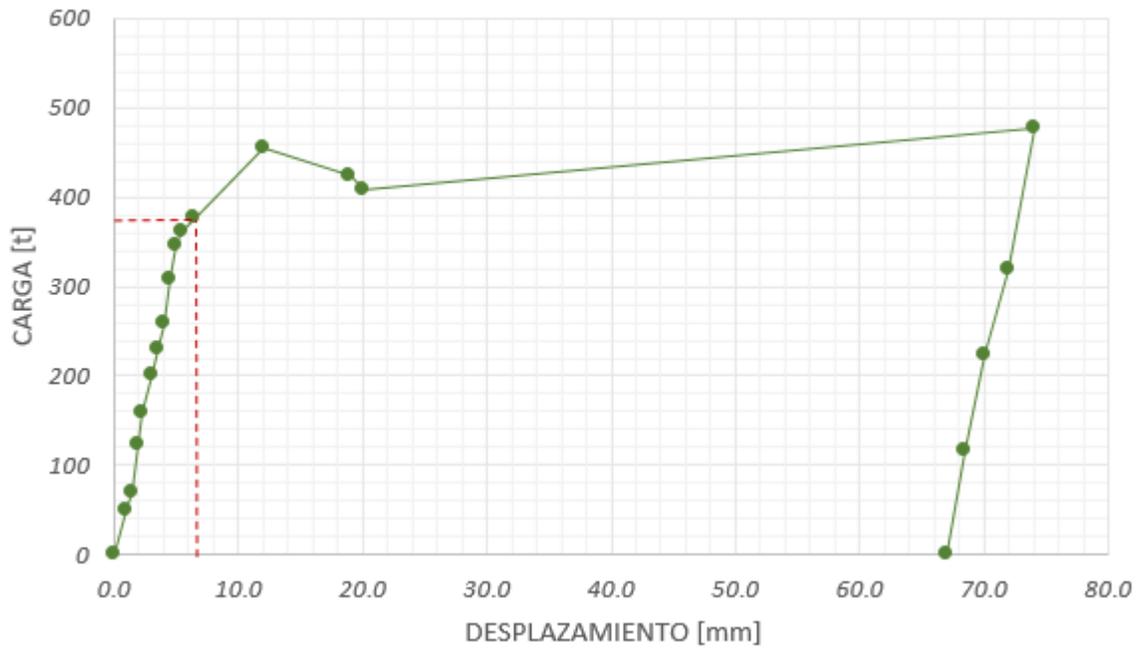
CENTRAL TERMOELÉCTRICA PESQUERA



REFINERÍA MIGUEL HIDALGO

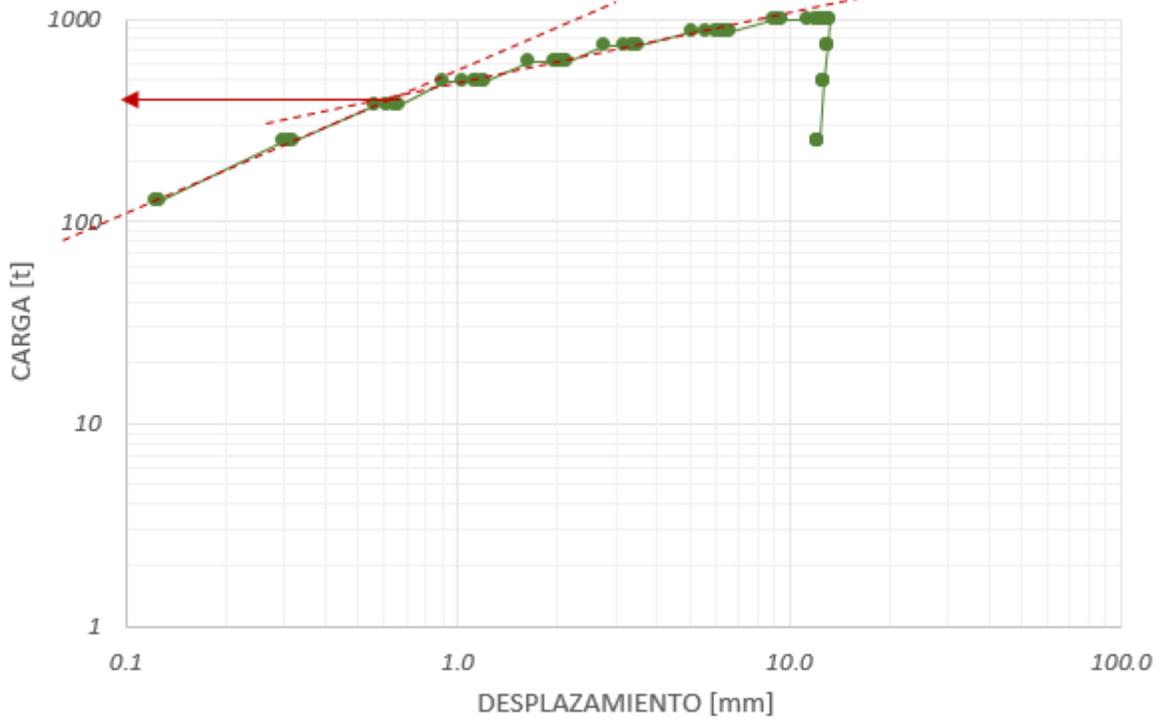


VIADUCTO CARLOS HANK GONZÁLEZ

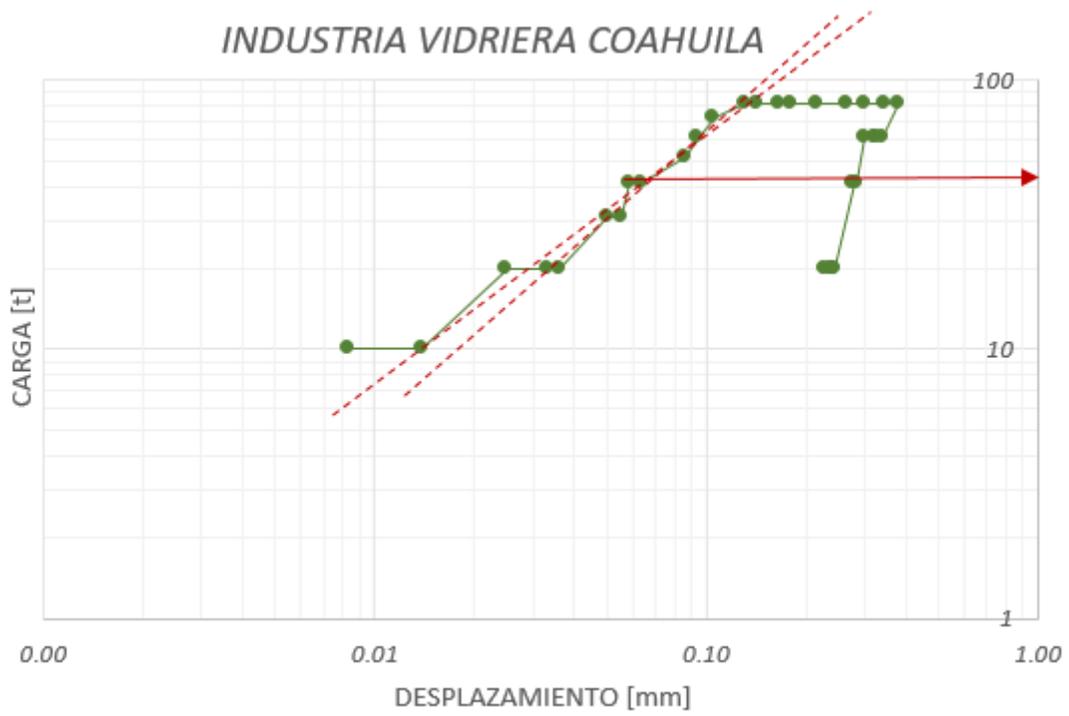


6.9.3. Método de Beer

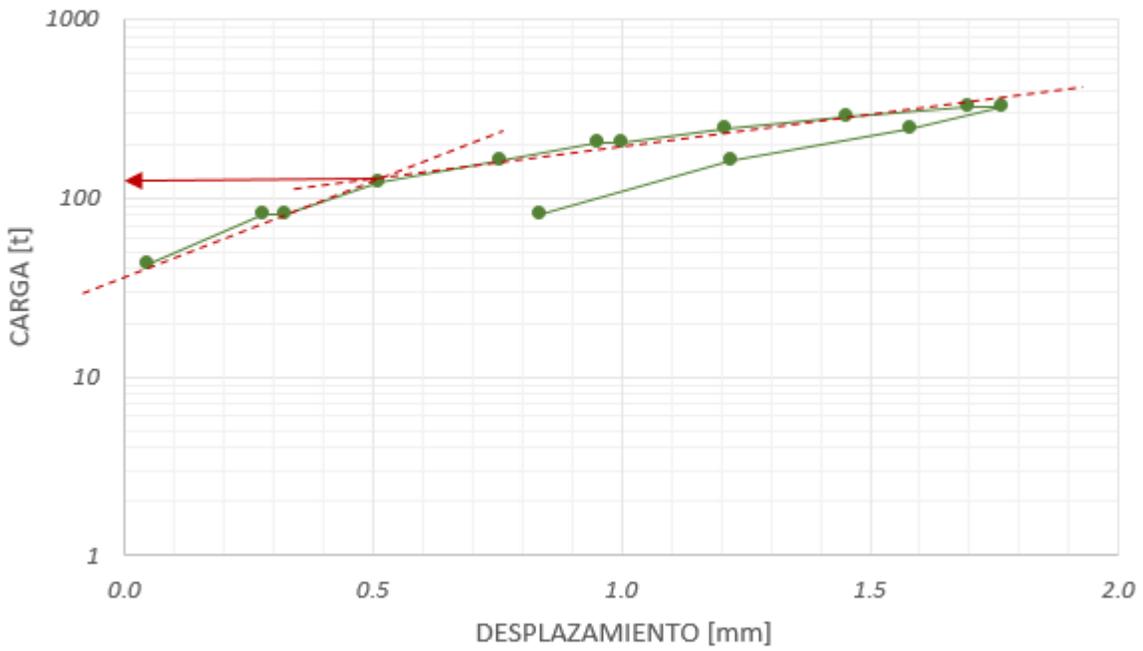
INTERPUERTO ARTHUR



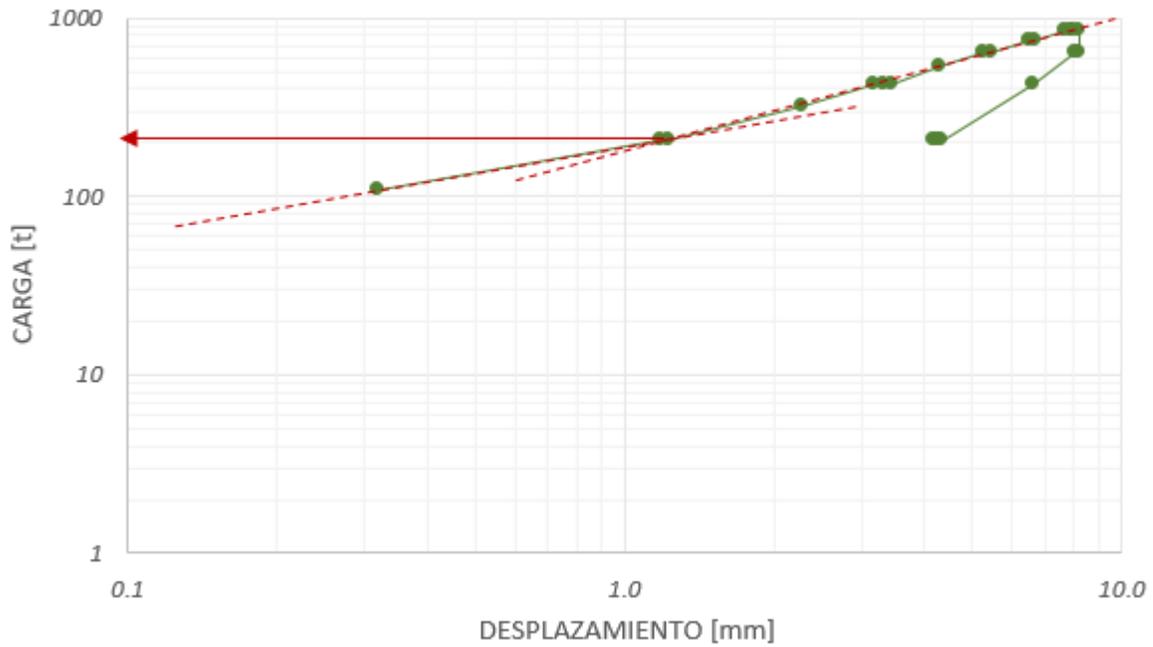
INDUSTRIA VIDRIERA COAHUILA



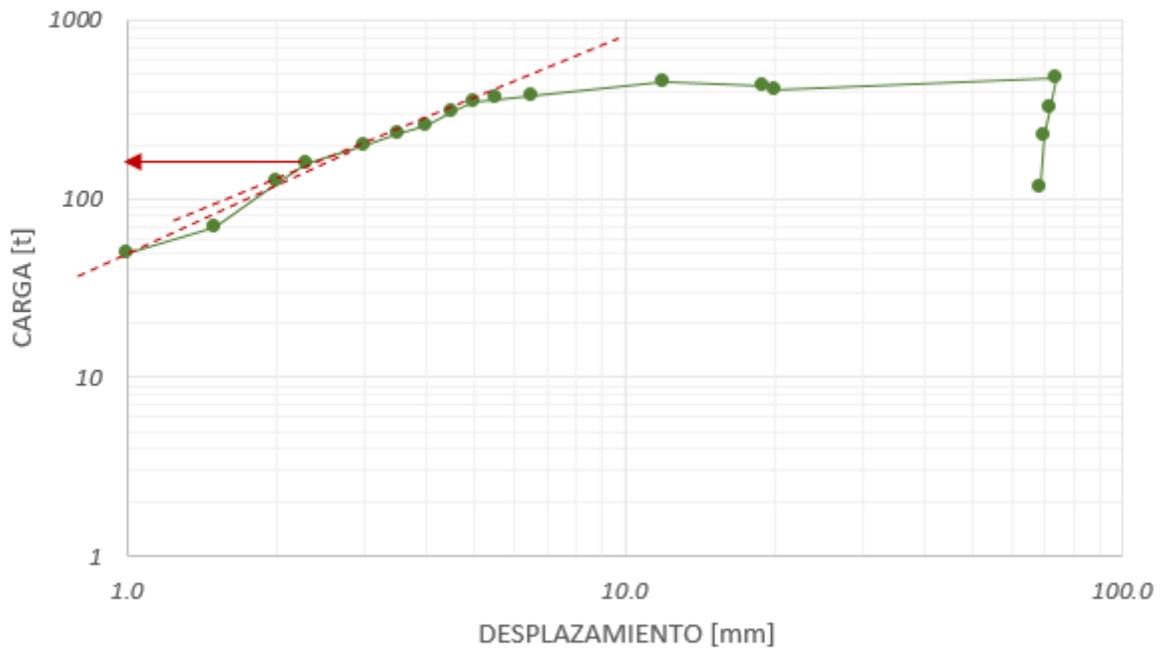
CENTRAL TERMOELÉCTRICA PESQUERA



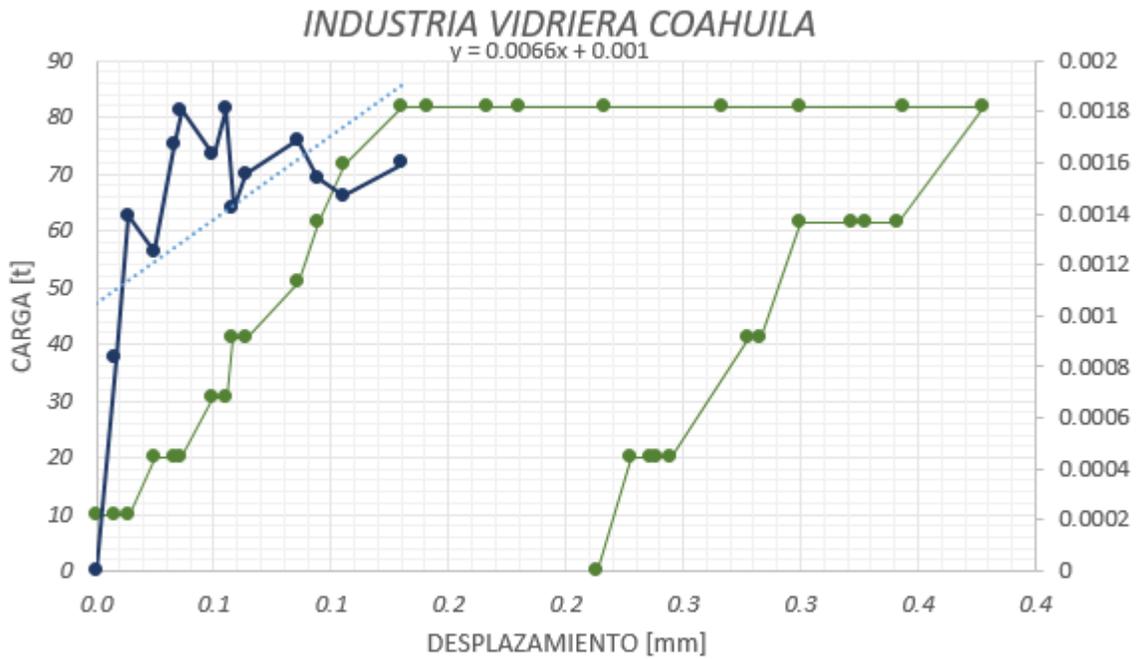
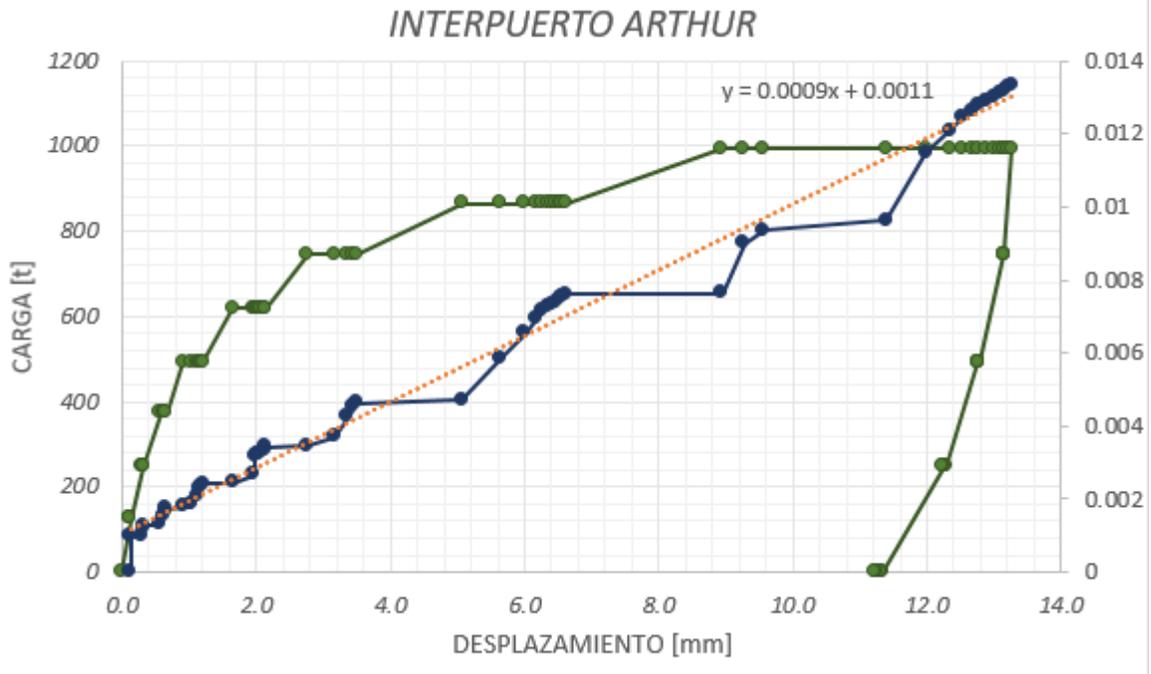
REFINERÍA MIGUEL HIDALGO



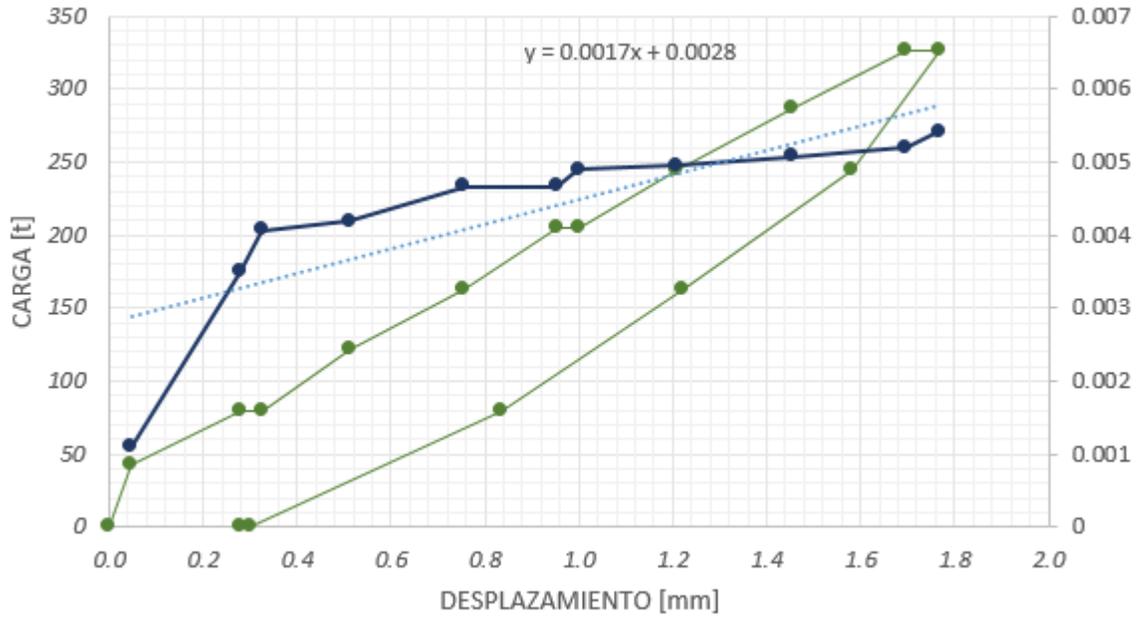
VIADUCTO CARLOS HANK GONZÁLEZ



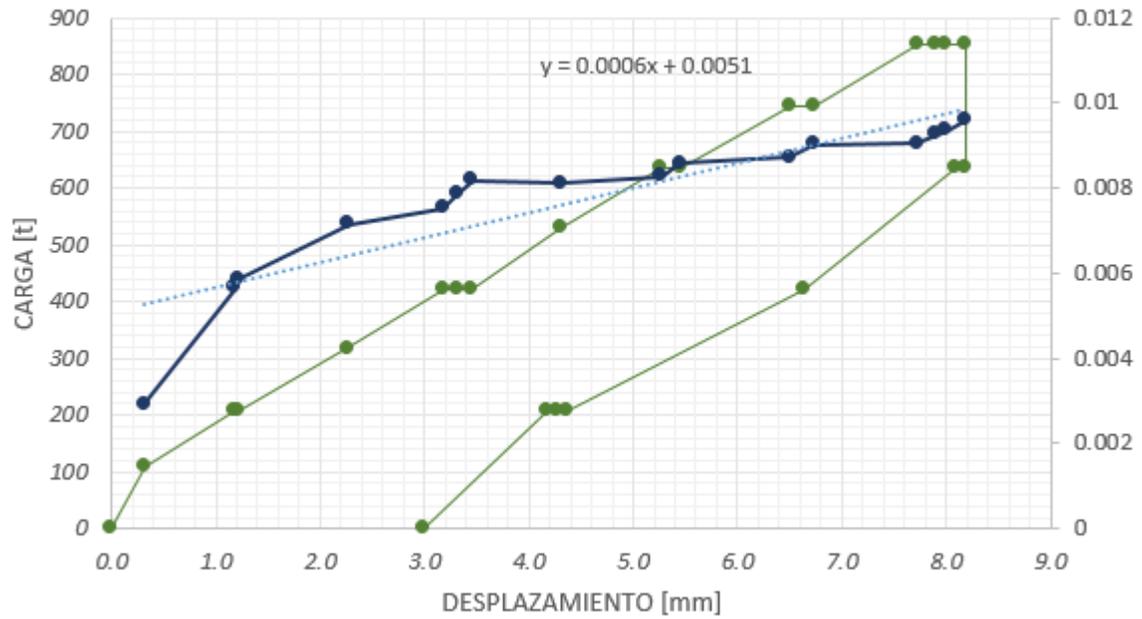
6.9.4. Método de Chin y Kondner

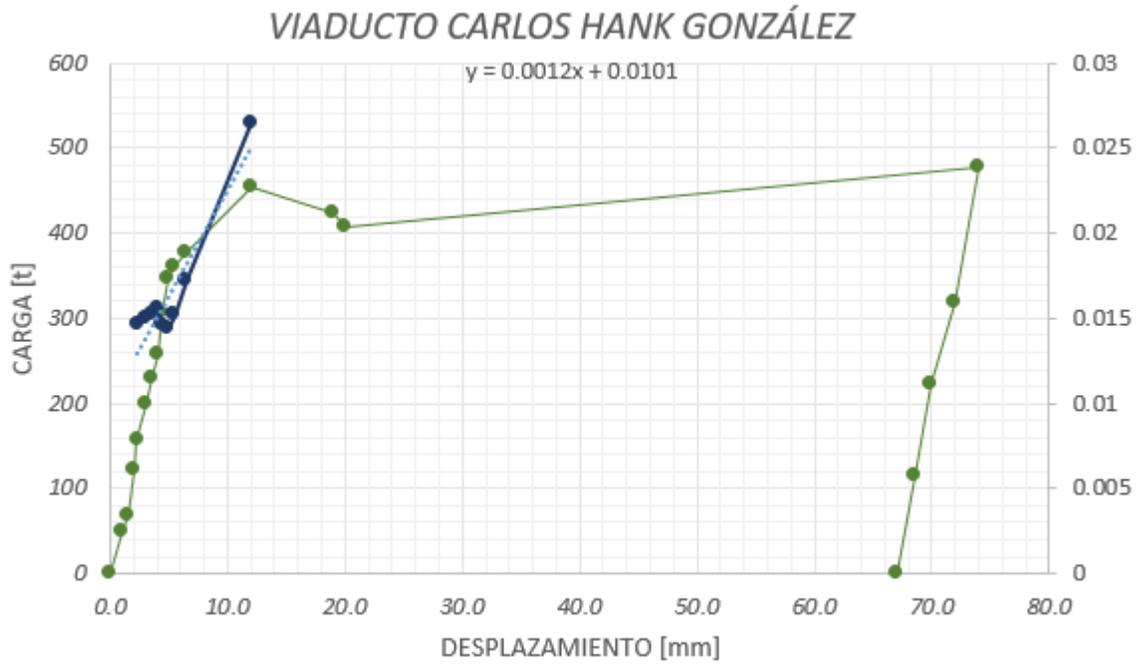


CENTRAL TERMOELÉCTRICA PESQUERA

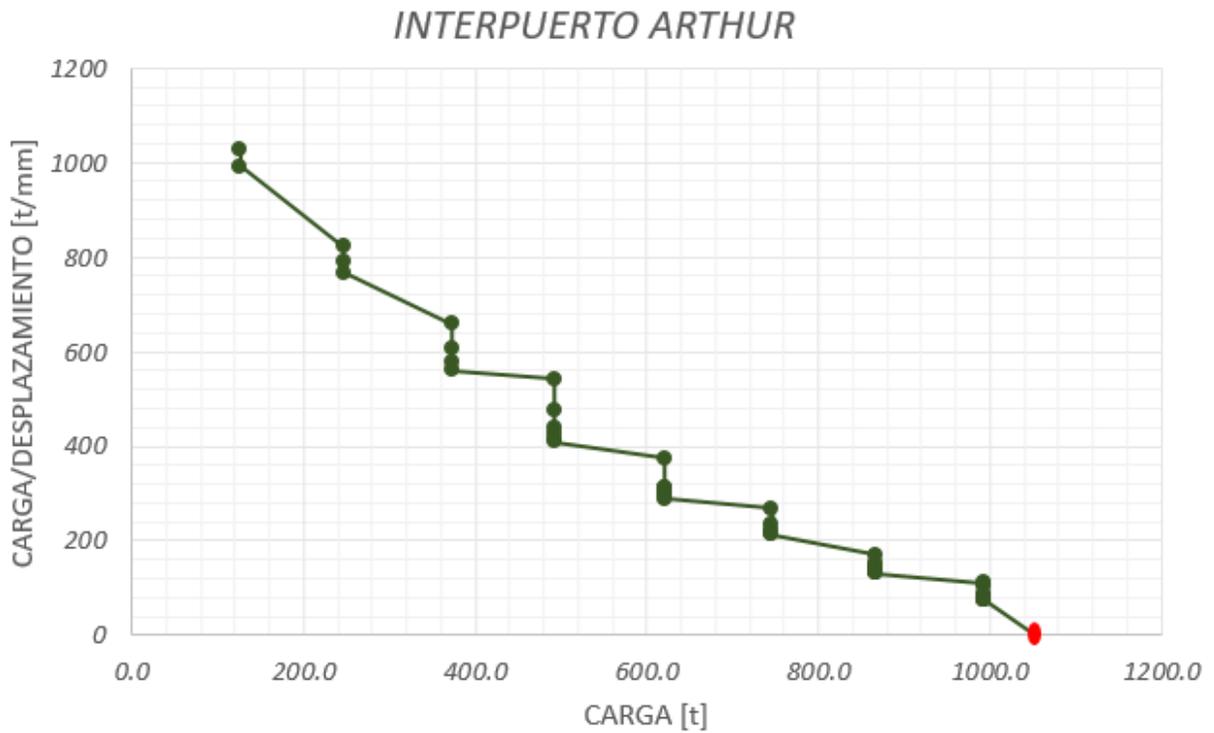


REFINERÍA MIGUEL HIDALGO

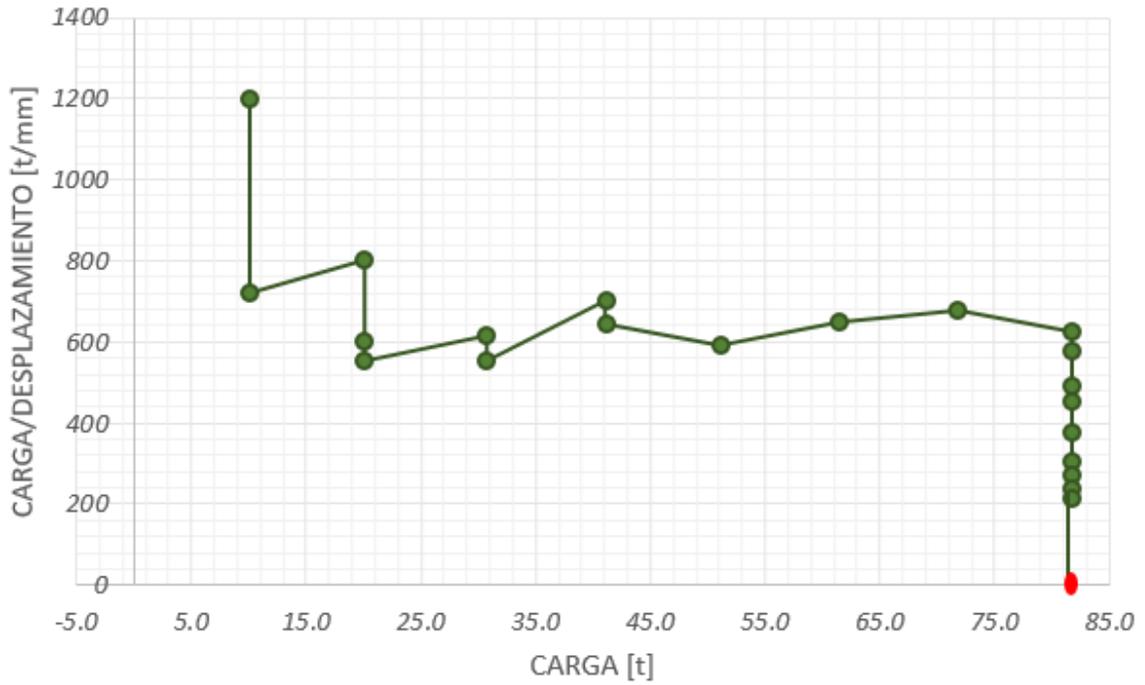




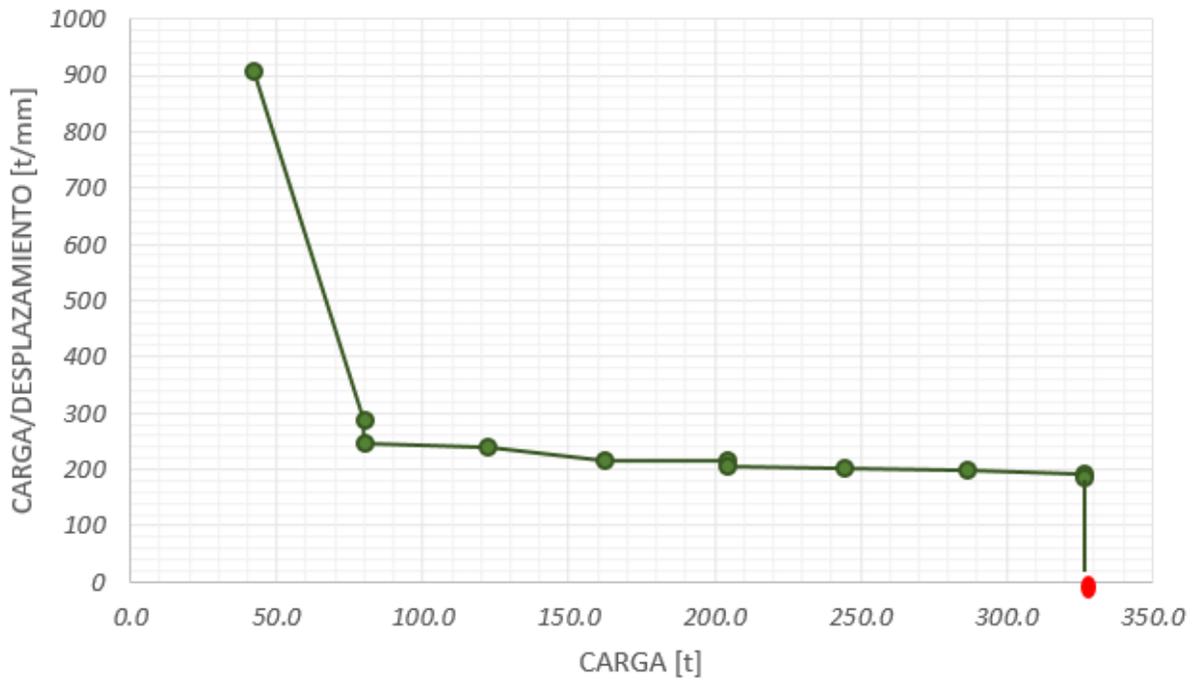
6.9.5. Método de Decourt



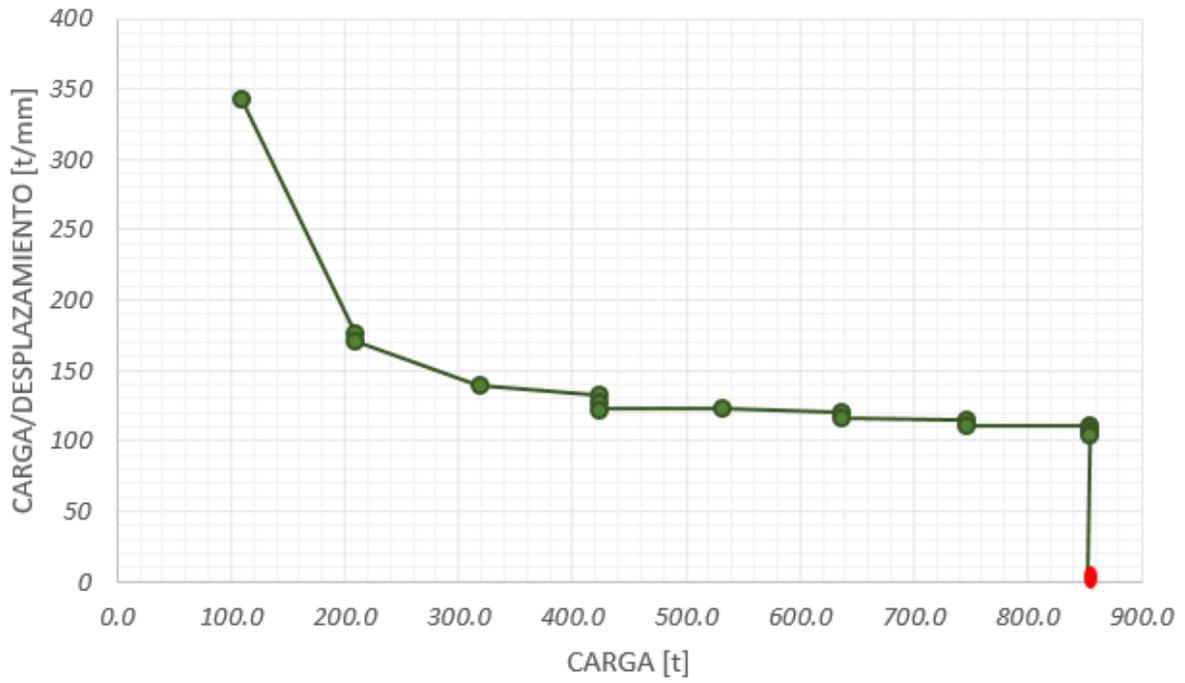
INDUSTRIA VIDRIERA COAHUILA



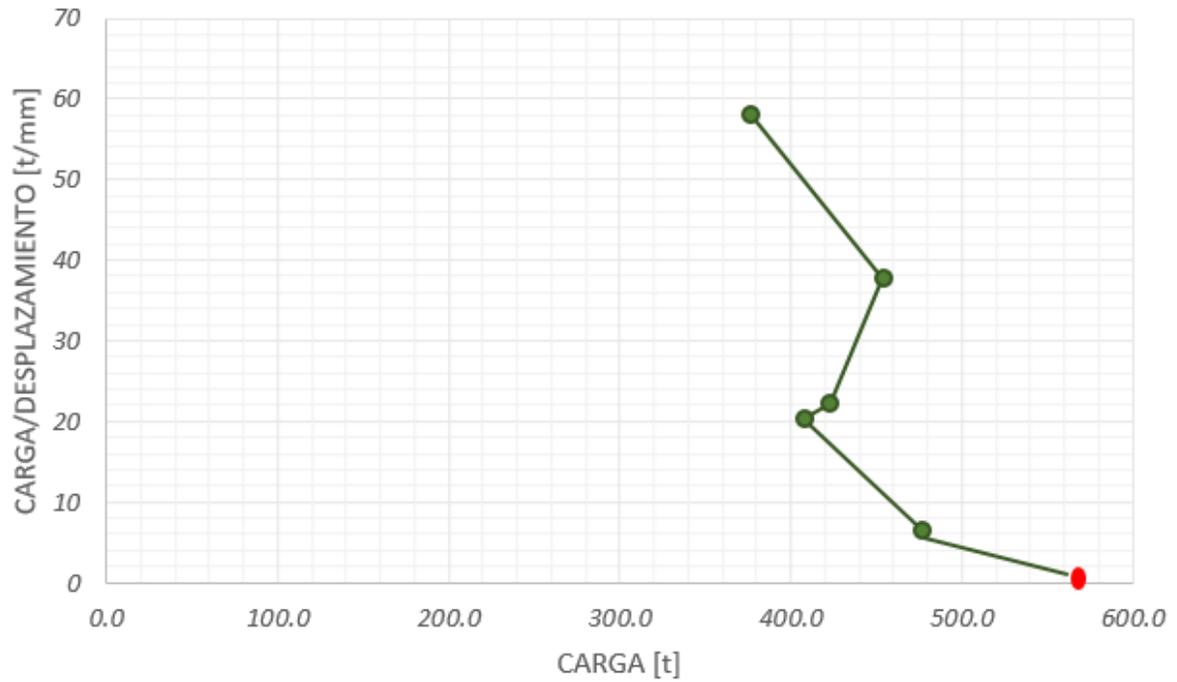
CENTRAL TERMOELÉCTRICA PESQUERA



REFINERÍA MIGUEL HIDALGO



VIADUCTO CARLOS HANK GONZÁLEZ



6.10. Tabla resumen

A continuación se presenta un resumen de las cargas últimas obtenidas por los diferentes criterios.

| TABLA RESUMEN Q_{ult} [t] | | | | | |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------|----------------|-----------------------|----------------------|
| CASO | Davisson (1972) | Hirany y Kulhawy (1989) | De Beer (1967) | Chin y Kondner (1970) | Decourt (1999; 2008) |
| INTERPUERTO ARTHUR | 610 | 480 | 373 | 1111.11 | 1050 |
| INDUSTRIA VIDRIERA COAHUILA | 81 | 20 | 41 | 151.5 | 81.8 |
| CENTRAL TERMOELÉCTRICA PESQUERA | 165 | 80 | 122 | 558.2 | 330 |
| REFINERÍA MIGUEL HIDALGO | 780 | 422.5 | 209 | 1666.6 | 860 |
| VIADUCTO CARLOS HANK GONZÁLEZ | 460 | 377 | 157 | 833.3 | 560 |

7. Conclusiones

- Al realizar las pruebas de carga es importante tener en claro los objetivos, y con ello puede lograrse la optimización de la solución de cimentación y reducir tiempos y costos.
- Según la literatura se ha observado que al probar las pilas o pilotes en una fecha cercana a la construcción de la cimentación, la capacidad de carga será una fracción de la real, debido al efecto de remoldeo que se ocasiona por el procedimiento constructivo.
- Existe una necesidad de ajustar métodos de cálculo de capacidad de carga relacionados con el tipo de suelos, ya que en la práctica los ingenieros tienden a calcular con las teorías clásicas las cuales presentan condiciones ideales del medio, que en conjunto con la gran variedad de suelos que México presenta, las incertidumbres del material y de los procedimientos constructivos es un análisis poco real, por lo que la implementación más frecuente de pruebas de carga a proyectos de cimentaciones y la constante investigación del medio, garantizara un diseño más óptimo, lo cual económicamente hablando beneficiara al proyecto.
- De acuerdo con la evaluación comparativa entre las magnitudes de carga última determinadas según los criterios estudiados en el presente trabajo a diferentes pruebas de carga, se observa que los métodos de Davisson, el método de Beer y el método de Hirany y Kulhawy presentan valores similares, considerados conservadores, mientras que por otro lado los valores obtenidos por los criterios de Decourt, Chin y Kondner son valores más arriesgados.

- Como se observa la prueba de carga de Industria vidriera Coahuila, presenta graficas con tendencias poco común a las gráficas típicas de carga-desplazamiento, esto probablemente se debe a que el programa de cargas que se le aplicó no era el indicado, se observa que al seguir los criterios presenta algunos problemas para obtener la carga última, debido a su trayectoria.
- Por otro lado es conveniente estudiar más pruebas de carga por diferentes procedimientos, de tal forma que al analizarlos con los métodos estudiados se pueda tener una muestra más representativa del comportamiento de cada método y poder determinar las condiciones óptimas para utilizar cada uno de los métodos.
- Hay que tener en consideración que los procedimientos constructivos no siempre son los más adecuados, ya que pueden influir en la interpretación errónea de la curva carga-desplazamiento, por lo que al realizar las pruebas y sobre todo al construir las pilas o pilotes es conveniente realizar un riguroso control de calidad.

8. Anexos

Datos de las curvas de carga.

| INTERPUERTO ARTHUR SALINAS VICTORIA, NUEVO LEÓN | |
|---|---------------------|
| Carga [t] | Desplazamiento [mm] |
| 0.0000 | 0.0000 |
| 126.0000 | 0.1228 |
| 126.0000 | 0.1270 |
| 247.0000 | 0.3006 |
| 247.0000 | 0.3133 |
| 247.0000 | 0.3217 |
| 373.0000 | 0.5664 |
| 373.0000 | 0.6138 |
| 373.0000 | 0.6477 |
| 373.0000 | 0.6646 |
| 493.0000 | 0.9102 |
| 493.0000 | 1.0383 |
| 493.0000 | 1.1218 |
| 493.0000 | 1.1515 |
| 493.0000 | 1.1896 |
| 493.0000 | 1.2065 |
| 620.0000 | 1.6510 |
| 620.0000 | 1.9727 |
| 620.0000 | 1.9854 |
| 620.0000 | 2.0066 |
| 620.0000 | 2.0515 |
| 620.0000 | 2.0836 |
| 620.0000 | 2.1336 |
| 620.0000 | 2.1463 |
| 746.0000 | 2.7728 |
| 746.0000 | 3.1750 |
| 746.0000 | 3.3655 |
| 746.0000 | 3.4544 |
| 746.0000 | 3.5094 |
| 866.0000 | 5.0758 |
| 866.0000 | 5.6557 |
| 866.0000 | 6.0113 |
| 866.0000 | 6.1891 |
| 866.0000 | 6.2780 |
| 866.0000 | 6.3458 |
| 866.0000 | 6.4093 |

| INTERPUERTO ARTHUR SALINAS VICTORIA, NUEVO LEÓN | |
|---|---------------------|
| Carga [t] | Desplazamiento [mm] |
| 866.0000 | 6.4701 |
| 866.0000 | 6.5320 |
| 866.0000 | 6.5786 |
| 866.0000 | 6.6209 |
| 993.0000 | 8.9408 |
| 993.0000 | 9.2795 |
| 993.0000 | 9.5673 |
| 993.0000 | 11.4004 |
| 993.0000 | 11.9930 |
| 993.0000 | 12.3444 |
| 993.0000 | 12.5307 |
| 993.0000 | 12.6704 |
| 993.0000 | 12.7847 |
| 993.0000 | 12.8947 |
| 993.0000 | 13.0006 |
| 993.0000 | 13.0895 |
| 993.0000 | 13.1614 |
| 993.0000 | 13.2122 |
| 993.0000 | 13.2673 |
| 746.0000 | 13.1487 |
| 746.0000 | 13.1487 |
| 746.0000 | 13.1487 |
| 746.0000 | 13.1487 |
| 493.0000 | 12.7762 |
| 493.0000 | 12.7720 |
| 493.0000 | 12.7677 |
| 493.0000 | 12.7593 |
| 247.0000 | 12.2851 |
| 247.0000 | 12.2682 |
| 247.0000 | 12.2597 |
| 247.0000 | 12.2386 |
| 0.0000 | 11.3411 |
| 0.0000 | 11.3115 |
| 0.0000 | 11.2691 |
| 0.0000 | 11.2183 |

| INDUSTRIA VIDRIERA COAHUILA PIEDRAS NEGRAS, COAHUILA | |
|--|---------------------|
| Carga [t] | Desplazamiento [mm] |
| 10.0000 | 0.0000 |
| 10.0000 | 0.0083 |
| 10.0000 | 0.0139 |
| 20.0000 | 0.0250 |
| 20.0000 | 0.0333 |
| 20.0000 | 0.0361 |
| 30.7143 | 0.0500 |
| 30.7143 | 0.0556 |
| 41.0714 | 0.0583 |
| 41.0714 | 0.0639 |
| 51.0714 | 0.0861 |
| 61.4286 | 0.0944 |
| 71.7857 | 0.1056 |
| 81.7857 | 0.1306 |
| 81.7857 | 0.1417 |
| 81.7857 | 0.1667 |
| 81.7857 | 0.1806 |
| 81.7857 | 0.2167 |
| 81.7857 | 0.2667 |
| 81.7857 | 0.3000 |
| 81.7857 | 0.3444 |
| 81.7857 | 0.3778 |
| 61.4286 | 0.3417 |
| 61.4286 | 0.3278 |
| 61.4286 | 0.3222 |
| 61.4286 | 0.3000 |
| 41.0714 | 0.2833 |
| 41.0714 | 0.2778 |
| 20.0000 | 0.2444 |
| 20.0000 | 0.2389 |
| 20.0000 | 0.2361 |
| 20.0000 | 0.2278 |
| 0.0000 | 0.2134 |

| CENTRAL TERMOELÉCTRICA PESQUERA | |
|---------------------------------|---------------------|
| PESQUERÍA, NUEVO LEÓN | |
| Carga [t] | Desplazamiento [mm] |
| 0.0000 | 0.0000 |
| 42.2222 | 0.0465 |
| 80.0000 | 0.2791 |
| 80.0000 | 0.3256 |
| 122.2222 | 0.5116 |
| 162.2222 | 0.7558 |
| 204.4444 | 0.9535 |
| 204.4444 | 1.0000 |
| 244.4444 | 1.2093 |
| 286.6667 | 1.4535 |
| 326.6667 | 1.6977 |
| 326.6667 | 1.7674 |
| 244.4444 | 1.5814 |
| 162.2222 | 1.2209 |
| 80.0000 | 0.8372 |
| 0.0000 | 0.3023 |
| 0.0000 | 0.2791 |

| REFINERÍA MIGUEL HIDALGO | |
|--------------------------|---------------------|
| TULA, HIDALGO | |
| Carga [t] | Desplazamiento [mm] |
| 0.0000 | 0.0000 |
| 109.0909 | 0.3182 |
| 209.0909 | 1.1818 |
| 209.0909 | 1.2273 |
| 318.1818 | 2.2727 |
| 422.7273 | 3.1818 |
| 422.7273 | 3.3182 |
| 422.7273 | 3.4545 |
| 531.8182 | 4.3182 |
| 636.3636 | 5.2727 |
| 636.3636 | 5.4545 |
| 745.4545 | 6.5000 |
| 745.4545 | 6.7273 |
| 854.5455 | 7.7273 |
| 854.5455 | 7.9091 |
| 854.5455 | 8.0000 |
| 854.5455 | 8.1818 |
| 636.3636 | 8.1818 |
| 636.3636 | 8.0909 |
| 422.7273 | 6.6364 |
| 209.0909 | 4.3636 |
| 209.0909 | 4.2727 |
| 209.0909 | 4.1818 |
| 0.0000 | 3.0000 |

| VIADUCTO CARLOS HANK GONZÁLEZ | |
|--|---------------------|
| CIRCUITO EXTERIOR MEXIQUENSE ESTADO DE MÉXICO | |
| Carga [t] | Desplazamiento [mm] |
| 0.0000 | 0.0000 |
| 50.0000 | 1.0000 |
| 69.2308 | 1.5000 |
| 123.0769 | 2.0000 |
| 157.6923 | 2.3000 |
| 200.0000 | 3.0000 |
| 230.7692 | 3.5000 |
| 257.6923 | 4.0000 |
| 307.6923 | 4.5000 |
| 346.1538 | 5.0000 |
| 361.5385 | 5.5000 |
| 376.9231 | 6.5000 |
| 453.8462 | 12.0000 |
| 423.0769 | 19.0000 |
| 407.6923 | 20.0000 |
| 476.9231 | 74.0000 |
| 319.2308 | 72.0000 |
| 223.0769 | 70.0000 |
| 115.3846 | 68.5000 |
| 0.0000 | 67.0000 |

9. Bibliografía

ASTM D1143/D1143M-07 (2013) Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load, American Society of Testing Materials, Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken.

Fellenius B.H. (2017) Basic of Foundation Design, electronic edition.

SMMS (1982) "Manual de Diseño y Construcción de Pilas y Pilotes" Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Segunda reimpresión.

SMIG (2017) "Ingeniería de Cimentaciones", Tomo II, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica.

Charles W. "A short Course in Soil-Structure engineering of deep foundations excavations and tunnels."

Bowles, J. E., 1988. Foundation Analysis and Design. 4^a edition. Singapore: Editorial McGraw Hill.

Paniagua, W. Ibarra, E. González, J. Ingumm – Pilotec; 2008. Diseño de prueba de carga axial en una pila instrumentada colada in situ en depósitos interestratificados del oriente del Valle de México.

<http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/t11-080#.W3DZAuj0nIU>