REVISIÓN DE LA CIMENTACIÓN DE ESTRUCTURAS PORTUARIAS

Autor: Daniel Quintana. Estudiante 5to año Ingeniería Civil.

dquintana@uclv.edu.cu

Tutor: Dr. Ing. Luis O. Ibañez. Dpto Ingeniería Civil.

Universidad Central de Las Villas. Villa Clara. Cuba

lbanez@uclv.edu.cu

1.1 RESUMEN.

El objetivo de este trabajo esta relacionado con la búsqueda bibliográfica de las diferentes normativas utilizadas en la revisión de puertos, y sobre el estudio del estado actual de su aplicación en nuestro país. Se abordará sobre metodologías seguidas por diferentes autores en la revisión estructural de puertos, haciendo énfasis en los aspectos relacionados con la carga horizontal a la que esta sometida la cimentación.

También se abordan las metodologías para determinar la capacidad de carga horizontal en pilotes, donde se hace una comparación importante entre varios autores (Universidad Tecnológica Nacional, Cátedra de Cimentaciones, en Buenos Aires; Theoretical Manual for Pile Foundations de Reed L. Mosher and William P. Dawkins de la US Army Corps of Engineers.). Se analizan las expresiones de carga que generan los buques al atracar y amarrados en el muelle.

Se presenta un estudio sobre las expresiones utilizadas en las pruebas de carga.

1.2 REVISIÓN DE PROYECTOS.

En los años actuales, el trasporte marítimo se caracteriza por el uso de contenedores de gran capacidad, y la tendencia a establecer rutas marítimas con puertos como base de almacenamiento, a partir de los cuales se intercambia las mercancías, todo ellos con el empleo de contenedores, dejando atrás el trasiego a granel de productos. Por otra parte, los puertos construidos en las décadas de los 50 al 80, fueron diseñados para cargas pequeñas y el uso del ferrocarril para el trasiego a granel de nuestras producciones.

A través de la modelación matemática basada en el Método de los Elementos Finitos (MEF) en nuestra Facultad se estableció un modelo en el cual se cuantificó y evaluó la capacidad de carga de las cimentaciones sobre pilotes de diferentes puertos del país. La modelación en 3D de cada estructura permitió determinar la redistribución de cargas en un muelle en función de su configuración. Se estudiaron las la cimentaciones de varios puertos, con una variada estratificación, y donde no se conocía la longitud real del pilote, por lo que se analizaron más de 120 casos determinado la capacidad de carga y se establece la respuesta de la cimentación bajo los diferentes sistemas de cargas, así como el comportamiento de las pruebas de carga que se realizaría en el lugar. Se modela además el fenómeno de la distribución de esfuerzos en la cimentación (interacción suelo - estructura), estableciendo recomendaciones prácticas para evaluar este fenómeno.

A continuación se abordan los resultados y características de proyectos de investigación sobre la capacidad de carga de puertos en Cuba, donde se realiza un estudio de las estructuras para obtener el estado y la problemática que tienen los mismos cuando ejecutan las tareas de carga y descarga, a los cuales se les realizan diferentes pruebas de carga evaluando su capacidad resistente, las respuestas de la estructura hacia esa carga y las fallas que este provoca.

Proyecto de Investigación sobre la capacidad resistente del atraque No 8 del Puerto del Mariel.

Se realizó el análisis de la capacidad resistente del atraque No 8 del Puerto del Mariel, para valorar la posibilidad de la explotación de una grúa Litronic LHM-400, de 900 T de capacidad.

Para la realización del proyecto se realizaron las siguientes etapas de investigación:

1. Modelación del problema.
2. Análisis de la losa (capacidad resistente, curva carga vs. deformación)
3. Análisis de la viga cabezal (capacidad resistente)
4. Análisis de la cimentación sobre pilotes(capacidad de carga, curva carga vs. deformación)
5. Recomendaciones para la realización de la prueba de carga
6. Realización de la prueba de carga (Cimentación y losa)
7. Modelación de las pruebas de cargas.
8. Calibración de los modelos utilizados con los resultados de las pruebas de cargas.
9. Conclusiones Finales.

Se realizó una prueba de carga al pilote en la zona más crítica, cargándose directamente hasta 150 T, y teniendo en cuenta las cargas adicionales, se llega a 160 T, obteniéndose como resultados asentamiento de 1,8 mm, lo que evidencian que los pilotes llegan a un estrato resistente de argilita en lugar de trabajar como pilote flotante en los estratos menos resistentes.

En este proyecto se comprobó de forma definitiva que el muelle y por tanto sus elementos componentes trabajan de forma espacial lo que garantiza una redistribución optima de la carga que coincide desde le punto de vista ingenieril con la modelación realizada, los pilotes fueron comprobados, y en todos los casos llegan al estrato de argilita y que por tanto se puede considerar una carga resistente de trabajo de 60 T, suficiente para soportar las solicitaciones que trasmite una (1), Litronic LHM –400 de 900 T de carga total; de todo el trabajo realizado de modelación y prueba de carga se concluye que es factible la explotación en el muelle de la grúa Litronic LHM –400 de 900 T de carga total.

Proyecto de estudio de la capacidad de carga del Atraque No. 8 del Puerto del Mariel para la manipulación de cargas mayores a 350 T.

Se evalúa la capacidad actual de carga de la cimentación del Atraque No. 8 del Puerto del Mariel para realizar operaciones de carga y descarga de maquinaria pesada de más de 350 Toneladas. La manipulación y traslado de esta maquinaria incrementará la carga aplicada sobre dicho puerto y se necesita evaluar si dicho incremento puede ser soportado por toda la estructura y la cimentación del muelle.

Se utilizan los resultados de un estudio precedente realizado en el 2002, para comprobar si para el nuevo sistema de carga los estados tensionales generados estaban dentro del intervalo tensional ya estudiado con el modelo matemático y la prueba de carga realizada en el trabajo anterior. Si la respuesta fuera positiva entonces se podría emplear el modelo calibrado del atraque y sobre el mismo buscar la respuesta bajo el nuevo sistema de carga, y con ello prescindir de la realización de una nueva prueba de caga.

Metodología:

1. Modelación de la carga actuante a nivel de cada pilote (Influencia de la rigidez del cabezal, espaciamientos y acción de las cargas móviles).
2. Cálculo de la capacidad resistente del pilote aislado (carga de rotura y de carga de trabajo)
   a. Cálculo de la capacidad resistente por métodos basados en la teoría de la plasticidad (Métodos estáticos)
   b. Modelación por Elementos Finitos de la capacidad de carga del pilote.
   c. Chequeo estructural del pilote.
4. Cálculo de la capacidad de carga del pilote bajo la acción de cargas horizontales
5. Cálculo de los asentamientos de la cimentación:
6. Cálculo de la capacidad estructural de las vigas.
   a. Cálculo de la capacidad estructural.
   b. Cálculo de las deformaciones y la fisuración
7. Cálculo de la capacidad estructural de las losas.
   a. Cálculo de la capacidad estructural.
   b. Cálculo de las deformaciones y la fisuración
   c. Modelación por Elementos Finitos.
8. Estimación del comportamiento de la curva de Carga vs. Deformación de la prueba de carga estática (Modelación por el MEF).
9. Verificación del comportamiento real de la curva de Carga vs. Deformación obtenida de la prueba de carga ya realizada en el año 2002, con respecto a la estimada en la modelación.
10. Conclusiones y recomendaciones sobre la capacidad resistente de la estructura.
11. Verificación del comportamiento real de la estructura durante la descarga.

Se logró evaluar las posibilidades de explotación del atraque 8 del muelle del Mariel bajo los sistemas de cargas producidos por la manipulación de bultos con peso máximo de 315 ton, que en conjunto con el equipo de transporte trasmiten al muelle 375 ton. Para este sistema de carga se analizaron las capacidades resistentes de los tres componentes principales de el muelle, es decir, los pilotes, las vigas y las losas, a partir de una modelación espacial del mismo utilizando como base la investigación realizada en le año 2002, a partir de la cual se había obtenido un modelo calibrado de dicho muelle aplicándosele al mismo un nuevo sistema de carga.

Tanto para el caso de los pilotes, vigas y losas, se analizaron todos los posibles sistemas de cargas actuantes, comprobándose que las solicitaciones generadas, son menores a las resistentes, cumpliendo los estados límites de resistencia y utilización. Estos resultados están

avalados por los resultados de la prueba de carga del 2002, en la cual se generan estados tensionales mucho mayores a los que estarían sometidos estos elementos bajo este nuevo sistema de carga.

Para todas las posibles posiciones de la carga, los pilotes más esforzados trabajan a 48.5 ton, inferior a los 60.2 ton. establecidas como capacidad de carga de trabajo a partir de los análisis realizados anteriormente. Es necesario aclarar que todos los análisis se realizaron considerando carga estática, por lo que se debe ser cuidadoso en la manipulación de la carga, para evitar que se produzcan impactos que pueden llegar a generar cargas de hasta 1.5 veces las previstas, poniendo en peligro la estabilidad del muelle.

Luego de la revisión de 4 proyectos relevantes, se puede afirmar que el uso de la modelación matemática utilizando el MEF y la realización de pruebas de carga real ha permitido la evaluación de importantes estructuras, lográndose establecer valores de carga más precisos como en el caso de la determinación de fricción negativa en los pilotes del Viaducto de Matanzas, hacer propuestas más racionales para el proceso de hinca de pilotes, hacerse un juicio más exacto sobre el comportamiento de las cimentaciones lo que ha arrojado en varios casos valores de capacidad resistente mayores a los previstos inicialmente. Estos resultados tienen un indudable valor económico para el país como se ha demostrado en cada uno de ellos, evitando en varios casos las costosas reparaciones o reconstrucciones. A su vez han permitido establecer políticas de explotación adecuadas y técnicamente argumentadas.

En estos proyectos nunca se analizó el efecto de la carga horizontal por lo que será analizado más adelante en este trabajo de diploma.

1.3 REVISIÓN DE METODOLOGÍAS PARA EL CHEQUEO ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS Y PUERTOS.

Dentro de la bibliografía consultada se encuentran artículos de evaluación de obras civiles, Modelización Numérica y Virtualización de Edificios Históricos. Interface GiD-Sap2000-VRML. Muñoz Salinas, Francisco. Maristany y Carreras Jordi; Metodología para la solución de proyectos de puertos. En estas metodologías se describen evaluaciones de diferentes obras mediante métodos relativamente sencillos.

Mantenimiento y rehabilitación. Evaluación de obras civiles.

La metodología consiste en un proceso que se ejecuta a pedido del dueño de la edificación, de las instituciones de vialidad, edificaciones, obras hidráulicas y sanitarias, eléctricas cumpliendo con programas de mantenimiento o después de la ocurrencia de un evento que divide la evaluación en varias etapas; Evaluación primaria, Detallada o Secundaria y Proyecto de Rehabilitación.

La Evaluación Primaria, está compuesta por un informe cualitativo de la obra, se debe hacer una inspección sencilla en campo y llenar una planilla de inventario que genera un primer informe de mantenimiento y complementa una base de datos. Contempla las condiciones normales de la obra al momento de la evaluación, materiales, componentes, daños, estado de mantenimiento, operatividad, etc. Va dirigida fundamentalmente a la determinación de los daños existentes en el momento de la evaluación.

Normalmente los métodos de evaluación son del tipo cualitativo (cantidad del deterioro) y cuantitativo (gravedad del deterioro) que permiten de una manera clara, simple y ordenada encarar el problema de evaluar una obra en su condición de uso por simple inspección ocular,

ayudado con la instrumentación necesaria, generar tres índices que interpretan el estado de deterioro de la estructura en interrelación con el ambiente condicionante y son los siguientes:

Índice de Daños (ID): es el daño existente en los elementos de la obra por los factores estáticos en el momento de hacer la inspección evaluativa.

Índice de Severidad (IS): es la acción de los agentes exteriores que causan los daños sobre los elementos de la estructura, representa los factores dinámicos de la evaluación.

Índice de Vulnerabilidad (IV): es el nivel de pérdida de uno o de varios elementos estructurales esenciales de la obra al ser sometidos al riesgo de un evento, representa la combinación de los índices de daños y de severidad formando un par ordenado que interpreta la realidad física de la obra, pudiéndose representar por un número porcentual único para cada estructura.

En las obras, para la evaluación de los aspectos de cantidad de deterioro se utiliza una matriz, cuyos elementos simbólicos reúnen en si las dimensiones de la observación, generan la apreciación del grado de deterioro de la estructura y entre paréntesis la categoría de deterioro. En función de la categoría del deterioro se toman acciones de mayor o menor envergadura. Se introduce el concepto de estados límites de desempeño, estos son estados donde se superan las condiciones de diseño, comienzan (ver **Figura 1.**) en A planteando un estado límite de servicio en el rango elástico u operacional, donde después de un evento característico no hay que reparar nada y los peritos evaluadores dan la orden de ocupación inmediata, se obtienen márgenes menores al 5% de los daños. Un segundo límite en B correspondiente a daños menores genera la utilización de programas de mantenimiento integral con porcentajes de reparación hasta de un 20% de daños.

Un tercer estado límite se puede tomar en C donde se obtienen daños moderados hasta de un 40% y se debe proceder a encontrar las causas subyacentes de los daños estructurales. El siguiente corresponde al punto D o máximo soporte de capacidad portante de la edificación ó límite de seguridad donde se recomienda la desocupación del inmueble por tener hasta un 60% de daños estructurales y la obra entra en un periodo de prevención de colapso o etapa para salvaguardar recursos y vidas, es un margen de seguridad, las rehabilitaciones de la estructura normalmente son a largo plazo. Por último en E o límite de colapso donde la edificación esta por caer por el agotamiento de la estructura si es que no se ha caído ya.

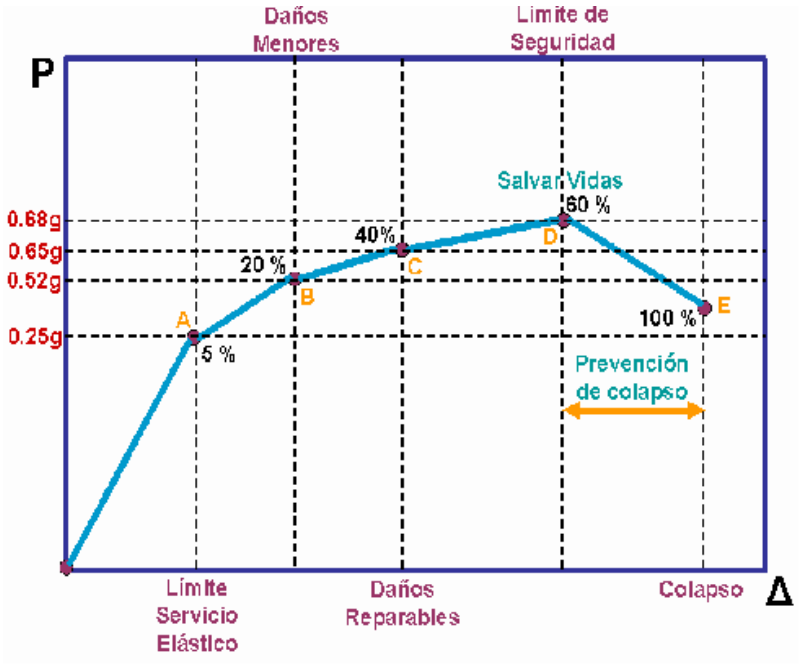


Figura 1. Estados Límites de Desempeño.

La evaluación Detallada o Secundaria. La evaluación detallada se basa en el cálculo de las relaciones Capacidad / Demanda donde cada construcción tiene elementos específicos que deben ser revisados y cada uno tiene una relación de C/D. Los elementos evaluados deben tener relaciones de C/D < 1, si la relación es menor de 1 el elemento tiene que ser tratado de forma especial y debe ser rediseñado. De la evaluación detallada se generan los Proyectos de Rehabilitación.

El resultado de la evaluación detallada me indica el estado general de la obra como un aporte de todos los elementos particulares, generando expresiones que indican un porcentaje (%) total de vulnerabilidad. La demanda esta dictada por las normas especificas y la capacidades por modelos estructurales de software lo más aproximados posibles al estado actual de la edificación. La evaluación detallada concluye con recomendaciones que deben de ser resueltas bajo el criterio del consultor y el grado de vulnerabilidad general que presenta la obra directamente en un programa de reparación o en un Proyecto de Rehabilitación.

Proyecto de rehabilitación. Es la etapa en que se hace que una Obra Civil vuelva a tener las mismas o mejores condiciones de servicio que las que tenía cuando comenzó su vida útil. Las técnicas de rehabilitación pueden ser reversibles o irreversibles, en la primera se trata de que la edificación obtenga nuevamente su capacidad portante reforzando los elementos sin intervención de elementos nuevos, solo reparación de elementos dañados, que en su conjunto mejoran la ductilidad de la edificación, la resistencia y rigidez de los diafragmas. Las técnicas irreversibles comprenden la adherencia de elementos nuevos para reforzar la obra evaluada con inyecciones y vaciados, elementos adheridos, morteros, reparación de juntas de construcción, reconstrucción de partes, incorporación de barras de preesfuerzo y reforzamiento de fundaciones.

Metodología para el análisis estructural de un edificio arquitectónico, a través de entornos gráficos. Procesos a desarrollar:

a. El primero, llamado Preproceso, en el cual se define todo lo relacionado a la geometría del edificio, y entrada de datos en general.

b. El Análisis, donde, dependiendo del tipo de problema, se aplican las distintas teorías de análisis estructural (sistema de barras, de placa, elasticidad bi y tridimensional, etc.).

c. Y por último el Posproceso, que es la manera de visualizar los resultados numéricos a través de gráficos.

Metodología para la solución de proyectos de puertos.

Esta metodología fue realizada por los compañeros del Centro de Investigaciones y Desarrollo de Estructuras y Materiales basados en una vasta experiencia en la revisión de estructuras portuarias.

En el siguiente gráfico correspondiente a la **Figura 2** se representa la metodología utilizada de forma general en la solución de proyectos de puertos, en la cual no se tiene en cuenta la revisión de los elementos de comportamiento estructural ante cargas horizontales.

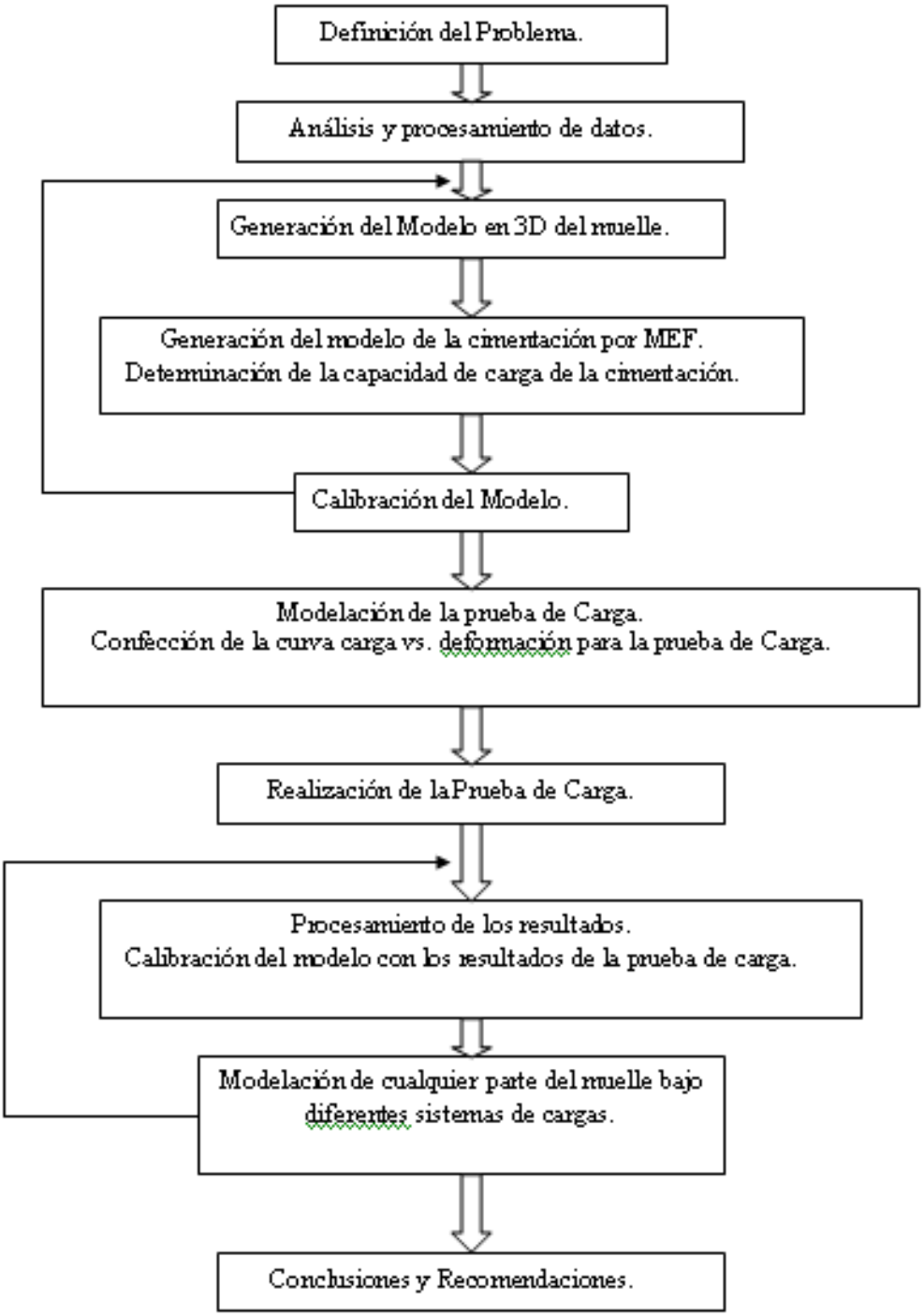


Figura 2. Metodología utilizada de forma general en la solución de proyectos de puertos.

1.4 ESTUDIO Y CRÍTICA DE LAS METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD DE CARGA HORIZONTAL EN PILOTES.

En este epígrafe se explicarán cómo diferentes autores tratan el tema de la determinación de la capacidad de carga horizontal en pilotes y los sistemas de carga que generan esfuerzos horizontales.

1.4.1 EXPRESIONES PARA LA CARGA QUE GENERA EL BUQUE.

El buque produce varios efectos contra el puerto emitiendo grandes fuerza o cargas lo que hay que tener en cuenta al diseño y en la revisión de estructuras portuarias.

Fuerzas que se generan cuando el buque está amarrado:

1- $F_{NT} = F_{NV} + F_{NC} + F_{NO}$ (1)

Donde:

F_{NT} es la fuerza normal total que se considera como la suma de los efectos normales debido al viento F_{NV}, las normales debido a la corriente marítima F_{NC}, y las normales debido a las olas F_{NO}.

1.1- Fuerza normal de viento en kilómetros.

$$F_{PV} = 73.6 \cdot 10^{-5} \cdot A_N \cdot V_N^2 \cdot \varepsilon \qquad \textbf{(2)}$$

Donde:

73.6 = coeficiente empírico

A_N = Área neta expuesta del buque en lastre normal en m^2, que se determina por fórmula.

$$A_N = A - A_P \qquad \textbf{(3)}$$

A = Área expuesta bruta del buque en lastre en m^2. A falta de datos exactos se puede determinar por una de estas fórmulas empíricas.

$A=0.10E^2$ para buques petroleros

$A=0.11E^2$ para buques pesqueros

$A=0.12E^2$ para buques pasajeros

$A=0.13E^2$ para buques cargueros

E = eslora máxima del buque en m.

A_P = Área de apantallamiento que está delante de área expuesta bruta del buque en m^2

Eslora máxima del buque en (m)	E ≤ 25	25 < E ≤ 75	75 < E ≤ 200	200 < E
ε	1.00	0.80	0.65	0.50

Tabla 1. Valores del coeficiente de ε.

1.2- Fuerzas normales debido a la corriente marítima F_{NC}, en kilómetros.

$$F_{NC} = 0.59 \cdot A_{NS} \cdot (V_{NC})^2 \qquad \textbf{(4)}$$

Donde:

0.95= coeficiente empírico.

A_{NS} = área sumergida de buque en m^2, normal a la dirección de la corriente, que a falta de datos se puede obtener por formulas empíricas que tenga en cuenta el calado y la eslora para la condición real del desplazamiento.

V_{NC} = velocidad de la corriente normal atraque, en m/s. Esta velocidad se determina de las informaciones hidrográficas con un 2% de probabilidad.

1.3- Fuerza normal debido a la ola F_{NO}., en kilómetros.

$$F_{NO} = \eta \cdot \rho \cdot \mathrm{g} \cdot \mathrm{ho} \cdot \mathrm{Ans} \qquad \textbf{(5)}$$

η = es un coeficiente que se toma del ábaco en función de las relación del calado C en m y la longitud de la ola en m.

ρ = densidad del agua de mar 1.025 tf/m^3.

g = aceleración de la gravedad = 9.81 m/s^2.

h_o = altura de la ola, en m que se determina de las informaciones hidrográficas del lugar para un 5% de probabilidad.

2- Fuerzas paralelas del buque amarrado.

Es la fuerza paralela total F_{PT} que se considera como la suma de las fuerzas paralelas debido al viento F_{PV}, a la corriente marítima F_{PC}, y las fuerzas paralelas debido a las olas F_{PO}.

$$F_{PT} = F_{PV} + F_{PC} + F_{PO} \qquad \textbf{(6)}$$

2.1- Fuerza normal de viento en kilómetros.

$$F_{PV} = 49.0 \cdot 10^{-5} \cdot A_{PV} \cdot V_{PV}^2 \cdot \varepsilon \qquad \textbf{(7)}$$

Donde:

49.0 = coeficiente empírico.

A_{PV} = área neta expuesta del buque en lastre normal, paralela a la velocidad del viento. A falta de datos se tomará para el valor de ésta el 14% del área neta, A_N.

V_{PV} = componente de la velocidad del viento paralela al atraque que se determina por las informaciones hidrográficas del lugar de emplazamiento de la obra. De no existir estos datos se usarán los de la norma cubana de carga de viento.

ε = Coeficiente que se toma de la Tabla anterior.

2.2- Fuerzas paralela debida a la corriente marítima.

Es la producida por la velocidad de la corriente F_{PC}, en kN.

$$F_{PC} = 0.59 \cdot \text{Aps}(\text{V}_{\text{PC}})^2 \qquad \textbf{(8)}$$

Donde:

0.95= coeficiente empírico.

V_{PC} = velocidad de la corriente paralela al atraque, en m/s y se determina de las informaciones hidrográficas con un 2% de probabilidad.

A_{PS} A falta de datos se tomara el 14 % del área sumergida normal.

2.3- Fuerza paralela debido a la ola F_{NO}, en kilómetros.

$$F_{NO} = \eta \cdot \rho \cdot \text{g} \cdot \text{ho} \cdot \text{Aps} \qquad \textbf{(9)}$$

Donde:

η, ρ, g, h_o ya fueron definidos anteriormente.

A_{PS} A falta de datos se tomara el 14 % del área sumergida normal.

3- Fuerza de compresión sobre el muelle o amarradero.

Como señalamos anteriormente la F_N que le viento, la corriente y las olas producen sobre el buque, se transmites al atraque, determinando fuerza de compresión o de tracción. La fuerza total de compresión, C, en kilonewton, sobre el muelle o amarradero:

$$C = \frac{1.10 \cdot F_{NT}}{Lc} \qquad \textbf{(10)}$$

Donde:

Lc = longitud de contacto de la operación con el atraque, en m. este valor depende de la relación entre el largo del muelle o amarradero L en m y el largo de la recta de buque, Lr en m.

Si L > Lr el valor de Lc = Lr

Si L < Lr el valor de Lc = L

El valor de Lr se determina a falta de datos de los buques, en función de la eslora E, por las expresiones siguientes:

Lr = 0.65E para buques petroleros, pesqueros y cargueros.

Lr = 0.50E para buques de pasajeros.

4- Fuerza de tracción sobre los cabos

Cuando el buque ejerce tracción sobre el muelle, lo hace mediante las fuerzas de tracción N_T que actúan sobre los cabos de amarre. Esta se determina a partir de de la fuerza normal total F_{NT}, del numero de amarres que trabajan (n), del ángulo de inclinación (β en grados) del cabo con el plano que contiene el tablero del muelle y del ángulo (α en grados) que forma la proyección de N_T con la línea de atraque

$$Nt = \frac{F_{Nt}}{n \cdot sen\alpha \cdot \cos\beta} \qquad \textbf{(11)}$$

Fuerzas que se generan al atracar el buque:

Al atracar el buque este produce impacto sobre el muelle, determinando la fuerza normal de impacto, F_{ni} y la fuerza paralela de impacto, F_{pi}

1- Fuerza normal total debida al impacto F_{ni}

Para obtener esta fuerza en kN es necesario determinar la energía absorbida E_{ab}, por el sistema de atraque defensa en KJ:

$$Eab = \Psi \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \qquad \textbf{(12)}$$

Donde:

Ψ = coeficiente que se toma de una tabla. Para buques en lastre se reducirán los valores en 15%

V = componente de la velocidad de aproximación normal del buque en m/s que se toma de una tabla

g = aceleración de la gravedad = 9.81 m/s

La fuerza normal total de impacto aplicado al atraque se obtiene por la expresión siguiente:

$$Fni = \sqrt{2 \cdot K \cdot Eab} \qquad \textbf{(13)}$$

Donde:

K = es la constante de rigidez del sistema atraque-defensa, en kN/m.

E_{ab} = está definida en la expresión anterior.

2- Fuerza paralela total debida al impacto F_{pi}

$$Fpi = \mu \cdot Fni \qquad \textbf{(14)}$$

Donde:

μ = coeficiente que depende del material de la superficie en contacto de la defensa y buques.

μ = 0.5 para hormigón o goma.

μ = 0.4 para madera.

1.4.2 CARGA HORIZONTAL EN PILOTES.

1.4.2.1 Metodología Propuesta por la Universidad Tecnológica Nacional de Buenos Aires. Cátedra de Cimentaciones.

Existen varios casos en que se producen cargas laterales sobre estructuras cimentadas sobre pilotes. Algunos ejemplos son: los ciclones que traen consigo fuertes vientos y grandes olas que impactan sobre plataformas petroleras, puentes, muelles, etc. Los sismos hacen oscilar las estructuras provocando fuerzas laterales; los barcos al atracar en los muelles les imponen fuerzas laterales.

- ✓ Los pilotes sometidos a cargas horizontales resisten las solicitaciones deformándose y movilizando la reacción necesaria del suelo que los rodea.
- ✓ El comportamiento de las piezas depende de la rigidez relativa del pilote respecto al suelo.
- ✓ Según el Manual de fundaciones Canadiense, la capacidad de carga horizontal puede estar regida por los siguientes tres mecanismos:

1. Se excede la capacidad de carga última del suelo resultando grandes deformaciones horizontales de los pilotes y por consiguiente, la falla de la fundación (Empuje Pasivo).
2. Los momentos de flexión pueden generar solicitaciones excesivas en el hormigón ó el acero con que están construidos resultando una falla estructural de los pilotes.
3. Las deformaciones de las cabezas de los pilotes pueden ser demasiado grandes en relación con el funcionamiento de la superestructura. En este caso el conflicto no es la falla de la fundación; sino que se trata de un problema de deformaciones.

En este resumen se tratan fundamentalmente las acciones sobre pilotes aislados. Al final del mismo se presentan algunas observaciones sobre GRUPO de pilotes.

SOBRE LA RIGIDEZ RELATIVA:

La rigidez relativa entre la pieza que constituye un pilote y el suelo que la rodea permite examinar los mecanismos de falla que se han descrito al comienzo. Tales mecanismos simplificados se listan a continuación ROTACIÓN – TRASLACIÓN – FLEXIÓN, los cuales se complementan con condiciones de borde superior tales como CABEZA LIBRE o CABEZA EMPOTRADA.

Obviamente, la cabeza libre de un pilote sometido a una solicitación horizontal se desplazará y también experimentará un giro que es función de la carga. En cambio la cabeza empotrada de un pilote puede trasladarse, pero no puede girar.

La rigidez relativa es en definitiva la solución de la ecuación diferencial que gobierna la deformada de una viga en un medio elástico (Hetenyi 1946). La ecuación tiene la siguiente expresión para una “viga“vertical:

$$E \cdot I \cdot \frac{d^4 y}{dx^4} + k_0 \cdot y = 0 \quad \textbf{(15)}$$

Donde k_0 es el coeficiente de reacción horizontal de la subrasante kh definido en el modelo de Winkler, multiplicado por el ancho ó diámetro B del pilote (k0 = kh B) **(16)**

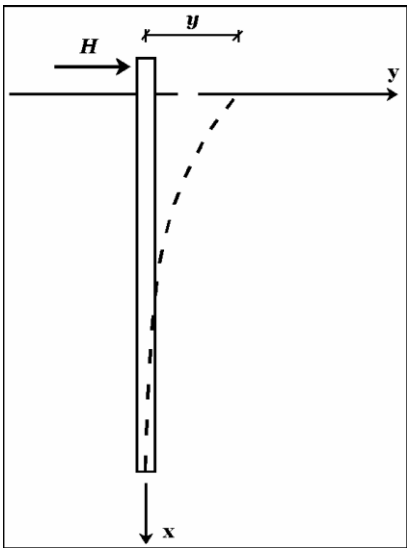
x = profundidad considerada.

y = Deformación de la pieza (**Figura 3.**).

La expresión del factor de Rigidez Relativa es como sigue:

$$R = \sqrt[4]{\frac{E \cdot I}{k}} \quad \textbf{(17)}$$

Aplicable para cuando kh puede considerarse constante con la profundidad, es decir en arcillas firmes a duras.



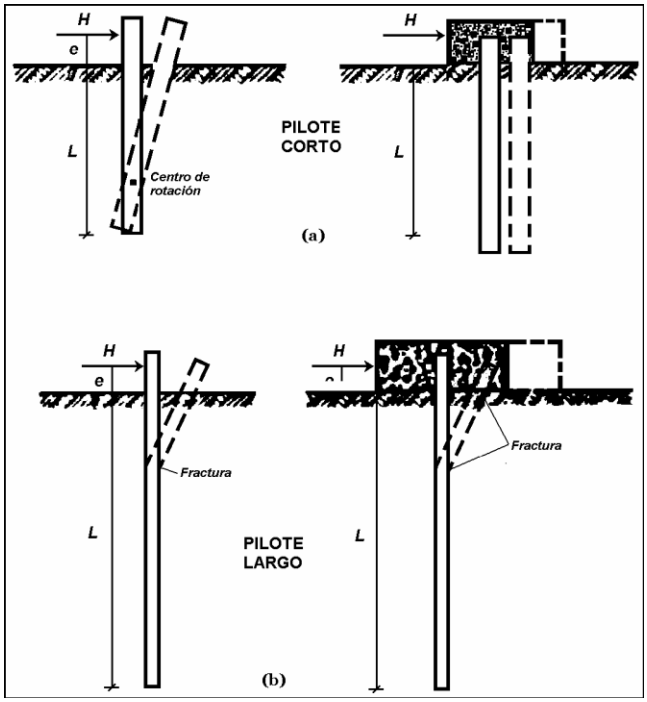


Figura 3. **Figura 4.**

kh puede considerarse también como una función lineal de la profundidad. En este caso se admite que el módulo de deformabilidad Es del suelo es también lineal con la profundidad.

$$T = \sqrt[5]{\frac{E \cdot I}{n \cdot h}} \quad \textbf{(18)}$$

Donde nh es la pendiente de la variación de kh con la profundidad (arenas ó arcillas normalmente consolidadas).

Las ecuaciones **(17)** y **(18)** son auto explicativas y se ve claramente que contienen el cociente ó relación de rigidez del pilote (EI) y el suelo (kh ó nh).

Las **(17)** y **(18)** son muy conocidas en el cálculo de vigas sobre fundación elástica.

Si L es la longitud de embebimiento de un pilote y se cumple que:

· L> 4T ó L> 3,5R, dependiendo del tipo de suelo, su comportamiento es el de una viga “flexible” respecto al suelo que lo rodea y la pieza falla por flexión frente a las solicitaciones horizontales.

· L< 2T ó L < 2R, su comportamiento es el de una pieza rígida respecto al suelo, en cuyo caso la falla se produce por rotación, ó traslación del pilote, llevando el suelo a la plastificación por presión pasiva.

La **Figura 4** muestra sendos croquis referidos a los modos de falla de los pilotes.

En la **Figura 4a**: Falla por rotación ó traslación (pilote rígido ó corto), y en la **Figura 4b**: Falla por flexión (pilote largo ó elástico).

La marcha del cálculo es la siguiente:

1. Determinar el factor de rigidez R ó T para pronosticar si el pilote se comportará como pieza rígida ó flexible.

2. Calcular los valores característicos a partir de los análisis elásticos adimensionales.

En el anexo 2 de los diagramas de Broms se muestra el aspecto general de los diagramas característicos para pilotes embebidos en un medio caracterizado por un coeficiente kh constante, o kh variable con la profundidad, tanto en el caso de fundaciones rígidas como flexibles.

Todos los diagramas están representados para una carga horizontal de 15 t y momento igual a cero. Se considera que estos diagramas deben compararse con los resultados de un cálculo manual.

EFECTO DE GRUPO DE PILOTES

La información disponible no es concluyente. El Manual de fundaciones de Canadá indica lo siguiente: “Es reconocido que la acción de pilotes en grupo produce una reducción en el coeficiente de reacción horizontal de la subrasante. La reducción es función del espaciamiento en la dirección de la carga como se indica a continuación...”

ESPACIAMIENTO	k_{grupo}
8 B	1,00 kh
6 B	0,70 kh
4 B	0,40 kh
3 B	0,25 kh

TABLA 5. Reacción de la subrasante de pilotes en grupo relacionados con el espaciamiento.

El espaciamiento normal a la dirección de la carga no tiene influencia en el comportamiento siempre que sea mayor que 2,5 B.

1.4.2.2 expresiones propuestas por: Theoretical Manual for Pile Foundations, del cuerpo de ingenieros de la fuerza armada estadounidense.

En todos los métodos se desarrolla la curva elemental presión contra desplazamiento p-u para incrementos continuos de carga estática, esta es posteriormente alterada para tener en cuenta los efectos de degradación por cargas cíclicas tales como las producidas por el oleaje en estructuras costeras.

Debido a que el pilote cargado lateralmente es al menos bidimensional la resistencia lateral última del suelo depende no solamente de la resistencia al cortante de este, sino también del mecanismo de geométrico de falla. En puntos próximos a la superficie del suelo la condición última se produce por una falla de tipo cuña, mientras que en posiciones inferiores esta está asociada con el flujo plástico del suelo alrededor del pilote según se incrementan los desplazamientos en cada uno de los métodos que se describirán, se analizarán dos alternativas de evaluación para la resistencia última lateral en cada punto del pilote, por falla tipo cuña y por falla tipo flujo plástico tomándose como resistencia última la menor de ellas.

1- Método de Reese, Cox y Koop 1974 para pilotes en arena (SLAT 1):

La curva p-u para un punto a una distancia z debajo de la cabeza del pilote se muestra en la figura siguiente:

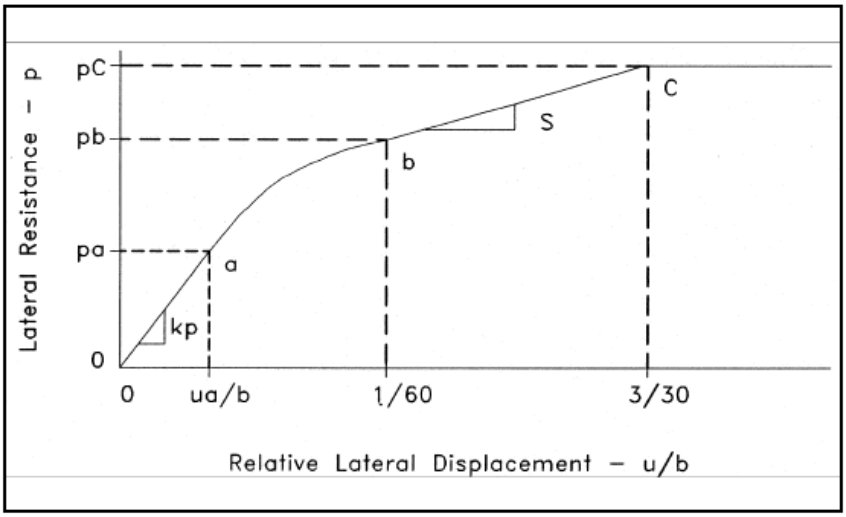


Figura 5.Curva p-u. Método SLAT 1.

La curva p-u presenta un tramo lineal de 0 – a, exponencial de a – b, lineal de b – c y valores constantes de resistencias para desplazamientos más allá de c.

Los pasos para construir la curva:

a- Determinar la pendiente del tramo lineal inicial.

$k_p = k \cdot z$ **(19)**

Donde:

k: se obtiene de la **tabla 6** siguiente para arenas sumergidas o por encima del nivel freático.

Table 2
Representative Values of *k* for Method SLAT1

Sand	Relative Density		
	Loose	Medium	Dense
Submerged (pci)	20	60	125
Above water table (pci)	25	90	225

z: profundidad del punto analizado por debajo de la superficie del terreno.

b- Cálculo de la resistencia última lateral.

$Ps = (C1 \cdot z + C2 \cdot b) \cdot \gamma' z$ Para fallo tipo cuña. **(20)**

$Ps = C3 \cdot b \cdot \gamma' z$ Para fallo tipo flujo plástico. **(21)**

$$C_1 = \frac{K \cdot \tan\phi \cdot \sin\beta}{\tan(\beta - \phi) \cdot \cos(\phi/2)} + \frac{\tan^2\beta \cdot \tan(\phi/2)}{\tan(\beta - \phi)} + K \cdot \tan\beta(\tan\phi \cdot \sin\beta - \tan(\phi/2)) \quad \textbf{(22)}$$

$$C_2 = \frac{\tan\beta}{\tan(\beta - \phi)} - \tan^2(45 - (\phi/2)) \quad \textbf{(23)}$$

$$C_3 = K \cdot \tan\phi \cdot \tan^4\beta + \tan^2(45 - (\phi/2))(\tan^8\beta - 1) \quad \textbf{(24)}$$

Donde:

γ: peso específico del suelo

z: profundidad por debajo de la superficie

K: coeficiente de presión de tierra horizontal. Es 0.4 para reflejar el hecho de que las superficies del modelo de falla asumido no son planas.

Φ: ángulo de fricción interna

β=45+ Φ/2 **(25)**

b: ancho del pilote, perpendicular a la dirección de la carga.

En la **Figura 6** se muestran los valores de C1, C2, C3 y la profundidad Z.crítica a la cual ocurre la transición de fallo tipo cuña a fallo por flujo plástico.

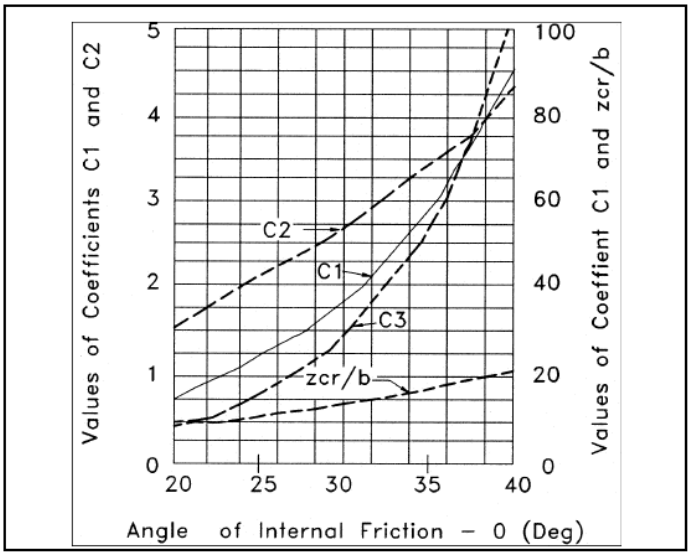


Figura 6. Factores para el cálculo de la resistencia última del suelo para pilotes cargados lateralmente en arenas.

c- Cálculo de la resistencia lateral para los puntos de transición c y b de la curva p-u por el método SLAT 1.

$$Pc = A \cdot ps \qquad \textbf{(26)}$$

$$Pb = B \cdot ps \qquad \textbf{(27)}$$

Donde:

A y B son coeficientes de reducción que se toman de la siguiente figura según si la carga es estática o cíclica.

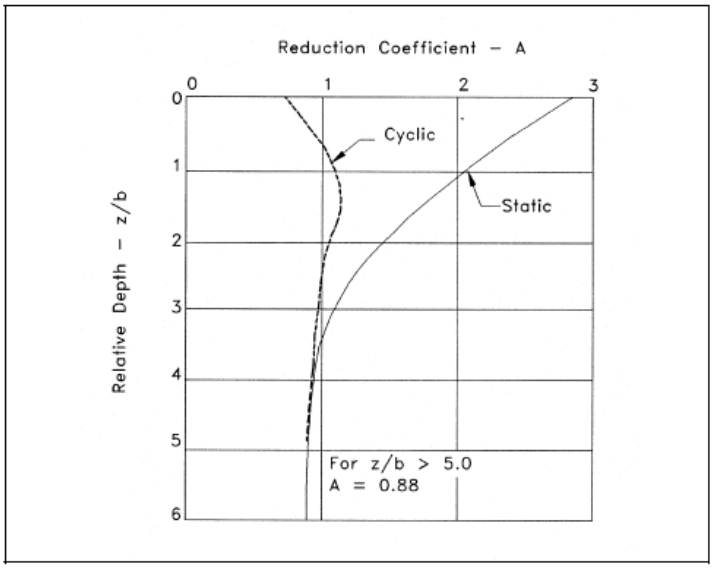


Figura 7. Coeficiente de reducción de resistencia A por el método SLAT1

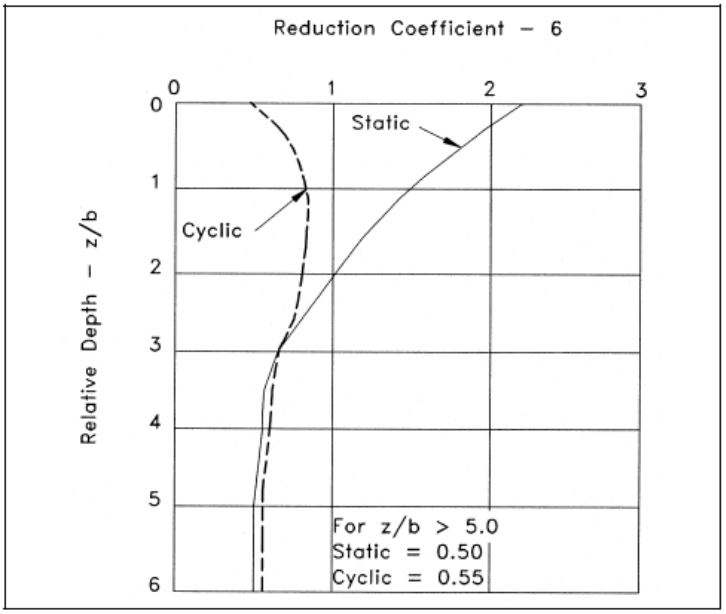


Figura 8. Coeficiente de reducción de resistencia B por el método SLAT1

El segundo tramo recto de la curva, b-c, se establece mediante las resistencias Pb y Pc y los desplazamientos u=b/60 y u=3b/80 como se muestra en la **Figura 5.**

La pendiente de este tramo está dada por:

$$s = \frac{40(Pc - Pb)}{b} \qquad \textbf{(28)}$$

d- La parte exponencial de la curva a-b es de la forma:

$$p = Cu^{\frac{1}{n}} \qquad \textbf{(29)}$$

Donde:

C, n y los términos del tramo inicial Pa y Ua se obtienen forzando $p = Cu^{\frac{1}{n}}$ a que pase por Pb y Ub con la misma pendiente s que el tramo b-c y que tenga la pendiente Kp en los términos del segmento inicial en a.

$$n = \frac{Pb}{s \cdot u_b} \quad \textbf{(30)} \qquad C = \frac{Pb}{u_b^{1/n}} \quad \textbf{(31)} \qquad u_a = \left(\frac{C}{Kp}\right)^{n(n-1)} \quad \textbf{(32)} \qquad Pa = Kp \cdot u_a \quad \textbf{(33)}$$

Nota: En algunas situaciones las ecuaciones anteriores pueden dar valores no apropiados para Ua y/o Pa. Si esto ocurre se omite la porción exponencial y el segmento inicial se extiende hasta interceptarse con el segmento b – c o hasta que se alcance la máxima resistencia Pc, (cualquiera que ocurra primero).

2- Método de Matlock 1970 para pilotes en arcillas (CLAT 1):

Se usaron una serie de pruebas de cargas laterales para producir la relación p – u para pilotes en arcillas blandas y medias sometidas a carga lateral estática en la forma:

$$\frac{p}{p_u} = 0.5\left(\frac{u}{u_c}\right)^{1/3} \qquad \textbf{(34)}$$

Donde:

Pu: resistencia lateral última y se obtiene:

$$Pu = \left(3 + \frac{\gamma'}{s_u} \cdot z + \frac{J}{b} \cdot z\right) \cdot s_u \cdot b \quad \text{Para fallos tipo cuña.} \qquad \textbf{(35)}$$

$$Pu = 9 \cdot s_u \cdot b \quad \text{Para fallos tipo flujo plástico.} \qquad \textbf{(36)}$$

Uc: desplazamiento lateral a la mitad del valor de la resistencia última.

$$u_c = 2.5 \cdot \varepsilon_{50} \cdot b \qquad \textbf{(37)}$$

Donde:

Su: resistencia a cortante del suelo

J: 0.5 para arcilla blanda o 0.25 para arcilla media.

ε_{50}: esfuerzo al 50 % de la resistencia última de una curva de laboratorio tensión-esfuerzo. Los valores se dan en la siguiente **tabla 7.**

Para saber que fórmula usar, se halla Zcrítica.

$$Zcr = \frac{6 \cdot s_u \cdot b}{\left(\gamma' \cdot b + J \cdot s_u\right)} \qquad \textbf{(38)}$$

De Zcrít. Hacia arriba se usa $Pu = \left(3 + \frac{\gamma'}{s_u} \cdot z + \frac{J}{b} \cdot z\right) \cdot s_u \cdot b$

De Zcrít. Hacia abajo se usa $Pu = 9 \cdot s_u \cdot b$

Table 3
Representative Values of ϵ_{50}

Shear Strength (psf)	Percent
250-500	0.02
500-1,000	0.01
1,000-2,000	0.007
2,000-4,000	0.005
4,000-8,000	0.004

La curva p-u se ilustra para carga estática y cíclica en la **Figura 10.**

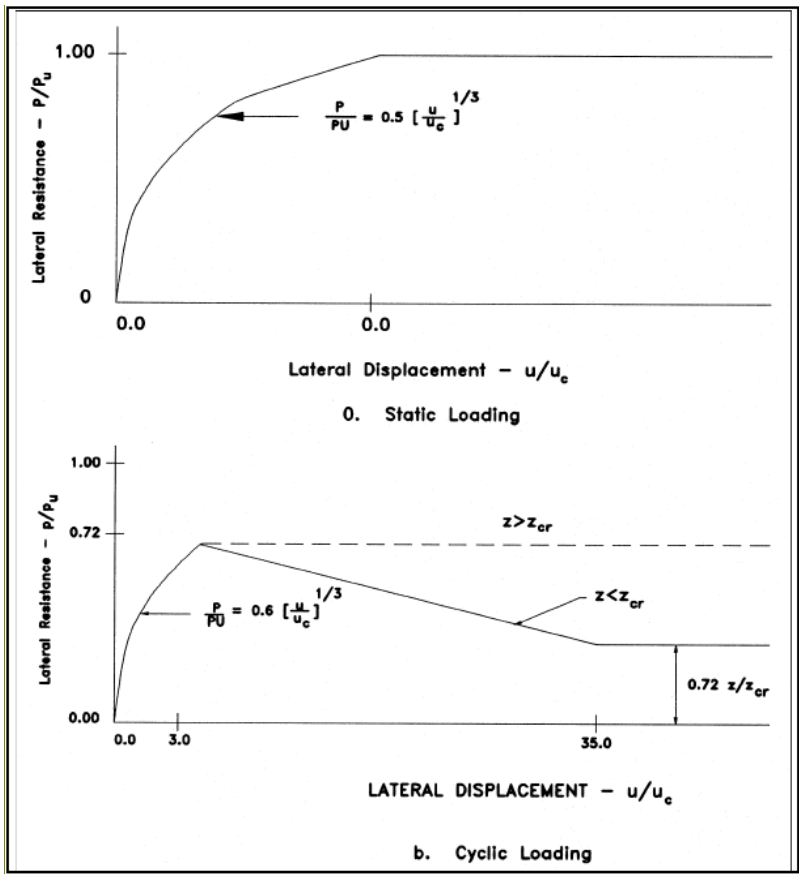


Figura 10. Curvas p-u. Método CLAT1

Esta curva termina en un desplazamiento relativo U/Uc = 3 para la cual la resistencia disminuye con el incremento de los desplazamientos para Z<Zcr o permanece constante para Z>Zcr.

3- Otros métodos.

Pilotes en arena.

Murchison y O'neill (1984):

Simplifican los procesos del método SLAT1 reemplazando las tres partes de la curva p-u por una simple expresión analítica.

Pilotes en arcilla.

Reese, Cox y Koop (1975):

Realizaron pruebas de carga lateral para obtener curvas p-u para pilotes en arcillas firmes por debajo del nivel freático.

En este caso obtienen una curva semejante a la p-u de SLAT1 compuesta por cinco segmentos de curva.

Reese y Welch (1975):

Realizaron pruebas de carga lateral en arcillas firmes sobre el manto freático, la curva obtenida sobre resultados experimentales para carga estática establece una relación exponencial entre la resistencia lateral y el desplazamiento con una resistencia última a partir de la cual esta permanece constante para desplazamientos adicionales sin incremento.

O'Neill y Gazioglu (1984):

Como en el anterior método (CLAT4) se requiere por parte del usuario la selección de parámetros apropiados en las ecuaciones de predicción estos autores incorporan los efectos continuos y relativos de la rigidez característica pilote-suelo que no se tuvieron en cuenta en procedimientos anteriores.

1.4.2.3 Dimensionamiento del grupo de pilotes atendiendo al criterio de estabilidad, sometidos a cargas horizontales según La Propuesta de Norma Cubana 1:2007.

Esquema de análisis

Una vez determinada la carga horizontal que actúa sobre cada pilote del grupo, se realiza el esquema que se indica en la **figura 11**, teniendo que cumplir la condición:

$$HP \leq Q_{HC} \qquad \textbf{(39)}$$

Cálculo de la carga horizontal resistente por estabilidad de cálculo del pilote en grupo.

La carga horizontal por estabilidad de cálculo del pilote en grupo se determina mediante la siguiente expresión.

$$Q_{HC} = \frac{Q_H{}^*{}_g}{\gamma_s \cdot \gamma_{gH}} \qquad \textbf{(40)}$$

Donde:
$Q_H{}^*{}_g$: carga horizontal resistente por estabilidad característica del pilote en grupo.
γ_{gH}: coeficiente de estimación de la resistencia horizontal de cálculo:

- suelos friccionales $\gamma_{gH} = 1.5$
- suelos cohesivos $\gamma_{gH} = 1.4$

Cálculo de la carga horizontal resistente por estabilidad característica del pilote en grupo ($Q_H{}^*{}_g$).

En función del espaciamiento entre pilotes se puede presentar los siguientes casos:

Caso 1: Sp ≥ 7·D

Se toma a $Q_H{}^*{}_g$ igual a $Q_H{}^*$ (carga horizontal resistente por estabilidad característica del pilote aislado)

Caso 2: Sp < 7·D

Se toma como $Q_H{}^*{}_g$ el siguiente valor:

$$\frac{Q_H{}^*{}_E}{n} \qquad \textbf{(41)}$$

Donde:

$Q_H{*}_E$: carga horizontal resistente por estabilidad de un pilote aislado equivalente de dimensiones Bg y LE en donde Bg será la dimensión en planta del grupo de pilotes, normal a la dirección de la carga horizontal aplicada a éste.

n: Cantidad total de pilotes del grupo.
Q_H*: carga horizontal resistente por estabilidad característica del pilote aislado.

Consideraciones para determinar la carga horizontal resistente por estabilidad característica del pilote aislado (Q_H*).

Tipos de suelos:
- cohesivos
- friccionales

Condiciones de restricción de la cabeza del pilote:
- libres ó articulados
- empotrados.

Tipos de pilotes.

- Pilote corto (no se desarrolla rótula plástica).
- Pilote largo (se desarrolla rótula plástica).

La resistencia última se desarrolla cuando los desplazamientos horizontales del extremo del pilote alcanzan aproximadamente un 20 % de su diámetro.

Las expresiones establecidas son válidas para el caso de suelos homogéneos.

En el caso de suelos cohesivos estratificados para la determinación aproximada de (Q_H*) se utilizará un promedio pesado de C_u* en función de los espesores de los estratos.

En el caso de suelos friccionales estratificados, para la determinación aproximada de (Q_H*) se utilizará un promedio pesado de φ´* en función de los espesores de los estratos.

En el caso de que el perfil del terreno está constituido por estratos de suelos cohesivos y friccionales el método empleado es aplicable.

Cálculo de Q_H* en suelos friccionales.
Pilotes con extremo libre ó articulado.

Caso 1. Pilote Corto.
Para este tipo de pilote, el valor de Q_H* se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{Q_H *}{K_P \cdot \gamma * \cdot D^3} = \frac{\left(\frac{L_E}{D}\right)^2}{2 \cdot \left(1 + \frac{\frac{e_H}{D}}{\frac{L_E}{D}}\right)} \quad \textbf{(42)} \qquad K_P = \tan^2\left(45 + \frac{\varphi' *}{2}\right) \quad \textbf{(43)}$$

Donde:

γ*: peso específico característico del suelo, el cual se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\gamma^* = \frac{\gamma}{\gamma_{g\gamma}} \qquad \textbf{(44)}$$

$\gamma_{g\gamma}$: coeficiente de estimación del peso específico característico del suelo.

Nota: Por encima del nivel freático se toma los valores de peso específico del suelo en su estado natural (γ) y por debajo del manto freático se toma el valor específico del suelo sumergido (γ').

Para que la ecuación dada para determinar Q_H* sea válida tiene que ocurrir que:

Mu > Mg

Donde:

$$M_g = Q_H{}^* \cdot (e_H + f) - \frac{1}{2} \cdot \gamma^* \cdot K_P \cdot D \cdot f^3 \qquad \textbf{(45)} \qquad f = \sqrt{\frac{2 \cdot Q_H{}^*}{3 \cdot \gamma^* \cdot K_p \cdot D}} \qquad \textbf{(46)}$$

Los valores de $\frac{Q_H{}^*}{K_P \cdot \gamma^* \cdot D^3}$ en función de e_H/D y L_E/D

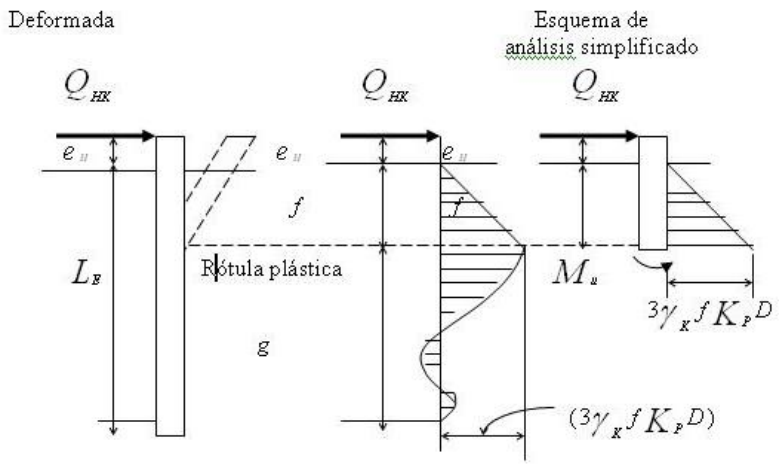


Figura 11. Pilote Largo, extremo libre, en suelos friccionales

Caso 2. Pilote Largo.

Para este tipo de pilote el valor de Q_H* se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{M_U}{K_p \cdot \gamma^* \cdot D^4} = \left(\frac{Q_H{}^*}{K_P \cdot \gamma^* \cdot D^3} \right) \cdot \frac{e_H}{D} + \left(\frac{Q_H{}^*}{1.5 \cdot K_P \cdot \gamma^* \cdot D^3} \right)^{\frac{2}{3}} \qquad \textbf{(47)}$$

Para que esta ecuación sea válida se tiene que cumplir la condición de que:

Mg ≥ MU

Donde:

$$M_g = \gamma^* \cdot D \cdot g^2 \cdot (1.5 \cdot L_E - g) \cdot K_P \qquad \textbf{(48)}$$

g= L_E-f **(49)**

$$f = \sqrt{\frac{Q_H *}{1.5 \cdot \gamma * \cdot K_p \cdot D}} \qquad \textbf{(50)}$$

Observe que la ecuación para determinar $\frac{Q_H *}{K_P \cdot \gamma * \cdot D^3}$ es de tercer grado, y sus valores se dan en función de $\frac{M_U}{K_P \cdot \gamma * \cdot D^4}$ y e_H / D

Cálculo de Q_H* en suelos cohesivos.
Pilote con extremo empotrado.

Caso 1. Pilote Corto.
Para este tipo de pilote, el valor de Q_H* se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{Q_H *}{K_P \cdot D^2} = 9 \cdot \left(\frac{L_E}{D} - 1.5 \right) \qquad \textbf{(63)}$$

Para que esta ecuación sea válida se tiene que cumplir que:

MU > ME donde

$$M_g = 9 \cdot C_u * \cdot D \cdot f \cdot (1.5 \cdot D + 0.5 \cdot f) \qquad \textbf{(64)}$$

$$f = L_E - 1.5 \cdot D = \frac{Q_H *}{9 \cdot C_u * \cdot D} \qquad \textbf{(65)}$$

los valores de $\frac{Q_H *}{C_u * \cdot D^2}$ en función de L_E / D

Caso 2. Pilote Largo.

Para este tipo de pilote, el valor de Q_H* se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{Q}{C_u * \cdot D^2} = \sqrt{182.25 + \frac{36 \cdot M_u}{C_u * \cdot D^3}} - 13.5 \qquad \textbf{(66)}$$

Para que esta ecuación sea válida se tiene que cumplir que:
ME = Mu y que Mg ≥ MU

Donde:

$$M_g = 9 \cdot C_u * \cdot D \cdot f \cdot (1.5 \cdot D + 0.5 \cdot f) \quad \textbf{(67)} \qquad f = \frac{Q_H *}{9 \cdot C_u * \cdot D} \quad \textbf{(68)}$$

El valor mínimo de (g) con el cual se cumple la condición de Mg = MU se calcula mediante la siguiente expresión:

$$g_{mínimo} = \sqrt{\frac{4 \cdot M_U}{9 \cdot C_u * \cdot D}}$$

La longitud mínima de pilote que cumple esta condición será:
L_E (mínima)=1.5·D+f+$g_{mínima}$

los valores de $\frac{Q_H *}{C_u * \cdot D^2}$ en función de $\frac{M_U}{C_u * \cdot D^3}$

En este caso se estudiaron dos procedimientos de la Norma Cubana para determinar la carga horizontal resistente, uno en suelos friccionales para pilotes con extremo libre ó articulado y el otro en suelos cohesivos para pilotes con extremo empotrado.

1.5 ESTUDIO DE LAS CRITERIIOS PARA LA REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE CARGA.

En muchas ocasiones las estructuras deben construirse sobre terrenos cuya capacidad portante en superficie es insuficiente para soportar las cargas de apoyo. En dichos casos se necesitan sistemas de cimentación profunda que transmitan las cargas de apoyo a zonas más profundas del terreno dotadas de la capacidad portante adecuada. Las cimentaciones basadas en pilotes son uno de los sistemas de cimentación profunda más frecuentemente utilizados. Los pilotes reciben las cargas de la estructura y las transmiten al terreno por rozamiento a lo largo de su fuste o por punta como consecuencia del apoyo directo del extremo del pilote en capas más profundas y resistentes del terreno.

Dada la gran responsabilidad estructural de los pilotes, resulta fundamental comprobar que su comportamiento real en obra responde a las previsiones del Proyectista. Normalmente suelen realizarse una serie de ensayos para controlar la corrección de la ejecución de los pilotes. Dichos ensayos suelen comprobar la integridad estructural del pilote (ensayos sónicos o similares), pero no permiten comprobar la capacidad portante real del pilote.

Para comprobar la capacidad portante real de un pilote, el mejor sistema es someterlo a un ensayo directo de carga estática. En esencia, estas pruebas, no son más que experimentar a escala real, un pilote, para procesar su comportamiento bajo la acción de cargas y determinar su capacidad de carga. Precisamente, su inconveniente fundamental estriba en su elevado costo y en el tiempo requerido para realizarla.

Sowers (1977), recomienda que los resultados del ensayo son una buena indicación del funcionamiento de los pilotes, a menos que se hagan después de un período de tiempo. Jiménez (1986) muestra preocupación ya que el pilote de prueba puede representar o no la calidad de los pilotes definitivos. Otra limitación planteada por este autor radica en que la prueba de carga se realiza generalmente a un solo pilote y se conoce que el comportamiento de un grupo es diferente al de la unidad aislada.

Se plantea que la prueba de carga es un método bastante seguro en la determinación de la carga última de los pilotes, siempre que se proporcione el mismo grado de calidad al pilote en prueba y al definitivo, pero es muy costoso y por esto se toman otras alternativas en la medición de la capacidad de carga. A continuación se muestran algunos criterios utilizados para determinar la capacidad de carga de un pilote a partir de los ensayos de carga.

Criterio	Descripción
1. Limitación de asentamiento total relativo	a) Desplazamiento en la punta mayor (D/30) (Norma Brasileña, ABNT, 1980)
2. Tangente a la curva carga – asentamiento (comportamiento hiperbólico)	a) Intersección de la tangente inicial y final de la curva carga – asentamiento definida por la carga admisible b) Valor constante de carga para asentamiento creciente
3. Limitación del asentamiento total	a) Absoluto 1 pulgada b) Relativo – 10% del diámetro
4. Postulado de Van de Beer (1953)	Asintota de la función exponencial: $P=Pmax(1-e^{-az})$
5. Davisson (1980)	Desplazamiento aproximado de la punta del pilote mayor que D/120 + 4mm

Tabla 8. Criterios para determinar la carga ultima del ensayo de carga.

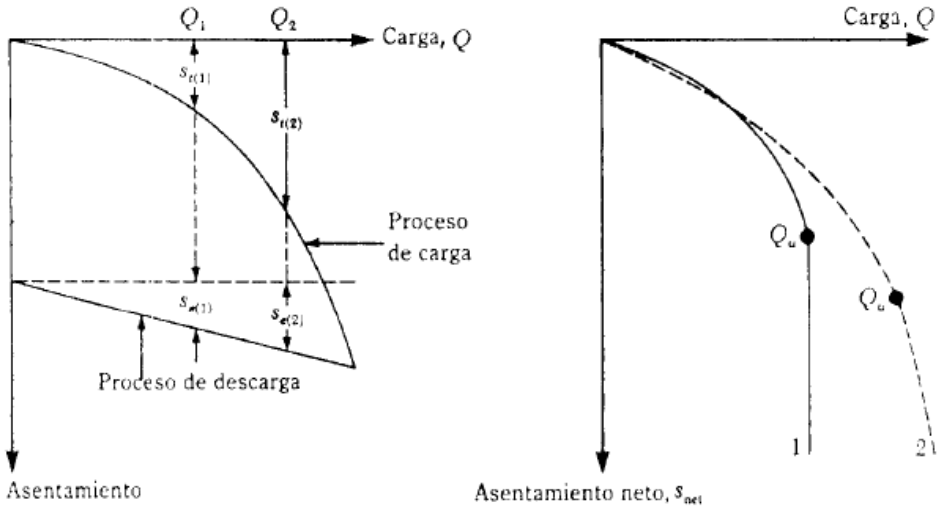


Fig. 12. Gráfica de carga contra asentamiento total.

1.5.1. Procedimiento para pruebas de carga en pilotes según **Theoretical Manual for Pile Foundations, del cuerpo de ingenieros de la fuerza armada estadounidense.**

- Calcular la capacidad última del pilote basado en la teoría de mecánica de suelos.

- Calcular la carga de diseño usando el factor de seguridad adecuado.

Carga de diseño (D)= Capacidad última del pilote (U)/FOS

- Generalmente la carga total de prueba es dos veces la de diseño. (Esto puede cambiar en función del código local de construcción)

Carga total de prueba (Q)= 2 veces la carga de diseño (D)

- Aplique el 12.5% de la carga de diseño y registrar el asentamiento del pilote cada dos horas.

- Las lecturas se deben tomar hasta que el asentamiento registrado sea menor que 0.001pies durante un período de dos horas. Cuando la razón de asentamiento del pilote sea menor de 0.001 pies por cada dos horas, añada otro 12.5% de la carga de prueba. Ahora la carga total es de 25% de la carga de prueba. El asentamiento se monitorea como en el paso anterior. Cuando la razón de asentamiento sea menor que 0.001 pies por cada dos horas, añade la próxima carga.

- La próxima carga es el 25% de la carga de prueba. Ahora la carga total es el 50%.

La carga se incrementa al 75% y al 100% y se toman las lecturas de asentamiento.

- Se retira la carga en la misma secuencia, y se registran las lecturas de asentamiento. Debe transcurrir al menos un tiempo de una hora para la retirada de la carga.

- La lectura final de asentamiento se debe registrar 48 horas después de retirar la carga final.

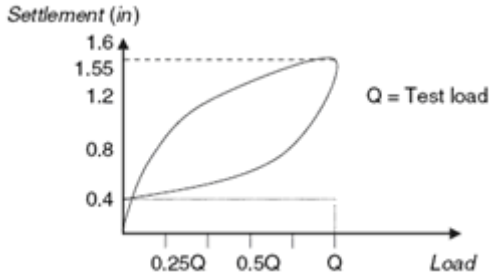


Fig. 13. Gráfica de carga contra asentamiento.

- Q Máxima carga de prueba; La máxima carga de prueba es dos veces la carga de diseño. El asentamiento se indica en el ejeY. Los asentamientos se incrementan durante la etapa de aplicación de la carga y decrecen cuando esta se retira.

Asentamiento bruto=Asentamiento total de la prueba de carga (en este caso, como se ve en el gráfico este es de 1.55 pulgadas)

Asentamiento bruto=Asentamiento del pilote dentro del suelo + el acortamiento del pilote.

- Es obvio que que el pilote se comprime debido a la acción de la carga y como consecuencia este se acorta.

Asentamiento neto=Asentamiento en el extremo después de retirada la carga. (en este caso es de 0.4 pulgadas)

Asentamiento neto=Asentamiento del pilote dentro del suelo después de retirada la carga.

- Cuando se libera la carga el pilote recupera su longitud inicial. En un estricto sentido, debe haber una ligera deformación, aun después de retirada la carga. En la mayoría de los casos se asume que el pilote retoma su longitud inicial una vez retirada la carga.

- Se considera que la prueba de carga del pilote ha fallado si el asentamiento dentro del suelo es mayor que una pulgada a plena carga de prueba, o si el asentamiento dentro del suelo es mayor que 0.5 pulgadas al final de la prueba, después de retirada la carga.

1.5.2. Metodologia para el análisis de Pruebas de Carga según el artículo: CIMENTACIONES PROFUNDAS de Jorge E. Alva Hurtado.

La prueba de carga se realiza generalmente por las siguientes razones, Vesic (1977):
- Verificar experimentalmente que la actual respuesta del pilote a la carga (reflejada en la relación carga-asentamiento) corresponde a la respuesta asumida por el diseñador.
- Que la carga última actual del pilote no es menor que la carga última calculada y que fue usada como base en el diseño de la cimentación.
- Obtener datos del suelo deformado y facilitar el diseño de otro pilote.
- Determinar el comportamiento carga-asentamiento de un pilote, especialmente en la región de carga de trabajo.
- Para indicar la dureza estructural del pilote.

Procedimiento de Carga.
Existen diversos tipos de procedimientos de carga, la norma ASTM-D-1143-81 resume la mayoría de éstos, pero tan sólo se presentarán los más comunes, que son:

a) Prueba de carga mantenida:
Llamada también ML y es el denominado por el ASTM-D-1143-81 como el procedimiento estándar de carga; el procedimiento a seguir es el siguiente: Siempre y cuando no ocurra la falla primero, cargar el pilote hasta 200% de su carga de diseño, aplicando la carga en incrementos del 25% de la carga de diseño del pilote. Mantener cada incremento de carga hasta que la razón de asentamiento no sea más grande que 0.01 pulgadas (0.25 mm)/hora, pero no mayor que 2 horas. Si el pilote de prueba no ha fallado, remover la carga de prueba total en cualquier momento después de 12 horas si el asentamiento del tope sobre un período de 1 hora no es más grande que 0.01 pulgadas (0.25 mm); si ocurre lo contrario, permita que la carga total permanezca sobre el pilote por 24 horas. Después del tiempo requerido de espera, remover la carga de prueba en decrementos de 25% de la carga total con 1 hora entre decrementos. Si la falla del pilote ocurre, continúe aplicando carga con la gata al pilote hasta que el asentamiento sea igual al 15% del diámetro del pilote o dimensión diagonal.

b) Razón de penetración constante.-
Fue un método desarrollado por Whitaker en 1957 para modelos de pilote (pilotes de prueba preliminares) y posteriormente usado para ensayos de pilote de tamaño natural; este método también es llamado CRP y tiene la ventaja de ser rápido en su ejecución, no dando tiempo a la consolidación del terreno. El método consiste en hacer penetrar el pilote a una velocidad constante y medir continuamente la fuerza aplicada en la cabeza del pilote para mantener la razón de aplicación. La norma ASTM-D-1143-81 especifica que la razón de penetración del

pilote debe ser de: 0.01 a 0.05 pulgadas (0.25 a 1.25mm)/min en suelo cohesivo y 0.03 a 0.10 pulgadas (0.75 a 2.5 mm)/min en suelo granular.

Criterios de Carga de Falla.

El criterio más usado para definir la carga de rotura en un gráfico carga vs asentamiento, es aquel que muestra un cambio brusco en la curva obtenida, pero en la mayoría de los casos, la pendiente de la curva varía gradualmente, no pudiendo establecerse en forma definida la carga de rotura.

Otra observación hecha a este criterio, es que frecuentemente la escala adoptada para el trazado carga vs asentamiento no es escogida con criterio bien definido. Para uniformizar los criterios de escala, se ha sugerido que la curva carga vs. asentamiento sea escogida de tal forma que la recta que corresponde a a deformación elástica del pilote PL/AE forme un ángulo de 20 con la horizontal. Sin embargo éste no es criterio reglamentado, y en vista de que en mecánica de suelos no existe un criterio uniforme para establecer la carga de rotura se mencionarán algunos de estos criterios.

Los criterios recopilados por Vesic (1975) son:

1-Limitando el asentamiento total.

a) absoluto: 1" (25.4 mm) (Holanda, Código de Nueva York).

b) relativo: 10% del diámetro del pilote (Inglaterra)

2-Limitando el asentamiento plástico.

a) 0.25 pulgada (6.35 mm) (AASHTO).

b) 0.33 pulgada (8.40 mm) (Magnel).

c) 0.50 pulgada (12.7 mm) (Código de Boston).

3-Limitando la relación asentamiento plástico/asentamiento elástico: 1.5 (Cristiani y Nielsen).

4-

$$\text{Relación máxima } \frac{\text{Incremento asentamiento elástico}}{\text{Incremento asentamiento plástico}}$$

Szechy (1961).

5-Limitando la relación asentamiento/carga:

a) Total 0.01 in/ton (California, Chicago).

b) Incremental 0.03 in/ton (Ohio) 0.05 in/ton (Raymond Co).

6-Limitando la relación asentamiento plástico/carga:

a) Total 0.01 in/ton (New York)

b) Incremental 0.03 in/ton (Raymond Co).

7-

$$\text{Relación máxima } \frac{\text{Incremento asentamiento}}{\text{Incremento de carga}}$$

Vesic (1963).

Fellenius (1980) recopiló varios criterios de falla aplicables al gráfico carga vs asentamiento.

a) Método de Davisson.- La carga límite propuesta es definida como la carga que corresponde a un asentamiento que excede la compresión elástica del pilote por un valor X dado por:

$$X = 3.8 + \frac{D}{120}$$

Donde:
D = diámetro (mm)
X = en (mm)

El método de Davisson se aplica a ensayos de velocidad de penetración constante, si se aplica a ensayos con carga mantenida, resulta conservador.
b) Método de Chin:
Se admite que la curva carga-asentamiento cerca a la rotura es hiperbólica. En este método el asentamiento es dividido por su correspondiente carga y el gráfico pasa a ser una curva de asentamiento/carga vs asentamiento. Los puntos obtenidos tienden a formar una recta y la inversa de la pendiente es la carga de rotura. Este método se aplica a pruebas rápidas o lentas, ya que el tiempo de aplicación de los estados de carga es constante.
c) Método de De Beer:
La curva carga vs asentamiento es llevada a un gráfico log-log. Para los valores de carga mayores, los puntos tienden a caer en dos rectas y su intersección es la carga de rotura.
d) Criterio de 90% de Brinch-Hansen:
La carga de rotura será aquella cuyo asentamiento es el doble del asentamiento medido para una carga que corresponde al 90% de la carga de rotura.
e) Método de Fuller y Hoy:
De acuerdo a este criterio, la carga de rotura es aquella que corresponde al punto en la curva carga-asentamiento tangente a una recta de inclinación 0.05 in/ton.
f) Método de Butler y Hoy:
La carga de rotura es definida como aquella correspondiente al punto de intersección de dos rectas tangentes, la primera corresponde a la tangente a la curva y que tenga una inclinación de 0.05 in/ton y la segunda recta tangente es aquella paralela a la línea de compresión elástica del pilote y tangente a la curva.

1.5.3. Análisis de Pruebas de Carga según La Norma Cubana 1:2007.

Carga resistente por estabilidad característica de un pilote aislado pronosticado por la prueba de carga estática. (Q_V*).
El método establecido para determinar (Q_V*) es a partir de la carga última (Q_U), obtenida mediante una prueba de carga estática (Ver **Figura 14**):

Se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$Q_V^* = \frac{Q_U}{\gamma_{gPC}}$$

Donde:
Qu: Carga última promedio resistente por estabilidad del pilote, determinada por prueba de carga en condiciones ingeniero-geológicas similares.
γ_{gPC}: Coeficiente de estimación de la carga característica cuando se hace tratamiento estadístico de los resultados de varias pruebas. Se toma para una probabilidad del 95 %. El valor máximo es de 1.4 y se emplea cuando no se realiza tratamiento estadístico.

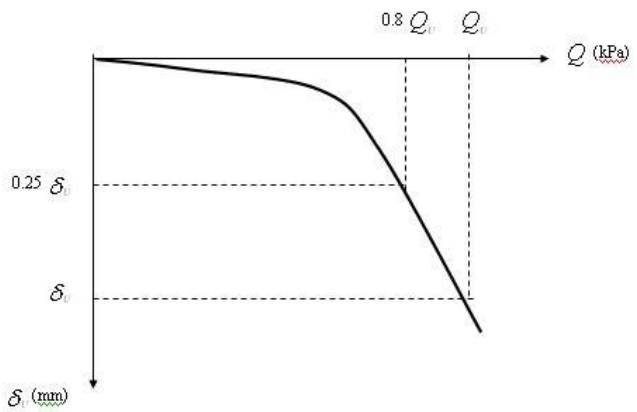


Fig. 14. Curva Carga vs Deformación

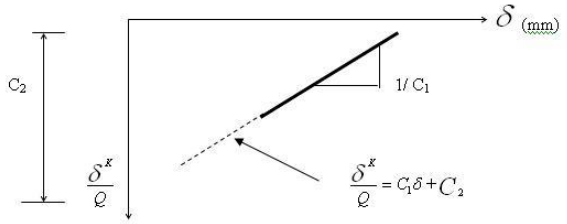


Figura. 15. Curva Carga deformación. Prueba de carga estática

Determinación de la carga última resistente por estabilidad (Q_u).

Se toma de la prueba de carga los siguientes datos:

- Carga aplicada (Q)
- Asiento estabilizado de la cabeza del pilote correspondiente a cada carga aplicada (δ).

Se construye el gráfico de (δ) vs $\frac{\delta^K}{Q}$, ver **Figura 15.**

Se traza una recta de ajuste determinándose C_1 y C_2 para valores de K de 0.5 y 1.0

C_1: pendiente de la recta

C_2: Intercepto de la recta con el eje $\frac{\delta^K}{Q}$

De las dos rectas anteriores se toma aquella que tenga mejor ajuste, determinándose los valores de:

Q_U: carga última.
δ_U: asiento de la cabeza del pilote correspondiente a la carga última mediante las expresiones dadas en la Tabla 4.

Para que este método sea válido la cabeza del pilote debe sufrir un asiento igual o mayor de ($0.25 \cdot \delta_U$) durante la realización de la prueba.

K	δ_U	Q_U
1.0	$\frac{C_2}{11 \cdot C_1}$	$\frac{11}{12 \cdot C_1}$
0.5	$\frac{C_2}{C_1}$	$\frac{1}{2 \cdot \sqrt{C_1 \cdot C_2}}$

Tabla 9. Valores de δ_U y Q_U en función de K

Nota: Se recomienda que durante la realización de la prueba de carga de un pilote la cabeza del mismo debe alcanzar un asiento de:

$$\delta(mm) = \delta_E + 6 + 0.1 \cdot D$$

Donde:
D: diámetro o lado del pilote en milímetros.
δ_E: deformación elástica del pilote, la cual es calculada mediante la siguiente expresión:

$$\delta_E = \frac{Q \cdot L}{A_P \cdot E_P}$$

A_p: área de la sección transversal del pilote.
L: longitud total del pilote

E_P: módulo de elasticidad del material del pilote.

Q: carga resistente por estabilidad característica de un pilote aislado pronosticada por los resultados del ensayo de penetrómetro estático.
En este método se determina la resistencia característica en punta y en fuste separadamente.

1.6 CONCLUSIONES.

Se revisaron algunos proyectos relacionados con el chequeo estructural de puertos en los cuales se realiza una modelación matemática de todos los elementos de la estructura, lo que da criterio para la realización de las pruebas de carga a escala real. Estas pruebas permitieron la determinación de las magnitudes de las cargas de operación, aceptándose en algunos casos las cargas propuestas por el explotador y en otros limitándolas. En estos proyectos se debe aclarar que no se contaba con la información de la posible carga horizontal que se pueda generar durante el proceso de descarga del bulto, ya sea desde una grúa dentro de el buque u otro sistema de descarga, debiéndose procurar determinar este valor para precisar si resulta necesario una análisis adicional con dichas cargas.

En cuanto a las metodologías para el chequeo estructural de edificios y puertos, unas trabajan como: Evaluación primaria, Detallada o Secundaria y Proyecto de Rehabilitación, donde se hace un informe cualitativo de la obra, un cálculo de las relaciones Capacidad/Demanda donde cada construcción tiene elementos específicos que deben ser revisados y se hace que una Obra Civil vuelva a tener las mismas o mejores condiciones de servicio que las que tenía cuando comenzó su vida útil. Otras metodologías consideran un Preproceso, Análisis y Posproceso; donde se define todo lo relacionado a la geometría del edificio, y entrada de datos en general, se aplican las distintas teorías de análisis estructural (sistema de barras, de placa,

elasticidad bi y tridimensional, etc.), y el Postproceso que es la manera de visualizar los resultados numéricos a través de gráficos. Y otra metodología más relacionada con Puertos se fundamenta en definir el problema, análisis de datos y generación del modelo, calibración del modelo y modelación de la prueba de carga, realización de la prueba, procesamiento de los resultados y calibración, y conclusiones.

Producto del buque se generan de forma general las siguientes fuerzas contra el muelle, ya sea al atracar este o detenido; la fuerza normal total que se considera como la suma de los efectos normales debido al viento, las normales debido a la corriente marítima, y las normales debido a las olas. Al atracar el buque este produce impacto sobre el muelle, generándose la fuerza normal de impacto y la fuerza paralela de impacto.

Las metodologías estudiadas para determinar capacidad de carga horizontal en pilotes se diferencian en algunos fundamentos. La Norma Cubana propone expresiones para cada tipo de suelo (Cohesivos y Friccionales), tipo de ligadura en el extremo del pilote y si el pilote es corto o largo. La Cátedra de Cimentaciones de la Universidad Tecnológica Nacional de Buenos Aires el primer aspecto que determina es cómo se comportará la pieza (rígida o flexible), luego se calculan los valores característicos a partir de los diagramas de Broms los cuales están representados para una carga horizontal de 15 t y momento cero. El libro del Cuerpo de Ingenieros de E.U. construye una curva de presión contra desplazamiento y después se hacen los cálculos de la resistencia lateral en dependencia de (fallo tipo cuña, o tipo flujo plástico) para los puntos de transición de la curva.