

MODELACIÓN DE PILOTES CORTOS-RÍGIDOS SOMETIDOS A CARGAS LATERALES

Ing. Anelys Betancourt Quintero¹, Dr. Ing. Rolando Lima Rodríguez², Ing. Yimay Sánchez Rivero³.

1. Universidad de Matanzas – Sede “Camilo Cienfuegos”, Vía Blanca Km.3, Matanzas, Cuba. anelys.betancout@umcc.cu

2. Universidad de Matanzas – Sede “Camilo Cienfuegos”, Vía Blanca Km.3, Matanzas, Cuba. rolando.lima@umcc.cu

3. Empresa Constructora Militar No. 4. yimaysanchez@nauta.cu



Resumen

En el presente trabajo se realiza un estudio acerca de las cimentaciones del tipo pilotes cortos y rígidos sometidos a la acción de las cargas laterales, con el fin de evaluar sus deformaciones y capacidad de carga a través de la modelación matemática y ensayos de carga a escala real. Para ello se realiza un análisis de la bibliografía existente internacionalmente y en el país para conformar el marco teórico de estudio acerca de la forma de trabajo de los pilotes rígidos sometidos a cargas laterales. Posteriormente se evalúan las capacidades de la modelación en el software Plaxis 3D Foundation para representar el comportamiento de los suelos adyacentes a la cimentación. Se precisan las bases metodológicas para la simulación virtual. Finalmente se realizan las modelaciones correspondientes y se analizan los resultados obtenidos, comparándolos con pruebas de cargas a escala real realizadas en otros países, analizando las expresiones propuestas para la norma cubana que está en elaboración, además de otras teorías y se definen las expresiones que mejor se ajustan al cálculo de los pilotes cortos – rígidos.

Palabras claves: pilotes rígidos, cargas laterales, modelación, pruebas de cargas.



Introducción:

La integración de todos los elementos estructurales que conforman cualquier tipo de edificación es vital para el correcto desempeño de la misma; donde cada uno debe ser capaz de resistir las cargas que se ejercen sobre él, además de su propio peso. La cimentación dentro de los elementos estructurales como resultado de la interacción con la superestructura está sujeta a cargas combinadas: componente vertical, horizontal y un par de torsiones. La misma tiene como función transmitir, distribuir y resistir las cargas provenientes de toda la estructura al suelo de la base; por lo que requieren una atención especial durante el proceso de diseño. Dadas las condiciones geográficas de Cuba muchas edificaciones dadas sus características se ven más expuestas que otras a la acción del viento y los ciclones tropicales, siendo frecuente encontrar cimentaciones sometidas a grandes cargas de momento y/o cortantes y axiales pequeños o de succión. Ante esta situación específica las cimentaciones superficiales siguen siendo una de las soluciones más aplicadas por los proyectistas. Las mismas presentan el inconveniente en las dimensiones que se obtienen en el diseño que solo garantizan el trabajo de contrapeso para que el cimiento no falle por vuelco o por arrancamiento, por lo que el suelo queda sometido a tensiones muy bajas y se desaprovecha su aporte; además del consiguiente gasto de materiales, equipos, mano de obra y tiempos de ejecución. Se hace necesario el uso de otro tipo de cimentación que aproveche el aporte resistente del suelo y que a la vez sean más económicas. La respuesta a esta problemática ha sido el empleo de pilotes y por su comportamiento ante las cargas horizontales los pilotes rígidos:

Para establecer cuándo se puede considerar la forma de trabajo como la de un pilote rígido, Àbalos (1972), Tsytoovichy otros (1974), Bordelois (1985), Castro (1987) tratado por Lima (2009), recurren a relacionar la longitud total con el lado menor o el diámetro y establecer un límite superior para dicha relación que oscila entre 7 y 12.

En otros trabajos, Broms (1964,1965), Kananian (1966), Jiménez Salas, et al. (1980) se establecen expresiones que tienen en cuenta las rigideces del pilote y el suelo.

Existe un límite superior a partir del cual el pilote es tratado como flexible. Lima 2008, utiliza las siguientes expresiones para evaluar la rigidez del pilote:

En terrenos granulares: $(L/\lambda \leq 2)$

$$\lambda = 5 \sqrt{\frac{E_p \cdot I_p}{\eta h}} \dots\dots\dots(1)$$

❖ En terrenos con cohesión: $(L/\lambda \leq 1.5)$

$$\lambda = 4 \sqrt{\frac{4 \cdot E_p \cdot I_p}{D_o \cdot K_h}} \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

λ - Longitud elástica suelo-pilote.



- L - Longitud del pilote rígido.
- Do - Diámetro del pilote rígido (de ser rectangular será el ancho {b}).
- Ep- Módulo de elasticidad del material que conforma el pilote.
- Ip - Momento de inercia de la sección transversal.
- Kh - Módulo de balasto horizontal del suelo.
- ηh - Coeficiente.

El módulo de balasto se supone que siempre sea determinado de ensayos "in situ", en la propuesta norma cubana de pilotes se propone la expresión de Vesie:

$$K_h = 1.3 \sqrt[12]{\frac{D_0^4 \cdot E_0}{E_p \cdot I_p} \cdot \frac{E_0}{1 - \gamma^2} \cdot \frac{1}{D_0}} \dots\dots\dots (3)$$

Dónde:

- Eo - Módulo de deformación general del suelo.
- v - Coeficiente de Poisson del suelo.
- Do - Diámetro del pilote rígido.
- Ep- Módulo de elasticidad del material que conforma el pilote.
- Ip - Momento de inercia de la sección transversal.
- λ - Longitud elástica suelo-pilote.

Según Fleming et al. (1992), el comportamiento de pilotes depende fundamentalmente del fallo a que se ven sometidos. Cuando en los pilotes actúan cargas laterales y sufren una rotación alrededor de un punto, se comportan como un cuerpo rígido. Los pilotes flexibles son aquellos en los que ocurre una rotura a una longitud determinada del mismo haciendo que en la parte superior o cabeza del pilote se generen desplazamientos significativos. Para pilotes rígidos, el problema pasa a ser de ruptura del suelo dado la deflexión en la cabeza del pilote; mientras que para pilotes largos puede ocurrir la ruptura estructural del elemento o igualmente la excesiva deflexión horizontal. (Cunha, 1996).

La rigidez a flexión de un pilote determina la forma de calcular su capacidad resistente. Para el caso de un pilote rígido la capacidad de carga es determinada por el suelo. Para el caso de un pilote flexible o largo, la capacidad de carga depende tanto de la capacidad estructural del material como de la capacidad del suelo, según muestra la figura 1. En este caso al pasar los esfuerzos resistentes a flexión se forma la rótula plástica en el elemento estructural hasta alcanzar la ruptura. Poulos y Davis (1980), Broms (1964).



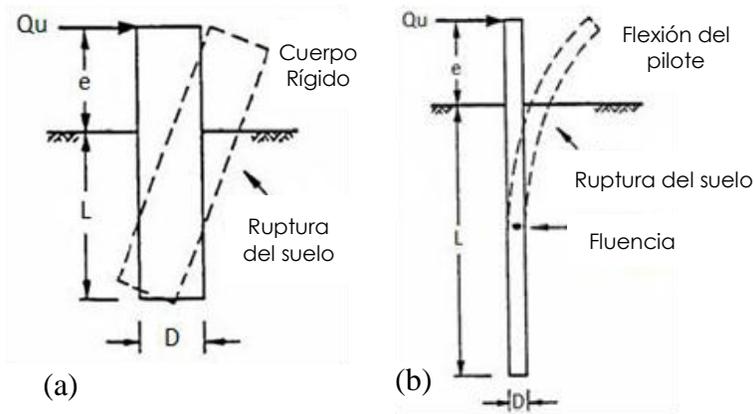


Figura. 1: Comportamiento de pilotes (a) Rígido (b) Flexible. Tomado de Paz (2015).

(Lima, 2006), propone una posible solución de cimentación, casi no aplicada en la actualidad cubana, que ante la acción de las cargas horizontales es efectiva en aprovechar la capacidad resistente del suelo pudiendo proporcionar grandes resultados económicos, siendo esta los denominados pilotes cortos.

Los pilotes cortos sometidos a cargas horizontales resisten las sollicitaciones deformándose y movilizand la reacción necesaria del suelo que los rodea de modo que:

1. El comportamiento depende de la rigidez relativa del pilote respecto al suelo.
2. La capacidad de carga horizontal puede estar regida por los siguientes tres mecanismos:
 - 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).
 - Los momentos de flexión pueden generar sollicitaciones excesivas en el hormigón o el acero con que están construidos, resultando una falla estructural de los pilotes.
 - 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.

Se hace necesario dejar establecida una definición de lo que son los pilotes cortos con un comportamiento rígido.

Pilote corto-rígido: Es el elemento de cimentación capaz de transmitir al terreno todas las cargas provenientes de la estructura, de forma tal que las deformaciones de flexión que produzcan en él puedan considerarse despreciables, y a su vez que las cargas verticales sean soportadas por la base y las sollicitaciones de momento y/o cortante sean resistidas por el aporte de las caras laterales. Este elemento es rígido y a la vez corto, figura 2.

Su longitud máxima es de 5.0 m debido que para el equipamiento existente en el país es difícil conseguir la rigidez para un elemento mayor. Bispo y López (2008). Es importante



señalar que en la literatura consultada se utiliza indistintamente el concepto de corto o rígido para analizar la forma de trabajo de este tipo de pilotes, pero en la presente investigación se utilizará como válida la definición anterior.

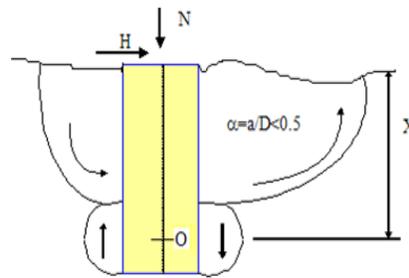


Figura. 2: Zona de grandes desplazamientos alrededor del bloque de cimentación.

1.1: Métodos para el análisis de la resistencia y deformación de pilotes cortos- rígidos.

En las últimas décadas han sido revelados varios métodos para la determinación del comportamiento de pilotes sujetos a las acciones laterales, de manera que se puedan evaluar los desplazamientos y los esfuerzos a que estos elementos están sujetos. En todos ellos el pilote es asumido como una viga lineal caracterizada por una rigidez, residiendo su principal diferencia en la modelación del comportamiento reológico del suelo que lo envuelve. Existen dos vías que normalmente son utilizadas para modelar el comportamiento del suelo: una mediante modelos discretos y otra mediante modelos continuos (Santos, 1999).

Un análisis riguroso de los pilotes perforados cargados lateralmente es muy complejo debido al sistema de esfuerzos tridimensionales asimétricos que actúan sobre el fuste. Estas fuerzas influyen sobre la resistencia activa y pasiva actuando en las caras delanteras y traseras, las fuerzas cortantes vertical y horizontal actúan a lo largo de la superficie lateral y la resistencia axial en el cortante de la punta. Un análisis detallado en 3D necesita el uso de métodos numéricos. Sin embargo, un análisis convencional está basado en realizar una simplificación utilizando un modelo en 2D que asume la resistencia del suelo solamente en las caras laterales y probablemente el cortante en las puntas, figura 3. Bispo y López (2008).

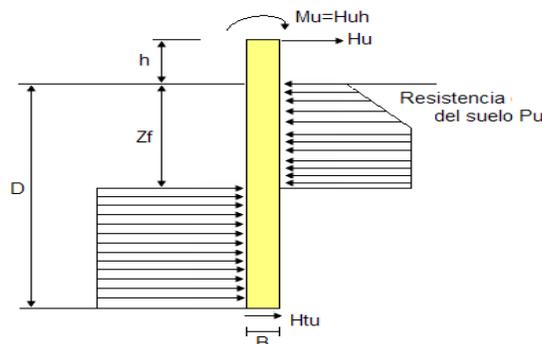


Figura 3: Resistencia del suelo. Tomado de Bispo y López (2008).



Existen varios métodos para el análisis del problema de la resistencia y deformación de pilotes. Lima en el 2008 realiza un resumen sobre la forma en que se aborda esta temática:

- a) Hipótesis de Winkler.
- b) Estudios elásticos.
- c) Análisis en rotura.
- d) Estudios experimentales.
- e) Métodos numéricos.
- f) Métodos combinados.

Los primeros dos métodos son válidos para solicitaciones sobre el pilote en régimen de servicio. Las teorías en rotura, por el contrario, examinan la situación límite de agotamiento del terreno, suponiendo movilizad su máxima resistencia lateral. Diferentes investigadores abordan el tema, utilizando las estas teorías, figura 4.

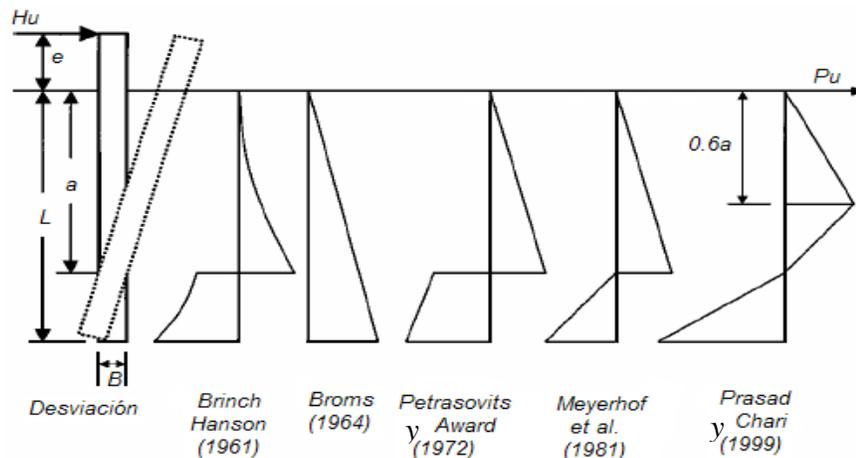


Figura 4: Distribución de presión supuesta del suelo bajo cargas laterales según las diferentes teorías. Tomado de Lima (2008).

Las teorías en rotura examinan la situación límite de agotamiento del terreno, suponiendo movilizad su máxima resistencia lateral. Dentro de estas están los aportes de Brinch-Hansen (1961) válida para pilotes cortos y posteriormente Broms (1964) estima mediante diagramas simplificados la resistencia última de pilotes sometidos a esfuerzos horizontales, capaz de generar una capacidad lateral última a expensas del empuje pasivo y recomienda la utilización de expresiones que permiten estimar deflexiones para cargas de servicio en suelos granulares y cohesivos.



1.1.1: Método de Brinch-Hansen (1961).

El método de Brinch-Hansen (1961) se basa en la teoría de empujes de suelo. Este método asume la hipótesis de que el pilote es un elemento rígido con cabeza libre y que el suelo movilizado a su alrededor genera un empuje pasivo sobre el pilote. La teoría de Brinch-Hansen (Hernández Egido, 2007) analiza los suelos con un comportamiento $c-\phi$, que son los parámetros obtenidos generalmente en los suelos de Cuba.

La diferencia entre los empujes pasivos y activos de tierra se expresa como:

$$\sigma_h = \gamma \cdot D \cdot z \cdot K_q + c \cdot D \cdot K_c \quad \dots\dots\dots (4)$$

Donde:

σ_h - diferencia entre los empujes pasivos y activos de las presiones de tierra.

Z - profundidad debajo de la superficie de tierra.

K_q - coeficiente de presiones pasiva debido al peso del suelo para una profundidad intermedia.

K_c - coeficiente de presiones pasiva debido a la cohesión para una profundidad intermedia.

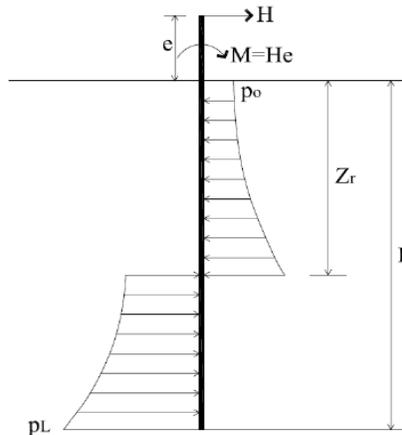


Fig. 5: Pilote sometido a cargas laterales. Mecanismo de movilización de la resistencia de un pilote. Tratado por Brinch-Hansen (1961).

Este problema presenta dos incógnitas: la propia carga horizontal límite (H_u) y la función (P_{zu}) que depende del tipo de suelo. Algunas soluciones gráficas fueron resueltas para la determinación de (H_u) como una función de la geometría del pilote, bajo ciertas condiciones de distribución (P_{zu}).

Para suelos cohesivos-friccionales, la distribución de empuje pasivo puede ser obtenida a través de la ecuación 5. Los factores multiplicativos fueron presentados por Paulos y Davis en forma de ábaco en función de la geometría y del ángulo de fricción interna del suelo, figura 6. Las ecuaciones anteriores permiten conocer la distribución de (P_{zu}) y determinar los valores de (Z_r) y (H_u). Brinch-Hansen (1991) establece:



$$P_{zu} = \sigma_{vz} = qK_q + cK_c \dots \dots \dots (5)$$

Donde:

- σ'_{vz} : Tensión vertical efectiva en el eje z.
- K_q y K_c : Factores que dependen de Φ y de z/B .
- q : Sobrecarga del suelo en z.
- c : Cohesión del suelo.

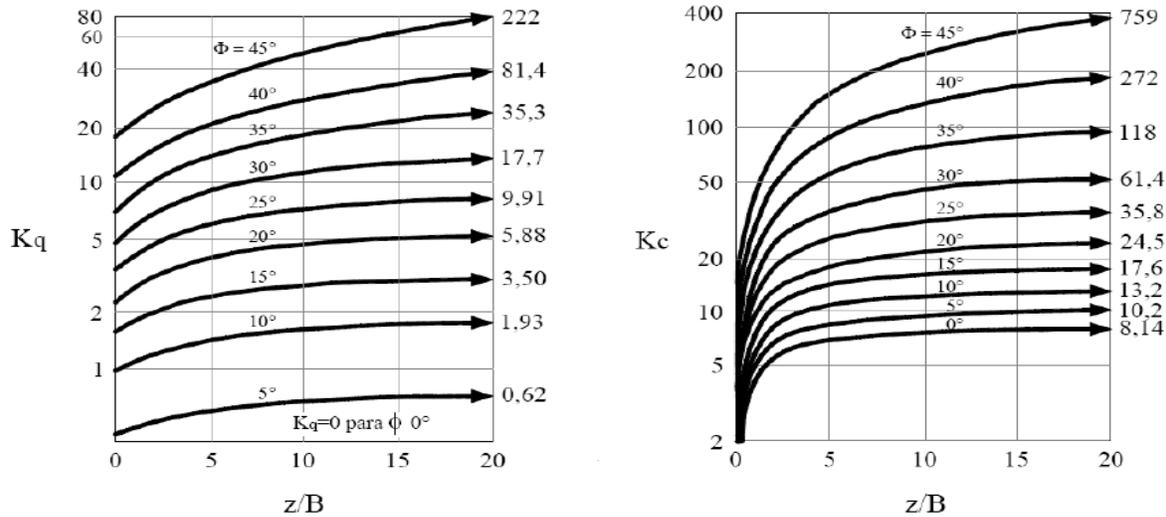


Fig. 6: Valores de K_q y K_c en función de la razón (z/B) y el ángulo de fricción interna. (Poulos y Davis, 1980). Tomado de Paz (2015).

Este método tiene como ventaja su aplicabilidad en los suelos cohesivos, friccionales y suelos estratificados. Como desventaja, el método solo puede ser aplicado en pilotes cortos (razón $L/B < 2$), pues no considera la formación de rótulas plásticas en el elemento estructural y sin rotaciones. Otra desventaja es en los casos sin soluciones aproximadas, pues la solución en estos casos tendrá que dar tentativas y errores. Tales consideraciones llevan a la necesidad de metodologías de proyecto más abarcadores para el caso de pilotes en suelos cohesivos-friccionales.

La propuesta de norma cubana para cimentaciones profundas, al igual que un gran número de trabajos, están fundamentadas en la teoría de Broms. Dicha teoría es la más simplificada para el diseño de cimentación con pilote.

1.1.2: Método de Broms (1964).

Broms (1964) presentó en dos artículos los principios de una nueva metodología para el análisis de cargas laterales en pilotes. El primero aborda la temática de pilotes en suelos cohesivos y en el segundo estudio llega a conclusiones sobre el comportamiento de pilotes en suelos granulares. Paz (2015).



Broms presenta un método semiempírico basado en el concepto de Estado Límite del terreno combinado con la resistencia del material del pilote, estudiando un mecanismo de agotamiento del sistema en el que se forman las rótulas plásticas adecuadas en el pilote y se movilizan las reacciones máximas del terreno. Con estas hipótesis, ha estudiado el problema para suelos coherentes e incoherentes, proponiendo unas leyes de reacción tipos, a partir de las cuales puede obtenerse la carga horizontal de rotura en función del momento plástico de la sección del pilote. Según Broms, la resistencia lateral última en pilotes es gobernada por la tensión plástica de la sección transversal del pilote y por la resistencia lateral ofrecida por el suelo. De esta forma, el fallo puede ser causado por capacidad de carga del suelo. En la figura 7 se representa el mecanismo de rotura de un pilote sometido a carga lateral. En las figuras 8 y 9 aparecen los gráficos de distribución probable y la simplificada de presiones sobre pilotes.

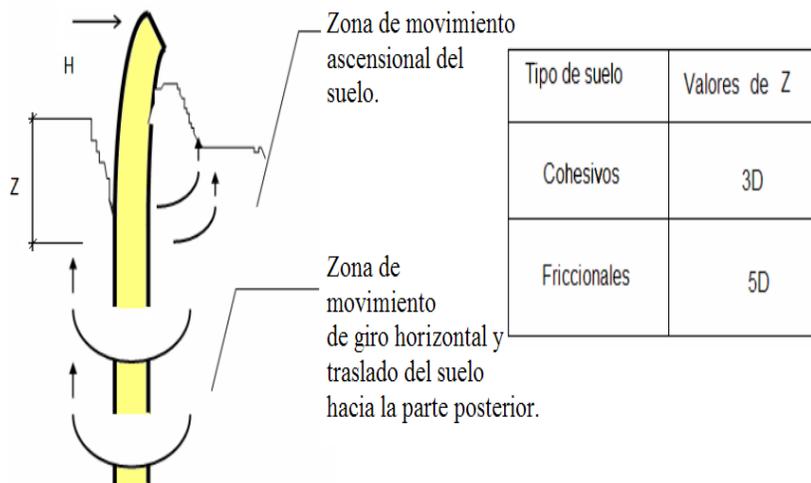


Figura 7: Mecanismo de rotura de un pilote sometido a carga horizontal.

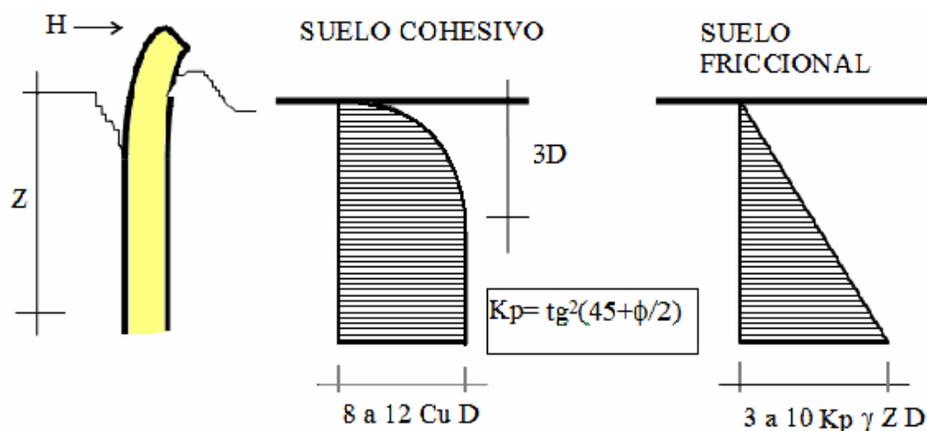


Figura 8: Gráfico de distribución simplificada de la presión sobre el pilote.



A partir de los esquemas simplificados que aparecen en la figura 8, realizando un equilibrio de fuerza se obtienen las expresiones para determinar la capacidad soportante lateral del pilote.

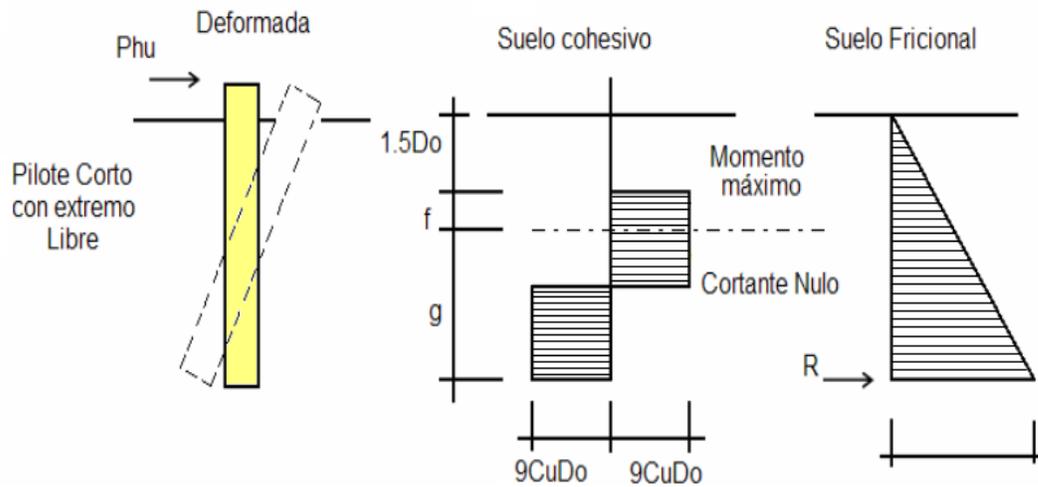


Figura 9: Gráfico de distribución probable de la presión sobre el pilote.
Tomado de Bispo- López (2008).

e) Métodos numéricos: Con el avance y desarrollo tecnológico en el campo de la informática, se han podido desarrollar herramientas computacionales basadas en métodos numéricos que permiten simular de manera virtual, experimentos reales y estudiar el comportamiento estructural. En Cuba existe una experiencia acumulada en diversos campos de la ingeniería estructural, plasmada en los trabajos de (León 1997), (Recarey 1999), (Ibáñez 2001), (Cobelo 2004), (Broche 2005), (Bonilla 2008), (Iglesias 2011), (Vázquez 2013), (Paz 2015).

1.2: Concepción general de la modelación.

En el campo de la ingeniería, el hombre se ha enfrentado a un grupo de fenómenos donde por limitaciones del conocimiento o por la carencia de una infraestructura técnica adecuada, no ha encontrado la respuesta en el “problema real”. Esto ha propiciado que recurra a su capacidad creativa y logre una abstracción de este problema, obteniendo “modelos” sobre los cuales se trabajan buscando una respuesta analítica, que por muy precisa que ella sea, los resultados obtenidos serán indicativos del “problema real” en la medida que el “modelo” represente fielmente sus propiedades esenciales (Broche 2005).

Siendo la modelación el método de manejo práctico o teórico de un sistema por medio del cual se estudiará este, pero no como tal, sino por medio de un sistema auxiliar natural o artificial, el que, desde el punto de vista de los intereses planteados, concuerda con el sistema real que se estudie. Es decir, es el método que opera de forma práctica o teórica como un “objeto”, no de forma directa, sino utilizando cierto sistema auxiliar (natural o artificial) el cual se encuentra en una determinada correspondencia objetiva con el “objeto”



modelado y está en condiciones de sustituir el “objeto” que se estudia en determinadas etapas de la investigación, permitiendo obtener información susceptible de comprobaciones experimentales. [Recarey (1999), Ibáñez (2001), Bonilla (2008) y García (2015)].

Modelación: Simplificar o reducir el medio real a uno físico en el cual sea posible aplicar las ecuaciones constitutivas que gobiernan el problema. Se define como relaciones constitutivas las expresiones matemáticas de las leyes físicas que gobiernan el problema que se estudia. Jiménez (1986).



Fig. 10: Forma simplificada del proceso de modelación. Tomado de García (2015).

El concepto general de modelación está sin dudas estrechamente ligado al concepto de lo que es un modelo, como muestra la figura 10.

El procedimiento numérico más generalizado es el Método de los Elementos Finitos (MEF), por las bondades que brinda: incorpora a su solución herramientas de cálculos mejor elaboradas, es muy versátil a la hora de modelar geometrías complejas. Su uso se ha extendido para obtener soluciones a problemas con comportamiento no lineal del material, por su capacidad de adecuación a diferentes efectos locales (Oñate 2005); (Zienkiewicz 2004); (Cobelo 2004); (Brebbia 1975); (Broche 2005), (García 2015).

Para el estudio de las cimentaciones los investigadores utilizan con más frecuencia los siguientes softwares computacionales:

- ABAQUS: (Basado en el M.E.F., para el análisis dinámico y no lineal). [Hoback y Rujipakorn (2004), Johnson et al. (2006), Chaudhary (2007)].
- COSMOS: (Basado en el M.E.F.).
- NASTRAN: (Basado en el M.E.F.).
- SIGMAW: (Basado en el M.E.F., para análisis de tensión-deformación en suelo y roca).



- PLAXIS: (Basado en el MEF, para análisis de tensión-deformación en suelo y roca). [Nguyen et al. (2006), Díaz (2008), Janda et al. (2008), Figueredo y Lorenzo (2008), Silva (2008), Van de Velde (2008), Fernández (2009) y García (2009), Figueredo y Lorenzo (2010), Iglesias (2011), Vázquez (2013)].
- FLAC: (Basado en el MED, para análisis de tensión-deformación en suelo y roca).
- NAPRA: (Implementado por Russo en 1995, tiene en cuenta la modelación de la losa por el (M.E.F) y los pilotes como resortes, bajo un análisis no lineal, considerando las interacciones existentes entre los elementos componentes del sistema. [Sales (2000)]
- GARP: (Combina el (M.E.C.) y el (M.E.F.)). [Russo y Viggiani (1997), Russo (1998) y Moyes et al. (2003) citados por Poulos (2001), Sales (2000)], ANSYS [Vittinghoff et al. (1997) y Katzenbach et al. (1999) citados por Maybaum et al. (1999), Liang et al. (2003)], basado en el (M.E.F.).

PLAXIS comenzó su desarrollo en la Universidad Técnica de Delft en 1987. El objetivo inicial era desarrollar un código de elementos finitos de uso sencillo para analizar el comportamiento de los diques y terraplenes construidos sobre los suelos blandos de los ríos de las lowlands de Holanda. En los años siguientes, Plaxis creció para cubrir otras muchas áreas de la ingeniería geotécnica hasta conseguir formar en 1993, debido a sus continuas actividades de crecimiento, una compañía llamada Plaxis BV. Además de ser un software que metodológicamente es más simple a la hora de resolver problemas que no tengan un alto grado de complejidad, el programa ofrece las siguientes facilidades:

- Generación sencilla de los modelos geométricos a partir de herramientas CAD.
- Generación automática de las superficies de contacto entre varios estratos inclinados mediante la ubicación de sondeos o calas.
- Generación automática del mallado de los elementos del modelo.
- Posibilidad de modelar placas, pilotes, muros y vigas.
- Empleo de interfaces en las superficies de contacto entre distintos elementos y materiales.
- Implementación de modelos de comportamiento de materiales como Mohr-Coulomb, suelo con endurecimiento, elásticos, etc.

1.2.1: Invariantes para la modelación.

El concepto de invariante para el diseño de cimentaciones tipo pilotes rígidos sometidos a grandes cargas de momento y/o cortantes y axiales pequeños o de succión se refiere a aspectos condicionantes o determinantes que aparecen al modelar mecánicamente el diseño de un elemento. (Bispo y López, 2008). En este caso las invariantes para el diseño estructural tienen las siguientes particularidades:



1.2.1.1: Cargas.

Se plantean modelos de cargas o acciones externas. En el proceso de diseño de la cimentación es necesario determinar la carga actuante a nivel del pilote aislado, (Ibáñez, 2001), con el fin de calcular la capacidad de carga y la deformación del mismo, así como las deformaciones que pudiera sufrir el suelo adyacente.

La distribución teórica de presiones se acerca a la realidad cuando las presiones, los asientos y las deformaciones de la estructura y el suelo son compatibles (López Villar 2001); (Calavera 2000); (Meli Piralla 1986). Referente a esta distribución de presiones de contacto se deben tener en cuenta otros aspectos con que se modela la interacción en la superficie suelo- pilote, dependiendo de factores como: tipo de carga, sea puntual o repartida; profundidad del pilote; tipo de suelo y la estratificación del terreno (Meli Piralla 1986).

Mejías (2010) recomienda para la modelación de las cargas dividirla de la siguiente forma:

Magnitud (Variabilidad): las cargas son variables aleatorias, para saber su magnitud generalmente se determinan por técnicas probabilísticas (carga de uso, carga de viento, etc.

Forma de aplicación: se define como la forma de representar, esquematizar las cargas "reales" a formas conocidas para facilitar el cálculo.

Tiempo de aplicación: El origen de las cargas suele ser muy diverso, se tiende a clasificar estas acciones actuantes de acuerdo a su permanencia o tipo de influencia. Estas pueden ser: acciones permanentes o cargas muertas, acciones variables o cargas vivas (efectos de cambio de temperatura y cambios volumétricos), acciones accidentales (Viento, oleaje, etc.)

Combinación de cargas: posibilidad que tienen las cargas de estar actuando a la vez. La obtención de la combinación pésima o más desfavorable en la estructura es uno de los procesos más importantes y decide, en ocasiones, la racionalidad y la seguridad de la estructura. En Cuba se plantean los siguientes casos:

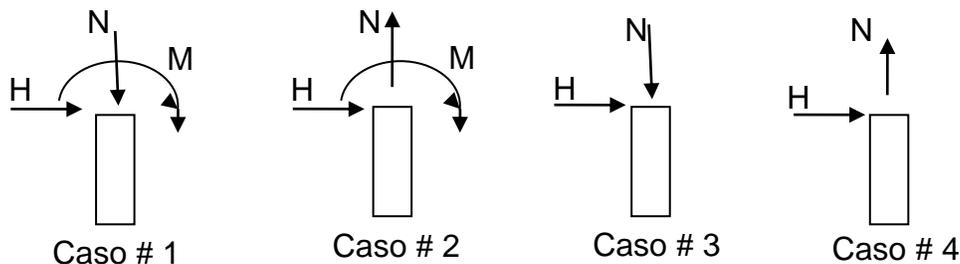


Figura 11: Solicitaciones que se pueden generar. Tomado de Lima (2009).



1.2.1.2: Geometría.

Está relacionado con los tipos de solicitaciones a que va estar expuesta, ya que la forma de la cimentación es, en muchos casos, una consecuencia de cómo actúan las cargas. Las condiciones de continuidad entre los elementos de una estructura dependen esencialmente del detalle constructivo con que se resuelve la conexión. La suposición que se haga en el modelo analítico debe ser congruente con el tipo de conexión que se especifique en los planos para los elementos en cuestión. Bispo y López (2008).

Se tiene como objetivo modelar el suelo con el pilote en tres dimensiones (3D) para refinar los cálculos y los estudios que permita ver de forma más específica dónde se producen las mayores concentraciones de tensiones cuando la estructura responda a las cargas a que está sometida.

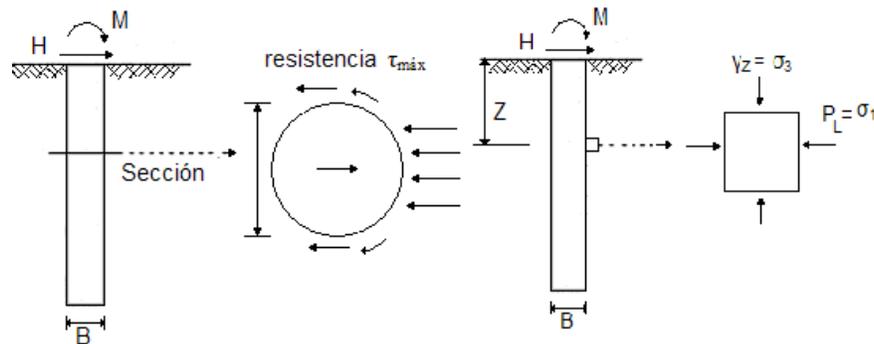


Figura 12: Resistencia por la geometría. Tomado de Bispo y López (2008).

1.2.1.3: Material.

“La modelación constitutiva de un material es uno de los elementos más importantes para la solución de problemas en el campo de la ingeniería” (Recarey, 1999). Si no se parte de un modelo constitutivo adecuado, no tendrían validez los resultados obtenidos, teniendo en cuenta que se toma un comportamiento equivocado del material ante el efecto de las cargas.

Las principales propiedades de un material pueden representarse mediante curvas esfuerzo-deformación obtenidas en ensayos estándares para condiciones uniaxiales de esfuerzos (de tracción o compresión), que, a pesar de algunas limitaciones, brindan una información relevante acerca del comportamiento del material. Entre estos modelos hallamos los siguientes: Modelo elástico lineal, modelo plástico, modelo elasto-plástico, modelos no lineales, modelos reológicos, modelos reológicos no lineales. (Mejías, 2010)



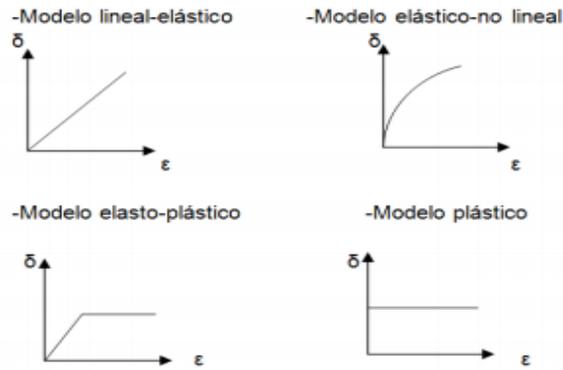


Figura 13: Modelos del material. Tomado de Mejías (2010).

1.2.1.4: Condiciones de Apoyo.

Esta invariante está muy vinculada a la dependencia de cómo se traten los vínculos columna-cimiento, así serán las solicitaciones a que se verá sometida dicha cimentación. En caso de existir continuidad, habrá posibilidad de transferencia de flexiones y fuerzas horizontales, en caso contrario solo fuerzas horizontales y verticales, o una de ellas solamente. Otro aspecto de esta invariante se manifiesta en la superficie de contacto pilote-suelo, la cual debe garantizar la transferencia de esfuerzos horizontales, siempre que se logre un adecuado factor de seguridad al deslizamiento. La transferencia de los esfuerzos verticales y de flexión es otro de los aspectos que garantiza un buen diseño geotécnico, así como el adecuado comportamiento frente a los asentamientos. (Bispo y López, 2008).

1.3: Calibración.

Con el objetivo de comparar la validez del modelo propuesto y su posible generalización y aplicación, se procede a compararlo con los resultados obtenidos a través de prueba de carga y otras formulaciones. Las pruebas de carga proveen una base para evaluar la exactitud de las diferentes teorías para estimar las laterales capacidades de carga. (Helmert 1997). Los resultados que se logren en la modelación a través de las diferentes pruebas de carga permiten validar los resultados de los análisis iniciales y confirmar la potencialidad tanto del modelo físico y matemático, así como el método de solución (M.E.F) capaces de representar en todos los casos con suficiente precisión los resultados experimentales. De la Rosa (2014).

Es válido señalar que en la literatura consultada son pocas las pruebas de cargas en las que se encuentra suficiente información para establecer comparaciones [Rocha (1998), Sedalla (1998), Das (1999)]; además de reducirse en la mayoría de los casos a pilotes de pequeño diámetro y longitud, Ibáñez (2001).

Cuando en las pruebas de cargas, dada las características de la forma en que se realice el ensayo, no se llegue a definir donde ocurre la falla, es necesario aplicar métodos que permitan estimar el valor numérico donde ocurre la ruptura del suelo, a través de la interpretación de las curvas carga vs deformación, pudiéndose mencionar: el método de Davisson, método de Chin y el método de Van Der Veen. En este trabajo se utilizará este



último método.

1.3.1: Método de estimación de la capacidad de carga lateral a través de la interpretación de las curvas carga vs deformación.

El método de Van Der Veen (1953) ha sido ampliamente utilizado para la extrapolación de curvas carga vs deformación obtenidas en pruebas de carga que no fueron llevadas a la ruptura ó cuando el ensayo de carga no indica una ruptura nítida. Se puede considerar que este método tiene dos hipótesis básicas: La forma de la curva carga vs asentamiento de tipo exponencial y el modo de ruptura, del tipo de ruptura física que corresponde a desplazamientos teóricamente infinitos (Barreto, 2011), tratado por Müller (2014). El método de Van der Veen (1953) ajusta el gráfico resultante de la prueba de carga a una curva con una formulación exponencial, como se muestra en la **ecuación 6** que puede ser resuelta iterativamente.

$$Q = Q_u(1 - e^{-\alpha r}) \dots \dots \dots (6)$$

Donde:

- Q y r : Coordenadas conocidas de la curva carga vs deformación
- Q_u : Carga de ruptura (que se desea determinar)
- α : Coeficiente de forma de la curva.

Reorganizando los términos de la ecuación 6 y aplicando logaritmo neperiano se obtiene la siguiente expresión:

$$\alpha \cdot r = -\ln\left(1 - \frac{Q}{Q_u}\right) \dots \dots \dots (7)$$

El valor de (Q_u) que satisfaga esta ecuación representa una recta en un gráfico semi-logarítmico. Esta recta puede ser definida por regresión lineal, siendo el valor de (Q_u) aquel que alcanza el mayor coeficiente de correlación (R^2). El coeficiente angular de esta recta tiene el valor de (α). El método consiste en adoptar varios valores para (Q_u) de forma arbitraria, conforme ilustra la figura 14 y verificar cuál de esos valores resulta en la recta con mayor (R^2). Es entonces que, al realizar tanteos con diferentes valores de “ Q_u ”, y obtener el resultado del gráfico de la ecuación anterior en función del desplazamiento (Figura 1.14), se obtenga un comportamiento lineal. El valor adoptado de “ Q_u ” que lo originó corresponderá a la carga de ruptura (Valencia et al, 2008).



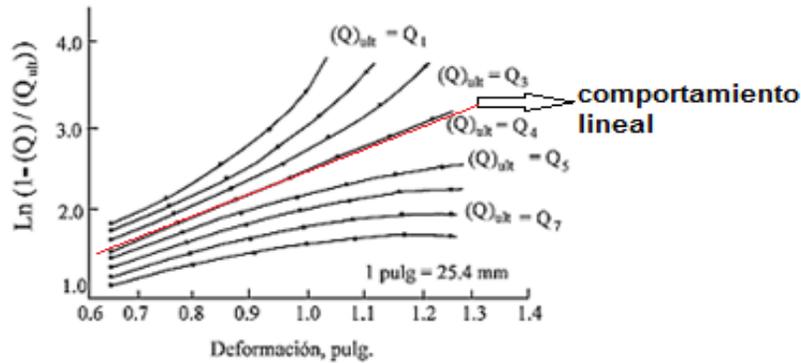


Figura 14: Solución gráfica de la ecuación de Van Der Veen. Tomado de Müller (2014).

1.4: Validación del modelo.

1.4.1: Obtención de los resultados de las pruebas de cargas.

De las pruebas revisadas se escogió las utilizadas por Helmers (1997) en su trabajo, que fue seleccionada por su nivel de documentación y datos que ofrece, estas fueron realizadas en cuatro sitios en Virginia. El elemento que se ensayó fue un pilote de hormigón macizo de forma cilíndrica con una longitud de 1.20m y un diámetro de 0.2m. Para desarrollar su trabajo realizó pruebas de campo y de laboratorio para caracterizar el suelo, obteniendo los valores de peso específico, cohesión y fricción, límites líquidos, límites plásticos, índice de poros, porcentaje de finos, etc. tabla 1 y 2. En el campo se realizaron pruebas de penetración estándar y en el laboratorio las pruebas triaxiales de compresión, obteniéndose los resultados siguientes:

Tabla 1: Características generales de los suelos. Tomado de Helmers (1997).

Lugar	Eo(kg/cm ²)	LP	LL	% Finos
Salem	682	18	38	63.9
Suffolk	204	17	23	62.1
Fairfax Count Parkway	204	32	76	88
Roberts Road	60	-	-	56.2

Tabla 2: Parámetros de los suelos. Tomado de Helmers (1997).

Lugar	Clasificación del suelo	γ (kN/m ³)	ϕ (grados)	C (kN/m ²)
Salem	(CL)	19.95	34	16.76
Suffolk	(ML) a (CL)	19.16	31	16.76
Fairfax Count Parkway	(MH) a (CH)	17.91	30	9.58



Roberts Road	(ML)	17.28	40	7.18
---------------------	------	-------	----	------

Los resultados de las pruebas de carga aparecen en la tabla 3 y en la figura 15

Tabla 3: Capacidad de carga última medida. Tomado de Helters (1997).

Lugar	Capacidad Medida (kN)
Salem	20.46
Suffolk	20.02
Fairfax Count Parkway	16.46
Roberts Road	20.68

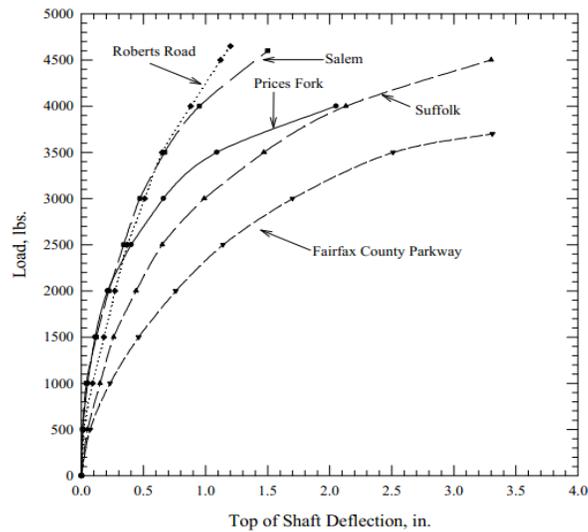


Figura 15: Resultados gráficos de capacidad de carga medida. Tomado de Helters (1997).

1.4.2: Calibración numérica del modelo:

Es necesario primero determinar el modelo físico y matemático adecuado para la modelación teniendo como base la solución numérica mediante el método de elementos finitos (*MEF*). Los criterios considerados en cada análisis fueron aquellos en los que se obtuvieron las mejores respuestas en el menor costo computacional, evaluándose criterios referentes a las proximidades de borde, cantidad de nodos por elemento y el tiempo de procesamiento. Para llevar a cabo la calibración numérica del modelo fueron realizados cuatro análisis:

1. Geometría más racional del dominio de suelo.
2. Tamaño mínimo del modelo para minimizar los efectos de proximidad de los bordes.
3. Tipo de elemento finito.
4. Densidad de la malla.



Respetando la secuencia de entrada de datos establecida en el capítulo II, se dividirá el análisis en dos partes. En una primera parte se analizará el modelo para los casos 1 y 2, los que corresponden a la modelación de la geometría y la posterior asignación de los materiales, interfase y cargas. Una vez ingresados los datos, para pasar a la generación de la malla se analizarán los casos 3 y 4, de manera que todas las pruebas de carga sean modeladas para la densidad de malla que ofrezca mejores resultados para un adecuado costo computacional.

1.4.3: Creación del modelo geométrico.

1.4.3.1: Geometría más racional del dominio de suelo.

De las formas de dominio más conocidas tenemos el dominio cúbico y el dominio cilíndrico. Algunos autores consideraron dominios cúbicos en sus estudios, díganse: Karthigeyan et al. (2006), Bourgeois et al (2010) y Voottipruex et al (2011). Por otro lado, entre los que consideraron dominios cilíndricos se encuentran: Fan y Long (2005), De La Rosa González (2014) y Paz (2015). Aunque el dominio cilíndrico se asemeja mucho más a la geometría del pilote, el Plaxis 3D consta para la concepción del suelo solo del dominio cúbico.

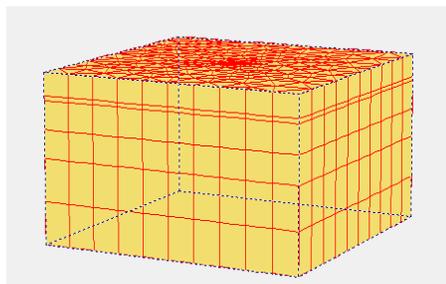


Figura 16: Dominio cúbico para el suelo. Elaboración propia.

1.4.3.2: Tamaño mínimo del modelo para minimizar los efectos de proximidad de los bordes.

a) Espacio geométrico:

Los análisis de dimensiones permiten obtener el menor tamaño de modelo a considerar minimizando el costo computacional. En otros estudios varios autores definieron dimensiones al modelo en función al diámetro del pilote. Chai y Hutchinson (2002) consideraron modelos de tamaño 10 veces el diámetro para minimizar los efectos de borde. Kim y Jeong (2011) consideraron un modelo de tamaño igual a 22 veces el diámetro del pilote y 1.7 veces su longitud.

Para el dimensionamiento del modelo se siguieron las recomendaciones ofrecidas por Ibáñez descritas en el capítulo anterior. Se dieron los datos iniciales, quedando establecidos los límites horizontales y verticales, donde se verificaron las deformaciones en los límites



del modelo pudiéndose demostrar que son despreciables y por tanto se considera correcta esta consideración inicial, figura 15.

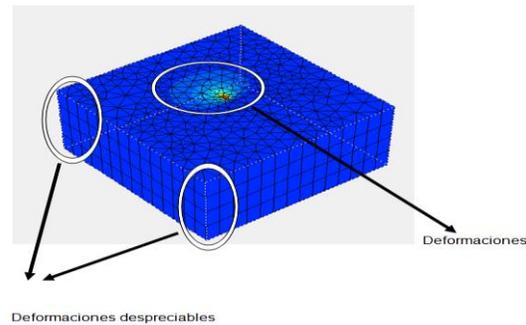


Figura 17: Límites verticales y horizontales a $2L$ para las deformaciones. Elaboración propia.

1.4.3.3: Materiales:

a) Hormigón:

Para el caso del hormigón el modelo constitutivo que se adoptó fue el lineal elástico, según plantean Poulos (2001), Velde (2008), Figueredo (2010), Lorenzo (2010), De la Rosa (2014) y Paz (2015). Además, para la forma de trabajo del elemento que se considera rígido y gira alrededor de un punto, que no tiene deformaciones, considerarlo en la etapa lineal es correcto según su comportamiento.

Tabla 4: Datos del pilote usados para la modelación. Tomado de Helmers (1997).

L (m)	D (m)	γ (k N/m³)	E (psi)	(ν)
1.20	0.20	24	3500	0.167

b) Suelo:

Para la realización de la modelación se utilizaron las características de los tipos de suelos ensayados, tabla 1.1 y 1.2, utilizando el modelo Mohr- Coulomb.

1.4.3.4: Generación de contacto pilote-suelo.

En el capítulo anterior fue definido que el parámetro δ -inter no se tendría en cuenta. Para el parámetro R_{inter} , Ibáñez (2001) recomienda para el hormigón un valor de 0.7 y para definir la interfase en el suelo plantea utilizar un valor de $2/3$ para cuando la interacción sea entre arena y hormigón y $1/2$ para arcilla y hormigón, adoptándose este último ya que los suelos son predominantemente arcillosos y limos arcillosos.

1.4.3.5: Modelación de las solicitaciones.

Para la modelación de las solicitaciones se comenzó aplicando los valores de carga última medidos en las pruebas de cargas. Partiendo del valor medido en ocasiones se pudo



comprobar que la capacidad de carga era mayor, por lo que se fue incrementando sucesivamente la carga hasta llegar a su capacidad última.

1.4.4: Análisis del tipo de elemento finito.

Para definir el tipo de elemento finito más adecuado para el suelo fueron evaluados los principales criterios relacionados con los resultados que brinda el software, en ese caso: forma de elemento finito, cantidad de nodos, tiempo de procesamiento y desplazamientos para la carga actuante. En la bibliografía consultada se recomiendan elementos hexaédricos, tetraédricos etc., sin embargo, el software Plaxis 3D Foundation versión 1.1 cuenta solo de elementos triangulares de 6 nodos en la dirección horizontal y cuadriláteros de 8 nodos en la dirección vertical.

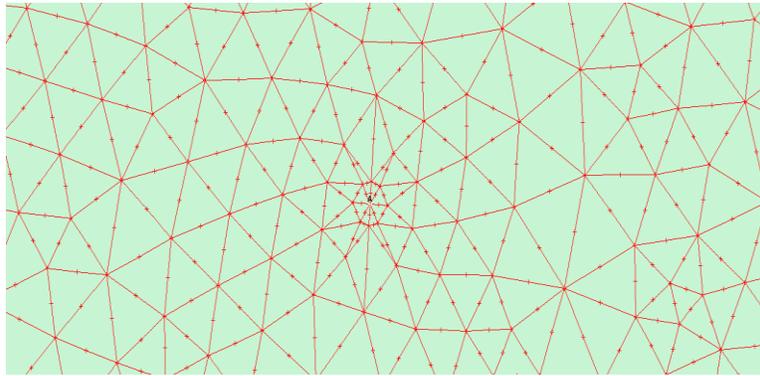


Figura 18: Elemento finito triangular de 6 nodos. Elaboración propia.

1.4.4.1: Análisis de la densidad de la malla:

Para garantizar un mallado eficiente se requiere de la calibración de los modelos propuestos, de manera que se pueda obtener precisión en los resultados y el costo computacional asociado.

El mallado es de suma importancia en la modelación puesto que con él se define la precisión con la cual se desea que se obtengan los resultados numéricos. Por ello se han realizado numerosas investigaciones en las cuales se destacan una serie de consideraciones a tener en cuenta para tener éxito en este aspecto, entre las que se encuentran:

- Debe reducirse al máximo el tamaño del modelo, para ello son válidas el uso de simplificaciones por simetría, siempre y cuando sea compatible con el problema físico (geometría, condiciones límites, cargas).
- El mallado debe ser progresivo para optimizar el rendimiento, más denso en aquellos puntos donde interesa tomar resultados y menos denso donde se aleja de la zona de interés.
- La relación entre la mayor dimensión del elemento y la menor dimensión estará cercana a la unidad. Se recomienda, siempre que sea posible, relaciones 1:1 y nunca deben ser superiores a 4:1.



- Los elementos de mayor tamaño son generalmente colocados en las zonas menos solicitadas cerca de las fronteras exteriores. No hay reglas precisas para establecer el tamaño de los elementos, es suficiente recomendar un aumento progresivo y regular lejos de las zonas sensibles.
- Los elementos individuales no deberán ser distorsionados. Los ángulos entre dos lados de elementos adyacentes, no deberán exceder por mucho a los 90° y nunca sobrepasar los 180°, esto implica que los triángulos tendrán similitud, en lo posible, a los triángulos equiláteros, los cuadriláteros a los cuadrados y los hexaedros a los cubos, para no introducir perturbaciones en los cálculos numéricos.

El mallado se concibe progresivamente para optimizar el rendimiento, más denso en aquellos puntos donde interesa tomar resultados y menos denso donde se aleja de la zona de interés (zona de interfase pilote-suelo).

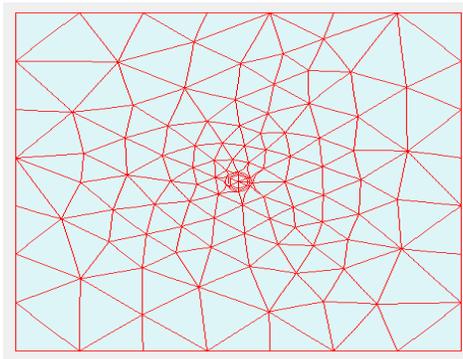


Figura 19: Malla sin refinar. Elaboración propia.

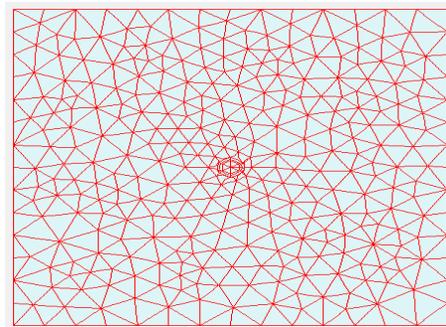


Figura 20: Malla refinada de manera progresiva. Elaboración propia.

Una vez concluidos los análisis de forma, dimensiones y tipo de elemento finito fueron evaluados los diferentes tamaños, definiendo la densidad de malla ideal para ser usada en la modelación. Para obtener el mallado idóneo se realizaron varias corridas al modelo con un grado de mallado diferente, refinando según las recomendaciones la malla alrededor del pilote. Teniendo en cuenta que para una malla muy gruesa el número de puntos donde se evalúan las tensiones es menor, no serán precisos los resultados en comparación con mallas más densas, por lo que esta no se tendrá en cuenta para la calibración. De la misma manera se procede con la malla muy fina que tampoco se evaluará debido al alto costo



computacional. El parámetro de referencia para evaluar el mallado grueso, medio y fino serán las deformaciones en la cabeza del pilote. Para una malla gruesa la deformación es prácticamente despreciable, mientras que se obtienen mejores resultados en las mallas media y fina. Para estas los valores de deformaciones no tienen grandes diferencias, sin embargo, el tiempo de procesamiento de la malla fina con respecto a la media es muy superior, por lo que se seleccionará una malla progresiva del tipo media con la cual serán modelados los cuatro sitios descritos.

Tabla 5: Calibración de la malla a emplear. Elaboración propia.

Tipo de malla	Progresiva				
	Elementos	Nodos	Tamaño (m)	Tiempo (s)	Deformación (m)
Gruesa	678	1433	0.18434	2779	0.026
Media	1094	2285	0.14512	3010	0.093
Fina	2388	4917	0.09823	8440	0.101

1.5: Resultados.

Creado el modelo en el software y procesada toda la información para la modelación de las cuatro pruebas de cargas, se calcularon cada una de ellas lográndose los siguientes resultados:

Tabla 6: Resultados obtenidos en la modelación en el Plaxis 3D Foundation. Elaboración propia.

Lugar	Capacidad Calculada (kN)	Deformaciones (m)
Salem	19.76	0.093
Suffolk	25.6	0.419
Fairfax Count Parkway	14.32	0.233
Roberts Road	23.2	0.777

1.5.1: Determinación de la capacidad de carga según el MEF y su comparación con el método de Broms y Brinch - Hansen.

Las capacidades de carga se determinaron utilizando los diferentes métodos:

1. La teoría de Broms (1964) para suelos friccionales, utilizando el ángulo de fricción medido y tomando la cohesión igual a cero.
2. La teoría de Brinch-Hansen (1961) para suelos con cohesión y fricción ($c-\phi$).
3. Valores de carga última obtenidos en la modelación virtual con el software Plaxis 3D.
4. La teoría de Broms para suelos $c-\phi$, utilizando un valor de ϕ equivalente.



1.5.1.1: Teoría de Broms.

a) Estudio numérico de pilotes rígidos en suelos friccionales.

A fin de ser consecuente con las premisas de Broms los datos usados son los correspondientes a un suelo friccionar atribuyendo al suelo situaciones que hicieran comportarse el suelo como puramente friccionar. En la tabla 7 se muestran las capacidades del pilote medidas, las cuales excedieron las calculadas. Los valores de capacidad medidas/capacidad calculados variaron de 3.1 a 4.4 con un promedio de 3.8. Estas diferencias entre la teoría y los ensayos son debido al hecho de que Broms (1964), se formulan para suelos sin cohesión, mientras los valores de capacidad calculados mostrados, se computaron utilizando muestras de suelo $c-\phi$ de la tabla 2, en los que se consideró la cohesión igual a cero.

Tabla 7: Capacidades medidas y las capacidades laterales últimas calculadas para la Teoría de Broms. (1964). Elaboración propia.

Lugar	Capacidad Media (kN)	Capacidad Calculada (kN)	Medida/Calculada (kN)
Salem	20.46	5.248	3.90
Suffolk	20.016	4.536	4.41
Fairfax Count Parkway	16.457	4.581	3.59
Roberts Road	20.683	6.760	3.06
Promedio			3.84

1.5.1.2: Teoría de Brinch-Hansen (1961) para suelos con cohesión y fricción ($c-\phi$).

En la tabla 8 se muestran las capacidades medidas, parecidas con un promedio de 1.0 con las capacidades calculadas para la teoría de Brinch - Hansen. Los valores de la capacidad medida / capacidad calculada varían de 0.8 a 1.4.

Tabla 8: Capacidades medidas y las capacidades laterales últimas calculadas para la Teoría de Brinch-Hansen (1961). Elaboración propia.

Lugar	Capacidad Medida(kN)	Capacidad Calculada(kN)	Medida/Calculada (kN)
Salem	20.46	24.152	0.85
Suffolk	20.016	19.215	1.04
Fairfax Count Parkway	16.457	12.209	1.35
Roberts Road	20.683	20.727	1.00
Promedio			1.01



ϕ (grados)	Brinch-Hansen Capacidad calculada (kN)	Broms Capacidad Calculada (kN)	Relación (Broms/Brinch- Hansen)(kN)
30	2.49	4.27	1.71
32	2.935	4.625	1.58
34	3.469	5.026	1.45
36	4.136	5.471	1.32
38	4.892	5.96	1.22
40	5.871	6.538	1.11

Tabla 9: Comparación entre la Teoría de Brinch-Hansen (1961) y la Teoría de Broms (1964b), para diferentes ángulos de fricción interna y suelos (cohesión = 0). Elaboración propia.

1.5.1.3: Valores de carga última obtenidos en la modelación virtual con el software Plaxis 3D.

Como se muestra en la tabla 10 los resultados de capacidades laterales obtenidos en modelación en el Plaxis 3D son satisfactorios, aunque difieren algunas de las capacidades obtenidas en la modelación en el Abaqus, estas diferencias se deben a que este software contiene mayores capacidades a la hora de definir aspectos en la modelación como son la interfase y la selección de elementos finitos. Aun así, los resultados obtenidos en la modelación con el Plaxis están en un 96% de precisión con respecto a los medidos en las pruebas de cargas.

Tabla 10: Comparación entre las capacidades medidas, las capacidades laterales últimas determinadas en la modelación en el ABAQUS y en el Plaxis 3D Foundation. Elaboración propia.

Lugar	Capacidad Medida(kN)	Capacidad obtenida en el ABAQUS (kN)	Medida/ Calculada (kN)	Capacidad obtenida en el Plaxis 3D (kN)	Medida/ Calculada (kN)
Salem	20.46	19.6	1.04	19.76	1.03
Suffolk	20.016	19.2	1.04	25.6	0.78
Fairfax Count Parkway	16.457	16.2	1.02	14.32	1.14
Roberts Road	20.683	19.7	1.05	23.2	0.89
Promedio			1.03		0.96



1.5.1.3.1: Análisis comparativo de las capacidades últimas con el método de Van Der Veen (1953).

Según describen las curvas carga vs deformación obtenidas en pruebas de carga, estas no muestran de forma clara si fueron llevadas a la ruptura, pues el ensayo de carga no indica una ruptura nítida. Teniendo en cuenta este concepto, después de realizar la comparación entre las capacidades medidas y las calculadas en el software Plaxis 3D Foundation, se aplicó el método de Van Der Veen (1953) ajustando el gráfico resultante de la prueba de carga, de manera que se obtenga la carga de ruptura. Lo primero es establecer la carga de falla a partir del criterio de Van der Veen, la cual se variará en valores aproximados a la capacidad medida y calculada en el Plaxis 3D Foundation. Los resultados para los suelos restantes se contemplarán en los anexos.

a) Suelo Salem.

Qi	Qu		y1	y2	y3	y4	y5	y6	y7	y8	y9		def
0	19.5		0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
2.22	19.7		0.1208647	0.119561	0.118286	0.117037	0.115815	0.114617	0.113445	0.112296	0.111117		0.25
4.45	19.9		0.2590365	0.256039	0.253111	0.250249	0.247451	0.244716	0.242041	0.239424	0.236863		1.27
6.67	20.1		0.4186283	0.413364	0.408233	0.403229	0.398348	0.393585	0.388936	0.384397	0.379964		2.54
8.9	20.3		0.6095605	0.601073	0.592824	0.584806	0.577008	0.56942	0.562034	0.554843	0.547837		5.08
11.12	20.5		0.8445666	0.831185	0.818243	0.80572	0.793594	0.781845	0.770456	0.75941	0.74869		8.64
13.34	20.7		1.1523377	1.13059	1.109729	1.089697	1.070441	1.051915	1.034074	1.016878	1.000291		11.94
15.57	20.9		1.601775	1.562341	1.525152	1.489998	1.456696	1.425086	1.395028	1.366398	1.339085		17.78
17.79	21.1		2.4339211	2.333515	2.244032	2.163472	2.090338	2.023476	1.961981	1.905126	1.852325		24.13

Fig. 21: Deformaciones y capacidad medida (Qi) y carga de falla (Qu) para el suelo Salem. Elaboración propia.

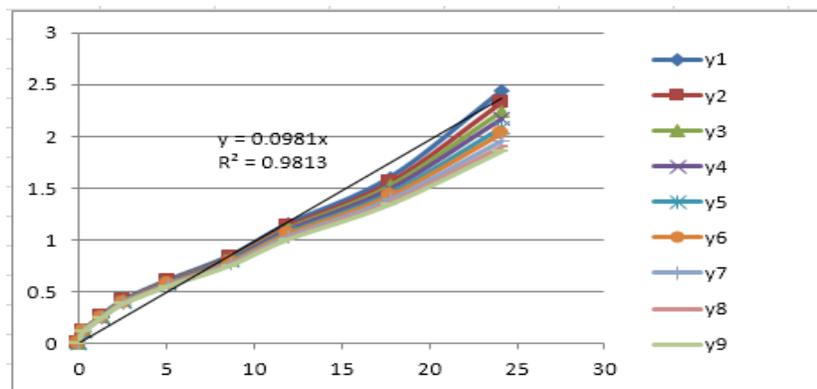


Fig.22: Curva de mejor ajuste para el suelo Salem, $R^2=0.9813$. Elaboración propia.

Después de realizadas las comparaciones según este método, para cada uno de los suelos se llegó a determinar la carga de ruptura, obteniéndose resultados satisfactorios para un 97% de precisión con respecto a las capacidades medidas en las pruebas de cargas.



Tabla 11: Comparación entre las capacidades medidas, las capacidades laterales últimas determinadas por el método de Van der Veen. Elaboración propia.

Lugar	Capacidad Medida(kN)	Carga de ruptura Van der Veen (kN)	Capacidad Medida/ Carga de ruptura (kN)	Capacidad obtenida en el Abaqus (kN)	Capacidad obtenida en el Plaxis 3D Foundation (kN)
Salem	20.46	19.7	1.03	19.6	19.76
Suffolk	20.016	19.5	1.02	19.2	25.6
Fairfax Count Parkway	16.457	17.2	0.96	16.2	14.32
Roberts Road	20.683	24.4	0.85	19.7	23.2
Promedio	0.97				

Conclusiones:

En la literatura consultada se encuentra el pilote rígido como elemento de cimentación capaz de resistir las cargas laterales de forma tal que se aproveche el aporte del suelo.

Lima (2008) demuestra su eficiencia y propone como expresiones para calcular la capacidad de carga las propuestas por Broms, que a su vez son las que aparecen en la propuesta de norma cubana para el diseño de pilotes, no obstante, existen otras expresiones que pueden ser más eficientes para el cálculo de la capacidad de carga, esto motivó el desarrollo de este trabajo que arribó a resultados satisfactorios.

Las cimentaciones sometidas a la acción de las cargas horizontales del tipo pilotes cortos-rígidos, presentan ventajas con respecto a las cimentaciones superficiales, siendo más económicas en cuanto a materiales, mano de obra, tiempos de ejecución; aprovechan el aporte del suelo y aun no llegan a ser una solución muy empleada en Cuba.

El software Plaxis 3D Foundation basado en el Método de los Elementos Finitos (MEF) resultó muy eficiente para modelar cimentaciones del tipo pilotes cortos-rígidos, obteniendo resultados que no difieren mucho de los obtenidos en la modelación en el Abaqus y los valores reales de las pruebas de cargas.

El método de Van der Veen ayuda a estimar la carga de ruptura a partir de los ensayos realizados in situ a pilotes de estudio, donde los valores obtenidos se ajustan a los resultados de las modelaciones con softwares apropiados para este fin.

Las expresiones de Broms, son muy conservadoras y desprecian una gran parte del aporte del suelo, sin embargo, la teoría de Brinch-Hansen que incluye a la cohesión y el ángulo fricción interna del suelo, proporciona valores que se ajustan más a los ensayos in situ y a los resultados de las modelaciones, por lo que debe pensarse en que sean las que se utilicen en la propuesta de norma para el diseño geotécnico de pilotes.



BIBLIOGRAFÍA

- Almeida, M. A. de (2008) *Análise do Comportamento de Estacas Strauss submetidas a Carregamento Horizontal no Solo da Região de Londrina – PR. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 167p.*
- Bispo, J. S y López, D. A. (2008). Modelación de pilotes rígidos. Universidad Central de Las Villas. Santa Clara. Cuba.
- Bonilla, J.D.R. (2008). Estudio del comportamiento de conectores tipo perno de estructuras compuestas de hormigón y acero mediante modelación numérica. Tesis de Doctorado, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, 128 p. Santa Clara. Cuba.
- Broche, J. L. (2005): Conceptualización del comportamiento estructural de las cimentaciones superficiales aisladas desde una óptica integral, aplicando técnicas de modelación numérica. Tesis de Doctorado, UCLV, Santa Clara. Cuba. 141 p.
- Broms, B. B. “*Lateral Resistance of Piles in cohesive soils*”. *Journal of the Soil and Mechanics and Foundations Division, Proceeding, ASCE, Vol 90, SM-3: 123-156; March 1964.*
- Broms, B. B. “*Design of laterally loaded piles*”. *Proceeding, ASCE, Vol 91, SM-3: 79-99; March 1965.*
- Cobelo, W.; Recarey, C. y Castañeda, A. (2004): Análisis de asentamiento de Láminas como estructura de Cimentación. *Revista Ingeniería Civil, No 135, CEDEX. Madrid. España. p 115-122.*
- Cunha (2013). *Fundações. Apostila do curso de Pós-graduação em Geotecnia. Prof. Renato Pinto da Cunha. Programa de Pós-graduação em Geotecnia. Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília, 477 p.*
- Davis, E. H. & Poulos, H. G. (1972). *The analysis of pile-raft systems. Aust. Geomechs. Jnl.*, vol. G2, n. 1, p. 21-27.
- De la Rosa, J.G. (2014). Estudio Numérico del Comportamiento de Estacas Cargadas Lateralmente. Universidad de Brasilia. Brazil.
- Fleming, K., Weltman, A., Randolph, M.F. & Elson, K. (2009). *Piling Engineering. Third Edit. Taylor & Francis, 398 p.*
- Galadino, C. M. (2013). Comportamiento de estaca rígida en suelo tropical sometida a prueba de carga con esfuerzo horizontal. Universidad Federal de Río de Janeiro. Brazil.
- Gutiérrez, P. A. V. (2010). Comportamiento de pilotes individuales bajo carga lateral: evaluación de un caso real. Guayaquil. Ecuador.



-Ibáñez, L.O.M. (2001). Análisis de comportamiento geotécnico de las cimentaciones sobre pilotes sometidas a carga axial mediante la modelación matemática. Tesis de Doctorado, Universidad Central de Las Villas. Santa Clara. Cuba.

-Ibáñez, M. & Quevedo, G.S. (2010). Modelación por elementos finitos de pilotes colados in situ en suelos friccionantes. *Ingeniería*, 14(2): p.113–119.

-Iglesias, E. A. B. (2011). Influencia del espesor de la balsa en el comportamiento de las Balsas de Cimentación Combinadas con Pilotes, a partir de considerar su interacción con el suelo de soporte. Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. Matanzas. Cuba.

-Lima, R. R. (2008). Diseño de cimentaciones sometidas a solicitaciones de momentos, cortantes y axiales de compresión pequeños o de succión. Universidad Central de Las Villas. Santa Clara. Cuba.

-Mejías, A. O. L. (2010). Recomendaciones para la modelación por el Método de los Elementos Finitos. Universidad Central de Las Villas. Santa Clara. Cuba.

-Müller, L.F. (2014). Metodología para el diseño de pilotes helicoidales para las condiciones cubanas. Universidad Central de las Villas “Marta Abreu”. Santa Clara. Cuba.

-Paz, J. A. P. (2015). Carga horizontal en pilotes. Recomendaciones para la Norma Cubana de cimentaciones profundas. Universidad Central de Las Villas. Santa Clara. Cuba.

-Poulos, H. y Davis, E., 1980, “*Pile Foundation: Analysis and Design*”, Wiley, Nueva York. Estados Unidos de América.

-Tristá, J. G. (2015). Estudio del comportamiento tenso- deformacional de suelos parcialmente saturados en Cuba. Universidad Central de las Villas. Cuba. p,42-44. Santa Clara. Cuba.

-Vazconez, A. M. T. (2013). Modelación numérica del comportamiento resistente y deformacional de pilotes cargados lateralmente. Instituto Superior Politécnico José. A. Echeverría. La Habana. Cuba.

Fuentes electrónicas:

<http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/7094/1/tesis365.pdf>

<http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v80n179/v80n179a12.pdf>

https://www.ucursos.cl/ingenieria/2011/2/CI5411/1/material_docente/bajar?id_material=387291

[http://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1687/3/Articulo_Modelaci%C3%3n-num%C3%A9rica-de-un-pilote-individual-cargado-lateralmente%20\(1\).pdf](http://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1687/3/Articulo_Modelaci%C3%3n-num%C3%A9rica-de-un-pilote-individual-cargado-lateralmente%20(1).pdf)



<https://moodle.unipampa.edu.br/mod/resource/view.php?id=74839>

<https://www.youtube.com/watch?v=Nff0aasMIV4>

<https://www.youtube.com/watch?v=jpNiMSTgbJ8>

<https://www.youtube.com/user/plaxistv>

<https://www.youtube.com/watch?v=BQI618jWbkQ>

<https://www.youtube.com/watch?v=HBrbl5X1j1A>



CD de Monografías 2016

(c) 2016, Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos"

ISBN: XXX-XXX-XX-XXXX-X