

**MANUAL DE ADMINISTRACION Y CONTROL EN CIMENTACION DE  
PUENTES.**

**HÉCTOR MAURICIO HERNÁNDEZ MONSALVE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2004.**

**MANUAL DE ADMINISTRACION Y CONTROL EN CIMENTACION DE  
PUENTES.**

**HÉCTOR MAURICIO HERNÁNDEZ MONSALVE**

**Proyecto de grado presentado como requisito  
para optar el título de Ingeniero Civil**

**Director de Proyecto  
Ricardo Cruz Hernández  
Ingeniero Civil, PhD.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2004.**

## CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN A LOS PUENTES.	08
2. FUNDAMENTOS SOBRE CIMIENTOS PARA PUENTES	10
2.1. CLASIFICACION DE LAS CIMENTACIONES	10
2.1.1. Cimentaciones Superficiales	10
2.1.2. Cimentaciones Profundas	10
2.2. PILAS Y CAISSONS.	11
2.3. PILOTES	12
2.3.1. Clasificación de los pilotes	17
2.3.2. Forma de Los pilotes	18
2.3.3. Topología de los pilotes	19
2.3.4. Partes de una Cimentación por Pilotaje	24
2.4. SELECCIÓN DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE LOS PILOTES	25
2.4.1. Uso de los Pilotes	25
2.4.2. Hinca de pilotes	25
2.4.3. Equipos para la hinca de pilotes	29
2.4.4. Comportamiento del Pilote durante la hinca	33
2.4.5. Otros métodos de hinca de Pilotes	34
2.5. CAPACIDAD RESISTENTE DEL PILOTE	35
2.5.1. Fuste del Pilote	35

2.5.2. Efectos del Pilote en el Suelo	36
2.5.3. Transferencia de la carga del Pilote	37
2.5.4. Campo de Esfuerzos alrededor del Pilote	38
2.5.5. Análisis Estático de la capacidad de carga del Pilote	38
2.5.6. Prueba de Carga	39
2.5.7. Asentamiento de un solo Pilote	40
2.6. ANALISIS DINAMICO DE LA CAPACIDAD RESISTENTE DEL PILOTE	40
2.6.1. Análisis por Onda	41
2.6.2. Métodos Aproximados	43
2.6.3. Separación de los pilotes	43
2.6.4. Tolerancias	44
3. ASPECTOS ADMINISTRATIVOS EN CIMENTACION DE PUENTES	45
3.1. OBJETIVO DE LA ADMINISTRACIÓN	45
3.2. IMPORTANCIA DEL PROCESO ADMINISTRATIVO EN LA ACTIVIDAD CONSTRUCTORA	45
3.3. HABILIDADES ADMINISTRATIVAS Y JERARQUÍA ORGANIZACIONAL	46
3.4. FASES DEL PROCESO ADMINISTRATIVO	47
4. ANALISIS GENERAL, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
5. BIBLIOGRAFIA	53

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Maquina perforadora.	12
<b>Figura 2.</b> Armada de aceros para zapatas.	15
<b>Figura 3.</b> Camisa conformada por tramos soldados.	16
<b>Figura 4.</b> Armado de canastas.	26
<b>Figura 5.</b> Corte de camisa.	26
<b>Figura 6.</b> Piloteadora excavando el suelo.	26
<b>Figura 7.</b> Extracción del material.	26
<b>Figura 8.</b> Aplicación de lodos bentoníticos.	27
<b>Figura 9.</b> Proceso ya terminado.	27
<b>Figura 10.</b> Martillo	27
<b>Figura 11.</b> Martillo en proceso de hinca de la camisa.	27
<b>Figura 12.</b> Hinca de la camisa.	27
<b>Figura 13.</b> Desplazamiento de las canastas	27
<b>Figura 14.</b> Canasta ya colocada en el sitio.	28
<b>Figura 15.</b> Traslapo de canastas.	28
<b>Figura 16.</b> Proceso de amarre entre canastas.	28
<b>Figura 17.</b> Colocación de perros.	28
<b>Figura 18.</b> Instalación de tubería tremie.	28
<b>Figura 19.</b> Vaciado de concreto en el pilote.	28

<b>Figura 20.</b> Descabece de pilotes.	29
<b>Figura 21.</b> Pruebas PIT para los pilotes.	29
<b>Figura 22.</b> Resultado de las pruebas.	29
<b>Figura 23.</b> Análisis de resultados.	29
<b>Figura 24.</b> Piloteadora montada sobre ferry.	30
<b>Figura 25.</b> Piloteadora hincando la camisa.	31
<b>Figura 26.</b> Camisa deformada.	33
<b>Figura 27.</b> Adecuación del sitio para la toma de la prueba.	42
<b>Figura 28.</b> Adecuación del sitio para la toma de la prueba.	42
<b>Figura 29.</b> Realización de la prueba.	42
<b>Figura 30.</b> Realización de la prueba.	42
<b>Figura 31.</b> Resultados obtenidos de la prueba.	43
<b>Figura 32.</b> Resultados obtenidos de la prueba.	43

**Nota:** Las fotografías que se encuentran en este libro son propias del autor. Estas fueron tomadas en el proyecto “CONSTRUCCION DEL PUENTE BOTON DE LEYVA EN LA CARRETERA MOMPOX – EL BANCO”.

**TITULO:  
MANUAL DE ADMINISTRACION Y CONTROL EN CIMENTACION DE  
PUENTES\***

**AUTOR: HECTOR MAURICIO HERNANDEZ MONSALVE**

**PALABRAS CLAVES**

Cimentación  
Pilotes  
Puentes  
Hinca  
Bentoníticos

**DESCRIPCION**

En el presente documento se muestran los pasos a seguir en cimentación de puentes, específicamente las del puente “Botón de Leyva en la carretera Mompox - El Banco”; el cual se encuentra localizado sobre el nuevo trazado que une, a la altura de la población de Guamal, la carretera que se desarrolla paralela a la margen izquierda del río, con la vía existente por la margen derecha.

El puente tiene una longitud total de 498 metros y esta compuesto por una estructura principal de 260 metros de longitud (luz principal de 130 metros y dos luces laterales de 65 metros), sus accesos por viaductos con longitudes totales de 170 metros en la margen izquierda y 68 metros en la margen derecha, ancho de calzada de 8.30 metros, ancho de andenes de 1.50 metros a cada lado y ha sido diseñado para soportar camiones hasta de 40 toneladas.

*Antecedentes:* el puente unirá los departamentos de Bolívar y Magdalena y permitirá dar continuidad al proyecto Transversal Depresión Momposina, para el establecimiento de empresas agroindustriales, las cuales darán un gran impulso a la economía de la región en términos de inversión, generando empleo y mejor nivel de vida. Reduciendo las distancias de mercado, se dinamiza el comercio, se reducen los costos y los precios de los bienes; permitiéndole a los habitantes acelerar su ritmo de crecimiento e integrarse al proceso del desarrollo del resto del país.

---

\* Modalidad: Practica Empresarial

*Duración del Proyecto:* El proyecto se ejecutara en un plazo de 22 meses durante los años 2004 y 2005.

*Localización:* el puente hace parte de la carretera que va de El Banco a Mompox, cruza el río Magdalena y une los municipios de Guamal (Magdalena) y Margarita (Bolívar).

*Beneficios:* dicha obra traerá beneficios a la región de los que se pueden resaltar los siguientes:

- Generación de empleo durante el tiempo de construcción.
- Disminución de los tiempos de recorrido entre los municipios de la región.
- Desarrollo de actividades comerciales de bienes y servicios.
- Impulso turístico en la región.
- Integración regional y departamental.
- Oportunidades para el desarrollo de industrias agropecuarias.
- Comercialización de productos agrícolas, pecuarios, maderables, pesqueros, etc.

*Proceso Constructivo:* los trabajos consistirán en la construcción de los accesos, el viaducto y el puente en si, incluyendo obras de drenaje, explanación, terraplenes, estructura de pavimentos, subbase granular y mezcla densa en caliente, al igual que las excavaciones, pilotaje, concretos y aceros de refuerzo.

**TITLE:  
MANUAL OF ADMINISTRATION AND CONTROL IN FOUNDATION OF  
BRIDGES \***

**AUTHOR: HÉCTOR MAURICIO HERNANDEZ MONSALVE**

**KEY WORDS**

Foundation  
Steer  
Bridges  
It sinks  
Bentoníticos

**DESCRIPTION**

Presently document the steps are shown to continue in foundation of bridges, specifically those of the bridge "Button of Leyva in the highway Mompox – El Banco"; which is located on the new layout that unites, to the height of the population of Guamal, the highway that is developed parallel to the left riverbank of the river, with the existent road for the right riverbank.

The bridge has a total longitude 498 meters and this compound for a main structure 260 meters of longitude (main light 130 meters and two lateral lights 65 meters), its accesses for viaducts with total longitudes 170 meters in the left riverbank and 68 meters in the right riverbank, wide of roadway 8.30 meters, wide of platforms 1.50 meters to each side and it has been designed to support trucks until of 40 tons.

*Antecedents:* the bridge will unite Bolívar's departments and Magdalena and he/she will allow to give continuity to the project Traverse Depression Momposina, for the establishment of agroindustrial companies, which will give a great impulse to the economy of the region in investment terms, generating employment and better level of life. Reducing the market distances, the trade is energized, they decrease the costs and the prices of the goods; allowing the inhabitants to accelerate their rhythm of growth and to be integrated to the process of the development of the rest of the country.

*Duration of the Project:* The project was executed in a term of 22 months during the years 2004 and 2005.

*Localization:* the bridge makes part of the highway that goes from El Banco to Mompox, it crosses the river Magdalena and it unites the municipalities of Guamal (Magdalena) and Margarita (Bolívar).

*Benefits:* this work will bring benefits to the region of those that the following ones can be stood out:

- Employment generation during the time of construction.
- Decrease of the times of journey among the municipalities of the region.
- Development of commercial activities of goods and services.
- I impel tourist in the region.
- Regional and departmental integration.
- Opportunities for the development of agricultural industries.
- Commercialization of agricultural, cattle products, maderables, fishing, etc.

*I process Constructive:* the works will consist on the construction of the accesses, the viaduct and the bridge in if, including drainage works, explanation, embankments, structure of pavements, granular subbase and dense mixture in hot, the same as the excavations, pilotage, concrete and reinforcement steels.

## 1. INTRODUCCION A LOS PUENTES.

Un puente es una estructura que forma parte de caminos, carreteras y líneas férreas y canalizaciones, construida sobre una depresión, río, u obstáculo cualquiera. Los puentes constan fundamentalmente de dos partes, la **superestructura**, o conjunto de tramos que salvan los vanos situados entre los soportes, y la **infraestructura** (apoyos o soportes), formada por las *pilas*, que soportan directamente los tramos citados, los *estribos* o pilas situadas en los extremos del puente, que conectan con el terraplén, y los *cimientos*, o apoyos de estribos y pilas encargados de transmitir al terreno todos los esfuerzos. Cada tramo de la superestructura consta de un *tablero* o piso, una o varias vigas de apoyo y de las *riostras* laterales. El tablero soporta directamente las *cargas* dinámicas y por medio de la armadura transmite las *tensiones* a las vigas y de ahí a las pilas y estribos.

La cimentación bajo agua es una de las partes más delicadas en la construcción de un puente, por la dificultad en encontrar un terreno que resista las presiones, siendo normal el empleo de pilotes de cimentación. Las pilas deben soportar la carga permanente y sobrecargas sin asentamientos, ser insensibles a la acción de los agentes naturales, viento, grandes avenidas, etc. Los estribos deben resistir todo tipo de esfuerzos; se construyen generalmente en hormigón armado y formas diversas.

El arte de construir puentes tiene su origen en la misma prehistoria. Puede decirse que nace cuando un buen día se le ocurrió al hombre prehistórico derribar un árbol en forma que, al caer, enlazara las dos riberas de una corriente sobre la que deseaba establecer un vado. La genial ocurrencia le eximía de esperar a que la caída casual de un árbol le proporcionara un puente fortuito. También utilizó el hombre primitivo losas de piedra para salvar las corrientes de pequeña anchura cuando no había árboles a mano. En cuanto a la ciencia de erigir puentes, no se remonta más allá de un siglo y nace precisamente al establecerse los principios que permitían conformar cada componente a las fatigas a que le sometieran las cargas.

El arte de construir puentes no experimentó cambios sustanciales durante más de 2000 años. La piedra y la madera eran utilizadas en tiempos napoleónicos de manera similar a como lo fueron en época de julio Cesar e incluso mucho tiempo antes. Hasta finales del siglo XVIII no se pudo obtener hierro colado y forjado a precios que hicieran de él un material estructural asequible y hubo que esperar casi otro siglo a que pudiera emplearse el acero en condiciones económicas. Al igual que ocurre en la mayoría de los casos, la construcción de puentes ha evolucionado paralelamente a la necesidad que de ellos se sentía.

Recibió su primer gran impulso en los tiempos en que Roma dominaba la mayor parte del mundo conocido. A medida que sus legiones conquistaban nuevos países, iban levantando en su camino puentes de madera más o menos permanentes; cuando construyeron sus calzadas pavimentadas, alzaron puentes de piedra labrada. La red de comunicaciones del Imperio Romano llegó a sumar 90000 km de excelentes carreteras.

A la caída del Imperio sufrió el arte un grave retroceso, que duró más de seis siglos. Si los romanos tendieron puentes para salvar obstáculos a su expansión, el hombre medieval ve en los ríos una defensa natural contra las invasiones. El puente era, por tanto, un punto débil en el sistema defensivo feudal. Por tal motivo muchos puentes fueron desmantelados y los pocos construidos estaban defendidos por fortificaciones. A fines de la baja Edad Media renació la actividad constructiva, principalmente merced a la labor de los Hermanos del Puente, rama benedictina. El progreso continuó ininterrumpidamente hasta comienzos del siglo XIX.

La locomotora de vapor inició una nueva era al demostrar su superioridad sobre los animales de tiro. La rápida expansión de las redes ferroviarias obligó a un ritmo paralelo en la construcción de puentes sólidos y resistentes. Por último, el automóvil creó una demanda de puentes jamás conocida. Los impuestos sobre la gasolina y los derechos de rodamiento suministraron los medios económicos necesarios para su financiación y en sólo unas décadas se construyeron más obras notables de esta clase que en cualquier siglo anterior. El gran número de accidentes ocasionados por los cruces y pasos a nivel estimuló la creación de diferencias de nivel, que tanto en los pasos elevados como en los inferiores requerían el empleo de puentes. En una autopista moderna todos los cruces de carreteras y pasos a nivel son salvados por este procedimiento.

Colombia también ha dado gran impulso a la construcción de puentes para dar continuidad a la red nacional de carreteras y en los últimos años ha entrado en la tecnología de la construcción de puentes con grandes luces (más de 100 metros) mediante voladizos sucesivos; uno de ellos es el puente Botón de Leyva ubicado en la carretera Mompox - El Banco, en el cual se adelanta actualmente la etapa de cimentación con pilotes desde 25 metros hasta 50 metros de profundidad, etapa a la cual correspondió la práctica empresarial.

La experiencia en aspectos técnicos como administrativos permitió durante la práctica empresarial participar, desarrollar y apoyar la logística en el alistamiento y preparación para la construcción de pilotes, la selección y traslado de equipos y materiales, la disposición y utilización en obra y en general participar junto al Director de obra e ingenieros residentes en el planeamiento, organización, arranque, programación, ejecución y control de pilotaje.

## 2. FUNDAMENTOS SOBRE CIMIENTOS PARA PUNTES

La cimentación es la parte estructural encargada de transmitir las cargas al terreno, el cual es el único elemento que no se puede elegir, por lo que la cimentación se realiza en función del suelo. Al mismo tiempo el suelo de cimentación no se encuentra todo a la misma profundidad por lo que eso será otro motivo que influye en la decisión de la elección de la cimentación adecuada.

La finalidad de la cimentación es sustentar estructuras garantizando la estabilidad y evitando daños a los materiales estructurales y no estructurales. Los problemas que se presentan en la cimentación o en una estructura pueden detectarse mediante:

- Estudio del material que forma el terreno en que se construirá dicha obra.
- Estudio realizado en el laboratorio de mecánica de suelos.

### 2.1. CLASIFICACIÓN DE CIMIENTACIONES.

Estas pueden ser:

2.1.1. **Cimentaciones Superficiales.** Son superficiales cuando transmiten la carga al suelo por presión bajo su base sin rozamientos laterales de ningún tipo. Un cimiento es superficial cuando su ancho es igual o mayor que su profundidad. Engloban las zapatas en general y las losas de cimentación. Los distintos tipos de cimentación superficial dependen de las cargas que sobre ellas recaen.

El material mas empleado en la construcción de cimientos superficiales es la piedra (Básicamente tratándose de construcciones ligeras), en cualquiera de sus variedades siempre y cuando esta sea resistente, maciza y sin poros. Sin embargo el concreto armado es un extraordinario material de construcción y siempre resulta más recomendable. En terrenos cohesivos, el cimiento de concreto ciclópeo es sencillo y económico.

Los cimientos de concreto armado se utilizan en todos los terrenos pues aunque el concreto es un material pesado, presenta la ventaja de que en su cálculo se obtienen, proporcionalmente, secciones relativamente pequeñas si se les compara con las obtenidas en los cimientos de piedra.

2.1.2. **Cimentaciones Profundas.** Las cimentaciones profundas son aquellas que, como su nombre lo indica, presentan una profundidad de cimentación elevada (varias decenas de metros). Este tipo de cimentaciones se encargan de transmitir

las cargas que reciben de una construcción a mantos resistentes más profundos; es decir transmiten la carga al suelo por presión bajo su base.

Dentro de esta clase de cimentaciones se encuentran dos grandes grupos:

- Pilas y Caissons
- Pilotes

## **2.2. PILAS Y CAISSONS.**

Las pilas y caissons son elementos estructurales que presentan una sección transversal considerable (comparada con los pilotes) y que se encargan de transmitir la carga de una sola columna a un estrato que sea capaz de soportarla.

Para la construcción de pilas y caissons se presentan tres procesos constructivos.

El primero consiste en excavar hasta el nivel de cimentación y luego construir una pila dentro de dicha excavación. Cuando la excavación se realiza bajo el agua, el forro de la excavación se denomina ataguía. Los pasos a seguir son los siguientes:

- a) Hincado de tablestacas
- b) Apuntalamiento interior de las caras que se encuentran en seco
- c) Descenso del nivel de agua y apuntalamiento de la zona
- d) Figurada y colocación del hierro y vaciado del concreto

El segundo método consiste en hincar cajones, cajas o cilindros hasta la profundidad deseada y luego el material interior es extraído por excavación o dragado. El procedimiento es el siguiente:

- a) Construcción del cajón
- b) El hincamiento se lleva a cabo sacando material del interior de ellos, lo que produce que el cajón comience a penetrar en el suelo gracias a su propio peso.
- c) Una vez alcanzada la profundidad final, se introduce el refuerzo y el fondo de la excavación se llena con concreto por medio de un tubo trompa de elefante.

El último método consiste en excavar las pilas con máquinas perforadoras provistas con barrenos (ver figura 1). Estas excavan hasta lugares donde el suelo lo permita sin derrumbarse. Una vez se llega a suelos de esta clase se utilizan lodos bentoníticos para llenar la excavación y permitir continuar con la misma.

Cuando se alcanza la profundidad necesaria o se llega a un estrato cohesivo, se detiene la excavación y se inserta un tubo llamado camisa. Este tubo permite seguir excavando y evitar que el suelo se derrumbe dentro de la excavación. Por último se introduce el refuerzo y se funde el concreto recordando retirar la camisa (en caso que se pueda).

Figura 1. Máquina perforadora.



### **2.3. PILOTES.**

#### **RESEÑA HISTORICA**

Los pilotes son anteriores a la historia que conocemos. Hace 12,000 años los habitantes neolíticos de Suiza hincaron postes de madera en los blandos fondos de lagos poco profundos para construir sus casas sobre ellos y a alturas suficiente para protegerlos de los animales que merodeaban y de los guerreros vecinos.

Estructuras similares están actualmente en uso en las junglas del sudeste de Asia y de América del Sur. Venecia fue construida sobre pilotes de madera en el delta pantanoso del río Po, para proteger a los primeros italianos de los invasores del este de Europa y, al mismo tiempo, para estar cerca del mar y de sus fuentes de subsistencia. Los descubridores españoles dieron a Venezuela ese nombre, que significa pequeña Venecia, porque los indios vivían en chozas construidas sobre pilotes en las lagunas que rodean las costas del lago Maracaibo. En la actualidad las cimentaciones de pilotes tienen el mismo propósito: hacer posible las

construcciones de casas y mantener industrias y comercios en lugares donde las condiciones del suelo no son favorables.

## GENERALIDADES

Los cimientos, a fin de distribuir la carga, pueden extenderse horizontalmente, pero también pueden desarrollarse verticalmente hasta alcanzar estratos más bajos capaces de soportarla. En estos casos se recurre a la solución de cimentación profunda, que se constituye por medio de muros verticales profundos de hormigón, los muros pantalla o bien a base de pilares hincados o perforados en el terreno, denominados pilotes.

Los estudios de suelos y geotécnicos muestran que, al realizar la excavación para la ejecución de la obra, se pueden encontrar diversas dificultades para encontrar el estrato resistente o firme donde se quiere cimentar, o simplemente se nos presenta la necesidad de apoyar una carga aislada sobre un terreno firme a gran profundidad, o difícilmente accesible por métodos habituales, por lo que se recomienda la construcción de pilotes.

Un pilote es un soporte, normalmente de hormigón armado, de una gran longitud en relación a su sección transversal, que puede hincarse o construirse "in situ" en una cavidad abierta en el terreno. Los pilotes son columnas esbeltas con capacidad para soportar y transmitir cargas a estratos más resistentes o de roca.

Constituye un sistema constructivo de cimentación profunda al que se denomina Cimentación por pilotaje. Los pilotes son necesarios cuando la capa superficial o suelo portante no es capaz de resistir el peso de la estructura o bien cuando esta se encuentra a gran profundidad; también cuando el terreno está lleno de agua y ello dificulta los trabajos de excavación. Con la construcción de pilotes se evitan construcciones costosas y volúmenes grandes de cimentación.

Los pilotes deben recibir fuerzas longitudinales de compresión, ya que las cargas por flexión producen deformaciones mayores con alto grado de peligrosidad; sin embargo, en ocasiones deberán tomarse en cuenta otras solicitaciones de cargas horizontales como viento y sismo. Una excentricidad por pequeña que sea provoca cambios importantes en los esfuerzos de los pilotes. La capacidad de estos para soportar las cargas dependerá de la resistencia desarrollada entre ellos y el subsuelo.

El empleo de cimentaciones mediante pilotaje esta indicado en los siguientes casos:

- Cuando la carga transmitida por las estructuras no puede ser distribuida en el terreno de forma uniforme mediante el empleo de sistemas de cimentación como zapatas o losas.
- Cuando el suelo firme no puede ser alcanzado de forma sencilla o se encuentra a gran profundidad.
- Cuando los estratos superiores del terreno son poco consistentes hasta cotas profundas, contienen gran cantidad de agua o bien se necesita cimentar por debajo del nivel freático.
- Cuando se prevea que los estratos inmediatos a la superficie de cimentación pueden determinar asientos imprevisibles de cierta importancia.
- Si se quiere reducir o limitar los posibles asientos de la construcción
- En presencia de grandes cargas y concentradas.
- Si las distintas capas superficiales de los terrenos pueden sufrir variaciones estacionales como hinchamientos, retracciones, etc.
- En construcciones sobre el agua.

En ocasiones, cuando se comienza a realizar la excavación para la ejecución de una obra, se pueden encontrar diversas dificultades para encontrar el estrato resistente o firme donde queremos cimentar. O simplemente se nos presenta la necesidad de apoyar una carga aislada sobre un terreno sin estar firme, o difícilmente accesible por métodos habituales.

En estos casos se recurre a la solución de cimentación profunda, que se constituye por medio de muros verticales profundos, los muros pantalla o bien a base de pilares hincados o perforados en el terreno, denominados pilotes.

Los pilotes pueden agruparse alrededor de cada elemento de carga, procurando obtener siempre un apoyo que sea lo mas rígido posible. No se aconseja apoyar el elemento de carga solo sobre uno de los pilotes, ya que durante su hincado podrá quedar desplazado de su posición original y ocasionar una flexión por excentricidad de la carga.

Asimismo, los pilotes se pueden distribuir en una zapata cuadrada, rectangular, circular, hexagonal, etc; de tal manera que coincida la resultante de cargas con la de los pilotes, permitiendo que entre ellos se encuentre una separación no menor de 1.25 metros o tres diámetros entre sus centros. (ver figura 2.)

Figura 2. Armada de aceros para zapata.



La capacidad de carga de un pilote se reduce cuando se trabaja en conjunto de pilotes; además, esta sujeto a cargas excéntricas y, quizás, a fuerzas de levantamiento que producen deformaciones indeseables. Este es un detalle que siempre debe tenerse presente, así como la separación entre los pilotes para evitar la influencia de tensiones entre ellos. Los bulbos de presión se sobre ponen cuando los pilotes se colocan muy juntos, causando fatigas excesivas y hundimientos en el terreno.

Generalmente, toda construcción sufre un asentamiento en mayor o menor grado, el cual dependiendo de lo adecuado que haya sido el estudio de la mecánica de suelos y la cimentación escogida.

No obstante, un asentamiento no causara mayores problemas cuando el hundimiento sea uniforme y se hayan tomado las debidas precauciones para ello. Sin embargo, en las cimentaciones aisladas y en las corridas, con frecuencia aparecen hundimientos diferenciales mas pronunciados en el centro de la construcción. Esto se debe principalmente a la presencia de bulbos de presión y a la costumbre generalizada de mandar mayores cargas en la parte central.

Los pilotes pueden tener gran diversidad de formas longitud, unión en sus tramos y procedimientos de hincado, así mismo, los hallamos de sección circular, cuadrada, hexagonal, octogonal, etc.

La perforación para los pilotes a lo largo de sus tramos sirve para saber, con seguridad, si este se conservara o no vertical a la hora del hincado; además, el

orificio sirve para colocar un esfuerzo de acero capaz de absorber esfuerzos de flexión, tensión y cortante.

Los pilotes que se usan mas, son los prefabricados de concreto, los de concreto armado, los de concreto comprimido, los de acero, los presforzados, y en menor proporción, los de madera.

Todos ellos pueden hincarse desde una profundidad de 3 a 40 metros; en caso de requerirse una profundidad mayor, se pueden formar con tramos de 1 metro o de mayor longitud que al soldarse quedan como pilotes de una sola pieza. (Ver figura 3)

Figura 3. Camisa conformada por tramos soldados



La capacidad de carga de un pilote prefabricado depende de muchos factores, como propiedades del suelo, peso del martillo, frecuencia de los golpes, nivel freático, etc, de tal manera que es difícil determinar su capacidad portante si antes no se hace una prueba de carga. Dicha prueba consiste en cargarle al pilote un peso conocido que determine su capacidad y su asentamiento en el suelo.

La eficacia de un pilote depende de:

- El rozamiento y la adherencia entre el suelo y el fuste del pilote.
- La resistencia por punta, en el caso de transmitir compresiones. Ante posibles esfuerzos de tracción, se puede ensanchar la parte inferior del pilote, de forma que trabaje el suelo superior.
- La combinación de las dos anteriores.

### **2.3.1. Clasificación de los Pilotes**

#### **Según su forma de trabajo:**

- a) Pilotes rígidos de primer orden. Aquellos cuya punta llega hasta el firme transmitiéndole la carga aplicada a la cabeza. La acción lateral del terreno elimina el riesgo de pandeo.
- b) Pilotes flotantes. Aquellos cuya punta no llega al firme, quedando hincado en el terreno suelto y resistiendo por adherencia, su valor resistente es función de la profundidad, diámetro y naturaleza del terreno. Se sitúan en terrenos de resistencia media baja, y transmiten su carga por rozamiento, a través del fuste.
- c) Pilotes semi-rígidos o combinados. Aquellos cuya punta llega hasta el terreno firme, pero este está tan profundo, o es tan poco firme, que el pilote resiste simultáneamente por punta y por adherencia.

#### **Según el sistema constructivo:**

- a) Pilotes prefabricados hincados (o apisonados, ejecutados a base de desplazamiento del terreno).

Se hincan en el terreno mediante unas máquinas a golpe de mazas, con martillo neumático y son prefabricados, constituidos en toda su longitud mediante tramos ensamblables. Son relativamente caros ya que están fuertemente armados para resistir los esfuerzos durante el transporte y el hincado en el terreno. Una vez hincado en el terreno, este ejerce sobre el pilote y en toda su superficie lateral, una fuerza de adherencia que aumenta al continuar clavando más pilotes en las proximidades, pudiendo conseguir mediante este procedimiento una consolidación del terreno.

- b) Pilotes excavados o perforados, ejecutados a base de extracción de tierras y relleno de hormigón armado.

La práctica empresarial a la que corresponde este libro está encaminada a este tema en particular.

### **Según el diámetro del pilote:**

- a) Micropilotes: diámetro menor de 200 mm. Se emplean en obras de recalce.
- b) Pilotes convencionales: Diámetro entre 200 mm y menores a 800 mm
- c) Pilotes de gran diámetro: diámetro mayor o igual a 800 mm
- d) Pilotes pantalla, de sección pseudo rectangular
- e) Pilotes de sección en forma de cruz.

### **2.3.2. Formas De Los Pilotes.**

Los constructores a través del tiempo han probado y usado con éxito variable, muchas formas de pilotes. Cada forma ha tenido, probablemente, éxito bajo ciertas condiciones; sin embargo, el uso de cierto tipo o forma de pilote que ha dado buen resultado en una obra, puede que no tenga éxito en una situación diferente.

Cuatro formas básicas se usan comúnmente:

Primera, sección transversal uniforme en toda la longitud del pilote.

Segunda, base o punta ensanchada.

Tercera, forma cónica.

Cuarta, tablestaca.

El pilote de sección uniforme puede presentarse en varias formas: sección circular, cuadrada, octagonal, estriada, y H. La sección uniforme hace que la resistencia del pilote como columna sea uniforme de la punta a la cabeza y que el rozamiento superficial este bien distribuido en todo el fuste. Se adapta bien para hacer juntas y cortes, ya que todas las secciones del pilote son iguales.

Con objeto de aumentar la resistencia en la punta y la fricción en la porción inferior del pilote, se han usado diferentes formas de ensanchamiento de la punta. En una se usa una punta grande prefabricada que se une a un pilote cilíndrico, mientras que en otra se forma un bulbo de concreto que es forzado dentro del suelo en la punta del pilote. Los pilotes de esta última forma han demostrado ser muy efectivos para desarrollar resistencia en la punta en suelos cohesivos compactos y aun en arenas sueltas. Tienen poco valor como pilotes de fricción y una ligera ventaja sobre los de sección uniforme, cuando se usan como pilotes resistentes por la punta, en roca.

La forma cónica se origino con el pilote de madera, que esta de acuerdo con la forma natural del tronco del árbol; sin embargo, esta forma ha sido imitada en pilotes de hormigón y de acero para hacer más fácil la construcción. Los pilotes cónicos son útiles para compactar arenas sueltas debido a su acción de cuna, pero en otros casos pueden ser menos efectivos que los de sección uniforme. Tanto la resistencia en la punta como la fricción lateral en la porción inferior del pilote cónico son bajas porque el área de la punta y el área superficial del pilote son pequeñas. El resultado es que los pilotes de forma cónica resistentes por la punta requieren mayor longitud que los de sección uniforme para soportar la misma carga. Los pilotes cónicos que dependen de la fricción para soportar la carga, pueden transmitir una gran parte de la misma a los estratos superiores más débiles, con lo cual se producen asentamientos inconvenientes.

Las tablestacas son relativamente planas y de sección transversal ancha, de manera que cuando se hincan unas a continuación de otras forman un muro. Se fabrican muchas formas diferentes de tablestacas en madera, concreto y acero, para fines determinados, como son las ataguías, los muelles, los muros de sostenimiento de tierras y rastrillos impermeables; algunas tienen forma de arco y otras sección transversal en Z para darles mayor rigidez y la mayoría de los tipos se fabrican con conexiones o enclavamientos, que sirven para unir las entre sí formando un muro que impide el paso del suelo.

Los pilotes que son huecos tienen, sobre los que no lo son, la ventaja de que pueden ser inspeccionados en toda su longitud después de hincados. Durante la hinca los pilotes se pueden desviar de la vertical, encorvarse o doblarse en ángulos cerrados o pueden dañarse por una hinca excesiva. Los pilotes huecos se pueden inspeccionar dejando caer en su interior una llama brillante o reflejando los rayos del sol con un espejo; pero en las otras formas hay que suponer que están correctos sin poder comprobarlo. Por lo tanto en los pilotes que no se pueden inspeccionar deben usarse factores de seguridad más altos. Los pilotes huecos que se hincan con los extremos abiertos y en los que después se extrae el material del interior, permite examinar el suelo situado debajo de la punta del pilote. Cuando un pilote con el extremo abierto se apoye en una roca de superficie irregular, se puede allanar la superficie de la roca rebajándola y, si se encuentra que el pilote se va a apoyar en una piedra que esta mas arriba que el estrato indicado para soporte del pilote, se puede barrenar la piedra o dinamitarla para que el pilote pueda llegar a la profundidad requerida.

### **2.3.3. Topología de los pilotes.**

El tipo de pilote debe ser cuidadosamente seleccionados para que se adapte a:

- La carga que deba soportar.
- El tiempo disponible para la ejecución del trabajo.
- Las características del suelo que atravesara el pilote, así como las de los estratos a los cuales se transfiere la carga.
- Las condiciones del agua subterránea.
- El tamaño de la obra que se realiza.
- La disponibilidad del equipo y la facilidad de transportarlo a la obra.
- Los requisitos del código de construcciones.

A continuación se enuncian algunos tipos de pilotes:

### **Pilotes De Madera**

La madera es uno de los materiales mas usados para pilotes, porque es barata, fácil de obtener y fácil de manipular. Algunas clases de maderas apropiadas para pilotes se encuentran disponibles en casi todas partes del mundo. El abeto, el pinabeto y el pino, pueden tener hasta 30 m de longitud, el roble y otras maderas duras hasta 15 m, el pino del sur hasta 25 m y el palmito; todas estas maderas se emplean comúnmente para pilotes. Los pilotes de madera no sometidos a tratamiento alguno, que estén completamente embebidos en el suelo debajo del nivel del agua, se conservan sanos y duran indefinidamente.

La madera que no haya sido sometida a tratamiento y este situada por arriba del nivel freático se pudre y arruina por las termitas y otros insectos. En agua salada la madera puede ser atacada por horadores marinos. Hay muchos tipos de horadores marinos, la mayoría pertenece a los crustáceos (langostas y cangrejos) o a la de las ostras y almejas. La limnoria, que es un crustáceo de la familia del cangrejo, destruye la madera de afuera hacia adentro, dejando el pilote como si fuera una aguja de madera.

Se puede hacer que los pilotes de madera duren mas sometiéndolos a un tratamiento con cloruro de zinc, sulfato de cobre y otros productos químicos patentados. La impregnación con creosota es uno de los procedimientos más eficaces y de más duración para la protección de los pilotes de madera.

Generalmente se emplea de 200 a 400 Kg. de creosota por m<sup>3</sup> de madera (12 a 25 libras por pie cúbico) que se introducen por un procedimiento de vacío y presión. En las áreas donde el ataque de los organismos marinos es muy severo, se protegen los pilotes sometiéndolos a un tratamiento que es una combinación de arseniato de cobre seguido por alquitrán de hulla y creosota; ambas substancias, aplicadas bajo calor y presión, son necesarias para que los pilotes se conserven en agua salada entre 15 y 25 años.

Los pilotes de madera sufren grandemente por un exceso de hinca; en la cabeza se separan las fibras y el fuste puede llegar a rajarse o romperse, cuando encuentran una gran resistencia a la hinca.

Los pilotes de madera pueden soportar con seguridad de 15 a 30 toneladas por pilote. Se han utilizado pilotes de madera para cargas de 45 toneladas métricas o más y los ensayos de carga han demostrado que pueden soportarlas con seguridad. El problema principal, en estos casos, es que hay que estar seguro que la calidad estructural de la madera es uniforme y alta para que no haya peligro de que se rompan durante la hinca. El bajo costo del material y la hinca, se hacen a menudo del pilote de madera la cimentación más barata por toneladas de carga.

### **Pilotes de Tubos de Acero**

Los tubos de acero rellenos de concreto constituyen excelentes pilotes. En la mayoría de los casos se hincan con el extremo inferior cerrado con una placa plana o una punta cónica. La placa plana es más económica y tiende a formar una punta cónica de suelo a medida que se hinca el pilote. Unas planchas formando una X soldadas al extremo del tubo ayudan al pilote a penetrar la grava y las capas cementadas y a cortar la capa de roca. Los tubos con el extremo inferior abierto se emplean cuando es esencial un desplazamiento mínimo. Los tacos de suelo que se van introduciendo en el tubo se extraen a intervalos para impedir que se empaqueten y hagan que el pilote se hinque como si estuviera cerrado en la punta.

Tanto los pilotes cerrados como los abiertos se rellenan de hormigón después de hincados (y de extraído el suelo de los abiertos); esto aumenta la resistencia del fuste, porque tanto la resistencia del acero como la del concreto contribuyen a la resistencia de la columna.

Se han hincado tubos desde 27.3 cms (10.75 plg) de diámetro externo y paredes de 4.8 mm (0.188 plg) de espesor hasta 91.4 cm (36 plg) de diámetro y paredes de 12.7 mm (0.5 plg) de espesor, con capacidades desde 50 hasta más de 200 toneladas. Las longitudes las limita el equipo de hinca; se han colocado pilotes de tubo hasta de 60m (200 pies) de largo.

Los pilotes de tubo son ligeros, fáciles de manipular e hincar y se pueden cortar y empalmar fácilmente. Son más rígidos que los pilotes H y no se desvían tan fácilmente cuando encuentran un obstáculo. Tienen además la ventaja de poderse inspeccionar interiormente después de hincados y antes de colocar el hormigón. Al hincar los pilotes de acero la masa debe golpear perpendicularmente sobre el centroide de la sección. Un martillo descentrado o que se bambolee "acordonara" el tubo e inclinara el perfil estructural, lo cual destruye la efectividad del golpe. El contenido de carbono del acero del pilote es importante, porque si es muy alto el pilote se rajara y si es muy bajo se deformara.

## **Pilotes De Perfiles De Acero**

Los perfiles estructurales de acero, especialmente los pilotes H y los perfiles WF, son muy usados como pilotes para soportar cargas, especialmente cuando se requiere una alta resistencia por la punta en suelo o en roca. Como el área de la sección transversal es pequeña comparada con la resistencia, se facilita la hinca a través de obstrucciones, tales como las vetas duras cementadas, los viejos troncos de madera y hasta las capas finas de roca parcialmente meteorizada. Los pilotes se pueden obtener en piezas y se pueden cortar o empalmar fácilmente.

La longitud la limita la hinca solamente; se han colocado perfiles H de 35.5 cms (14 plg) de mas de 90 m de longitud. Los perfiles H hincados en roca pueden soportar cargas hasta el límite elástico del acero. En rocas muy duras algunas veces se refuerza la punta del pilote con planchas de acero soldadas al alma del perfil para evitar pandeo local. Los pilotes H penetran el suelo produciendo un desplazamiento mínimo y produciendo un levantamiento del suelo y presión lateral también mínimos. Cuando los pilotes H se usan para resistir por fricción, como el área entre las alas es tan grande, la falla ocurre por esfuerzo cortante, en planos paralelos al alma de la sección que pasa por las aristas exteriores de las alas y por fricción contra el metal en las caras exteriores de las alas.

Los perfiles estructurales tienen tres desventajas.

Primera, son relativamente flexibles y se desvían o tuercen fácilmente si encuentran obstáculos como piedras grandes. De hecho algunos pilotes H se han desviado tanto que sus puntas han resbalado sobre el estrato resistente en vez de penetrar en él.

Segunda, el suelo se empaqueta entre las alas de perfil de tal manera que el área de rozamiento corresponde al perímetro del rectángulo que circunscribe al pilote en vez de al perímetro total de la sección del pilote.

Tercera, la corrosión reduce el área efectiva de la sección transversal. En la mayoría de los suelos es suficiente dejar un margen para corrosión de 1.25 a 2.50 mm, porque la dura película de corrosión protege al pilote de futuros ataques. En suelos fuertemente ácidos como los rellenos y la materia orgánica y en el agua de mar, la corrosión es mucho más seria; en estos casos la protección catódica o la inyección de concreto son necesarias para impedir el deterioro del pilote.

## **Pilotes Prefabricados**

Los pilotes prefabricados de concreto tienen el fuste de sección uniforme circular, cuadrada y octagonal, con refuerzo suficiente para que puedan resistir los esfuerzos que se producen durante su manipulación. Los tamaños más pequeños

tienen de 20 a 30 cm de ancho y son generalmente sólidos; los tamaños mayores son sólidos o huecos para reducir el peso. El uso del pretensado en los pilotes de hormigón permite tener la resistencia necesaria con paredes de espesores relativamente delgados; pilotes huecos de 140 cm de diámetro y paredes de 10 cms de espesor, similares a los tubos de hormigón, generalmente se han usado cuando se ha requerido gran rigidez y alta capacidad de carga.

Los pilotes de concreto prefabricados se usan principalmente en construcciones marinas y puentes, donde la durabilidad bajo condiciones severas de intemperie es importante y donde los pilotes se extienden fuera de la superficie del terreno como una columna sin soporte lateral. En este último caso el refuerzo se proporciona de acuerdo con su condición de columna. Las longitudes corrientes de los pilotes sólidos pequeños varían entre 15 y 18 m y para los pilotes largos, huecos, se puede llegar hasta 60 m. La carga típica para los pilotes pequeños esta entre 30 y 50 toneladas y para los pilotes grandes hasta más de 200 toneladas.

El uso de los pilotes prefabricados esta limitado por dos factores: (1) son relativamente pesados si se les compara con otros pilotes de tamaño similar, (2) es dificultoso cortarlos si resultan demasiado largos y es aun más difícil empatarlos para aumentar su longitud.

### **Pilotes de Concreto Fabricados "In Situ"**

Los pilotes de hormigón fabricados "in situ" son los que más se usan para cargas entre 30 y 60 toneladas. Estos tipos de pilotes se pueden dividir en dos grupos: pilotes con camisa o tubo de entibacion en los que un tubo de metal de paredes delgadas se hinca en el terreno y sirve de molde y pilotes sin tubo de estibación, en los que el hormigón se coloca en un agujero hecho previamente en el suelo, quedando el hormigón finalmente en contacto directo con el suelo.

El pilote Raymon normal es uno de los primeros tipos de pilote con tubo de entibacion. Es un tubo de metal de pared delgada de 20 cm (8 plg) de diámetro en la punta, que aumenta a razón de 3.3 cm por metro de longitud (0.4 pulg por pie) se hinca en el terreno por medio de un mandril al que se ajusta al tubo perfectamente; después se extrae el mandril y el agujero cónico recubierto por el tubo se rellena de concreto.

### **Pilotes Compuestos**

Los pilotes compuestos son de una combinación de un pilote de acero o madera en el tramo inferior y un pilote de concreto, fabricado "in situ", en el tramo superior. De esta manera es posible combinar la economía del pilote de madera colocado bajo el nivel del agua subterránea, con la durabilidad del hormigón sobre el agua o combinar el bajo costo del pilote de hormigón fabricado "in situ" con la gran longitud o relativamente mayor resistencia en la hincada del pilote de tubo o de perfil H.

El proyecto y construcción de la unión entre ambos tramos es la clave del éxito en los pilotes compuestos. La cabeza del tramo inferior debe protegerse durante la hincada; la junta entre ambos tramos debe hacerse hermética para que no penetre el suelo o el agua; debe mantenerse una buena alineación entre los dos tramos para evitar que se formen ángulos y la unión o empalme debe ser tan fuerte como la más débil de las partes que une.

Se usan dos métodos para la fabricación de estos pilotes. En uno se hincan totalmente el tramo inferior; el tubo de metal con su núcleo se une al tramo inferior y ambas partes, así unidas se hincan hasta la penetración final. Se extrae el núcleo y se coloca el concreto en el tubo. Un segundo método consiste en hincar primero el tubo de acero; se girará el núcleo y el tramo inferior se coloca dentro del tubo. El tramo inferior se hincan hasta más allá del tubo utilizando el núcleo. El tubo de entibación de acero para el pilote fabricado "in situ" se coloca dentro del primer tubo y se une al tramo inferior, después de lo cual el primer tubo es extraído y colado al pilote.

#### **2.3.4. Partes de una Cimentación Por Pilotaje:**

- **Soporte o pilar:** Elemento estructural vertical, que arranca del encepado.
- **Vigas riostras:** Elementos de atado entre encepados. Son obligatorias en las dos direcciones si el encepado es de un solo pilote. En encepados de dos pilotes es obligatorio el arrojamiento en al menos una dirección, la perpendicular a la dirección de su eje de menor inercia.
- **Fuste del pilote:** Cuerpo vertical longitudinal del pilote. Las cargas son transmitidas al terreno a través de las paredes del fuste por efecto de rozamiento con el terreno colindante.
- **Punta del pilote:** Extremo inferior del pilote. Transmite las cargas por apoyo en el terreno o estrato resistente
- **Terreno circundante:** Los pilotes pueden alcanzar profundidades superiores a los 40 mts teniendo una sección transversal de 2-4 mts, pudiendo gravitar sobre ellos una carga de 2000 t.

## **2.4. SELECCIÓN DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE LOS PILOTES.**

### **2.4.1. Uso de los pilotes.**

Los pilotes se usan de muchas maneras. Los pilotes de carga que soportan las cimentaciones son los más comunes. Estos pilotes transmiten la carga de la estructura a través de estratos blandos a suelos más fuertes e incompresibles o a la roca que se encuentre debajo o distribuyen la carga a través de los estratos blandos que no son capaces de resistir la concentración de la carga de un cimiento poco profundo. Los pilotes de carga se usan cuando hay peligro de que los estratos superiores del suelo puedan ser socavados por la acción de las corrientes o las olas o en los muelles y puentes que se construyen en el agua.

Los pilotes de tracción se usan para resistir fuerzas hacia arriba, como en las estructuras sometidas a supresión, tales son los edificios cuyos basamentos están situados por debajo del nivel freático, las obras de protección de presas o los tanques subterráneos. También se emplean para resistir el vuelco en muros y presas y como anclaje de los cables que sirven de contravientos en las torres o retenidas en los muros anclados y en las torres.

Los pilotes cargados lateralmente soportan las cargas aplicadas perpendicularmente al eje del pilote y se usan en cimentaciones sometidas a fuerzas horizontales, como son los muros de sostenimiento de tierras, los puentes, las presas y los muelles y como defensas en las obras de los puertos. Si las cargas laterales son grandes, los pilotes inclinados pueden resistirlas más eficazmente.

Los pilotes se usan algunas veces para compactar el suelo o como drenes verticales en estratos de baja permeabilidad. Los pilotes colocados muy próximos unos de otros y las tablestacas anchas y delgadas unidas entre sí, se usan como muros de sostenimiento de tierras, presas temporales o defensas contra filtraciones.

### **2.4.2. Hinca de pilotes**

La operación de introducir el pilote en el terreno se llama hincado del pilote. Como muchas otras operaciones que se realizan en las construcciones, la hincado de pilotes es un arte, cuyo éxito depende de la habilidad e ingeniosidad de los que la realizan; sin embargo, también como en muchos otros trabajos de construcción depende cada vez más de la ciencia y de la ingeniería para hacerlos más eficaces. Aun más importante que el arte y la ingeniería envueltos en la construcción, resultan otros factores que aseguran el buen funcionamiento de la cimentación de

pilotaje una vez terminada. Por lo tanto, el ingeniero que proyecta la cimentación debe finalmente intervenir en la construcción y el ingeniero constructor en el proyecto. El método más antiguo y uno de los más ampliamente usados actualmente es por medio de una maza.

Los constructores orientales usaron durante siglos un bloque de piedra como maza; un grupo de obreros dispuestos en forma de estrella alrededor de la cabeza del pilote levantaban la piedra por medio de cuerdas que mantenían tirantes; por un movimiento rítmico de estirar y aflojar las cuerdas levantaban la piedra en el aire y guiaban el golpe hacia abajo, sobre la cabeza del pilote. Los romanos usaban un bloque de piedra que elevaban por medio de una cabria en forma de A, utilizando la energía de esclavos o caballos y guiaban su caída por medio de postes verticales.

A continuación se muestran los pasos a seguir en el proceso de pilotaje.

Figuras 4 y 5. Armada de canastas. Corte de camisa



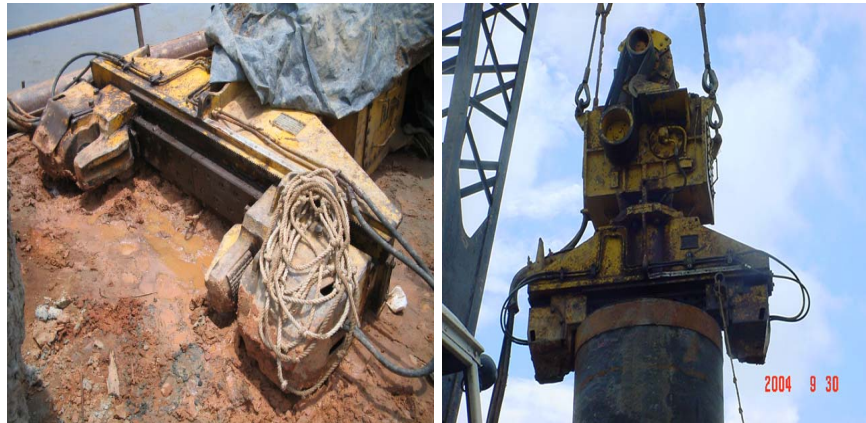
Figuras 6 y 7. Piloteadora excavando el suelo. Extracción del material.



Figuras 8 y 9. Aplicación de lodos bentoníticos. Proceso ya terminado.



Figuras 10 y 11. Martillo. Martillo en proceso de hinca de la camisa.



Figuras 12 y 13. Hinca de camisa. Desplazamiento de las canastas.



Figuras 14 y 15. Canasta ya colocada en el sitio. Traslapo de canastas.



Figuras 16 y 17. Proceso de amarre entre canastas. Colocación de perros.



Figuras 18 y 19. Instalación de tubería tremie. Vaciado del concreto en el pilote.



Figuras 20 y 21. Descabece de pilotes. Pruebas PIT para los pilotes.



Figuras 22 y 23. Resultados de la prueba. Análisis de resultados.



### 2.4.3. Equipos para la hincada de pilotes.

Aunque la simple armadura en forma de A que empleaban los romanos para la hincada de pilotes todavía se usa actualmente (con energía mecánica), la máquina más comúnmente usada es esencialmente, una grúa. Unidas a la pluma de la grúa están las guías: dos canales de acero unidos entre sí por medio de separadores en U y arriostrados por diagonales. Estas canales sirven de guía al martillo o maza que tienen unas aletas que le permiten resbalar entre las canales de la guía. Las guías están aseguradas a la grúa por un tirante que generalmente es ajustable, lo cual permite la hincada de pilotes inclinados. Para los martillos de vapor se necesita una caldera de vapor o un compresor de aire. El pilote se coloca entre las guías y debajo del martillo.

Algunos equipos grandes se montan en una base de vigas I que se apoyan en una armazón de acero y emparrillado de madera. Estos equipos se trasladan haciéndolos resbalar sobre vigas o rodillos. Para trabajos de carreteras se usan equipos de grúas instaladas en vehículos con llantas de goma y para trabajos dentro de los edificios se han usado hasta martillos montados en camiones con horquilla para elevar pesas. Algunas veces estos equipos o martinets se montan en barcazas para trabajos en agua (ver Fig. 24) o en carros de ferrocarril para trabajos en las vías. Cuando no hay espacio suficiente para una guía suelen usarse guías oscilantes que cuelgan de cables.

Figura 24. Piloteadora montada sobre un ferry.



La característica más importante de un equipo para la hincada de pilotes, desde el punto de vista del ingeniero, es su capacidad para guiar el pilote exactamente. Debe ser lo suficientemente fuerte y rígido para mantener el pilote y el martillo en su posición y con la inclinación fijada, a pesar del viento, las obstrucciones bajo el terreno y el movimiento del martillo. (Ver figura 25)

Figura 25. Piloteadora hincando la camisa.



### **Martillos o mazas para la hincada de pilotes.**

El martillo más simple es la maza, que consiste en un bloque de acero fundido que pesa de 250 a 1,000 kilogramos. Se eleva por medio de un torno de 1.50 a 3.00 m sobre la cabeza del pilote y luego se deja caer. La hincada de pilotes con maza es simple, pero muy lenta y se usa solamente en pequeños trabajos en los que el constructor tiene que improvisar su equipo o cuando no está justificado el costo del traslado de equipos pesados.

El martillo de vapor de simple efecto se compone de un pesado bloque de acero fundido, que es la maza, un pistón y un cilindro. Se introduce vapor o aire comprimido en el cilindro para levantar la maza 60 a 90 cm, y luego se le da salida al vapor para que la maza caiga sobre la cabeza del pilote. Estos martillos son simples y fuertes y golpean a baja velocidad, con energía relativamente constante a pesar del desgaste, los ajustes y las pequeñas variaciones en la presión del vapor.

En los martillos de doble efecto o diferenciales se emplean el vapor o el aire comprimido para levantar la maza y para acelerar la caída. Los golpes son más rápidos, de 95 a 240 por minuto, con lo cual se reduce el tiempo necesario para la hincada del pilote hasta se hace esta más fácil en arena suelta. El martillo puede perder parte de su eficiencia con el desgaste o el ajuste deficiente de la válvula. La energía que se desarrolla en cada golpe varía grandemente con la presión del vapor o del aire y se necesita una inspección cuidadosa para estar seguros de que dicha presión es la especificada y constante. Si el número de golpes por minuto es aproximadamente el especificado, la presión del vapor es probablemente correcta. Los martillos de vapor pueden operar con vapor o con aire comprimido; la operación con vapor es más eficiente, especialmente si se emplean generadores

de vapor circulante. Si el martillo va a operar bajo el agua, lo cual se puede hacer con el de doble efecto de tipo cerrado, se necesita suministrar aire.

Los martillos Diesel para la hinca de pilotes se encuentran en el mercado en tamaños cada vez mayores. El martillo Diesel se compone de un cilindro de fondo macizo y una maza pistón encerrada en el mismo. Al comenzar la hinca la maza se levanta mecánicamente y luego se deja caer. El combustible se inyecta dentro del cilindro cuando cae la maza, produciéndose la ignición por el calor del aire comprimido por la maza. El impacto y la explosión fuerzan al cilindro hacia abajo contra el pilote y a la maza hacia arriba, para repetir el ciclo automáticamente. Las mayores ventajas del martillo Diesel son: que lleva consigo la fuente de energía, es económico y se opera fácilmente. La energía por golpe es alta en relación con el peso del martillo, pero esta se desarrolla por la alta velocidad de los golpes de una maza de peso mediano. La mayor desventaja estriba en que la energía por golpe varía con la resistencia que ofrece el pilote y es extremadamente difícil valorarla en la obra. En algunos tipos de martillo Diesel la distancia del recorrido de la maza puede observarse visualmente y calcular la energía, aproximadamente, por el producto del recorrido y el peso de la maza. En otros martillos se puede estimar la energía por la presión del aire generada en una cámara de rechazo situada sobre el martillo. Debido a que la energía es variable, el martillo Diesel es el que mejor se adapta a los casos en que el control de la energía no es crítico, o donde este pueda ser vigilado de cerca en los momentos críticos.

Un martillo de doble efecto movido por presión hidráulica es algo más rápido y ligero que el equivalente de vapor, porque la presión con que funciona es mucho mayor. El sistema compacto de la bomba hidráulica es más fácil de trasladar que el voluminoso compresor de aire o la caldera de vapor; sin embargo, las altas presiones llevan aparejados problemas mecánicos más difíciles. El martillo ligero de doble efecto, producirá la misma energía en kilográmetros en el instante en que la maza hace contacto con la cabeza del pilote, que un martillo pesado de vapor simple efecto cayendo de 0.75 a 0.90 m de altura. Sin embargo, los efectos de los dos golpes son diferentes, debido a la gran diferencia de velocidades que tienen las mazas en el instante del golpe. La experiencia demuestra que el peso de maza debe estar entre un tercio y dos veces el peso del pilote.

En la mayoría de los martillos para hinca de pilotes es necesario usar sombreretes. Protectores para distribuir la fuerza del golpe del martillo en la cabeza del pilote. El sombrerete se hace de acero fundido y contiene en su interior un bloque renovable de madera, fibra o un metal laminado y goma o un cojín plástico y contra él golpea el martillo.

#### 2.4.4. Comportamiento del Pilote durante la Hinca.

La hinca de pilotes es una operación fascinante que siempre atrae multitud de espectadores. Las nubes de vapor y el continuo martillar les hace detenerse, pero en general, no advierten lo que requiere más atención del ingeniero: el comportamiento del pilote durante la hinca. En suelos muy blandos los primeros golpes del martillo pueden hincar el pilote varios metros; de hecho el pilote puede introducirse en el terreno bajo el peso del martillo solamente; sin embargo en los suelos duros cada golpe del martillo está acompañado por una deformación del pilote (ver figura 26) y la consiguiente pérdida de energía.

Figura 26. Camisa deformada



El golpe del martillo produce inicialmente un movimiento del pilote hacia abajo, pero este es seguido por un rebote que representa la compresión elástica temporal del pilote y del suelo que lo circunda. El movimiento neto del pilote en el suelo por el efecto de un golpe del martillo. La penetración promedio para varios golpes se puede hallar de la resistencia a la hinca, que es el número de golpes necesario para hincar el pilote una distancia determinada.

Cuando el pilote es muy largo y la hinca difícil, el comportamiento del pilote es más complejo. En el momento del impacto la parte superior del pilote se mueve hacia abajo; la parte inmediatamente debajo se comprime elásticamente y la punta del pilote permanece momentáneamente fija. La zona de compresión se mueve rápidamente hacia abajo y alcanza la punta del pilote una fracción de segundo después de producirse el impacto. Como resultado de esta onda de compresión, la totalidad del pilote no se mueve hacia abajo en un instante, sino que lo hace en segmentos más cortos.

#### **2.4.5. Otros Métodos de Hinca de Pilotes**

En los suelos no cohesivos se puede usar el chiflón de agua para hincar hasta su posición final pilotes cortos con cargas ligeras y para ayudar la hinca de pilotes largos con cargas pesadas. El chorro se produce inyectando agua con una presión de 10 a 20 Kg. por cm<sup>2</sup> por un tubo de 3.8 a 5.0 cm de diámetro, que tiene una boquilla de mitad del mismo. El chorro de agua se puede usar para abrir un hueco en la arena antes de proceder a la hinca o se puede fijar el tubo o un par de tubos, a los lados del pilote (o dejarlo embebido en el pilote de concreto) de manera que la acción del chorro de agua y la hinca sean simultáneas. Como el chorro de agua afloja el suelo, corrientemente se interrumpe antes que el pilote alcance su posición final y los últimos decímetros de la penetración se hacen con el martillo solamente. Si se usa demasiada agua el chorro puede aflojar los pilotes que se hayan hincado previamente. El chiflón de agua beneficia grandemente la hinca en arena compacta, pero su ayuda es pequeña en arcillas.

Cuando el pilote deba atravesar capas superiores de arcillas compacta o roca blanda para alcanzar el estrato firme, se puede ahorrar tiempo y dinero haciendo una perforación previa. Si el suelo es seco esta perforación se hace con una barrera y se deja caer el pilote dentro del agujero abierto. Si el suelo se mantiene continuamente firme, se puede fabricar un pilote de concreto en el agujero para formar un pilote de colado in situ.

Si el suelo contiene vetas blandas, se puede hacer el agujero con una barrera rotatoria y se mantiene abierto rellenándolo con una pasta blanda de suelo y agua. El pilote se hinca a través de esa pasta hasta el estrato firme situado debajo.

El punzonado es la hinca en el suelo de un pesado perfil de acero laminado, para romper obstrucciones o vetas duras que puedan dañar y hasta impedir la penetración de pilotes pequeños. El perfil de acero que se haya empleado como punzón se saca antes de hincar el pilote.

Se emplean los gatos para hincar pilotes cuando no se permiten las vibraciones del martillado o cuando no hay espacio suficiente para usar martillos. Se usan principalmente en obras de recalce de cimentaciones, donde el pilote, en pequeñas secciones, se hinca por medio de gatos, usando el peso de la propia estructura como reacción.

Los vibradores son efectivos, según se ha comprobado en la hinca de pilotes de suelos limosos y arenosos. Los vibradores consisten en un par de pesos que giran en dirección contraria, orientados de manera que produzcan movimientos hacia arriba y hacia abajo. Se han usado vibradores con velocidades de 735 a 2500 revoluciones por minuto y que pesan de 12000 a 14000 kg. respectivamente. Un vibrador de 12000 Kg. movido por un motor eléctrico de 200 caballos de vapor desarrolla una fuerza dinámica de cerca de 159100 kg. Un pequeño vibrador de

100 caballos de vapor proyectado para la hincada y extracción de tablestacas pesa 5000 kg. y desarrolla una potencia de 7466 kgm por minuto, a una velocidad de 700 a 1000 revoluciones por minuto.

Se han empleado vibradores gigantes en pares sincronizados para hincar pilotes de 1.20 m de diámetro y hasta cajones más grandes.

El vibrador sonico genera la vibración en resonancia con el pilote; de esta manera el impulso de la vibración esta en fase con la onda de compresión elástica que viaja hacia abajo en el pilote y la energía para vencer el rozamiento y la resistencia en la punta se usa mas eficientemente. Una máquina de hincada de combustión interna produce la frecuencia variable que se necesita para armonizar con la frecuencia natural del pilote como columna elástica. La velocidad de hincada es asombrosa en muchos casos y el ruido y las molestias de las sacudidas son menores que en la hincada con martillos de percusión.

## **2.5. CAPACIDAD RESISTENTE DEL PILOTE**

La capacidad de una cimentación de pilotaje para soportar cargas sin falla o asentamiento excesivo, depende de varios factores: la losa sobre los pilotes, el fuste del pilote, la transmisión de la carga que soporta el pilote al suelo, y el suelo y los estratos subyacentes de roca que finalmente soportan la carga.

En el análisis y proyecto del fuste del pilote intervienen tanto el suelo como el pilote. Corrientemente la capacidad del fuste del pilote obedece a necesidades constructivas y es mucho mayor que la necesaria para la carga máxima; pero puede ser crítica en el caso de pilotes esbeltos con cargas pesadas o cuando se encuentran dificultades en la construcción. La transferencia de la carga del pilote al suelo es lo que se llama capacidad de carga del pilote y es frecuentemente causa de dificultades en las cimentaciones de pilotaje. La capacidad de los estratos inferiores para soportar la carga depende del efecto combinado de todos los pilotes actuando conjuntamente. Aunque la capacidad de los estratos inferiores rara vez recibe atención, es frecuentemente fuente de dificultades en las cimentaciones de pilotaje.

### **2.5.1. Fuste del Pilote.**

El fuste del pilote es una columna estructura que esta fija en la punta y generalmente empotrada en la cabeza. La estabilidad elástica del pilote y su resistencia al pandeo ha sido investigada teóricamente y por ensayos de carga. El pandeo de un pilote depende de su alineamiento, longitud, momento de inercia y modulo de elasticidad y de la resistencia elástica del suelo que lo circunda. Tanto la teoría como la práctica demuestran que el soporte lateral del suelo es tan efectivo, que únicamente en pilotes extremadamente esbeltos hincados en arcillas muy blandas o en pilotes que se extiendan fuera del suelo, en el aire o en el agua, pueden producirse pandeo. Por lo tanto, los pilotes en arena o en arcilla blanda se

proyecta, corrientemente, como si estuvieran arriostrados o fueran columnas cortas. Esto se ha comprobado por ensayos de carga en pilotes de 30 m de longitud en arcilla blanda en un lugar del Medio Oeste. Los pilotes de acero de sección H fallaron por arriba de la superficie del terreno cuando se alcanzó el límite elástico del acero y los de concreto por rotura por aplastamiento, cuando se alcanzó la resistencia a compresión del hormigón.

Lo más importante a considerar como limitación de la capacidad del fuste de un pilote es la construcción defectuosa, especialmente la de las uniones de dos secciones del pilote; esto puede conducir a desviaciones de la parte inferior del pilote y a que se produzca un ángulo de la alineación del mismo y a una reducción de la sección transversal del pilote y una pérdida de resistencias como columna corta. El estudio que se ha hecho de los pilotes de esta forma demuestran que su capacidad no se reduce materialmente, siempre que el suelo circundante sea firme. La reducción de resistencias del pilote como columna se puede evitar con un cuidadoso control de los procedimientos constructivos.

### **2.5.2. Efectos del Pilote en el Suelo**

La forma de distribución del esfuerzo, el asentamiento y capacidad máxima de una cimentación por pilotaje, depende del efecto del pilote en el suelo. El pilote, representado por un cilindro de longitud  $L$  y diámetro  $D$ , es una discontinuidad en la masa de suelo, que reemplaza el suelo, según sea instalado por excavación, como un pilar, o por hinca. La excavación altera el suelo cambiando la forma de distribución del esfuerzo; el suelo puede ser comprimido hacia adentro, desorganizándose la estructura de las arcillas y reduciéndose la compacidad de las arenas. Al forzar un pilote dentro del agujero o al colocar concreto fresco, puede que se fuerce parcialmente el suelo hacia afuera, originándose más alteración.

La hinca del pilote origina aun mayor alteración. La punta del pilote actúa como un pequeño cimientado con un cono de suelo que se forma debajo de ella que perfora hacia abajo forzando al suelo hacia los lados en sucesivas fallas de capacidad de carga. Alrededor del pilote se forma una zona de alteración o suelo reamasado que tiene un ancho de  $D$  a  $2D$ . Si la hinca va acompañada por el chorro de agua o la perforación de un pequeño agujero, la zona de alteración es menor. Dentro de la zona de alteración se reduce la resistencia de cohesión de las arcillas saturadas y de los suelos cementados. En la mayoría de los suelos no cohesivos se aumenta la compacidad y el ángulo de fricción interna, sin embargo, en un suelo muy compacto pudiera haber una reducción en la compacidad en la zona inmediata al pilote, debido al esfuerzo cortante y a una ligera reducción local del ángulo de fricción interna.

El desplazamiento producido por la hinca de los pilotes tiene dos efectos. *Primero*, se produce un levantamiento del terreno en los suelos de arcilla saturada y en los

no cohesivos compactos. El levantamiento del terreno algunas veces empuja lateralmente 30 o 60 cms los pilotes hincados previamente o levanta la superficie del terreno una cantidad equivalente al volumen de suelo desplazado. *Segundo*, se establece una fuerte presión lateral en el suelo. Los limitados datos disponibles indican que la presión lateral total, en arcilla saturada, puede ser tanto como dos veces la presión vertical total de la sobrecarga de tierra y en las arenas la presión lateral efectiva puede ser desde la mitad a cuatro veces el esfuerzo vertical efectivo. En las arcillas saturadas hay indicaciones indirectas de presiones aun mayores, como son el colapso de ataguías y el aplastamiento de pilotes de tubo abierto de paredes delgadas o de camisas de acero y el empuje que reciben las estructuras situadas cerca de los pilotes que se están hincando.

En las arcillas saturadas el aumento de presión es, en su mayor parte, esfuerzo neutro, que con el tiempo se disipa en el suelo circundante, lo que hace que la presión lateral caiga hacia su valor original, algo menor que la presión de la sobrecarga de tierra. La reducción del esfuerzo neutro en la arcilla esta acompañada por una recuperación de la resistencia, que en algunos casos excede finalmente la resistencia original del suelo no alterado.

La hincada de pilotes con martillo produce choque y vibración que se transmite, a través del terreno, a las estructura contiguas. Esto puede molestar a los ocupantes y cuando es muy intenso causa daños físicos. Si el suelo es arena muy suelta, fina y saturada, las vibraciones pueden causar una licuefacción temporal de la misma, con la correspondiente perdida de capacidad de carga, produciéndose graves daños; aunque esto raramente ocurre. Es más común que la superficie del terreno, a pesar del desplazamiento producido por los pilotes. El hundimiento se puede extender tanto como hasta 30 m de la estructura, según la longitud de los pilotes y la intensidad de la hincada. Esto causa asentamientos y daños en las estructuras cercanas.

### **2.5.3. Transferencia de la Carga del Pilote**

El pilote transfiere la carga al suelo de dos maneras. *Primero*, por la punta, en compresión, que se llama resistencia por la punta, y *segundo*, por esfuerzo cortante a lo largo de su superficie lateral, llamado comúnmente fricción lateral (aunque una verdadera fricción no se desarrolla en todos los casos). Los pilotes hincados a través de estratos débiles hasta que su punta descansa en un estrato duro, transfieren la mayor parte de su carga por la punta y algunas veces se les llama pilotes resistentes por la punta. En suelos homogéneos los pilotes transfieren la mayor parte de su carga por fricción lateral y se les llama pilotes de fricción o pilotes flotantes; sin embargo, la mayoría de los pilotes desarrollan ambas resistencias.

#### **2.5.4. Campo de Esfuerzos alrededor del Pilote.**

La zona de esfuerzo inicial alrededor de un pilote que se coloque perforando el suelo o por medio de chiflón de agua, esta probablemente muy cerca del estado de reposo; lo cual depende de la reducción del esfuerzo que acompañe a la compresión del suelo hacia el agujero y del aumento del mismo producido por el desplazamiento del suelo al colocarse el pilote. Al cargarse al pilote el campo de esfuerzos cambia, porque la carga del pilote se transfiere al suelo.

Por arriba de la punta del pilote, dentro de una zona cilíndrica cuyo radio es alrededor de la mitad de la longitud del pilote, la resistencia por la punta produce un incremento de esfuerzo negativo, o una reducción del esfuerzo vertical en la masa. Los esfuerzos radiales (en dirección lateral) son análogamente influidos por el esfuerzo vertical transferido al suelo por el pilote. Por arriba del punto de carga el esfuerzo radial se reduce y por debajo se aumenta.

El efecto combinado de la resistencia por la punta y la fricción lateral en la zona de esfuerzo, depende de sus magnitudes relativas como también de la distribución lateral a lo largo del pilote.

#### **2.5.5. Análisis Estático de la Capacidad de Carga de un Pilote**

En el pilote resistente por la punta, esta se asemeja a una cimentación por superficie enterrada profundamente. Cuando se carga el pilote se forma un cono de suelo no alterado que se adhiere a la punta. Como la punta va penetrando mas profundamente conforme aumenta la carga, el cono fuerza el suelo hacia los lados cortando la masa a lo largo de una superficie curva. Si el suelo es blando, compresible o tiene un modulo de elasticidad bajo, la masa situada mas allá de la zona de esfuerzo cortante se comprime o deforma, permitiendo que el cono penetre mas. Esta es una forma de esfuerzo cortante local similar al descrito para las cimentaciones poco profundas. Si el suelo o la roca son muy rígidos, la zona de esfuerzo cortante se extiende hasta que el desplazamiento total permita al cono perforar el suelo hacia abajo. Se han propuesto varias formas para la zona de esfuerzo cortante para evaluar la resistencia por la punta.

Es difícil precisar cual es el factor de capacidad de carga correcto que debe usarse en cada caso. Los factores para cimentaciones poco profundas se aplican a los pilotes resistentes por la punta o a los pilotes, cuando descansan en estratos duros, y sobre los cuales se encuentran formaciones débiles. También se aplican a los pilotes embebidos en arcillas blandas y arenas sueltas. Los factores más altos se aplican solamente a las arcillas mas duras y a las arenas muy compactas, en las cuales la punta del pilote queda embebida a una profundidad de 10D.

El pilote hincado tiene, generalmente, una capacidad de carga máxima mayor que la del pilote colocado con excavación previa o con chiflón de agua, porque los valores máximos, tanto el de resistencia por la punta como el de fricción, se alcanzan durante la hinca.

Una segunda causa de la diferencia entre la capacidad de carga calculada y la real de los pilotes, proviene de la fricción negativa. Los esfuerzos que se desarrollan en el suelo por el pilote y por cualquier carga superficial, como el relleno, no soportada directamente por los pilotes, hace que el suelo no consolide. Si hay algún estrato muy compresible a algún nivel por arriba de la punta del pilote, la consolidación hará que el suelo de arriba se mueva hacia abajo con respecto al pilote. Esto estratos en vez de soportar el pilote, debido a su movimiento descendente, añaden carga al pilote. Esta fricción negativa ha sido tan grande en algunos casos, que ha producido la falla de la cimentación por pilotaje y debe por lo tanto, considerarse en el proyecto.

#### **2.5.6. Prueba De Carga**

El método mas seguro para determinar la capacidad de carga de un pilote, para la mayoría de los lugares, es la prueba de carga. Los ensayos de carga se hacen para determinar la carga máxima de falla de un pilote o grupo de pilotes o para determinar si un pilote o grupo de pilotes es capaz de soportar una carga sin asentamiento excesivo o continuo.

La capacidad de carga en todos los pilotes, excepto los hincados hasta la roca, no alcanza su valor máximo hasta después de un periodo de reposo. Los resultados de los ensayos de carga no son una buena indicación del funcionamiento de los pilotes, a menos que se hagan después de un periodo de ajustes. En el caso de pilotes hincados en suelo permeable este periodo es de dos o tres días, pero para pilotes rodeados total o parcialmente por limo o arcilla, puede ser de más de un mes.

Los ensayos de carga se pueden hacer construyendo una plataforma o cajón en la cabeza del pilote o grupo de pilotes, en la cual se coloca la carga, que puede ser arena, hierro, bloques de concreto o agua. Para hacer un ensayo más seguro y más fácilmente controlable, se usan, para aplicar la carga, gatos hidráulicos de gran capacidad cuidadosamente calibrados. La reacción del gato será tomada por una plataforma cargada o por una viga conectada a pilotes que trabajaran a tracción. Una ventaja adicional del uso de gatos es que la carga sobre el pilote se puede variar rápidamente a bajos costos. Los asentamientos se miden con un nivel de precisión o, preferiblemente, con un micrómetro montado en un soporte independiente.

Las cargas se aplican en incrementos que sean un quinto o un cuarto de la carga del pilote que se haya fijado para el proyecto, hasta que se produzca la falla o se

alcance una carga igual a dos veces la fijada para el proyecto; la carga se reduce después a cero, por decrementos. Cada asentamiento a intervalos regulares, hasta que su velocidad sea menor que 0.013 mm por hora. Posteriormente se dibuja la curva de asentamientos finales-carga, similar a la de la prueba de carga en placa.

Se ha propuesto muchos criterios diferentes para fijar la carga admisible o de trabajo, pero el mejor es el mismo que se emplea para cualquier otro tipo de cimentación: la carga con un factor de seguridad adecuado (1.5 a 2 cuando se ha hecho ensayo de carga) o la carga que produce el mayor asentamiento total permisible, cualquiera que sea menor.

### **2.5.7. Asentamiento de un solo Pilote**

El asentamiento de un pilote aislado proviene del acortamiento elástico del fuste del pilote y, en parte, de la distorsión del suelo alrededor del pilote. Como mejor se determinan estos efectos es por el ensayo de carga. El asentamiento se puede determinar por un análisis estático de la resistencia del pilote, calculando el acortamiento elástico de cada sección del fuste del pilote, teniendo en cuenta la porción de la carga total que queda en esa sección.

El mayor asentamiento en todos los pilotes, excepto los que se apoyan en roca, proviene de la consolidación del suelo subyacente por los esfuerzos que desarrolla el grupo de pilotes.

## **2.6. ANÁLISIS DINÁMICO DE LA CAPACIDAD RESISTENTE DEL PILOTE**

Como la hincada de un pilote produce fallas sucesivas de capacidad de carga del pilote, sería posible, teóricamente, establecer alguna relación entre la capacidad de carga del pilote y la resistencia que ofrece a la hincada con un martillo. Este análisis dinámico de capacidad de carga del pilote, que a menudo da lugar a fórmulas de hincada, se ha usado por más de un siglo. En algunos casos estas fórmulas han permitido predecir con exactitud la capacidad de carga del pilote, pero en otros no y su uso indiscriminado ha traído como consecuencia, unas veces, la seguridad excesiva y, otras, el fracaso.

La carga que recibe el pilote y la "falla" producida por la hincada con martillo, ocurren en una pequeña fracción de segundo, mientras que en la estructura la carga se aplica en un lapso que varía de horas a años. Una relación fija entre la capacidad de carga de un pilote obtenido dinámicamente y la obtenida a largo plazo, solo puede existir en un suelo en el que la resistencia a esfuerzo cortante sea independiente de la velocidad de aplicación de la carga. Esto es aproximadamente cierto en un suelo no cohesivo seco y en suelos no cohesivos húmedos de compacidad intermedia o de granos tan gruesos, que el esfuerzo cortante no produzca un esfuerzo neutro apreciable. En las arcillas y en los suelos no cohesivos, ya sean muy sueltos o compactos, de granos finos y saturados, la

resistencia depende de la velocidad con que se desarrolla el esfuerzo cortante; en estos suelos el análisis dinámico puede no tener validez.

### **2.6.1. Análisis por Onda**

El proceso dinámico de la hincada del pilote es análogo al del choque de una masa concentrada contra una varilla elástica. La varilla está parcialmente impedida de movimientos a lo largo de su superficie por la fricción lateral y, en la punta, por la resistencia por la punta. Este sistema se puede asemejar a un modelo de pequeñas masas elásticas. La masa del pilote, distribuida a lo largo del mismo, se presenta por una serie de pequeñas masas concentradas, unidas entre sí por resortes que simulan la resistencia longitudinal del pilote. La resistencia por fricción lateral se puede representar por un modelo geológico de superficie restringida que incluye el rozamiento, de la deformación elástica y la amortiguación.

Cuando el martillo golpea el sombrerete del pilote se genera una fuerza  $R_c$ , que acelera el sombrerete ( $W_c$ ) y lo comprime. El sombrerete transfiere una fuerza,  $R_o$ , al segmento de la cabeza del pilote,  $W_1$  y lo acelera un instante después de la aceleración de  $W_c$ . La fuerza de compresión que se ejerce en la cabeza del pilote  $R_1$  produce aceleración en el segmento siguiente del pilote,  $W_2$ , produciéndose una onda de compresión que se mueve hacia la punta del pilote. La fuerza vertical en cualquier instante,  $t$ , es equivalente a la compresión del resorte. La onda de fuerza, cuando se mueve hacia abajo, es parcialmente disipada en vencer la fricción y la fuerza que queda cuando la onda llega al extremo del pilote vence la resistencia por la punta. Para que el pilote penetre más profundamente es necesario que la fuerza en la onda sea mayor que las sumas acumuladas de la máxima resistencia por fricción lateral y la máxima resistencia por la punta; Si no es así, se dice que el pilote ha alcanzado el rechazo.

La forma de la onda de fuerza depende de la rigidez del pilote. En un pilote rígido (resortes fuertes) la forma de la onda es puntiaguda, con un pico más alto que el de un pilote flexible. La fuerza que vence la resistencia por la punta, es mayor para el pilote rígido. La fuerza pico o máxima es también una función de la energía del martillo y de su eficiencia; el de mayor energía produce la fuerza mayor. La fuerza dividida por el área transversal del pilote es igual al esfuerzo que se produce en el pilote durante la hincada si el esfuerzo máximo producido excede la resistencia del pilote, este se daña y entonces se dice que el pilote ha sido hincado excesivamente, o que ha sido sobre-hincado.

Aunque el análisis por onda de la hincada del pilote da una visión clara del mecanismo del proceso de hincada, su utilidad es limitada para evaluar la capacidad de carga del pilote. La disipación de energía por fricción lateral y su equivalencia a la constante del resorte y la resistencia por la punta, son difíciles de evaluar bajo las condiciones de la obra y prácticamente imposibles de pronosticar. Los cálculos

se hacen fácilmente con una computadora digital, pues a mano es muy tedioso. Este análisis se usa generalmente para diagnosticar las causas de un comportamiento anormal de hinca o como guía para seleccionar el equipo o pilote más eficiente.

A continuación se muestra el proceso de pruebas P.I.T (Pile Integrity Tester) realizadas a los pilotes. (Ver figuras de la 27 a la 32)

Figuras 27 y 28. Adecuación del sitio para la toma de la prueba.



Figuras 29 y 30. Realización de la prueba.



Figuras 31 y 32. Resultados obtenidos de la prueba.



### 2.6.2. Métodos Aproximados

Los métodos aproximados de análisis dinámico, las llamadas formulas de hincas, se han usado por mas de un siglo y todavía se usan para predecir la máxima capacidad de carga de un pilote, basándose en simples observaciones de la resistencia a la hincas.

Todos los análisis dinámicos están basados en la transferencia al pilote y al suelo de la energía cinética de la masa al caer. Esta realiza un trabajo útil forzando al pilote a introducirse en el suelo venciendo su resistencia dinámica. La energía se gasta en el rozamiento mecánico del martillo, en transferir la energía del martillo al pilote por el impacto y en la compresión temporal del pilote, del sombrerete (sí lo hay) y del suelo.

### 2.6.3. Separación de los pilotes

La separación final de los pilotes esta basada en el análisis de la acción de conjunto del grupo de pilotes. Los pilotes se colocan a distancias tales que la capacidad del grupo de pilotes actuando como una unidad sea igual a la suma de las capacidades individuales de los pilotes.

Puede ser necesaria una mayor separación en arenas compactas y en arcillas resistentes para reducir al mínimo la presión lateral producida por el desplazamiento.

En ciertos tipos de suelo, especialmente en arcillas compresibles, la capacidad de pilotes individuales dentro de un grupo separado puede ser menor que el equivalente de un pilote individual. Sin embargo, debido a su efecto insignificante, esto puede ignorarse en el diseño. A cambio, la preocupación principal ha sido que la capacidad del bloque del grupo pueda ser menor que la suma de las capacidades de los pilotes individuales. Como regla general, si la separación es mayor a 2 - 3 veces el diámetro, entonces el bloque de falla es más improbable.

Es de vital importancia que el grupo de pilotes en suelos friccionantes y cohesivos se acomoden de tal forma que se logre la distribución de carga en áreas mayores.

Se deben evitar grandes concentraciones grandes de pilotes debajo del centro del fuste. Esto puede ocasionar que la concentración de carga resulte en asentamientos locales y falla en el fuste del pilote. Variando la longitud de los pilotes en el mismo grupo puede tener efectos similares.

Para cargas de pilote de hasta 300 kN, la distancia mínima del fuste del pilote deberá de ser de 100 mm.

Para cargas mayores que 300 kN, esta distancia deberá ser mayor a 150 mm.

Por lo general, la siguiente fórmula puede usarse para determinar la separación de pilotes:

Para Pilotes friccionantes:

$$S = 2.5 * d + 0.02 * L$$

Para Pilotes de cohesión:

$$S = 3.5 * d + 0.02 * L$$

Donde:

D = Diámetro del pilote

L= Longitud del Pilote

S = Distancia de centro a centro de pilotes (separación)

#### **2.6.4. Tolerancias**

Es imposible colocar los pilotes en el punto o con el ángulo exactos que se hayan indicado en el proyecto, porque tienden a apartarse o desviarse cuando encuentran puntos doble colocar los pilotes en el punto o con el ángulo exactos que se hayan indicado en el proyecto, porque tienden a apartarse o desviarse cuando encuentran puntos duros, o blandos en el terreno. Los proyectos y especificaciones deben tolerar un desplazamiento de 5 cm en la cabeza de los pilotes pequeños hincados en suelo y 15 cm (y algunas veces más) en pilotes hincados a través del agua. Un desplome o angularidad en el eje del pilote de 1 o 2 por ciento, con respecto a la longitud del pilote, no afecta, generalmente, su capacidad de carga y, por lo tanto, debe permitirse en el proyecto y en las especificaciones. Corrientemente se permiten tolerancias mayores, si los ensayos de carga demuestran que los pilotes pueden soportar las cargas con seguridad.

### **3. ASPECTOS ADMINISTRATIVOS EN CIMENTACION DE PUENTES**

La administración es el proceso de diseñar y mantener un entorno en el que, trabajando en grupos, los individuos cumplan eficientemente objetivos específicos.

#### **3.1. OBJETIVO DE LA ADMINISTRACIÓN.**

Considerando a la administración, como la Integración dinámica y óptima de las funciones de planeación, organización, dirección y control para alcanzar un fin grupal, de la manera más económica y en el menor tiempo posible. LA función principal del empresario es la creación de un organismo estable, en continua superación y teóricamente perdurable; por otra parte el objetivo de todo director debería ser, el profundo desarrollo de grupos y su ordenación para alcanzar metas comunes, lo más rápidamente posible.

#### **3.2. IMPORTANCIA DEL PROCESO ADMINISTRATIVO EN LA ACTIVIDAD CONSTRUCTORA.**

Es indudable que los conceptos administrativos son comunes a todas las empresas y que en la industria de la construcción, sus principios generales se desarrollan en forma natural. Ante una situación imprevista, un grupo de hombres reacciona de diferentes maneras; el común denominador de aquellos que la superan está constituido por el desarrollo de cuatro acciones básicas: Planear, Organizarse, Dirigirse y Controlar los resultados.

Un equipo de construcción realiza su trabajo solo una vez en cada sitio; la siguiente vez su trabajo lo realizara en un nuevo lugar, con un nuevo patrón y bajo nuevas, aunque, similares especificaciones. Desde el comienzo de cada proyecto de construcción, el contratista se ve obligado a trabajar en el lugar en donde se encuentre la obra de una manera rápida y económica como sea posible y después abandonar el lugar.

La industria de la construcción ha diseñado estructuras organizativas según las cuales operan los contratistas más competentes con el fin de eliminar la burocracia organizativa que impide la comunicación rápida entre la oficina y la obra, y demora las desiciones, que son vitales para la administración.

Más que en cualquier otro negocio, en la industria de la construcción el éxito o el fracaso está determinado por la calidad de la dirección. La administración de la construcción es fundamentalmente la dirección de las personas, la capacidad para conservar a la gente unida en un grupo compacto respetando a su jefe y cooperando uno con otro. Para lograr el respeto y la lealtad de las personas, es

necesario que el administrador sea equitativo en sus negociaciones y en sus relaciones con los empleados. Cualquier desviación de esta conducta tiene efecto adverso, y la administración se desmembra con rapidez.

El interés del directivo por sus colaboradores es definitivo para el incremento de la productividad.

### **3.3. HABILIDADES ADMINISTRATIVAS Y JERARQUÍA ORGANIZACIONAL**

La **habilidad técnica** es la posesión de conocimientos y destrezas en actividades que suponen la aplicación de métodos, procesos y procedimientos. Implica por lo tanto el diestro uso de instrumentos y técnicas específicas.

La **habilidad humana** es la capacidad para trabajar con individuos, esfuerzo cooperativo, trabajo en equipo, la creación de condiciones donde las personas se sientan protegidas y libres de expresar sus opiniones.

La **habilidad de conceptualización** es la capacidad para percibir el panorama general, distinguir los elementos más significativos de una situación y comprender las relaciones entre ellos.

La **habilidad de diseño** es la capacidad para resolver problemas en beneficio de la empresa. Deben poseer además la habilidad de un buen ingeniero de diseño para deducir la solución práctica de un problema. Si se limitaran a detectar problemas y a fungir como “observadores de problemas”, fracasarían. Por lo tanto, también deben poseer la habilidad de ser capaces de diseñar soluciones funcionales a los problemas en respuesta a las realidades que enfrentan.

La importancia relativa de estas habilidades puede diferir de acuerdo con el nivel de la jerarquía organizacional de que se trate. Las habilidades técnicas son las de mayor importancia para el nivel de supervisión. Las habilidades humanas también son útiles en las frecuentes interacciones con los subordinados. Por otra parte, las habilidades de conceptualización no suelen ser decisivas para los supervisores de nivel inferior. La necesidad de habilidades técnicas decrece en el nivel administrativo intermedio, en el que sin embargo las habilidades humanas siguen siendo esenciales al tiempo que las habilidades de conceptualización cobran mayor importancia. En el nivel administrativo superior son especialmente valiosas las habilidades de conceptualización de diseño y humanas, mientras que la necesidad de habilidades técnicas es relativamente menor. Especialmente en las grandes organizaciones, se supone que los directores generales pueden utilizar las habilidades técnicas de sus subordinados. En las pequeñas empresas, en cambio, es probable que la experiencia técnica sea de gran importancia en este nivel.

### 3.4. FASES DEL PROCESO ADMINISTRATIVO.

Las funciones del proceso administrativo son:

**Planeación:** Conceptuamos a la planeación como el estudio y selección de alternativas sobre pronósticos de operaciones futuras, por lo cual y para el caso de empresas constructoras constara de tres etapas básicas, la planeación de su inicio, la de su consolidación y la del desarrollo de la misma.

La función de planeación o determinación del trabajo, debe ser realizado a través de:

- ✓ Definición de la razón de existir de la empresa (Naturaleza y alcance del trabajo que debe ser realizado). Es en sí la justificación de creación de una empresa constructora.
- ✓ Estimación de lo que se puede acontecer en el futuro (Predicción del futuro)
- ✓ Establecimiento de objetivos y metas (determinación de los resultados que deben ser alcanzados).
- ✓ Establecimiento de planes y estrategias de acción (formas de conseguir los resultados)
- ✓ Establecimiento de los requisitos de oportunidad en el logro de los objetivos (el tiempo que debe ser alcanzados)
- ✓ Determinación de los recursos requeridos para obtener los resultados predeterminados (la elaboración de presupuestos)
- ✓ Fijación de normas de operación, que nos permita determinar reglas o decisiones predeterminadas (Fijación de políticas)
- ✓ Establecimiento de procedimientos (Determinación de métodos y procedimientos sistemáticos para realizar el trabajo)

**Organización:** La organización se cree que sea la división lógica, óptima y ordenada de trabajos y responsabilidades, para alcanzar los pronósticos definidos por la planeación.

Para que un grupo pueda trabajar efectivamente en la realización de ciertos propósitos, debe existir una estructura explícita de funciones tomando en cuenta las cualidades de cada persona, en otras palabras usar la organización en función del individuo.

En esta fase se realizan organigramas, la organización depende de factores como la comunicación, cualquier intento organizativo sería irrealizable sin la

comunicación; el lenguaje es uno de los orígenes de la comunicación; se distinguen varias formas del lenguaje:

*Pasivo.* El que se comprende sin poder emplearlo (El perro obedece la orden de su dueño)

*Activo.* El que utiliza para hacer comprender a otros.

*Indirecto.* El que trasmite a través de gestos, mímicas y actitud frente a los demás (El cual en ocasiones, es mas expresivo que los anteriores).

La función de organización o clasificación y división del trabajo en unidades administrables, a través de:

- ✓ Estructuración de la empresa agrupando el trabajo por su naturaleza para una producción eficaz.
- ✓ Establecimiento de las condiciones materiales para que exista un trabajo efectivo de grupo entre las unidades organizacionales.

**Integración:** La función de integración o determinación de las necesidades de personal y asegurar su disponibilidad para la ejecución del trabajo, a través de:

- ✓ Análisis del trabajo para conocer las necesidades de capacitación del personal que se requiere.
- ✓ Reclutamiento, selección e inducción a la empresa, de las personas que se han identificado dentro de las unidades organizacionales que componen la estructura de la empresa.
- ✓ Desarrollo de los recursos humanos o sea el ofrecimiento de oportunidades a los empleados y trabajadores para que se desarrollen en sus propias capacidades en relación con las necesidades de la organización.

**Dirección:** se considera como la responsabilidad absoluta sobre la coordinación de los recursos humanos y del capital de una empresa, para satisfacer en forma optima al cliente, al accionista y al personal que la integra, en forma continua y perdurable.

La comunicación también forma parte esencial de la dirección, es el recurso del directivo para obtener entusiasmo, la creatividad y la lealtad de su personal, siempre y cuando la comunicación sea verdadera, consistente y seria.

### **Principios sobre la Motivación**

- ✓ Principio sobre la participación. La motivación necesaria para alcanzar resultados tangibles, tiende a aumentar, con el grado de participaciones las desiciones relativas a dichos resultados.

- ✓ Principio sobre la comunicación. La motivación necesaria para alcanzar resultados tangibles, tiende a aumentar si se mantienen a las personas al tanto de cualquier asunto que influya sobre dichos resultados.
- ✓ Principio de la Integración. La motivación necesaria para alcanzar resultados tangibles, tiende a aumentar si se conocen los recursos humanos, si se despierta un sentimiento de propiedad de la empresa y se estimula el trabajo en equipo.

La función de la dirección (Liderazgo) o sea la toma de responsabilidad sobre el comportamiento humano necesario para el cumplimiento de los objetivos y las metas de la empresa, a través de:

- ✓ Asignación a cada empleado y trabajador de las funciones y rutinas específicas encomendadas a ellos de tal manera que se delimite con precisión la responsabilidad de trabajo que tiene.
- ✓ Influir en las personas para que trabajen en la forma deseada o influir en su motivación.
- ✓ Establecimiento de la comunicación o sea la implantación de un flujo efectivo de ideas y de formación en todas las direcciones deseadas.
- ✓ Coordinación o sea la consecución de la armonía del esfuerzo del grupo hacia el cumplimiento de los objetos individuales y del grupo mismo.

### **Funciones de la Dirección.**

- ✓ Asegurarse de que el plan esté juiciosamente preparado y sea estrictamente ejecutado.
- ✓ Cuidar de que la estructura social y material sea consistente con los objetivos, recursos y requerimientos.
- ✓ Establecer una autoridad: Única, competente y vigorosa.
- ✓ Armonizar las actividades y coordinar los esfuerzos.
- ✓ Formular decisiones: Claras, precisas y correctas.
- ✓ Procurar la eficiente: selección de personal.
- ✓ Definir claramente las tareas.
- ✓ Fomentar la iniciativa y la responsabilidad.
- ✓ Remunerar satisfactoria y equitativamente al personal, en función de los servicios prestados.
- ✓ Sancionar las faltas y errores.
- ✓ Mantener la disciplina
- ✓ Vigilar el orden social y material.
- ✓ Mantener la unidad de mando.
- ✓ Cuidar la subordinación del interés particular al interés general.
- ✓ Mantener todo bajo control.
- ✓ Combatir el exceso de reglamentación, formalismo y papeleo.

Preceptos que facilitan la Dirección.

- ✓ Conocer a fondo a su personal
- ✓ Eliminar a los incapaces
- ✓ Conocer los convenios que ligan a la empresa y al personal
- ✓ Dar buen ejemplo
- ✓ Realizar inspecciones periódicas del cuerpo social
- ✓ Reunir a sus principales colaboradores en conferencias en que sean robustecidas la unidad de dirección y la coordinación de esfuerzos
- ✓ No absorberse en detalles
- ✓ Tender a que se reine en el personal, la actividad, la iniciativa y el desempeño

**Control:** se considera al control de una empresa como el establecimiento de sistemas que permitan detectar errores, desviaciones, causas y soluciones, de una manera expedita y económica. El control es un costo en si mismo, no es productivo en termino de dinero y esfuerzo, pero que, sin embargo, proporcione una visibilidad adecuada en forma periódica.

Los elementos a controlar, serán en forma genérica:

- ✓ Recursos
- ✓ Tiempo
- ✓ Calidad
- ✓ Cantidad

La función de control o sea asegurar el cumplimiento efectivo de los objetivos.

- ✓ Establecimiento de estándares de tal manera que tengamos normas de ejecución efectiva en la consecución de los objetivos y metas propuestas
- ✓ Evaluación de lo realizado o alcanzado contra la ejecución o resultados planeados o esperados. Esta evaluación implica necesariamente una medición de la ejecución
- ✓ Toma de desiciones correctivas para lograr el mejoramiento en la ejecución de los objetivos.

#### **4. ANALISIS GENERAL, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

De la práctica empresarial se puede resaltar entre otras cosas, que fue una experiencia muy importante en el campo del aprendizaje, específicamente en la parte de la construcción de puentes, como lo es el “Botón de Leyva”, ya que estas obras de gran magnitud no se presentan a la vuelta de la esquina, por tal motivo hay que sacarles el mayor provecho posible cuando se esta en ellas. Debido a esto me atrevo a lanzar ciertas recomendaciones tales como:

- En lo referente al estudio del subsuelo hay que tener sumo cuidado a la hora de realizar las respectivas investigaciones con los ensayos de laboratorio, ya que de estas pruebas depende la cimentación a escoger.
- Si se trata de trabajar con pilotes hay que seleccionar muy bien los equipos con los que se va a trabajar, para que de esta manera no se presenten problemas que puedan terminar con la paralización de la obra.
- Tener bien definido aspectos como: cronograma de actividades, precios de los materiales, etc; para no perder tiempo ni dinero.
- Velar por la seguridad industrial diaria del personal en la obra.
- Exigir el cumplimiento de todas las especificaciones contempladas en los planos y en el manual de interventoría del INVIAS.
- Si se tiene alguna duda en la lectura de un plano es importante aclararla con el jefe inmediato.
- La persona que realice la toma de muestra y ensayos debe estar capacitada para dicha actividad.
- Verificar personalmente los resultados de los ensayos.
- Bajo toda actividad de construcción velar por el bien de la comunidad y generar el menor impacto ambiental posible.
- Es recomendable aplicar un aditivo al concreto teniendo en cuenta el diseño de la mezcla en lugares donde se presenten altas temperaturas.
- Las recomendaciones y observaciones del desarrollo de la obra realizarlas siempre al ingeniero residente.

- Es indispensable que el operador y la maquinaria sean los idóneos para llevar a cabo las actividades programadas.
- Las brocas usadas en el proceso de pilotaje deben ser inferiores a su diámetro, puesto que si no al trabajar en rotación aumentarían el mismo.
- Se deben realizar más visitas de obra en el transcurso de la carrera ya que es muy diferente la práctica a la teoría y de esta forma adquirir más experiencia en la ejecución de la actividad.
- El desempeño como auxiliar de Ingeniería de un proyecto de construcción, es de gran responsabilidad, ya que de él dependen aspectos tan importantes, como la ejecución correcta del proceso de construcción y sus debidos controles de calidad.
- El control de calidad es uno de los aspectos más importantes en esta rama de la ingeniería civil, puesto que de él depende la correcta ejecución de la obra.

#### **APORTES A LA OBRA**

- Supervisión técnica a todas las actividades de la obra para generar menos inconvenientes.
- La lectura de planos al personal de mano de obra no calificada.
- El cumplimiento diario de la seguridad industrial.
- La seguridad de la obra bajo el control de la debida señalización.
- Aportar soluciones en lo referente a la construcción

## 5. BIBLIOGRAFIA

RESTREPO Y URIBE CONSULTORES. Estudio y diseño del puente Botón de Leyva en la carretera Mompox – El Banco. Bogota, 1998.

INGENIERIA Y MEDIO AMBIENTE LTDA, CONSULTORES. Plan de manejo ambiental para la construcción del puente Botón de Leyva en la carretera Mompox – El Banco. Bogota, 1998.

KOONTTZ, Harol & WEIHRICH, Heinz. Administración una perspectiva global, 11ª edición, México: Mc Graw Hill, 1999.

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA. Reflexiones sobre nuestros puentes, Programa Ingeniería XXI. Bogota: Escuela Colombiana de Ingeniería, 1995.

SUAREZ DIAZ, Jaime. Diseño de Cimientos. Bucaramanga: UIS, 1992.

MORENO LUNA, Daniel Mauricio & OSORIO BUSTAMANTE Edison. Comportamiento sísmico inelástico de pilas para puentes con gran profundidad de cimentación. Bucaramanga: UIS, 1999.