



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE PILOTES DE  
CONCRETO QUE TRABAJAN A FRICCIÓN  
ENFOCADO EN SUS CARACTERÍSTICAS  
GEOMÉTRICAS

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

P R E S E N T A :

**Amadeo Roberto Cázares Márquez**

MEXICO, D. F.

ABRIL DE 1993

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## INDICE

1. INTRODUCCION	1
2. CLASIFICACION DE PILOTES DE CONCRETO QUE TRABAJAN A FRICCION	3
2.1 Presentación.	3
2.2 Conceptos básicos sobre cimentaciones.	4
2.3 Señalización del pilote de fricción como una cimentación eficiente.	7
2.4 Tipos de pilotes de fricción.	11
2.5 Clasificación de los pilotes de concreto que son introducidos al suelo mediante hinca.	17
3. DIAGNOSTICO DE LOS FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA ELECCION DE LA SECCION GEOMETRICA MAS ADECUADA.	24
3.1 Señalización de los factores que intervienen en la elección.	24
3.2 El comportamiento estructural como factor interviniente.	25
3.2.1 Formulas dinámicas.	26
3.2.2 Formulas estáticas.	33
3.3 El costo como factor interviniente.	34

<b>3.4 Selección de condiciones iniciales en el análisis para la obtención de líneas comparación entre cada tipo de sección.</b>	<b>37</b>
<b>3.5 Análisis comportamiento estructural contra sección cuando se mantiene constante el área lateral del elemento.</b>	<b>38</b>
3.5.1 Sección circular.	39
3.5.2 Sección cuadrada.	42
3.5.3 Sección traingular.	44
<b>3.6 Análisis comportamiento estructural contra sección cuando se mantiene constante el volumen del elemento</b>	<b>46</b>
3.6.1 Sección circular.	47
3.6.2 Sección cuadrada.	49
3.6.3 Sección traingular.	52
<b>3.7 Análisis costo contra sección cuando se mantiene constante el área lateral del elemento.</b>	<b>54</b>
3.7.1 Sección circular.	55
3.7.2 Sección cuadrada.	59
3.7.3 Sección traingular.	62
<b>3.8 Análisis costo contra sección cuando se mantiene constante el volumen del elemento</b>	<b>65</b>
3.8.1 Sección circular.	66
3.8.2 Sección cuadrada.	70
3.8.3 Sección traingular.	73
<b>3.9 Tabla de resultados.</b>	<b>77</b>

4. INTEGRACION DE LOS FACTORES Y CONSTRUCCION DE CORRELACIONES QUE PERMITAN INFERIR EN LA EFICIENCIA DEL ELEMENTO: OBTENCION DE PARAMETROS.	79
4.1 Presentación.	79
4.2 Gráficas de relación comportamiento estructural contra sección.	80
4.3 Gráficas de relación costo contra sección.	87
4.4 Gráficas de relación comportamiento estructural contra costo para cada sección.	98
5. RESULTADOS	105
5.1 Capacidad de carga.	105
5.2 Costo.	107
5.3 Capacidad de carga contra costo según CFT.	107
5.4 Capacidad de carga contra costo según CRCDF.	109
5.5 Capacidad de carga contra costo según ambos criterios.	110
6. CONCLUSIONES.	112
7. BIBLIOGRAFIA	114

## 1. INTRODUCCION

Tal vez el objetivo básico de la Ingeniería sea el resolver determinados tipos de problemas, ayudándose para ello de las herramientas físicas y matemáticas que le dan a la misma el carácter de ciencia. Si pensamos que la anterior aseveración es cierta, podemos darnos cuenta que para resolver un problema puede haber infinidad de soluciones; pero solo unas cuantas son las más adecuadas o siendo estrictos, en ocasiones, solo es una la óptima. Y es esta último planteamiento donde surge la necesidad de ampliar el objetivo básico de la Ingeniería y establecer que esta disciplina además de dar los lineamientos que llevan a la solución del problema, deberá justificar que este resultado es el más óptimo que pudo haberse encontrado.

En el ámbito de la Ingeniería Civil, la idea de solución óptima esta asociada al máximo aprovechamiento de los recursos y es aquí donde el profesional de la materia se encuentra con los siguientes cuestionamientos: ¿Como saber si la solución que se plantea es la óptima? y/o ¿En que rangos es la más óptima y en cuales no?.

Este estudio presenta una modesta aportación a estas preguntas, ya que su objetivo surge con la idea de hacer un análisis comparativo de los pilotes de concreto que trabajan a fricción enfocandolo en sus características geométricas; relacionando para ello cada una de las secciones de los elementos con los factores que pueden llegar

a intervenir en la elección adecuada de la sección para un problema determinado y en que rangos comienza a variar esta solución dando paso a otra sección como alternativa adecuada.

Si el presente trabajo permite fortalecer la idea de que puede llegar a ser conveniente el establecer análisis previos a los problemas comunes en la Ingeniería; logrando con ello la obtención de nuevos panoramas o la confirmación y justificación de los establecidos, sin duda habrá un aspecto satisfactorio dentro del ámbitos de su justificación.

## 2. CLASIFICACION DE PILOTES DE CONCRETO QUE TRABAJEN A FRICCIÓN

### 2.1 Presentación.

Dentro de la Ingeniería Civil, uno de los lineamientos que le dan base, es el de crear estructuras que muestren un comportamiento satisfactorio bajo cargas de servicio, manteniendo un margen adecuado de seguridad.

En la búsqueda de cumplir la anterior aseveración, nos vemos en la obligación de considerar a una estructura eficiente, si sus partes así lo son; denotando a sus partes como superestructura aquella que engloba todo elemento estructural y que en conjunto proporcionan las condiciones de servicio que le dan razón de ser; y subestructura como aquella que conjunta a todo elemento destinado a soportar eficientemente a la superestructura, transmitiendo adecuadamente cargas de servicio y solicitudes externas a un estrato de suelo confiable y que recibe el nombre de Cimentación.

Dentro de esta división de partes, se puede señalar que el comportamiento satisfactorio de una estructura se rige del comportamiento de ambas partes, pero la subestructura colabora implícitamente en la eficiencia de la superestructura, garantizando la ausencia de algún colapso general en la estructura. Entonces dada la importancia de la cimentación para cualquier estructura, el problema se avoca a una elección óptima de esta, donde se siga



cumpliendo la aseveración inicial y que esta elección se base en las características del suelo y de la estructura a desplantar en este último.

## 2.2 Conceptos básicos sobre cimentaciones.

Este estudio consta de un análisis de uno de los tipos de cimentación existentes, que es el de pilotes de fricción. A manera de introducción a esta clase de pilotes, mencionaremos a continuación los tipos de cimentación usuales, el porque de su uso y algunas características de los mismos.

En forma general los tipos de cimentación más usados son:

- 1) Zapatas
  - a) Aisladas
  - b) Continuas
- 2) Losas
- 3) Cajones
- 4) Pilotes
  - a) De punta
  - b) De fricción

Existen algunas cimentaciones que no se mencionan, pero como se dijo con anterioridad, las cimentaciones señaladas son las más convencionales. Así que:

1.a) Zapatas Aisladas: Son apropiadas en terrenos de baja compresibilidad y cuando los asentamientos diferenciales entre columnas pueden ser incluidos en el diseño estructural del edificio sin incrementar el costo de la superestructura y consisten en una ampliación que se realiza en el apoyo de una columna a fin de reducir la presión de contacto con el terreno y no sobrepasar la presión máxima permisible.

1.b) Zapatas continuas: Son recomendables cuando los asentamientos diferenciales en zapatas aisladas son inaceptables, ya que aportan una continuidad estructural entre columnas que reduce este tipo de asentamientos. Son adecuadas, también, cuando las zapatas aisladas quedan muy cercanas. Además, con frecuencia, la excavación de zanjas continuas resulta más económica que la de pozos aislados. Son la ampliación que se realiza en el apoyo de un muro y su finalidad es la misma que la de las zapatas aisladas.

2) Losas: Son apropiadas cuando las cargas son tan grandes que las zapatas continuas, en la etapa de diseño, ocupan casi el 50 % del área destinada a la cimentación y resulta generalmente más económico el empleo de una losa continua. En este tipo de cimentación se emplea todo el espacio de terreno disponible, para transmitir las cargas de tal manera que la presión es mínima y como consecuencia el riesgo de falla local disminuye. También disminuyen los asentamientos debidos a la existencia de materiales deformables superficiales. Sin embargo, si los estratos deformables son

profundos, los asentamientos estimados no varían y pueden ser ligeramente mayores debido al mayor peso de la losa de cimentación y a la mayor área de influencia; por lo que su elección es condicionada a una previa consideración de esto último.

3) Cajón de cimentación: Son apropiados cuando las cargas exceden a las permitidas por una cimentación a base de losa o cuando el proyecto arquitectónico marca la presencia de sótanos o estacionamientos subterráneos. Tiene como objetivo principal compensar el total o una parte de la carga solicitada con el peso del suelo que existe en estado natural antes de construir el cajón. Esta compensación puede ser total o parcial según las cargas actuantes ( $W_e$ ) y el peso del suelo removido ( $W_s$ ), de la siguiente manera:

Si  $W_e > W_s$  estamos hablando de una cimentación parcialmente compensada y si  $W_e = W_s$ , de una cimentación totalmente compensada. En el primer caso se necesita otro sistema de cimentación que complemente al cajón; en el segundo caso tenemos un inevitable presencia de asentamientos o emersiones del edificio, haciendo de esta opción una alternativa no muy recomendable ni usual.

4a) Pilotes de punta: Cuando el terreno cercano a la superficie es muy compresible o poco resistente, o cuando las cargas son muy altas, resulta conveniente cimentar sobre pilotes para transmitir la carga hasta un horizonte más resistente y menos deformable. Son

elementos de sección transversal pequeña en comparación con su longitud y son, generalmente, hincados en el suelo hasta llegar a un estrato de suelo firme y sobre él apoyarse y descargar los pesos que están siendo transmitidos por él.

Un sistema de cimentación análogo a este, es el uso de pilas; la diferencia entre pilas y pilotes de punta es arbitraria ya que ambos son elementos de comportamiento estructural parecido y sólo difieren en dimensiones, formas y procedimientos constructivos.

4b) Pilotes de fricción: Estos elementos están destinados a transmitir cargas pero a diferencia de los anteriores, que la transmiten hasta la punta del pilote, los de fricción la transmiten a lo largo de ellos mediante la fricción producida entre elemento y suelo.

La diferencia entre ambos pilotes en cuanto a procedimiento constructivo, la marca su comportamiento como cimentación ya que obliga a que el pilote de fricción sea rugoso en sus caras longitudinales, para proporcionar más adherencia entre caras y comportarse eficientemente.

### 2.3 Señalización del pilote de fricción como una cimentación eficiente.

Los pilotes de fricción transmiten las cargas estructurales al

suelo, principalmente a lo largo de su superficie lateral. Se hincan por impactos o se cuelan en perforaciones previas; es más conveniente la hinca de ellos, ya que se logran mayores adherencias con métodos más simples que los utilizados para pilotes colados "in situ". La hinca de los pilotes se realiza en estratos con características mecánicas pobres, sin que su punta se apoye en las capas resistentes subyacentes. Se emplean normalmente cuando el estrato superficial blando tiene un gran espesor que hace antieconómico usar pilotes de punta o cuando la consolidación de este estrato induce fricción negativa sobre los pilotes de punta y provoca su emersión. Esta última condición es común en la zona lacustre de la Ciudad de México donde se presenta un fuerte hundimiento regional.

El aspecto que rige el éxito de la elección de el pilote de fricción como la alternativa adecuada, es el desarrollo óptimo de adherencia pilote-suelo y esto a su vez depende entre otras cosas, de los siguientes factores;

1) Forma del pilote: Los pilotes cónicos tienen una capacidad de carga mayor que los de sección constante (hasta de 100%, Blanchet 1987).

2) Rugosidad y textura del material constitutivo del pilote: Los pilotes hechos con materiales rugosos y drenantes movilizan mayor adherencia que los lisos (Rosenblueth, 1965).

3) Longitud del pilote: La adherencia media disponible tiende a decrecer con esta longitud (Meyerhof, 1976; Cooke, 1979).

4) Procedimiento constructivo: Los pilotes hincados movilizan una mayor adherencia que los colados en perforaciones previas. (Blenchet, 1980).

5) Tiempo transcurrido desde el hincado: La adherencia crece con el tiempo debido a la consolidación del suelo alrededor del pilote (hasta 60%; Cooke, 1979).

6) Velocidad de carga: La adherencia máxima desarrollada bajo cargas sostenida es del orden de  $2/3$  de la correspondiente a carga estática transitoria, la cual es a su vez menor que la adherencia disponible bajo carga dinámica (Rosenblueth, 1965; Hansbo, 1989).

7) Historia de carga y deformaciones: Al rebasarse el desplazamiento relativo pilote-suelo necesario para movilizar su valor máximo, la adherencia puede sufrir una disminución significativa.

Aunque la adherencia suelo-pilote es un factor de relevante importancia en el comportamiento eficiente del elemento, existen otros factores de los cuales, su no consideración puede llevar a diseños nada confiables. Dentro de los factores anteriores podemos

mencionar:

**Repartición de cargas:** Las excentricidades y la no uniformidad de las cargas provocan asentamientos diferenciales y generan un momento de volteo estático que debilita la construcción ante sollicitaciones dinámicas.

**Area en planta:** Los asentamientos instantáneos o diferidos inducidos por la presión losa-suelo son aproximadamente proporcionales a la raíz cuadrada del área afectada. En edificios de grandes dimensiones en planta, pequeños incrementos de presiones estáticas o dinámicas son suficientes para producir grandes asentamientos.

**Esbeltez del edificio:** Para edificios de altura determinada, el sobreesfuerzo máximo sobre la cimentación en condiciones sísmicas es aproximadamente proporcional a la esbeltez.

**Forma en planta:** Las formas irregulares pueden dar lugar a direcciones de mínima resistencia a los momentos de volteo.

**Rigidez de la cimentación respecto a la del suelo subyacente:** Esta rigidez conduce a concentraciones de cargas que favorecen fallas locales. Los cajones usuales en la ciudad de México generan concentraciones de cargas en las orillas.

Repartición en planta de los pilotes: Los incrementos de esfuerzos debidos a sismos deben tomarse en cuenta en la repartición de los pilotes.

De todo lo anterior podemos mencionar que el pilote de fricción nos permite obtener una cimentación eficiente; siempre y cuando exista un conocimiento adecuado del elemento, de la relación elemento-suelo y de las características de las solicitaciones a soportar.

#### 2.4 Tipos de pilotes de fricción.

En la búsqueda de obtener el pilote de fricción que represente la solución más factible en seguridad, tiempo de realización y economía; el Ingeniero Civil debe de conocer los diversos tipos de pilotes de fricción que, aun conteniendo todos ellos el mismo comportamiento estructural, varían en sus características generales, como lo son el procedimiento constructivo, la sección geométrica, economía, tipo de hincado o material del cual esta constituido. Es por esta razón que podemos encontrar cualquier cantidad de tipos de pilotes de fricción existentes y en donde cada uno de ellos representa una solución particular a un problema particular y es de esta relación donde se puede encontrar la opción adecuada.

Esta tesis intenta hacer un análisis de un pequeño grupo de todos los tipos de pilotes de fricción que existen, pero es conveniente



mencionar los tipos más usados y después rehacer el planteamiento del cual es el tipo de pilote del que se hará su análisis y el porque de esta elección.

Así pues, tenemos que existen pilotes de madera, acero, concreto, y mixtos, en donde en cada grupo existen varias clases. A continuación se menciona cada grupo y clases explicando algunas de las características de cada uno de ellos.

#### 1.- Pilote de madera:

Este grupo de pilotes fue usado con frecuencia en años anteriores pero hoy en día y en nuestro país su uso es nulo ya que para proveerse de ellos es necesaria la tala de grandes cantidades de árboles. Aun así mencionaremos que se emplean generalmente maderas de encino, haya, olmo, abeto y pino y que su uso estaba encauzado a pequeñas estructuras o a estructuras con solicitaciones no considerables. Eran eficientes si se colocaban en un medio acuoso o húmedo ya que la madera se conserva bien en este; podían ser es cuadrados o redondos, siendo la dimensión más usual 30 cm y llegado excepcionalmente a 50 cm.

Como mencionamos su uso en nuestro país es nulo y si se buscó hacer referencia a este tipo de pilotes es para hacer denotar como un elemento estructural puede ser eficiente, pero no ser solución económica o social, por lo menos en nuestro país.

### 3.- Pilotes de acero:

Este tipo de pilotes es el que posee la mayor velocidad de hincado, su capacidad de carga es adecuada pero no son factibles económicamente hablando.

En una forma general podemos decir que dentro de este grupo se encuentran:

a) Pilotes tubulares: Están formados por un tubo de acero cuyo espesor es variable, con diámetro hasta de 45 cm y se hacen trabajar a fricción haciendo el pilote abierto de punta. Estos pilotes se forman por secciones unidas con rosca, lo que facilita su uso en zonas ya edificadas.

b) Pilotes H: Son de formados por secciones H de acero y entre los pilotes de este tipo son los más comúnmente usados y al igual que los anteriores pueden ser hincados muy cerca de construcciones existentes.

c) Pilotes I: Son de características similares a los pilotes H, pero estos son mas versátiles ya que pueden hacerse con ellos una sección cuadrada, usando dos secciones I unidas por una placa en cada extremo aumentando con ello su capacidad de carga. La unión se realiza a base de soldadura a lo largo de toda la placa.

Todos estos tipos de pilotes no desarrollan una adherencia adecuada en suelos arcillosos, ya que la rugosidad del material constituyente es de valores pequeños. Lo que se utiliza en ocasiones para mejorar la adherencia o el contacto pilote-suelo es el uso de estos pilotes pero aunándoles una nueva característica que les permita tener mayor contacto pilote-suelo y que los transforma en pilotes electrometálicos. En una forma general el principio de estos pilotes se basa en hacer aumentar el area del mismo vista en planta, mediante la confinación del suelo que circunda el mismo. Esto se logra con la inducción de un gradiente eléctrico dentro del medio de confinación del suelo y los pilotes mismos, de la siguiente manera:

Ya hincados los pilotes metálicos se hacen conectar estos, con un ánodo (carga eléctrica positiva) proveniente de un generador de corriente directa, mientras que el otro polo (cátodo) se hace conectar al suelo subyacente. Al hacer accionar el generador, al estar induciendo la energía eléctrica dentro del medio, y dadas las leyes de las cargas eléctricas, mientras que en la parte del suelo subyacente se esta perdiendo la cohesión interna se esta presentando el fenómeno de confinamiento del suelo alrededor del pilote, lográndose con ello una alta adherencia en el sistema suelo-pilote aumentando con ello las fuerzas de fricción del mismo. Este método se aplica alternativamente hasta terminar de confinar perfectamente todos los pilotes que constituyen la cimentación.

El uso de este tipo de pilotes no es tan frecuente como se podría pensar, ya que las incertidumbres en el comportamiento eléctrico del medio, hace a este método no lo suficientemente confiable. Además, la práctica ha arrojado la información de que este tipo de cimentación requiere un control estricto de operación y mantenimiento; lo que ha propiciado que este método se aleje de la solución óptima de una cimentación.

### 3.- Pilotes de concreto.

En este tipo de pilotes, la clasificación se limita a dos tipos o clases de pilotes que son:

a) Pilotes precolados: Son los fabricados en serie y transportados al lugar de hincado. Los pilotes que se fabrican a pie de obra y solo se mueven al sitio de hincado, también pertenecen a este grupo.

En este tipo de pilotes se construyen juntas de unión cuando son requeridas grandes longitudes de el elemento. Son en ocasiones, pretensados con lo que adquieren menor peso y menores grietas durante su transporte, manejo e hincado.

Los pilotes pretensados tienen mayores ventajas ya que permiten mejores juntas de unión utilizándose los agujeros del pre-esfuerzo y al tener la probabilidad de hacer una junta de unión eficiente,

se amplia el uso de los mismos en zonas de diferentes profundidades de hincado.

b) Pilotes colados "in situ": Se construyen en un tubo que sirve de cimbra y que puede ser de cualquier material empleado para este fin. Su procedimiento consiste en extraer el material, normalmente mediante el uso de aire o agua a presión e ir introduciendo la cimbra por el espacio que esta siendo desalojado de la extracción del material, hasta llegar a la longitud de hincado. La cimbra puede ser retirada o dejarla "ahogada" en el suelo según sea el tipo de pilote, cimbra y procedimiento constructivo.

En este tipo de pilotes también puede hacerse un preesfuerzo al elemento; introduciendo tubos a la cimbra hincada que permitan anclar las barras de preesfuerzo a su parte inferior del pilote, colando el pilote y tensando la barra posteriormente.

#### 4.- Otros.

Para algunos casos muy particulares, se llegan a utilizar pilotes compuestos de dos materiales (generalmente concreto y acero), buscando maximizar la economía y capacidad de trabajo del elemento y rigiendo como capacidad de trabajo la del material con menor resistencia.

Dentro de este tipo de pilotes, de uso no tan frecuente, los de mayor recurrencia son los formados por la combinación de acero y de concreto; por ejemplo pilotes de sección H forrados con concreto.

De lo anterior podemos resumir que atendiendo el material que constituye al elemento, existen cuatro tipos de pilotes de fricción de madera, de acero, de concreto y mixtos. De los cuatro tipos, los mas usados son los de concreto debido a su facilidad de adquisición, construcción, bajo costo y aceptable resistencia al intemperismo y son las características señaladas anteriormente las que inducen a realizar un estudio sobre este tipo de pilotes.

Dentro de los pilotes de fricción que tienen al concreto como material constituyente, existen dos grupos que son los colados "In situ" y los que se hincan en el terreno; los primeros no presentan tan buena adherencia pilote-suelo como los segundos y debido a que esta es una característica básica para el comportamiento eficiente de la cimentación a base de pilotes de fricción, son los pilotes de concreto que son hincados en el suelo mediante energía mecánica, a los que se enfoca este estudio.

#### 2.5 Clasificación de los pilotes de concreto que son introducidos al suelo mediante hinca.

Los pilotes de concreto que trabajan a fricción pueden se clasificados de muchas maneras pero, tal vez más general y propicia

para nuestro estudio, sea la siguiente:

Atendiendo a su estructura.

Atendiendo a su procedimiento constructivo.

Atendiendo a su procedimiento de hincado.

1.- Atendiendo a su estructura.

Los pilotes de concreto siempre se arman para resistir algunos esfuerzos y por temperatura; por lo anterior desde este momento nos referimos a estos pilotes como pilotes de concreto armado.

Los pilotes de concreto armado son piezas monolíticas de sección poligonal constante (cuadrados, hexagonales, octagonales, triangulares, circulares y anulares). Las secciones más usadas generalmente son la cuadrada, la circular y la triangular con menos frecuencia.

Por otra parte algunas características del elemento independientes a la sección con que se trate son:

Estos elementos siempre se arman para resistir los esfuerzos a que están sometidos durante su transportación, elevación e hinca.

Refiriendonos a las solicitudes estos elementos no están sometidos a grandes esfuerzos de flexión ya que el suelo que los

circunda a su vez los confina; por lo que el ACI recomienda como cantidad de acero, el  $A_{min}$  que se obtenga de los cálculos clásicos de la Mecánica de materiales, además del uso de soldadura en las juntas de unión para darle continuidad al elemento.

Para facilitar su hincia basta con cortar perfectamente a escuadra los pilotes en la base, achaflanando la aristas.

## 2.- Atendiendo su procedimiento constructivo.

El colado de los pilotes se realiza en general en cimbras horizontales de madera o metálicas.

Las cimbras pueden ser individuales, pero se disponen generalmente de forma que varios tengan caras en común o mejor dicho caras comunes, de modo que se reduzca el espacio ocupado en la obra. Con pilotes de sección cuadrada es incluso posible, después de haber colado la serie de los pilotes impares, servirse de las caras laterales de estos pilotes para colar los pilotes pares pintando convenientemente estas caras.

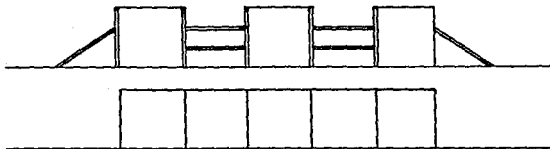


Figura 1



En los pilotes triangulares, el cimbrado es convencional pero presenta la ventaja de poder obtener pilotes de diferentes tamaños Fig. 2.

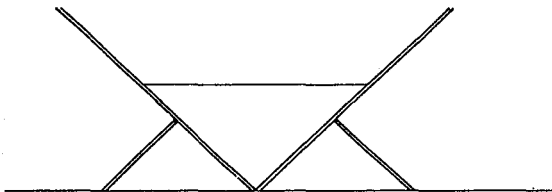


FIGURA 2

En los circulares, la cimbra se encarece debido a que como en el triangular solo se puede colar un pilote utilizando una cimbra a la vez, pero el molde es mas elaborado y complejo que el del triangular Fig. 3.



FIGURA 3

Para este tipo de pilotes, la cimbra puede ser horizontal o vertical; siendo la más usada la vertical (colado similar al de una columna).

Entre las características de estos elementos, que son independientes a la fabricación de los mismos, están:

Para poder levantar e izar los pilotes se provee de órganos metálicos adecuados en el concreto. El más sencillo es dejar "clavados" en el concreto tuercas en las que se atornillan, llegado el momento, tornillos que tienen en cabeza un estribo articulado, en el que pueden engancharse los dispositivos de la máquina de elevación.

Por otra parte, existen tornillos de paso especial que, colocados en el momento del colado y retirados después del principio del fraguado, pueden colocarse en las huellas dejadas por la rosca en el concreto.

### 3.- Atendiendo a su procedimiento de hincado.

Los pilotes se hincan con una masa metálica pesada que, cayendo sobre su cabeza un número de veces suficiente, los hunde hasta la profundidad deseada.

Es necesario un dispositivo de guía en la masa, que en general es una estructura compuesta de deslizaderas llamado martinete. En ciertos casos, sin embargo, el martinete puede reducirse a sus guías suspendidas, por ejemplo de una pluma de grúa y manteniendo a la distancia deseada en su parte baja mediante una simple suspensión de cable que sostiene a la masa, estando guiando al pilote por un marco rígido.

Se utilizan además accesorios de hinca como sombreretes o sombreros de hinca.

Tipos de hinca hay varios como la hinca por vibración, hinca hidráulica o hinca mecánica (mediante uso de masas); cada una de ellas para un caso particular del suelo a cimentar. Este estudio tratará con el tipo de hinca sencillo y convencional que es el de hincado mediante una masa de bloque sustentada por una pluma de grúa y manteniendo la distancia deseada mediante la suspensión de un cable de la pluma que sostiene la masa como mencionamos con anterioridad; y que se representa en la Figura 4.

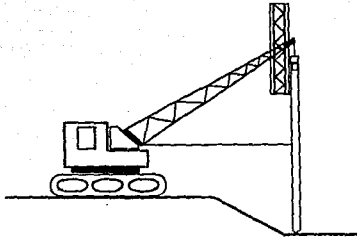


FIGURA 4

### 3. DIAGNOSTICO DE LOS FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA ELECCION DE LA SECCION GEOMETRICA MAS ADECUADA

#### 3.1 Señalización de los factores que intervienen en la elección.

Analizar si una cimentación sobre pilotes de fricción es eficiente, depende del análisis de los factores que correlacionados ente sí le dan a la cimentación esta misma característica.

Cuando se menciona el término eficiencia es necesario desglosar perfectamente la concepción de la misma y así tenemos que llamaremos eficiente para nuestro fin, al pilote de fricción que siendo una solución estructural, permita la realización de un rápido, fácil y económico procedimiento constructivo. Estas partes que conforman nuestro concepto de "eficiente", son los factores que infieren la elección adecuada de las características del pilote de fricción a cimentar o para ser más específicos; que infieren en la elección de la sección geométrica más adecuada.

Ahora bien, cada uno de estos factores son características independientes de un mismo pilote de fricción en cuestión; y es el englobamiento de estos lo que rige en el futuro comportamiento óptimo del elemento y en la eficiencia del mismo. Pero si no es solo un pilote en cuestión si no varios tipos a analizar, dicho englobamiento es particular a cada uno de los casos y la elección del pilote más eficiente es dependiente de una análisis comparativo

entre ellos.

Así, podemos ya decir que los factores directos en dicha elección son el comportamiento estructural del elemento y el costo del mismo. En donde, buscando obtener un parámetro, podemos poner uno asociado a otro con lo que obtendremos una línea de comparación entre cada una de las secciones a analizar.

### 3.2 El comportamiento estructural como factor interviniente.

Cuando se esta realizando la hinca de un pilote de concreto llega el momento en que este elemento no presenta ningún hundimiento al estarse sometiendo al procedimiento de hincado. Esto ocurre cuando el pilote al estarse deslizando dentro del suelo encuentra un macizo rocoso que le impide seguirse desplazando, situación que recibe el nombre de rechazo absoluto. Por otra parte, puede ocurrir que sin la existencia de un macizo rocoso se detenga la hinca cuando el hundimiento, bajo un golpe del martinete calculado tomando la media conseguida en una serie de diez golpes, ha alcanzado un valor fijado a priori que se llama rechazo relativo.

Si se ha presentado un rechazo absoluto, la carga que puede llegar a soportar este pilote, se calcula como la de un pieza prismática larga comprimida. Si lo que se ha presentado es un rechazo relativo, la carga que puede llegar a soportar se compone del rozamiento lateral y el efecto de punta en proporciones difíciles

de fijar exactamente.

De lo anterior podemos deducir que es el rechazo relativo al que debe de asociarse el comportamiento del pilote de fricción que haya sido diseñado para trabajar en dichas condiciones.

Y es de la carga que puede llegar a recibir el pilote de fricción, cuando este ha llegado al rechazo relativo, la que nos interesa determinar.

### 3.2.1 Formulas dinámicas.

Las formulas dinámicas utilizan las medidas realizadas durante la hincada.

El principio de cálculo es el siguiente: Se expresa que la energía producida por el martillo en su caída sobre el pilote, disminuida en la energía perdida durante la caída, es igual al trabajo necesario par hundir el pilote.

La energía perdida durante la caída se divide en:

- a) La perdida por el choque, ya que el martillo rebota deformando y calentandose.
- b) La perdida de la deformación elástica del pilote, que es restituida después del choque.

c) La disipada en las vibraciones de todo tipo (del pilote, del martinete, del martillo y del suelo).

d) La perdida en las deformaciones permanentes del pilote o del suelo.

La estimación de las perdidas de energía conduce a cifras muy divergentes sin embargo se ha establecido despreciar en forma general los casos c y d.

Generalmente se admite que la resistencia total de un pilote es la suma de la resistencia de su punta y del rozamiento lateral del terreno sobre su fuste; lo que es aparentemente exacto pero si se suman los esfuerzos necesarios para obtener el punzonamiento del terreno por la punta solamente a los necesarios para hacer deslizar el fuste supuesto aislado de la punta, parecen obtenerse resultados alejados de la verdad, pues la tierras rechazadas hacia arriba para dejar el espacio necesario a la progresión de la punta aumentan el rozamiento lateral.

Como para las formulas dinámicas, es necesario en este caso aplicar hipótesis simplificativas; lo más importante es que a falta de conseguir una solución rigurosa, se conozca el orden de magnitud de la aproximación y que, además del error admitido, este se produzca del lado de la seguridad.

Indicaremos que no hay ninguna formula dinámica válida en todas las



ocasiones y que es necesario calibrarla en cada caso hincando pilotes de ensayo que se sometán a cargas.

Todas las formulas dinámicas determinan el rechazo relativo en función de la fuerza o carga a conseguir, algunas de estas son:

Formula holandesa.

Es la más sencilla y la más empleada y tiene la forma:

$$F = \frac{M^2 h}{K e (M + P)} \dots\dots\dots 1$$

donde

F = Carga a soportar en kg.

P = Peso del pilote en Kg.

M = Peso del martillo en Kg.

h = Altura de caída del martillo en m.

e = Hundimiento medio en m por golpe calculado bajo una serie de diez golpes.

k = Un coeficiente de seguridad. Generalmente k = 6

Formula de Hiley:

Surge de la Holandesa y tiene la forma:

$$F = \frac{M^2}{K e (M + P)} (h - h_0) \dots \dots \dots 2$$

donde

$$h_0 = \frac{h_1 e_2 - h_2 e_1}{h_2 - h_1}$$

$e_1$  Es el hundimiento correspondiente a una caída del martillo de una altura  $h_1$ .

$e_2$  Es el hundimiento correspondiente a una caída del martillo desde una altura  $h_2$ .

Se admite que para la formula de Hiley, que tiene en cuenta en cierta medida la elasticidad del pilote por su término de corrección, el coeficiente de seguridad K puede reducirse a 3.

Formula general de hinca o de Terzaghi:

Se escribe en la forma:

$$F = \frac{S E}{K L} \left[ -e + \sqrt{a^2 + \frac{2 L M (M + P \rho^2)}{S E (P + M)} h} \right] \dots \dots \dots 3$$

donde

E. Coeficiente de elasticidad del concreto  $E = 2 * 10^6 \text{ ton/m}^2$

S Es la sección del pilote en  $\text{m}^2$ .

L La longitud hincada en m.

$\rho$  Coeficiente de restitución, teniendo en cuenta la elasticidad pilote-martillo;  $\rho = 0.5$  para concreto armado.

e,h,P,M Mismos que en formula Holandesa con  $K = 3$ .

Formula de Wellington.

Esta formula muy simplificada se usa en el caso de un martillo seco.

$$F = \frac{M h}{K (e + 0.025)} \dots\dots\dots 4$$

tomando para K valores de 4 a 8 según el terreno.

Las tres primeras formulas son usadas generalmente por países europeos; mientras que es la última la que generalmente se usa en América. Todas dan fuerza portantes o capacidades de carga que comparadas con las obtenidas por ensayos estáticos bajo cargas directas, son en general más bien prudentes en terrenos arenosos o calizos.

En terrenos arcillosos (caso de la ciudad de México) se observan tales anomalías que es prudente admitir que no hay ninguna fórmula verdaderamente aplicable, recomendándose ensayos de carga directos para la obtención de resultados confiables. Para el caso de obtener un parámetro que se pueda correlacionar con dichos ensayos y que permita obtener una capacidad de carga a priori, cualquiera de las fórmulas anteriores puede ser utilizada.

El RCDF-87 evalúa la capacidad de carga de los pilotes de fricción como:

$$C_f = A_l f F_r$$

donde

$C_f$  Capacidad por fricción en (ton)

$A_l$  Área lateral del pilote

$f$  Adherencia lateral media pilote-suelo (ton / m<sup>2</sup>)

$F_r$  Factor de resistencia,  $F_r = 0.7(1-S/2)$

$S$  Relación entre los máximos de la sollicitación sísmica y la sollicitación total que actúan sobre el pilote.

además

$$f = \alpha C_u$$

donde

- $C_u$  Resistencia al corte del suelo en condiciones no drenadas.
- $\alpha$  Coeficiente función de las características del suelo y del pilote

Sin embargo varios autores consideran que la adherencia debe estimarse en términos de esfuerzos.

$$f = K \tan \delta V_v$$

donde

- $V_v$  Presión vertical efectiva a la elevación considerada.
- $K$  Coeficiente de empuje horizontal.
- $\delta$  Angulo de fricción pilote-suelo.

Buscando la simplificación del cálculo de capacidad de carga por fricción, se puede utilizar una tabla construida por Tomlinson en la que relaciona la cohesión con el factor de adherencia ( $f_u$ ).

TABLA 1

Pilotes de concreto	Consistencia de la arcilla	Cohesión (ton/m <sup>2</sup> )	Adherencia (ton/m <sup>2</sup> )
	blanda	0----4	0---3.5
	firme	4----8	3.5---4.5
	dura	8----15	4.5----7

### 3.2.2 Formulas estáticas.

Las formulas estáticas se basan en el equilibrio teórico de las tierras y se establecen partiendo de los datos de la mecánica del suelo.

Se suponen conocidas, por sondeos previos, las características del suelo tales como la densidad, ángulo de rozamiento interno, cohesión y coeficiente de rozamiento del pilote con el terreno.

Las formulas estáticas sólo deben ser utilizadas por un ingeniero hábil que compara sus resultados con los de experiencia.

Formula de Dorr.

$$F = \gamma S h \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) + \gamma f y ( 1 + \operatorname{tg}^2 \phi ) \frac{h^2}{2} \dots \dots \dots 6$$

donde

El primer término corresponde al efecto de punta.

El segundo término corresponde al rozamiento.

$\gamma$  Es la densidad del terreno.

$S$  Es la sección del pilote.

$h$  La longitud del pilote.

$f$  El rozamiento del pilote con el terreno.

$y$  el perímetro del pilote.

### 3.3 Costo como factor interviniente.

Dentro de la construcción, la elaboración de cualquier trabajo genera una erogación que queda conformada por la suma de los costos por material, mano de obra y maquinaria a utilizar.

La conjugación de dichos insumos llega a determinar lo que en el ámbito de la construcción se conoce como costo directo y es este costo el que se busca optimizar, no con ello demeritando el correcto funcionamiento de la estructura a realizar.

El caso de los pilotes de fricción no es excluyente de la anterior aseveración y es por esto que el costo es también un factor interviniente en la construcción del pilote en una forma general y en forma particular de la elección de la sección, cumpliendo con el

comportamiento estructural deseado y que sea económica para que pueda recibir el nombre de sección adecuada.

Buscando diagnosticar cuales serían las secciones idóneas a analizar en este estudio, confrontemos los insumos mencionados anteriormente con las secciones usadas convencionalmente para pilotes de fricción y aquellas que tengan características congruentes entre sección e insumos serán la secciones a analizar.

a) Material:

El material participante es concreto con  $f'c \geq 250 \text{ kg/cm}^2$  y acero a base de  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ ; por lo que cualquier sección a analizar llámese triangular, hexagonal, octagonal, cuadrada o circular puede realizarse sin que el material que va a constituirlo presente inconvenientes para ello.

B) Mano de obra:

Si analizamos la mano de obra que interviene en la construcción de un pilote de concreto armado, nos damos cuenta que el procedimiento de trabajo es diferente para cada sección en particular. En el aspecto del cimbrado, si la sección es triangular o cuadrada esta puede elaborarse con mano de obra convencional pero si se trata de otro tipo de sección el cimbrado se tendría que cambiar a cimbrado metálico generalmente, lo que haría que interviniera otro tipo de



mano de obra (fabricación del molde).

Aun así, este no es un factor determinante pero el armado del elemento si lo es; ya que armar transversalmente un elemento se sección cuadrada, circular o triangular es menos complicado y más usual que el armado de una sección poligonal diferente, donde la mano de obra se incrementaría forzosamente en término de cantidad y calidad. Saliéndose, con ello, del aspecto de uso de mano de obra convencional en la fabricación del pilote.

De lo anterior se desprende que para este insumo, las secciones más adecuadas serían la triangular, cuadrada y circular.

#### C) Equipo:

Dadas las características del hincado de este tipo de elementos, la sección del elemento es independiente al uso de cualquier equipo; es decir el tipo de sección no interfiere primordialmente en la elección del equipo hincado. Por este motivo y dada la versatilidad posible del equipo, para este insumo existe indiferencia a la sección a elegir.

Después de haber confrontado los insumos con los tipos de secciones utilizables en pilotes de fricción, se desprende que son las secciones circular, triangular y cuadrada las que se apegan a los lineamientos de convencionalidad de cada insumo y las convierte en

las secciones adecuadas a analizarse en nuestro estudio.

### **3.4 Selección de condiciones iniciales en el análisis para obtener líneas de comparación entre cada tipo de sección.**

Dado que el comportamiento estructural del elemento así como el costo inherente en la fabricación del mismo, fueron diagnosticados como factores intervinientes en la elección de la sección geométrica adecuada, es obvio que cualquier análisis que arroje juicios acerca de cual es la sección óptima y en que casos así ocurre, deberá partir de la confrontación de estos factores con cada una de las secciones.

Así tenemos, que si buscamos hacer un análisis comparativo de las secciones utilizadas convencionalmente, en los pilotes de fricción, contra su comportamiento estructural nos damos cuenta de la necesidad de crear ciertas condiciones iniciales que permitan obtener una línea de comparación entre ellas. Como uno de los factores contra los que se van a analizar las secciones es el comportamiento estructural y este último esta en función directa al área lateral del pilote, podemos establecer como primera condición inicial la siguiente:

1a. Condición inicial: perímetro constante.

"Se establece como una constante al perímetro de cada una de las

secciones a analizar".

Como el segundo factor contra el que se va analizar cada sección es el costo y este podemos decir que esta en función del volumen del elemento se establecerá la segunda condición inicial como:

2a condición inicial: Volumen constante.

"Se fija el volumen del elemento para cada una de las secciones a analizar".

Ya obtenidas las condiciones que nos permiten obtener dos líneas de comparación y la posibilidad de correlacionarlas posteriormente podemos iniciar el análisis para cada una de estas condiciones.

### **3.5 Análisis comportamiento estructural Vs sección cuando se mantiene constante el área lateral del elemento.**

Si el perímetro de la sección es fijo y el área lateral del pilote es la que proporciona la capacidad de carga para un mismo tipo de suelo en cuestión, se fijará la longitud del elemento con lo que en sí, el área lateral media del pilote queda como constante.

Por otra parte las formulas a utilizar, estableciendo que las características del suelo son idénticas para cada sección; son la formula holandesa, la de Terzaghi y la que proporciona RCDF-87

junto con la tabla I que relaciona cohesiones con adherencia.

### 3.5.1 Comportamiento estructural Vs sección circular cuando P=cte.

Condiciones particulares:

- a) Se establece una longitud de hincado de 10 m.
- b) El perímetro de la sección será de 2 m.
- c) Se tendrán como datos (obtención de ensayos reales) las siguientes variables:

Peso del martillo,  $M = 2000$  kg.

Altura de caída del martillo,  $h = 3$  m.

Hundimiento medio,  $e = 0.032$  m.

Análisis

- a) formula holandesa:

$$F = \frac{M^2 h}{K e (M + P)}$$

donde:

Peso del pilote (p):

Material constituyente: concreto armado,  $P_v = 2400 \text{ kg/cm}^2$

Volumen:

$$\text{perimetro} = 2 \text{ m}$$

$$D = 0.64 \text{ m}$$

$$\text{Vol} = 10 * \pi * (0.64)^2 = 3.2 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso} = 7720 \text{ kg}$$

Coficiente de seguridad  $K = 6$

Valuando  $F$  se obtiene:

$$F = 6430 \text{ kg}$$

b) Formula de Terzaghi

$$F = \frac{SE}{KL} \left[ -e + \sqrt{e^2 + \frac{2LM(M + P\rho^2)h}{SE(P + M)}} \right]$$

donde:

sección del pilote (s)

$$\text{Area: } A = \frac{\pi (0.64)^2}{4} = 0.322 \text{ m}^2$$

Coficiente de elasticidad del concreto:  $E = 2 \cdot 10^6 \text{ ton/m}^2$

Coefficiente de restitución para concreto armado  $\rho = 0.5$

Coefficiente de seguridad  $K = 3$

Valuando F se obtiene:

$$F = 5245 \text{ Kg}$$

c) RCDF-87

$$C_f = A_1 f F_r$$

donde:

Factor de resistencia ( $f_r$ )

$$F_r = 0.7 ( 1 - S/2 )$$

considerando  $S = 1$  (caso critico)

$$F_r = 0.35$$

Adherencia lateral media pilote suelo ( $f$ ):

Considerando una cohesión media pilote-suelo (dato de un ensayo real de características análogas) a lo largo de 10 m de hincado de  $c = 2 \text{ ton/m}^2$ , de la tabla I se obtiene que  $f_a = 1.75 \text{ ton/m}^2$ .

Valuando la capacidad de carga:

$$C_r = 12250 \text{ kg}$$

3.5.2 Comportamiento estructural Vs sección cuadrada cuando P = cte.

Condiciones particulares: Idem que en sección circular

Análisis

a) formula holandesa:

$$F = \frac{M^2 h}{K e (M + P)}$$

donde:

peso del pilote (p):

Material constituyente: concreto armado,  $P_v = 2400 \text{ kg/cm}^2$

Volumen:

perímetro,  $4L = 2 \text{ m}$

$L = 0.5 \text{ m}$

$\text{Vol} = 10 * 0.5^2 = 2.5\text{m}^3$

Peso = 6000 kg

Coefficiente de seguridad  $K = 6$

Valuando F se obtiene:

$$F = 7812.5 \text{ kg}$$

b) Formula de Terzaghi

$$F = \frac{SE}{KL} \left[ -e + \sqrt{e^2 + \frac{2LM(M + P\rho^2)h}{SE(P + M)}} \right]$$

donde:

sección del pilote (s)

$$S = 0.25 \text{ m}^2$$

Coefficiente de elasticidad del concreto:  $E = 2 \cdot 10^6 \text{ ton/m}^2$

Coefficiente de restitución para concreto armado  $\rho = 0.5$

Coefficiente de seguridad  $K = 3$

Valuando F se obtiene:

$$F = 4893.5 \text{ Kg}$$

c) RCDF-87

$$C_f = A_f F_f$$



Factor de resistencia  $F_r = 0.35$

Adherencia lateral media  $f = 1.75$

Calculando la capacidad de carga:

$$C_f = 12250 \text{ kg}$$

3.5.3 Comportamiento estructural Vs Sección triangular cuando  
 $P = \text{cte.}$

Condiciones particulares: Idem que en sección circular.

Análisis:

a) Formula holandesa:

$$F = \frac{M^2 h}{K e (M + P)}$$

donde :

Peso del pilote (P):

Peso del pilote (P):

Volumen:

Perímetro,  $3L=2$  m

$L = 0.67$  m

$Vol = 10 * (0.433) * (0.67)^2 = 1.94$  m<sup>3</sup>

Peso =  $2400$  kg/m<sup>3</sup> \*  $1.94$  m<sup>3</sup> =  $4665$  kg

Coefficiente de seguridad  $k=6$

Valuando F se obtiene

$$F = 9377 \text{ kg}$$

b) Fórmula de Terzaghi:

$$F = \frac{S E}{K L} \left[ -e + \sqrt{e^2 + \frac{2 L M (M + P \rho^2) h}{S E (P + M)}} \right]$$

donde:

Sección del pilote (S)

$$S = 0.194 \text{ m}^2$$

Coefficiente de elasticidad del concreto  $E = 2 * 10^6$

Coefficiente de restitución para concreto armado  $\rho = 0.5$

Coefficiente de seguridad  $K = 3$

$$F = 4561 \text{ kg}$$

c) RCDF-87

$$C_f = A_i f F_r$$

donde:

Factor de resistencia  $F_r = 0.35$

Adherencia lateral media =  $1.75 \text{ ton / m}^2$

Valuando la capacidad de carga:

$$C_f = 12250 \text{ kg}$$

### 3.6 Análisis comportamiento estructural Vs sección cuando se mantiene constante el volumen del elemento.

Este análisis es similar al anterior pero dado que las formulas utilizadas para valuar la capacidad de carga usan el peso como variable, la misma variará en rangos importantes a considerar en este estudio. Es importante utilizar las mismas formulas que en el análisis anterior, así como las mismas condiciones iniciales para poder seguir obteniendo el mismo parámetro de comparación.

#### 3.6.1 Comportamiento estructural Vs sección circular cuando $Vol=cte$

### 3.6.1 Comportamiento estructural Vs sección circular cuando Vol=cte

Condiciones iniciales:

- a) Se establece una longitud de hincado de 10 m.
- b) El volumen del elemento será de 2.4 m<sup>3</sup>
- c) Se tendrán como datos los mismos que en análisis para la sección circular:

Peso del martillo M = 2000 kg

Altura de caída h = 3 m

Hundimiento medio e = 0.032 m.

Análisis:

a) formula holandesa:

$$F = \frac{M^2 h}{K e (M + P)}$$

donde:

Peso del pilote (P):

Volumen = 2.4 m<sup>3</sup>

Peso = 2.4 m<sup>3</sup> \* 2400 kg/m<sup>3</sup> = 5760 kg

Coefficiente de seguridad  $K = 6$

Valuando  $F$  se obtiene:

$$F = 8054 \text{ kg}$$

b) Formula de Terzaghi:

$$F = \frac{SE}{KL} \left[ -e + \sqrt{e^2 + \frac{2LM(M + P\rho^2)h}{SE(P + M)}} \right]$$

donde:

Sección del pilote ( $S$ ):

$$S = 0.24 \text{ m}^2$$

coeficiente de elasticidad del concreto  $E = 2 * 10^6$

Coefficiente de restitución para concreto armado  $\rho = 0.5$

Coefficiente de seguridad  $K = 3$

Valuando  $F$  se obtiene:

$$F = 4839 \text{ kg}$$

c) RCDF-87

$$C_f = A_l f F_r$$

donde:

Factor de resistencia  $F_r = 0.35$

Adherencia lateral media  $f = 1.75 \text{ ton} / \text{m}^2$

Area lateral ( $A_l$ ):

Area de la sección:

$$A_s = \frac{\pi D^2}{4} = (Vol / Long) = 0.24 ; D = 0.55 \text{ m}$$

$$A_l = \pi * D * Longitud$$

$$A_l = 17.36 \text{ m}^2$$

Valuando  $C_f$  se obtiene:

$$C_f = 10637 \text{ kg}$$

3.6.2 Comportamiento estructural Vs sección cuadrada cuando vol.=cte.

Condiciones particulares: Idem que en sección circular.

Análisis:

a) Formula holandesa.

$$F = \frac{M^2 h}{K e (M + P)}$$

donde:

Peso del pilote (P):

Volumen = 2.4 m<sup>3</sup>

Peso = 2.4 m<sup>3</sup> \* 2400 kg/m<sup>3</sup> = 5760 kg.

Coefficiente de seguridad K = 6

Valuando F se obtiene:

$$F = 8054 \text{ kg.}$$

b) Formula de Terzaghi.

$$F = \frac{S E}{K L} \left[ -e + \sqrt{e^2 + \frac{2 L M (M + P \rho^2) h}{S E (P + M)}} \right]$$

donde:

Sección del pilote (S):

Volumen = 2.4 m<sup>3</sup> ; S = 0.24 m<sup>2</sup>

Coefficiente de elasticidad del concreto E = 2 \* 10<sup>6</sup>

Coefficiente de restitución para concreto armado  $\rho = 0.5$

Coefficiente de seguridad K = 3

Valuando F se obtiene:

$$F = 4839 \text{ kg.}$$

c) RCDF-87

$$C_f = A_1 f F_r$$

donde:

Factor de resistencia  $F_r = 0.35$

Adherencia lateral media  $f = 1.75 \text{ ton / m}^2$

Area lateral ( $A_1$ ):



Area de la sección:

$$A_1 = L^2 = (\text{vol}/\text{long}) = 0.24 \text{ m}^2; L = 0.49 \text{ m}$$

$$A_1 = 4 L * \text{longitud}$$

$$A_1 = 19.6 \text{ m}^2$$

Valuando  $C_r$  se obtiene:

$$C_r = 12000 \text{ kg.}$$

3.6.3 Comportamiento estructural Vs sección triangular cuando vol.=cte.

Condiciones particulares: Idem que en sección circular.

Análisis:

a) Formula holandesa.

$$F = \frac{M^2 h}{K e (M + P)}$$

donde:

Peso del pilote (P):

$$\text{Volumen} = 2.4 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso} = 2.4 \text{ m}^3 * 2400 \text{ kg/m}^3 = 5760 \text{ kg.}$$

Valuando F se obtiene:

$$F = 8054 \text{ kg.}$$

b) Formula de Terzaghi.

$$F = \frac{S E}{K L} \left[ -e + \sqrt{e^2 + \frac{2 L H (M + P \rho^2) h}{S E (P + M)}} \right]$$

donde:

Sección del pilote (S):

Volumen = 2.4 m<sup>3</sup> ; S = 0.24 m<sup>2</sup>

Coficiente de elasticidad del concreto E = 2 \* 10<sup>6</sup>

Coficiente de restitución para concreto armado  $\rho = 0.5$

Coficiente de seguridad K = 3

Valuando F se obtiene:

$$F = 4839 \text{ kg.}$$

c) RCDF-87

$$C_f = A_1 f F_r$$

donde:

Factor de resistencia  $F_r = 0.35$

Adherencia lateral media  $f = 1.75 \text{ ton} / \text{m}^2$

Area lateral ( $A_l$ ):

Area de la sección:

$A_s = 0.433 a^2 = (\text{vol}/\text{long}) = 0.24 \text{ m}^2$  ;  $a = 0.74 \text{ m}$

$A_l = 22.33 \text{ m}^2$

Valuando  $C_r$  se obtiene:

$$C_r = 13680 \text{ kg}$$

### 3.7 Análisis costo Vs sección cuando se mantiene constante el área lateral del elemento.

El hacer el análisis de cada una de las secciones contra su costo obliga a elaborar un precio unitario para cada uno de los casos ya que cada uno posee características propias que harán variar su costo de fabricación.

El precio unitario esta formado por los costos originados por mano de obra equipo y material, participando de la siguiente manera:

El equipo se hará participar considerando solo el costo asociado a la perforación previa que servirá como guía para la hincada del pilote; ya que se considera que el costo del equipo de hincado,

puede hacerse invariable para cada tipo de sección para la actividad propiamente dicha.

En cuanto a mano de obra se considera que la interviniente en el proceso de hincado es la misma para cada tipo de sección pero en el armado del pilote se hace participar un rendimiento particular a cada tipo de sección con lo que se ajustan las diferencias entre cada una de ellas. Para los aspectos de cimbra y colado se considera que las diferencias entre cada tipo de sección son mínimas, es decir que el rendimiento no variará significativamente, al variar la sección.

Analizando el costo del material se observa que se contemplarán los costos formados por material (concreto y acero) y cimbra principalmente.

### 3.7.1 Análisis costo Vs sección circular cuando $Per. = cte$

Condiciones iniciales.

- a) Se realizara el precio unitario de un solo pilote.
- b) Se supone que existe un lugar físico en la obra donde se podrá realizar la fabricación del elemento.
- c) No se manejaran costos reales, sino costos en unidades monetarias (um).

d) Se considera que el uso de tensores y soportes para cimbra, es apreciablemente equivalente entre cada una de las secciones por lo que no se hará participar.

e) Se considera  $f'c = 250$  y  $f_y = 4200$  kg/cm<sup>2</sup> y un

$$A_{s_{min}} = \frac{0.7 \sqrt{\frac{f'_c}{f_y}} A_c}{f_y}$$

donde:

$A_c$  = Aconcreto-Arecubrimiento; (recubrimiento = 2.5 cm)

f) Se considera que el pilote al estar confinado, proporciona un  $V_o < V_{cr}$  por lo que solo requiere acero transversal mínimo.

Análisis:

A) Cimbrado:

Dadas las condiciones de cimbra para esta sección, se tiene:

Perímetro = 2m; Area = Perímetro \* longitud + 2 (Area sección)

$$2 * 10 + 2(0.322) = 20.6 \text{ m}^2$$

B) Acero:

Acero longitudinal:

$$A_{s_{min}} = \frac{0.7 \sqrt{f'_c} A_c}{f_y}$$

$$A_c = \frac{(63 - 5)^2}{4} = 2642 \text{ cm}^2$$

$A_{min} = 7 \text{ cm}^2$  ; peso del acero = 60 kg (6 barras # 4)

Acero transversal:

Generalmente este armado es a través de zunchos pero podemos considerar que en términos de peso es equivalente a un armado convencional. Pensando en E #3 @ d/2 a lo largo de todo el elemento se cumple del lado de la seguridad el RCDF-87 para  $V_u > V_u$  (ver inciso f de condiciones iniciales).

Como d = 63 cm; E @ 30 cm.

peso de acero : 30 estribos del # 3

perímetro del estribo :  $\pi (0.63 - 0.05)$

peso de estribos: 31 kg.

Peso total de acero = 91 kg.

C) Concreto:

Volumen = 3.2 m<sup>3</sup>

**Resumen:**

	Uso	Costo (um/unidad)	costo
Cimbra 20.6 m <sup>2</sup>	10	28.0	58
Armado 91.0 kg	1	2.2	200
concreto 3.2m <sup>3</sup>	1	330.0	1056
			1314 um

um unidad monetaria

**Equipo:**

Dentro de el proceso de hincado de un pilote se realiza una perforación de aproximadamente la mitad de la longitud a hincar, que permita servir como guía al hincado del pilote. Para el caso de este tipo de sección, la perforación previa posee la misma área que la de la sección del pilote a hincar. Una perforación de diámetro de 63 cm y longitud de 5 m, se estima su costo en 194 um con lo que queda conformado el costo por uso de equipo.

**Mano de obra:**

Este aspecto del P.U. es en ocasiones uno de los factores que lo encarece; motivado al mal manejo de el personal destinado a una u otra actividad. Si se considera que el manejo de personal para la

construcción de un pilote es óptimo, podemos pensar en un rendimiento de 100 kg/jor. (considerando una cuadrilla de trabajo) para el proceso de armado de esta sección, quedando el costo conformado por:

Costo por jornal : 57 um, Rendimiento 100 kg/jor.

peso del acero = 91 kg

costo por mano de obra : 52 um.

Resumen:

Material	1314.00
Mano de obra	52.00
Equipo	194.00
Costo total	1560.00

3.7.2 Análisis costo Vs sección cuadrada cuando el perímetro es cte.

Condiciones iniciales: Idem que en sección circular.

Análisis:

Material:



A) Cimbrado:

Dadas las condiciones de cimbrado de este tipo de sección se tiene que en promedio para cada pilote se utiliza una sola hoja de cimbra.

$$\text{Area} = 10 * 0.5 = 5 \text{ m}^2$$

B) Acero:

Acero longitudinal:

$$A_{s_{\text{long}}} = \frac{0.7 \sqrt{f_c} A_c}{f_y}$$

$$A_c = (50 - 5)^2 = 2025 \text{ cm}^2$$

$$A_{s_{\text{long}}} = 5.4 \text{ cm}^2; \text{ peso del acero} = 47 \text{ kg (3 barras \#4 y 3 \#3)}$$

Acero transversal:

Idem que en la sección circular, E #3 @ L/2

como L = 0.5 m; E #3 @ 25 cm.

Peso del acero: 40 estribos del #3

$$\text{Perímetro del estribo} = 4 * (0.5 - 0.05) = 1.8 \text{ m}$$

Peso de estribos = 40 kg

Peso total del acero = 87 kg

C) Concreto:

Volumen = 2.5 m<sup>3</sup>

Resumen:

	Uso	Costo (um/unidad)	Costo
Cimbra 5.0 m <sup>2</sup>	5	28.0	28.0
Armado 87.0 kg	1	2.2	192.0
Concreto 2.5 m <sup>3</sup>	1	330.0	825.0
			1045.0 um

Equipo:

La perforación previa para este equipo de sección es de 0.71 m de diámetro, ya que este proporciona la circunferencia capaz de envolver a una sección cuadrada de lado de 0.5 m. El costo para una perforación previa de 0.71 m de diámetro con 5 m de longitud es de 218 um.

Mano de obra:

Para un pilote de este tipo de sección se tiene un rendimiento, por cuadrilla de trabajo, de 150 kg/jor dentro del proceso de armado de este elemento. El costo queda conformado por:

Costo por jornal: 57 um, Rendimiento = 150 kg/jor.

Peso del acero = 87 kg.

Costo por mano de obra: 34 um.

Resumen:

Material	1045.00
Mano de obra	34.00
Equipo	218.00
Costo total	1297.00

3.7.3 Análisis costo Vs sección triangular cuando perm. =cte

Condiciones iniciales: Idem que en sección circular.

Análisis.

Material:

A) Cimbrado:

Dadas las características de este tipo de cimbrado, se tiene que en promedio para cada pilote se utilizan 2 hojas.

$$\text{Area} = 0.67 * 2 * 10 = 13.4 \text{ m}^2$$

B) Acero:

Acero longitudinal:

$$A_{s,av} = \frac{0.7 \sqrt{f'_c} A_c}{f_y}$$

$$A_c = 0.433 * (67 - 5)^2 = 1665 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,min} = 4.4 \text{ cm}^2; \text{ Peso del acero} = 34 \text{ kg (6 barras \#3)}.$$

Acero transversal.

Idem que en la sección circular; se manejaran E #3 @ L/2  
como L = 0.67 m; E @ 30 cm.

Peso del acero: 30 estribos #3

$$\text{Perímetro del estribo} = (0.67 - 0.05) * 3 = 1.86 \text{ m}$$

Peso de estribos: 31 kg

Peso total de acero = 65 kg

c) Concreto.

Volumen = 1.9 m<sup>3</sup>

Resumen:

	Uso	Costo (um/unidad)	Costo
Cimbra 13.4 m <sup>2</sup>	5	28.0	75.0
Armado 65.0 kg	1	2.2	143.0
Concreto 1.9 m <sup>3</sup>	1	330.0	627.0
			845.0 um

Equipo:

La perforación previa para este tipo de sección es de 0.78 m de diámetro, ya que es este el diámetro que proporciona la circunferencia envolvente a la sección triangular.

El costo para una perforación previa de 0.78 m de diámetro con 5m

de longitud es de 241 um.

Mano de obra:

Para el armado de este tipo de sección se tiene un rendimiento de 150 kg/jor y su costo queda dado por:

Costo por jornal: 57 um, Rendimiento: 150 kg/jor

Peso del acero = 65 kg

Costo por mano de obra: 25 um

Resumen:

Material	845
Mano de obra	25
Equipo	241
	1111 um

3.8 Análisis costo Vs sección cuando se mantiene constante el volumen del elemento.

Este análisis es análogo al anterior por poseer los mismos lineamientos pero conservando las mismas condiciones iniciales para

la restricción de volumen constante.

Se realiza el análisis obedeciendo la anterior aseveración con el objetivo de seguir produciendo perspectivas de comparación o conjugación entre cada análisis.

### 3.8.1 Análisis costo Vs sección circular, vol. = cte

Condiciones iniciales:

- a) Se realizará el precio unitario de un solo pilote.
- b) Se supone que existe un lugar físico en la obra donde se podrá realizar la fabricación del elemento.
- c) No se manejarán costos reales, sino costos en unidades monetarias (um).
- d) Se considera que el uso de tensores y soportes para cimbra, es apreciablemente equivalente entre cada una de las secciones por lo que no se hará participar.
- e) Se considera  $f'c = 250$  y  $f_y = 4200$  kg/cm<sup>2</sup> y un

$$A_{s_{\text{req}}} = \frac{0.7 \sqrt{f'_c} A_c}{f_y}$$

donde:

$A_c$  = Aconcreto-Arecubrimiento; (recubrimiento = 2.5 cm)

f) Se considera que el pilote al estar confinado, proporciona un  $V_u < V_u$ , por lo que solo requiere acero transversal mínimo.

g) El volumen total del elemento es de 2.4 m<sup>3</sup>

**Análisis:**

**Material:**

**Cimbrado:**

Dadas las características de cimbrado para este tipo de sección se tiene:

Como Vol. = 2.4 m<sup>3</sup>; D = 0.55m

Area = perímetro \* longitud + 2Area de sección.

$$= \pi (0.55) * 10 + \frac{2 \pi (0.55)^2}{4}$$

$$\text{Area} = 17.75 \text{ m}^2$$

**Acero:**

**Acero longitudinal:**

$$A_{s_{min}} = \frac{0.7 \sqrt{f'_c} A_c}{f_y}$$



$$A_c = \frac{\pi (55 - 5)^2}{4} = 1964 \text{ cm}^2$$

$A_{sola} = 5.17 \text{ cm}^2$ ; Peso de acero = 47 kg, (3 barras #3 y 3 barras #4)

#### Acero transversal

Para este tipo de sección se utilizan zunchos pero en términos de peso podemos considerar a estos como E #3 @ d/2 para cumplir de lado de la seguridad el RCDF-87 ( $V_{cr} > V_u$ ).

Como d = 55 cm; E @ 25 cm.

Peso del acero: 40 estribos #3

Perímetro del estribo =  $\pi(0.55 - .05) = 1.57 \text{ m}$

Peso de estribos = 35 kg

Peso total del acero = 82 kg.

#### C) Concreto:

Volumen = 2.4 m<sup>3</sup>

Resumen:

	Uso	Costo (um/unidad)	Costo
Cimbra 17.75 m <sup>2</sup>	10	28.00	49.70
Armado 82.00 kg	1	2.20	180.40
Concreto 2.40 m <sup>3</sup>	1	330.00	792.00
			1022.00 um

Equipo:

La perforación previa que se utiliza como guía en la hincada del pilote, de longitud de 5 m y con un diámetro de 0.55 m se estima en 170 um.

Mano de obra:

Para este tipo de sección se considera un rendimiento de 100 kg/jor en el proceso de armado del elemento. El costo queda dado por:

Costo por jornal: 57 um, Rendimiento: 100 kg/jor

Peso de acero = 82 kg

Costo por mano de obra: 47 um

**Resumen:**

Material	1022.00
Mano de obra	47.00
Equipo	170.00
	1239.00 um

**3.8.2 Análisis costo Vs sección cuadrada cuando vol. = cte**

**Condiciones iniciales:** Idem que en sección circular

**Análisis:**

**Material:**

**Cimbrado:**

Dadas las características de cimbrado para este tipo de sección se tiene:

Como Vol. =  $2.4 \text{ m}^3$ ;  $L = 0.49 \text{ m}$

Y se utiliza una sola hoja de cimbra en promedio:

Area =  $10.00 * 0.49 = 4.9 \text{ m}^2$

**Acero:**

Acero longitudinal:

$$A_{s_{min}} = \frac{0.7 \sqrt{f'_c} A_c}{f_y}$$

$$A_c = (49 - 5)^2 = 1936 \text{ cm}^2$$

$A_{s_{min}} = 5.1 \text{ cm}^2$ ; Peso de acero = 40 kg, (4 barras #4)

Acero transversal

Idem que en sección circular E #3 @ L/2

Como L = 0.49 m; E @ 25 cm.

Peso del acero: 40 estribos #3

Peso de estribos: Perímetro de 1 estribo = 1.76 m, Peso 79 kg

Peso total del acero = 79 kg.

C) Concreto:

Volumen = 2.4 m<sup>3</sup>

Resumen:

	Uso	Costo (um/unidad)	Costo
Cimbra 4.9 m <sup>2</sup>	5	28.00	27.44
Armado 79.00 kg	1	2.20	173.80
Concreto 2.40 m <sup>3</sup>	1	330.00	792.00
			993.00 um

Equipo:

La perforación previa para este tipo de sección es 0.69 m de diámetro ya que se proporciona la circunferencia capaz de envolver a una sección cuadrada de lado 0.49 m. El costo para una perforación previa de 0.69 m de diámetro con 5 m de longitud es de 212 um.

Mano de obra:

Para el armado de un pilote de este tipo de sección se tiene un rendimiento, por cuadrilla de trabajo de 150 kg/jor. El costo por este concepto es:

Costo por jornal: 57 um, Rendimiento: 150 kg/jor.

Peso de acero = 79 kg

Costo por mano de obra: 30 um

Resumen:

Material	993.00
Mano de obra	30.00
Equipo	212.00
	1235.00 um

3.8.3 Análisis costo Vs sección triangular cuando  $vol = cte$

Condiciones iniciales: Idem que en sección circular

Análisis:

Material:

Cimbrado:

Dadas las características de cimbrado para este tipo de sección se tiene que en promedio para cada pilote, se utilizan dos hojas de cimbrado:

$$\text{Area} = 0.74 * 2 * 10 = 14.8 \text{ m}^2$$

Acero:

Acero longitudinal:

$$A_{s_{min}} = \frac{0.7 \sqrt{f'_c} A_c}{f_y}$$

$$A_c = 0.433 (74 - 5)^2 = 2062 \text{ cm}^2$$

$A_{s_{min}} = 5.43 \text{ cm}^2$ ; Peso de acero = 47 kg, (3 barras #3 y 3 barras #4)

Acero transversal

Idem que en sección circular E #3 @ L/2

Como L = 0.74 m; E @ 35 cm.

Peso del acero: 29 estribos #3

Perímetro de 1 estribo =  $3(0.74 - 0.05) = 2.07 \text{ m}$

Peso de estribos = 34 kg

Peso total del acero = 81 kg.

c) Concreto:

Volumen = 2.4 m<sup>3</sup>

Resumen:

	Uso	Costo (um/unidad)	Costo
Cimbra 14.8 m <sup>2</sup>	5	28.00	83.00
Armado 81.00 kg	1	2.20	178.00
Concreto 2.40 m <sup>3</sup>	1	330.00	792.00
			1053.00 um

Equipo:

La perforación previa para este tipo de sección es 0.86 m de diámetro ya que se proporciona la circunferencia envolvente a una sección triangular. El costo para una perforación previa de 0.86 m de diámetro con 5 m de longitud es de 265 um.

Mano de obra:

Para el armado de un pilote de este tipo de sección se tiene un rendimiento, por cuadrilla de trabajo de 150 kg/jor. El costo queda conformado por:

Costo por jornal: 57 um, Rendimiento: 150 kg/jor.



Peso de acero = 81 kg

Costo por mano de obra: 31 um

Resumen:

Material	1053.00
Mano de obra	31.00
Equipo	265.00
	1349.00 um

Tabla 3.1 (características)

Sección	condición	Dimensión	Volumen	Perm. Secc.	Area lateral	Area Secc.	Peso
circular	perm= cte	D = 0.64	3.2	2.0	20.0	0.322	7720
cuadrada	perm= cte	L = 0.50	2.5	2.0	20.0	0.25	6000
triang.	perm= cte	L = 0.67	1.9	2.0	20.0	0.194	4665
circular	Vol = cte	D = 0.55	2.4	1.74	17.4	0.24	5760
cuadrada	Vol = cte	L = 0.49	2.4	1.96	19.6	0.24	5760
triang.	Vol = cte	L = 0.74	2.4	2.23	22.3	0.24	5760

tabala 3.2 Comportamiento estructural Vs sección.

Seccion	Capacidad de carga Perm = 2.00 m			Capacidad de carga Volumen = 2.4 m <sup>3</sup>		
	holandesa	Terzaghi	RCDF-87	holandesa	Terzaghi	RCDF-87
Circular	6430	5245	12250	8054	4839	10637
Cuadrada	7812	4893	12250	8054	4839	12000
Triang.	4665	4561	12250	8054	4839	13680

Tabla 3.3 Costo Vs sección transversal (perímetro sección = 2 m)

Seccion	Cimbra	Acero	Concreto	Material	Mano de Obra	Equipo	Total
Circular	58	200	1056	1314	52	194	1560
Cuadrada	28	192	825	1045	34	218	1297
Triang.	75	143	627	845	25	241	1111

Tabla 3.4 Costo Vs sección (vol = 2.4 m<sup>3</sup>)

Seccion	Cimbra	Acero	Concreto	Material	Mano de Obra	Equipo	Total
Circular	49.7	180	792	1022	47	170	1239
Cuadrada	27.5	174	792	993	30	212	1235
Triang.	83	178	792	1053	31	265	1349

Tabla 3.5 Resultados

Sección	Area lateral = 2.0 m Comportamiento Estructural				Volumen = 2.4 m <sup>3</sup> Comportamiento Estructural			
	holandesa	Terzaghi	RCDF-87	Costo	holandesa	Terzaghi	RCDF-87	Costo
Circ	6430	5245	12250	1560	8054	4839	10637	1239
Cuad	7812	4893	12250	1297	8054	4839	12000	1235
Triang.	4665	4561	12250	1111	8054	4839	13680	1349

**4. INTEGRACION DE LOS FACTORES Y CONSTRUCCION DE CORRELACIONES QUE  
PERMITAN INFERIR EN LA EFICIENCIA DEL ELEMENTO: OBTENCION DE  
PARAMETROS**

**4.1 Presentación:**

Se ha hecho énfasis en el anterior capítulo que, llamaremos eficiente a la sección del pilote de fricción que permita obtener un comportamiento satisfactorio con el menor costo de fabricación; y que los factores intervinientes en la eficiencia del elemento, son los que conforman este concepto: costo y comportamiento estructural.

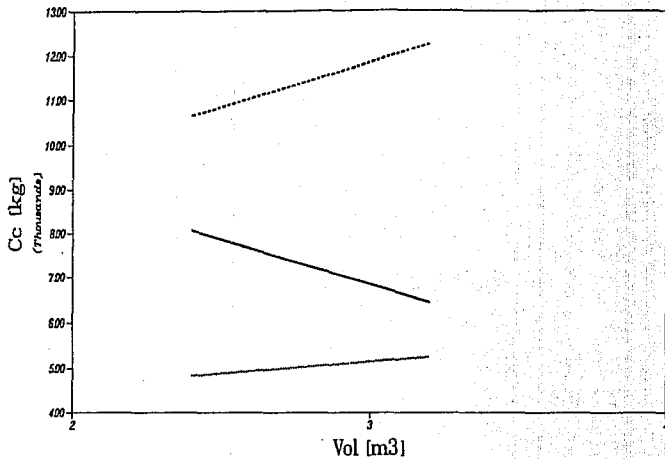
Si buscamos una solución específica y única, solo deberíamos observar que sección es la que se comporta estructuralmente mejor o cual es la más económica. Pero si de alguna manera buscamos obtener los rangos de variación entre estos aspectos, debemos buscar un intervalo de resultados que no den soluciones únicas sino "zonas" de resultados. Así pues, en general el objetivo de este capítulo es correlacionar en gráficas cada una de las secciones con cada uno de los factores para después integrarlos a manera de compilación de resultados y para esto, deberemos confrontar cada factor con cada sección y para cada condición, obteniendo gráficas que puedan ser interpretadas para nuestros objetivos.

## 4.2 Gráficas de relación comportamiento estructural contra sección.

Los criterios que se utilizaron en el análisis son los proporcionados por la formula holandesa, la formula de Terzaghi y la que proporciona el RCDF-87; Buscando cual de estos criterios es el más adecuado a seleccionar para evaluar la capacidad de carga del pilote, en la gráfica 1 se correlacionan capacidades de carga contra volúmenes para cada sección y con las capacidades de carga que se valoraron con cada criterio. Observando esta gráfica podemos enunciar que el criterio de la formula holandesa (CFH), es el más discrepante ya que en un incremento no relevante de volumen, se obtienen cambios considerables en capacidades de carga. Por otra parte, el criterio del RCDF-87 (CRCDF-87) y el de la formula de Terzaghi (CFT) no representan, con un incremento de volumen, cambios tan relevantes en las capacidades de carga; además de ser estos dos criterios el menos conservador y el más conservador respectivamente.

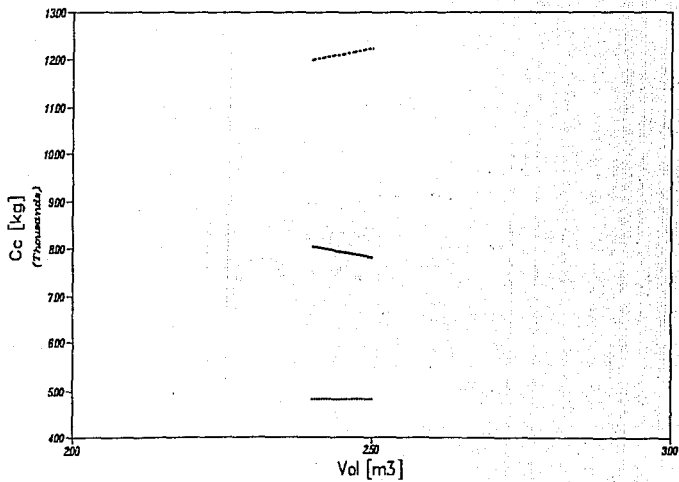
Por los planteamientos anteriormente mencionados usaremos dos criterios para obtener las gráficas de relación comportamiento estructural contra sección: el no conservador por ser el que proporciona el RCDF-87 y el conservador (CFT), por tener estas características (gráfica 2).

# SECCION CIRCULAR



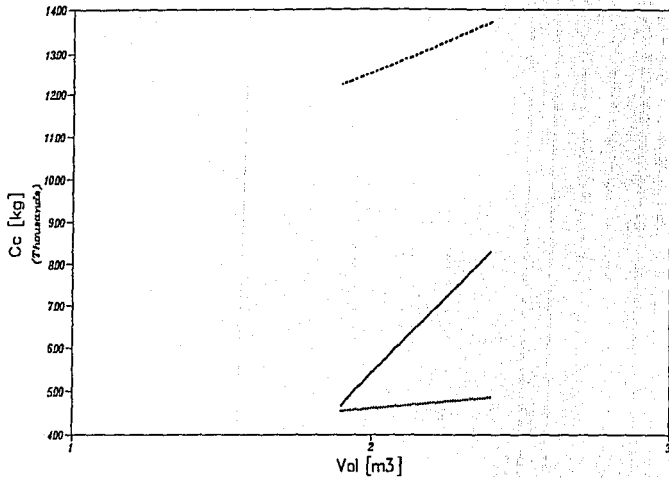
— CFH    - - - CFT    ···· CRCDF

# SECCION CUADRADA



— CFH    — CFT    - - - CRCDF

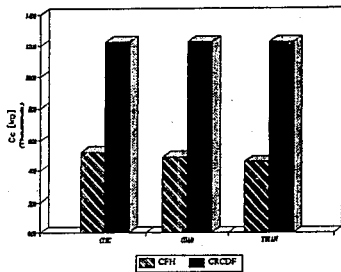
### SECCION TRIANGULAR



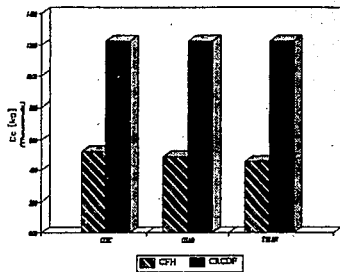
— CFH    — CFT    - - - CRCDF



CONDICION A =  $c_{12}$



CONDICION A =  $c_{12}$



De la gráfica 2, podemos observar que cuando se fuerza a que el área lateral del elemento sea constante para todas las secciones, se obtienen iguales capacidades de carga con el CRCDF; esto debido a que este criterio obtiene capacidades en función a las mismas áreas laterales. Así como cuando se fuerza al volumen a ser constante el CFT, obtiene iguales capacidades de carga para todas las secciones por estar en función al peso del elemento y a las características del suelo y como estas son idénticas para cada sección y el peso esta en función al volumen, es que se obtienen iguales parámetros.

De todo lo anterior se justifica el hecho de tener dos alternativas de valuación de capacidad de carga, para cada condición.

El confrontar las dos condiciones, criterio con criterio, nos permite observar que el rango de variación de capacidad de carga con un incremento no relevante de volumen, no es tan amplio y se puede observar en la tabla 4.2.

Tabla 4.2

CFT SECCION	Vol.	Capacidad de carga	Vol	Capacidad de carga	$\Delta V$	$\Delta Cc$	%
Circular	3.2	5245	2.4	4839	-0.8	-406	-8
Cuadrada	2.5	4893	2.4	4839	-0.1	-54	-1
Triangular	1.9	4561	2.4	4839	0.5	278	6

CRCDF SECCION	Vol.	Capacidad de carga	Vol	Capacidad de carga	$\Delta V$	$\Delta Cc$	$\%$
Circular	3.2	12250	2.4	10637	-0.8	1613	-13
Cuadrada	2.5	12250	2.4	12000	-0.1	250	-2
Triangular	1.9	12250	2.4	13680	0.5	1430	12

donde el mayor rango de variación de capacidad de carga es de 8 y 13% para incrementos de volumen del orden de 25% (sección circular) que podríamos considerar no de gran relevancia, aun sin mencionar que en incrementos de volumen de 4% solo existen incrementos en capacidades de carga de 1 y 2%.

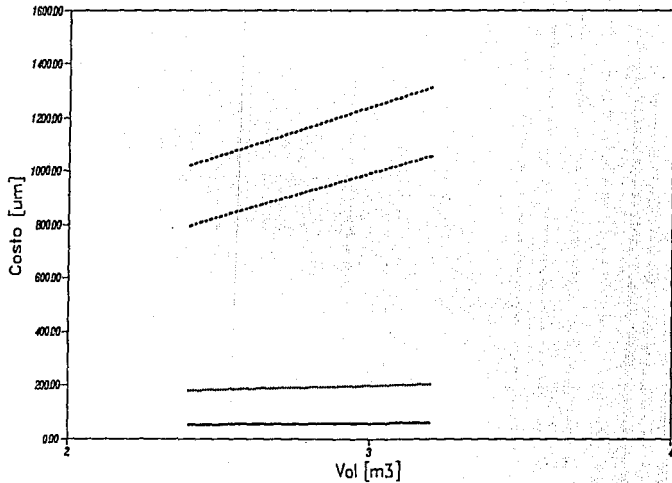
Ahora bien, si pensamos que un elemento de cimentación como el pilote de fricción no puede tener rangos de variación dentro del aspecto de su volumen, ya que caería, si estos rangos son amplios, en el ámbito de pilas de cimentación y observamos que en incrementos normales de volumen, el comportamiento de la capacidad de carga (de cada criterio) sigue siendo congruente, se puede hacer la consideración de que el CFT se utilice como criterio prioritario, cuando se hable de área lateral constante y el CFRCDF cuando se hable de volumen constante en obtención de capacidades de carga.

#### 4.3 Gráficas de relación costo contra sección.

Dentro del costo, uno de los factores que sería conveniente desglosar es el material; ya que este insumo, para nuestro análisis, está dividido en cimbra, acero y concreto y su desglose puede permitir la posibilidad de llegar a preveer las cantidades de material a necesitar y asignar los recursos adecuadamente a un problema real.

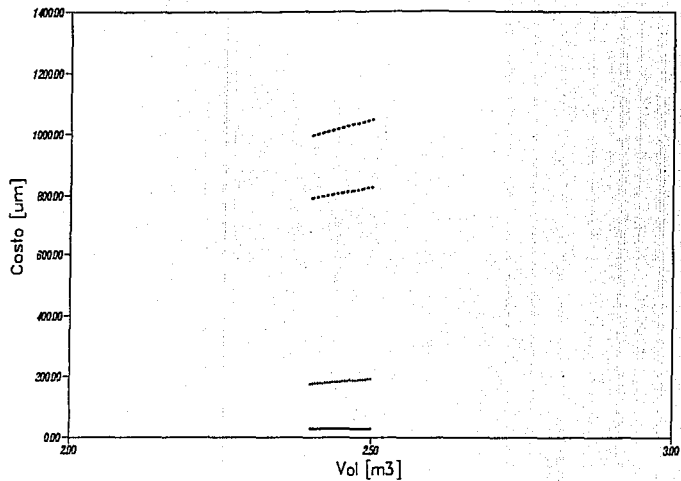
Por lo mencionado anteriormente en la gráfica 3 se relacionan volúmenes contra costos para cada sección y con el desglose por insumo para poder observar su comportamiento. Mientras que en la gráfica 4 se presentan las rectas de costo contra volumen; esto para cada sección. Con lo que se obtiene un comparativo dentro de este mismo insumo.

# SECCION CIRCULAR



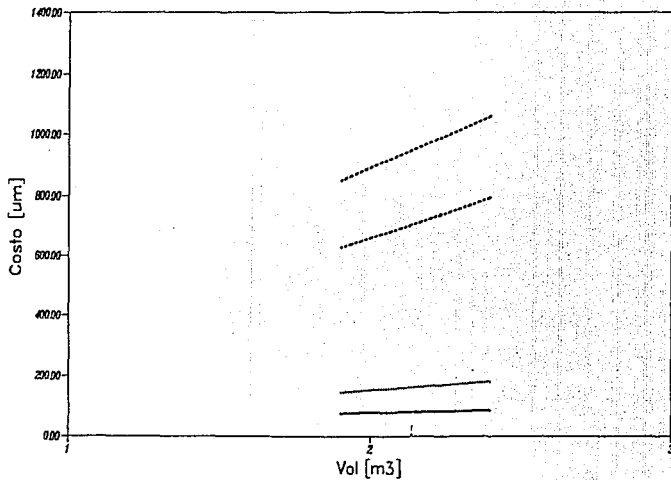
— cimbra — acero ..... concreto ..... total

### SECCION CUADRADA



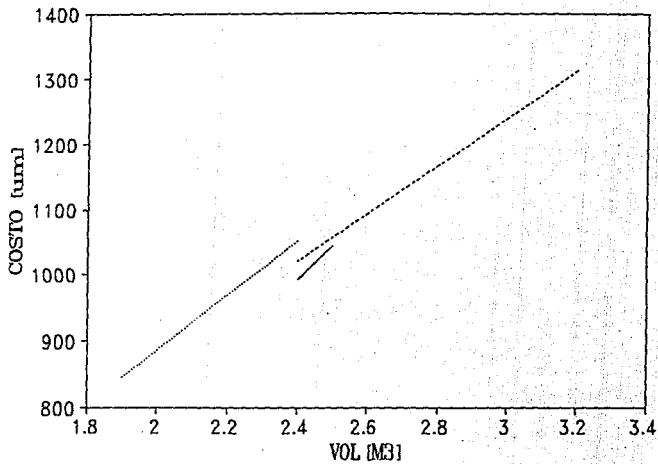
— cimbra    - - - acero    ..... concreto    - · - · - total

## SECCION TRIANGULAR



— cimbra — acero ..... concreto ..... total

# COSTO VS SECCION



--- circular    — cuadrada    — triangular



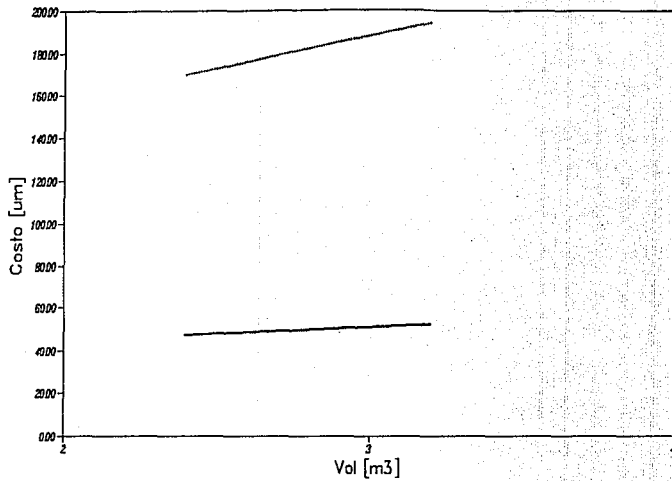
De la gráfica 3 observamos que en la sección circular a un incremento de volumen, el insumo que mas crece es el concreto. En la sección cuadrada podemos decir que a pequeños incrementos de volumen, crecen los costos de los insumos de manera similar. En la triangular, es el acero y el concreto los que rigen la conducta de crecimiento. Toda esta información puede ser requerida solo en casos particulares; donde, se puede saber con que recursos se cuentan y que se puede hacer para asignarlos adecuadamente.

La gráfica 4 arroja resultados más interesantes, hablando cualitativamente ya que observamos que para el insumo del material, la sección triangular es la mas cara cuando el volumen es igual para todas las secciones; mientras que es la cuadrada la más económica, para esta misma condición. Lo anterior es debido a que si se fuerza el volumen a ser constante (la longitud es fija), el área de cimbra aumenta en el caso del triangular más apreciablemente que para el caso de la sección cuadrada (ver gráfica 3 o tabla 3.4).

Aun así, nuestro análisis no termina aquí ya que faltan dos insumos que graficar además de confrontar costos con capacidades de carga.

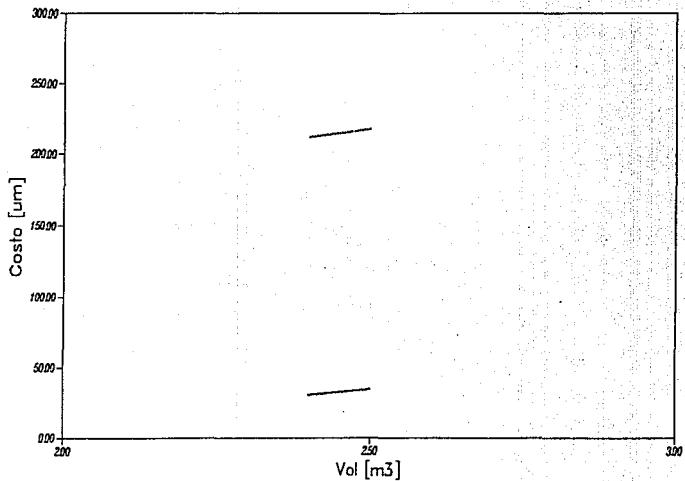
La gráfica 5 relaciona los dos insumos faltantes en términos de costo contra volúmenes y se presenta a continuación.

### SECCION CIRCULAR



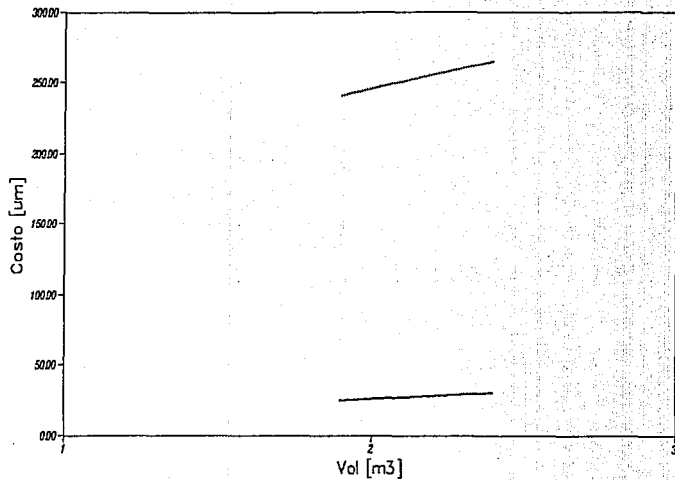
— mano de obra — equipo

### SECCION CUADRADA



— mano de obra — equipo

### SECCION TRIANGULAR



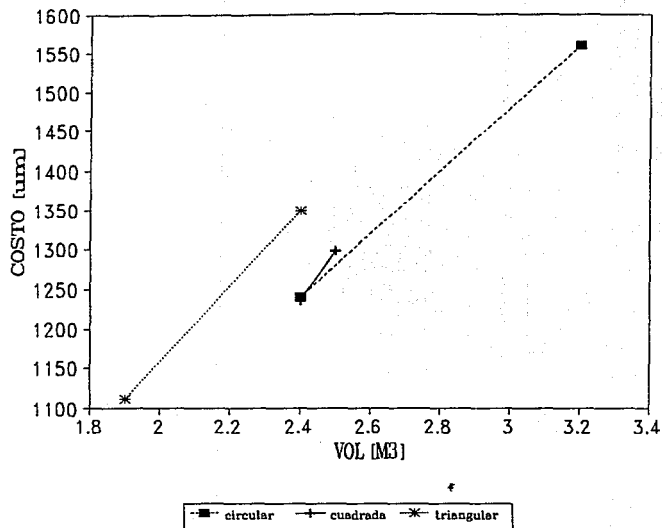
— mano de obra — equipo

De la gráfica 5 se obtiene que para cuando, en los pilotes, se tiene un volumen constante, el costo por mano de obra es mayor en la sección circular que en las otras; pero esta misma sección es la menos costosa en relación al equipo y debido a los diámetros de perforaciones previas que se realizan para el proceso de hincado . Por otra parte lo comportamientos al variar el volumen, son congruentes para los dos insumos; haciendo la señalización de que al variar el volumen haciendo el área lateral del elemento constante, el costo en la sección triangular se abate mientras que en las restantes crece.

El presentar estas gráfica con solo dos de los insumos y ningún costo total es con un fin similar al de graficar costo contra material de una manera desglosada; consultarla solo para casos particulares como el de preveer el uso del equipo y la selección de personal para fabricar el elemento.

Es en la gráfica 6 que se presenta a continuación donde si se presentan los costos totales, formados de la suma de costos por material, mano de obra y equipo.

## COSTO VS SECCION



En la gráfica 6 se observa que la sección que representa el mayor costo es la triangular, esto para la condición de volumen constante. Bajo esta misma condición es la sección cuadrada la más económica pero muy cercana a la circular.

Por otro lado y bajo la condición de perímetro de sección constante, es la sección triangular la que se abate en costo haciendo para ello la reducción de su volumen, ya que si esto no ocurriera la sección circular y cuadrada tendrían que crecer en costos al aumentar el volumen para seguir conservando constante el perímetro de las secciones; en otras palabras, la sección circular y cuadrada crecen en costos más rápidamente que la triangular cuando se incrementan las áreas laterales en forma idéntica para los tres.

#### **4.4 Gráficas relación comportamiento estructural contra costo para cada sección.**

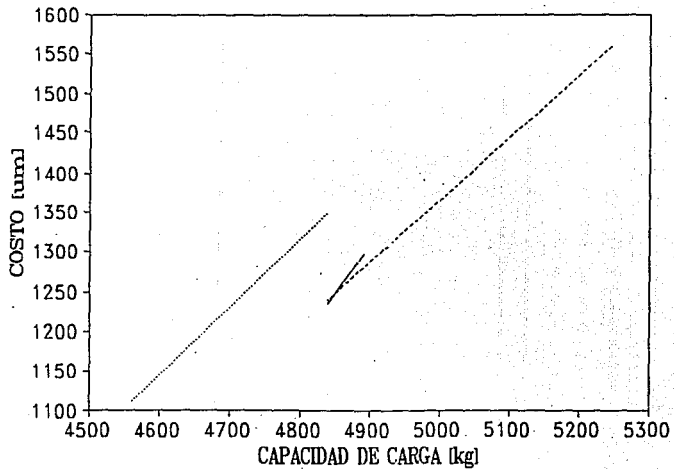
En el principio de este capítulo se mencionó que el objetivo del mismo es encontrar "áreas" de resultados que surgen del confrontamiento de los factores que previamente se señalaron como intervinientes en la elección de la sección geométrica más adecuada; siendo estos la capacidad de carga y el costo de fabricación. Ahora bien, el comportamiento estructural y el costo han sido ya relacionados con los diferentes volúmenes y por sección y han quedado representados en las gráficas 2 y 6 respectivamente.

De estas gráficas ya podemos obtener que sección es la más económica o cual es la de mayor importancia en términos de capacidad de carga pero aun no sabemos que interrelación se puede guardar entre ambas, que es en sí, el objetivo de este capítulo.

Por lo anterior mencionado, las siguientes gráficas relacionan capacidades de carga contra costos para cada criterio utilizado para evaluar el comportamiento estructural. Así, la gráfica 7 relaciona costos contra capacidades de carga utilizando el criterio de la fórmula de Terzaghi (CFT), mientras que la gráfica 8 hace lo mismo para el criterio del RCDF-87 (CFRCDF).

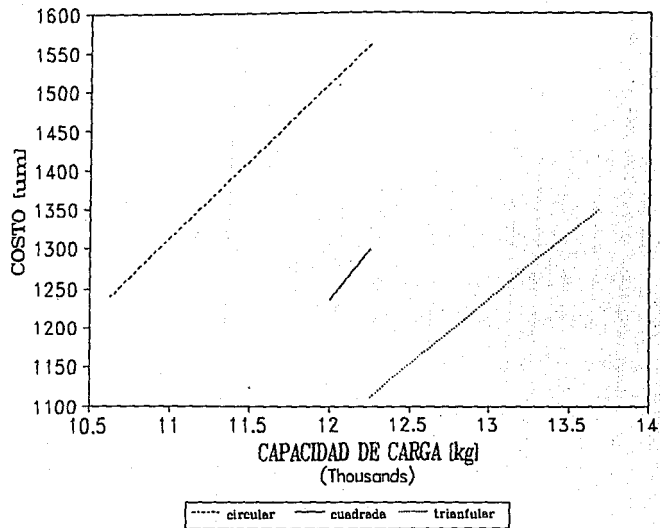


## CRITERIO DE LA FORMULA DE TERZAGHI



----- circular    ——— cuadrada    ——— triangular

# CRITERIO DEI RCDF-87 (CRCDF)



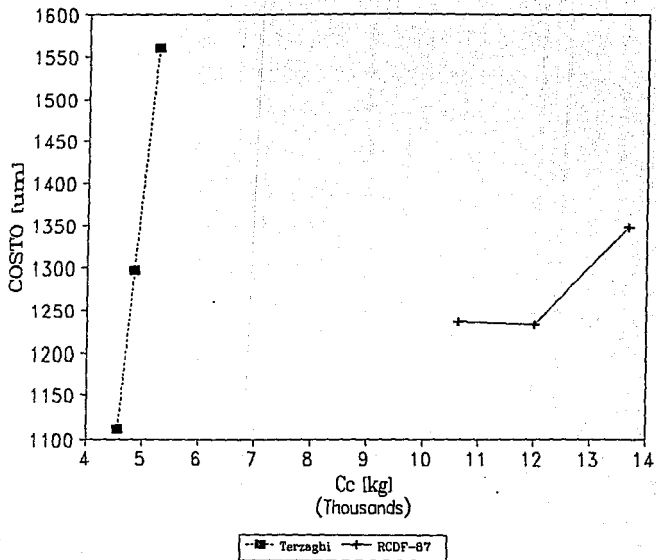
En la gráfica 7 se observan las conductas de variación de capacidades de carga y costos de cada sección, propiciada por el manejo de nuestras condiciones iniciales de análisis; volumen constante y volumen variable (área lateral constante).

Como características cualitativas de las conductas de cada sección, observamos que la sección circular y triangular aumenta rápidamente en costo al querer obtener mayores capacidades de carga. Mientras que en la sección cuadrada el crecimiento de ambas variables es más proporcionado.

En la gráfica 8 se observa que las curvas idealizadas de cada sección se comportan análogamente. En estas curvas se observa que al partir ambas del mismo parámetro (Volumen del elemento igual a 2.4 m<sup>3</sup>) la sección triangular encuentra la misma capacidad de carga con las otras secciones cuando su volumen es menor al del parámetro mencionado.

Entre las otras dos secciones, es la cuadrada la que encuentra rápidamente mayores capacidades de carga con menores costos.

Finalmente, queriendo seguir obteniendo más información de carácter cualitativo, se realizó la gráfica 9 donde se presenta un panorama general de la relación costo contra capacidad de carga y que se presenta a continuación.



Finalmente, es la gráfica 9 la que nos permite obtener información en función a una capacidad de carga necesaria ya sea con un tipo de sección fijo o a elegir.

Como la información cuantitativa que se pueda llegar a obtener de estas gráficas pertenece al capítulo de resultados aquí solo nos limitaremos a decir que según el CFT, es la sección circular la de mayor costo y capacidad de carga, que en la sección triangular ocurre lo contrario y que esto nos permite corroborar una de las razones de el uso frecuente de la sección cuadrada en nuestro medio.

Para el criterio CRCDF los rangos de variación en cuanto a costos no son tan amplios como los de capacidades de carga. Aquí se hace sentir que el uso más adecuado de secciones puede estar en la sección triangular o cuadrada y la elección surgiría de un análisis de capacidades de carga necesarias con sus costos asociados dentro de los ámbitos de cada sección y que quedan representados en la gráfica 9.

## 5. RESULTADOS.

De hecho, los resultados están implícitos en las gráficas presentadas en anterior capítulo; en primer plano con las gráficas de capacidad de carga y costo contra volumen (gráficas 2 y 6, respectivamente) y de una manera más particular en las gráficas que relacionan capacidad de carga contra costo según CFT y CRCDF y la conjugación de ambas (gráfica 7, 8 y 9 respectivamente). A partir de estas, se procederá a analizar cada uno de los parámetros estudiados sobre la elección adecuada de la sección geométrica del pilote. Esto es lo que conforma este capítulo.

### 5.1 Capacidad de carga.

En cuanto a la capacidad de carga se obtuvo que según el CFT, para la condición de área lateral constante, es la sección circular la que proporciona mayor capacidad de carga. Ahora bien, si se cambia a la condición de volumen constante, el CFT no se hace participar como indicador de sección a elegir ya que valúa la capacidad de carga en forma idéntica para cada sección; al corresponder estas a elementos con el mismo volumen. Pero si analizamos el cambio de condición de área lateral constante y volumen variable a volumen constante y área lateral variable, encontramos un parámetro para la capacidad de carga, asociado al volumen constante de las secciones y que se presenta a continuación.

sección	Al. cte.	Cc	Vol cte.	Cc	$\Delta$ Vol %	$\Delta$ Cc %	$\Delta$ vol %	$\Delta$ Cc %
Circular	3.2	5245	2.4	4839	33	8	33	8.00
Cuadrada	2.5	4893	2.4	4839	4	1	33	8.25
Triangul.	1.9	4561	2.4	4839	26	6	33	7.61

De donde observamos que para un volumen constante de los tres tipos de secciones, el CFT puede sugerir que es el pilote de sección cuadrada el más adecuado a elegir.

Según el CRCDF para la condición de volumen constante, es la sección triangular la que esta asociada con la mayor resistencia, pero el hacer la implicación de este criterio, al cambiar de condición inicial de manera análoga que en el caso anterior del CFT, se obtiene que:

sección	Vol cte.	Cc	Al cte.	Cc	$\Delta$ Vol %	$\Delta$ Cc %	$\Delta$ vol %	$\Delta$ Cc %
Circular	2.4	10637	3.2	12250	33	15	33	15.0
Cuadrada	2.4	12000	2.5	12250	4	2	33	16.5
Triangul.	2.4	13680	1.9	12250	26	11	33	14.0

De donde observamos que para un área lateral constante, el CRCDF señala a la sección cuadrada como la más idónea.

## 5.2 Costo

Los resultados arrojados de este factor fueron que para un volumen constante de los tres tipos de pilotes, es el de sección cuadrada pero muy cercana al de sección circular, el que presenta un menor costo; mientras que para la condición de área lateral constante, es el de sección triangular el más económico. Los rangos de variación de ambos, así como su transformación al cambiar de condición se observa directamente en la gráfica 6 de donde podemos mencionar que si pensamos que el crecimiento se aproxime a una línea, es la sección triangular la más económica para cuando los volúmenes disminuyan de la constante fijada a priori y que al ir creciendo el volumen a partir de la misma constante, es la sección triangular y circular las que van asociándose a los menores costos; siempre y cuando los intervalos de variación no sean grandes.

## 5.3 Capacidad de carga contra costo según el CPT.

Al asociar los dos factores intervinientes en la elección de la sección geométrica adecuada u óptima, se obtuvo que para la línea de comparación de volumen constante y siendo las capacidades de carga idénticas para cada sección, es la triangular la que presenta el costo más elevado, la sección circular presenta un costo menor que la anterior pero sobrepasando, aunque no considerablemente, a la sección cuadrada que bajo este criterio y con esta condición es la de menor costo.



Al hacer constante el área lateral de cada uno de los elementos variando su volumen, la sección circular presenta la mayor capacidad de carga pero con el mayor costo asociado; mientras que la sección cuadrada sólo se mueve en rangos cortos de resistencia y costo quedando nuevamente abajo que la sección circular pero sobrepasando en los mismos factores a la sección triangular que si bien es cierto, presenta menor capacidad de carga presenta también, un costo digno a tomarse en cuenta en ciertas ocasiones que las condiciones del problema así lo sugieran.

De este último aspecto es relevante enfatizar que la gráfica 7 nos puede proporcionar información de como se comportan los costos asociados a las capacidades de carga para cada tipo de sección, pudiendo enunciar las siguientes situaciones:

- 1) Para capacidades de carga menores a la obtenida de la línea de comparación de volumen constante para todas las secciones, de un valor de 4839 kg, es la sección triangular la que presenta menores costos.
- 2) Para capacidades de carga cercanas a 4839 kg, es la sección cuadrada la más adecuada.
- 3) Para capacidades de carga mayores a 4839 kg, es la sección circular la que presenta la solución óptima.

#### 5.4 Capacidad de carga contra costo según CRCDF.

Partiendo de la línea de comparación, para este criterio, de área lateral constante y de donde se obtienen iguales capacidades de carga para cada tipo de sección, es la sección circular la que presenta el costo más considerable y la triangular la que posee la situación más económica. La sección cuadrada queda como una alternativa intermedia dentro de esta misma condición.

Al hacer el volumen constante (cambiar de condición a área lateral variable) se observa que la sección triangular va obteniendo capacidades de carga más altas con mayores costos respecto a las otras dos secciones; ya que mientras la sección cuadrada se sigue moviendo en rangos intermedios, la circular baja considerablemente su capacidad de carga con un costo asociado similar al de la sección cuadrada. Lo anterior queda expuesto más detalladamente en los siguientes puntos:

- 1) Para nuestro análisis, si se quieren obtener capacidades de carga mayores a la constante de 12250 kg, es la sección triangular la idónea ya que presenta menores costos asociados a estas capacidades de carga.
- 2) Para cargas menores de 12250 kg, la sección triangular sigue obteniendo resistencias con los menores costos pero en la búsqueda de obtener estas capacidades de carga asociadas a

costos bajos comienza a decrecer su volumen y a surgir la idea de que ya no es la sección idónea por comenzar a hacerse esbelto el elemento. Por lo anterior se debe de pensar que para capacidades de carga menores a 12250 kg, debemos de considerar a la sección cuadrada como la idónea.

3) La sección circular, y para este criterio, no se hace participar ya que en el mejor de los casos, en cuanto a costo, empata a la sección cuadrada pero con capacidades de carga inferiores.

#### 5.5 Capacidad de carga contra costo según ambos criterios.

Al querer encontrar las "zonas" de resultados y no soluciones únicas, de las que se hizo mención en el capítulo IV, se construyó la gráfica 9 que nos proporciona información de manera más directa al presentar ambos criterios, haciendo implícitas ambas condiciones que les dieron vigencia en nuestro estudio. Así pues, de la gráfica podemos comentar lo siguiente:

1) Es la sección triangular la más discrepante al presentar con un criterio el menor costo con la menor capacidad de carga y con el otro criterio la mayor capacidad de carga con el mayor costo. Esta situación de discrepancia, la puede hacer digna de tomar en cuenta como una alternativa interesante, siempre y cuando se busquen obtener resultados del lado de la

seguridad auxiliándose para ello de pruebas de carga.

2) Es la sección cuadrada la más convencional a usar; ya que no presenta ninguna discrepancia con ningún cambio de condición o situación, lo que hace pensar en ella como un alternativa a usar con la que siempre se tendrá la idea de que tal vez no sea la sección más económica o la de mayor capacidad de carga pero siempre estará cercana a estas condiciones, además de proporcionar mayores coeficientes de seguridad.

3) Es la sección circular la que al ponderar factores surge como la sección lejana a la idónea y no tan relevante a considerar por encima de la sección cuadrada; ya que la primera, muestra más discrepancias. Además la sección circular no es solución económica con la que se le da más validez a considerar a la sección triangular como idónea para este mismo aspecto.

## 6. CONCLUSIONES

Después de realizar un estudio de capacidades de carga y costos para tres tipos de secciones de pilotes de fricción y confrontar factor a factor con cada condición y entre ellos, se puede concluir que para casos en donde las condiciones del tipo de suelo, así como las dimensiones disponibles y necesarias del elemento sean análogos a los de este estudio, se podrán utilizar los resultados del mismo como un indicador cualitativo de en que sección y bajo que condiciones se puede optar a elegir.

Siempre es imperioso mencionar que, dadas las incertidumbres que presenta un estudio de este tipo, surgida de la obligatoria simplificación de eventos que le permiten, al estudio, ser un documento de consulta y no un documento técnico a manera de norma, el correcto uso de este análisis estriba en la semejanza de los factores a intervenir; y como el costo no debe de ser un factor prioritario, solo se deberá utilizar como parámetro la capacidad de carga y con la cual se podrá determinar que tipo de sección es la que entra en los ámbitos de sección óptima para uno u otro problema.

Partiendo de lo anteriormente mencionado, el uso frecuente de la sección cuadrada dentro del D.F. (criterio RCDF-87) es perfectamente justificado; ya que esta sección siempre estuvo intermedia como alternativa dentro de nuestro estudio, pero siempre

cargada a la sección óptima y al cambiar de criterio o al confrontarlos, surgía como sección eficiente o dentro de este ámbito.

La sección triangular puede ser solución óptima siempre y cuando se tenga un adecuado control en la correcta fabricación de la misma; así como en su procedimiento de hincado pero siempre fundamentado en algunas pruebas de carga que le puedan dar solidez a la elección.

La sección circular comienza distar del término eficiente, ya que para la mayoría de los casos analizados se acercaba a la cuadrada en costos pero distaba de la triangular en capacidades de carga, lo que seguramente la convertiría en sección usada sólo en casos particulares o para casos no contemplados en nuestro estudio.

## BIBLIOGRAFIA

1. P. Galabru., "Tratado de procedimientos generales de construcción", Vol. 1. Ed. Reverté, 1974
2. Edwar V. Krick "Introducción a la Ingeniería y al diseño en la ingeniería" Ed. Limusa, 1981.
3. Park and Paulay., "Estructuras de concreto reforzado". Ed. Limusa, 1983.
4. Popov., "Introducción a la mecánica de sólidos"., Ed. Limusa, 1986
5. Leopoldo Espinoza y Gabriel Auvinet G. "Manual de Obras Civiles", (B.3.3.), Instituto de Investigaciones Electricas, CFE, 1981.
6. "Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto", Gaceta oficial del D.D.F., No. 44, 1987.
7. Serrano Ortiz., "Pilotes usados en cimentaciones profundas"., Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, 1978.

8. Moreno alfaro H., "Pilotes de fricción en el regalmento de construcciones para el D.F.: Una revisión de criterios"., Petroleos mexicanos.
  
9. G. Auvinet y M.J. Mendoza., "Consideraciones respecto al diseño de cimentaciones sobre pilotes de fricción en zonas sísmicas"., I.I. UNAM.