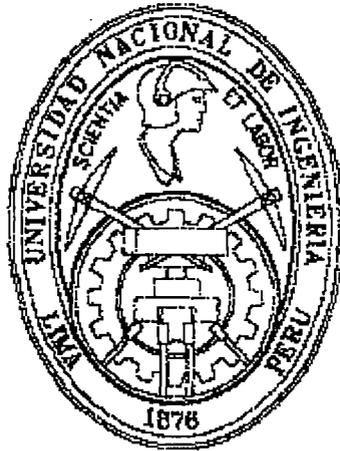


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**ANALISIS ESTATICO Y DINAMICO DE  
CIMENTACIONES PILOTEADAS PREFABRICADAS:  
INTERACCION DEL SISTEMA SUELO-PILOTE-  
MARTINETE**

**TESIS**

**Para optar el Título profesional de  
INGENIERO CIVIL**

**JORGE CHRISTIAN MIRANDA SANCHEZ**

**LIMA – PERU**

**2002**

**Digitalizado por:**

**Consortio Digital del  
Conocimiento MebLatam,  
Hemisferio y Dalse**

A mis Padres, Alejandro y  
Nela, pilares de mi educación

A mi esposa, Verónica, ya que  
sin ella no hubiera logrado  
este anhelo.

Mi agradecimiento muy  
especial al Ing. César  
Fuentes Ortíz, mi asesor, mi  
profesor y mi guía durante  
mis primeros años de vida  
profesional

## INDICE

<b>PROLOGO</b>		6
<b>CAPITULO I</b>	<b>INTRODUCCION</b>	
I.1.	Pilotaje	9
I.2.	Clasificación de cimentaciones Piloteadas prefabricadas	10
<b>CAPITULO II</b>	<b>CAPACIDAD ESTATICA DE CARGA ULTIMA POR PUNTA</b>	
II.1.	Introducción	35
II.2.	Determinación de la Capacidad Estática por punta Métodos de Vesic, Meyerhof, Jambú, Bowles y Terzagui.	36
II.3.	Análisis estático para un Grupo de pilotes.	47
II.4.	Influencia de un grupo de pilotes en la Capacidad Estática de carga por punta.	54
II.5.	Interacción estática suelo - carga	59
<b>CAPITULO III</b>	<b>CAPACIDAD ESTATICA DE CARGA ULTIMA POR FRICCION</b>	
III.1.	Introducción	63
III.2.	Determinación de la Capacidad Dinámica de Carga: Métodos de Tomlimson, Vijayvergiya y Beta.	63
III.3.	Determinación de la Capacidad Estática de Carga Total	71
III.4.	Sistema Estructural idealizado en el sistema suelo - pilote.	74
<b>CAPITULO IV</b>	<b>METODOS DE INTALACION DE CIMENTACIONES PILOTEADAS PREFABRICADAS</b>	
IV.1.	Introducción	89
IV.2.	Clasificación de Martinetes.	90
IV.3.	Martinetes Vibratorios	96



## PROLOGO

En el Perú la capacidad estática de carga de las unidades de cimentación piloteadas prefabricadas se ha considerado siempre a nivel de proyecto de ingeniería, dejando el cálculo de la capacidad dinámica de carga para efectos de obra por considerarse propios del hincado, de esta forma factores tan importantes en el análisis dinámico no son tomados en cuenta en el diseño de ingeniería, manteniéndose una separación innecesaria lo que ha llevado a innumerable errores

El objetivo de la presente tesis es demostrar la importancia de considerar un análisis dinámico en el proyecto de ingeniería y encontrar una relación entre ambos métodos obteniendo un procedimiento el cual permitirá al ingeniero encargado del diseño involucrar todos los factores propios del sistema suelo-pilote-martinete hasta la puesta en servicio de la unidad de cimentación.

Las bases de este estudio serán la determinación de la capacidad estática de carga por diversos métodos, analizando para ello la capacidad estática por punta, la capacidad estática por fricción, asimismo se determinará la capacidad dinámica de carga por medio de fórmulas dinámicas y un análisis más complejo utilizando una onda de

esfuerzos inducida producida por el impacto del martinete durante el hincado.

Para esta propuesta se esta tomando como modelo la cimentación piloteada del Muelle SiderPerú ubicado en Chimbote.

CAPITULO I  
INTRODUCCION

## CAPITULO I INTRODUCCION

### I.1.- PILOTAJE

#### I.1.1.-FUNCION

Los pilotes son elementos estructurales de concreto y/o acero, que se utilizan para transmitir cargas de la superficie a los niveles más inferiores en la masa del suelo.

Esta transmisión puede ser por distribución vertical de la carga al estrato mas inferior a través de la punta del pilote.

Los pilotes comúnmente se utilizan de la siguiente forma:

- Para llevar la carga de la superestructura en o a través de un estrato de suelo. Las cargas verticales y laterales pueden ser involucradas.
- Para resistir fuerzas de levantamiento o fuerzas de volteo.
- Para compactar depósitos sueltos no cohesivos a través de una combinación del desplazamiento de volumen del pilote y las vibraciones de hincado.
- Estos pilotes pueden ser posteriormente extraídos.
- Para controlar asentamientos cuando las cimentaciones superficiales o losas están bajo un suelo muy suave o bajo un estrato compresible.
- Para controlar amplitudes de vibración y la frecuencia de vibración en una cimentación de máquinas.
- Como un factor de seguridad adicional debajo de los estribos y puentes y/o pilas.
- En la construcción de estructuras en el mar, para transmitir las cargas sobre el nivel del agua a través de ella al suelo subyacente. Este es un caso de pilotaje parcialmente embebido.

- Una cimentación piloteada es mas cara que una cimentación superficial y mas cara que una losa. Se debe tener cuidado en la determinación de las propiedades del suelo a la profundidad de interés de tal forma que se conozca el número de pilotes que se necesita y su longitud.
- Se debe efectuar un análisis de costo para determinar si una cimentación con pilotes o una losa son mas económicos.

## **I.2.- TIPOS DE CIMENTACIONES PILOTEADAS**

Los diversos tipos de cimentaciones piloteadas se muestran en la figura 1.1.

### **I.2.1.- POR EL MATERIAL QUE LO FORMA**

#### **- DE MADERA**

Son generalmente pilotes de 12 a 18 mt y con una carga de trabajo restringida a 25 tn o menos.

No pueden soportar esfuerzos debido a un fuerte hincado y en ocasiones para penetrar mantos muy resistentes. Se puede reducir el daño en la punta utilizando regatones de acero y para determinados martillos, el peligro de romperlo se evita limitando el número de golpes y el esfuerzo en la cabeza del pilote.

Tiene una duración indefinida si permanentemente se encuentran rodeados por suelo saturado y se pudren en la parte superior a la zona de saturación, sin embargo se les puede prolongar la vida tratándolos con creosota a presión.

En las aguas saladas es preferible no utilizarlos ya que son atacados por organismos marinos.

Otra forma de clasificación es la que nos proporciona el Manual de la ASCE (American Society of Civil Engineers):

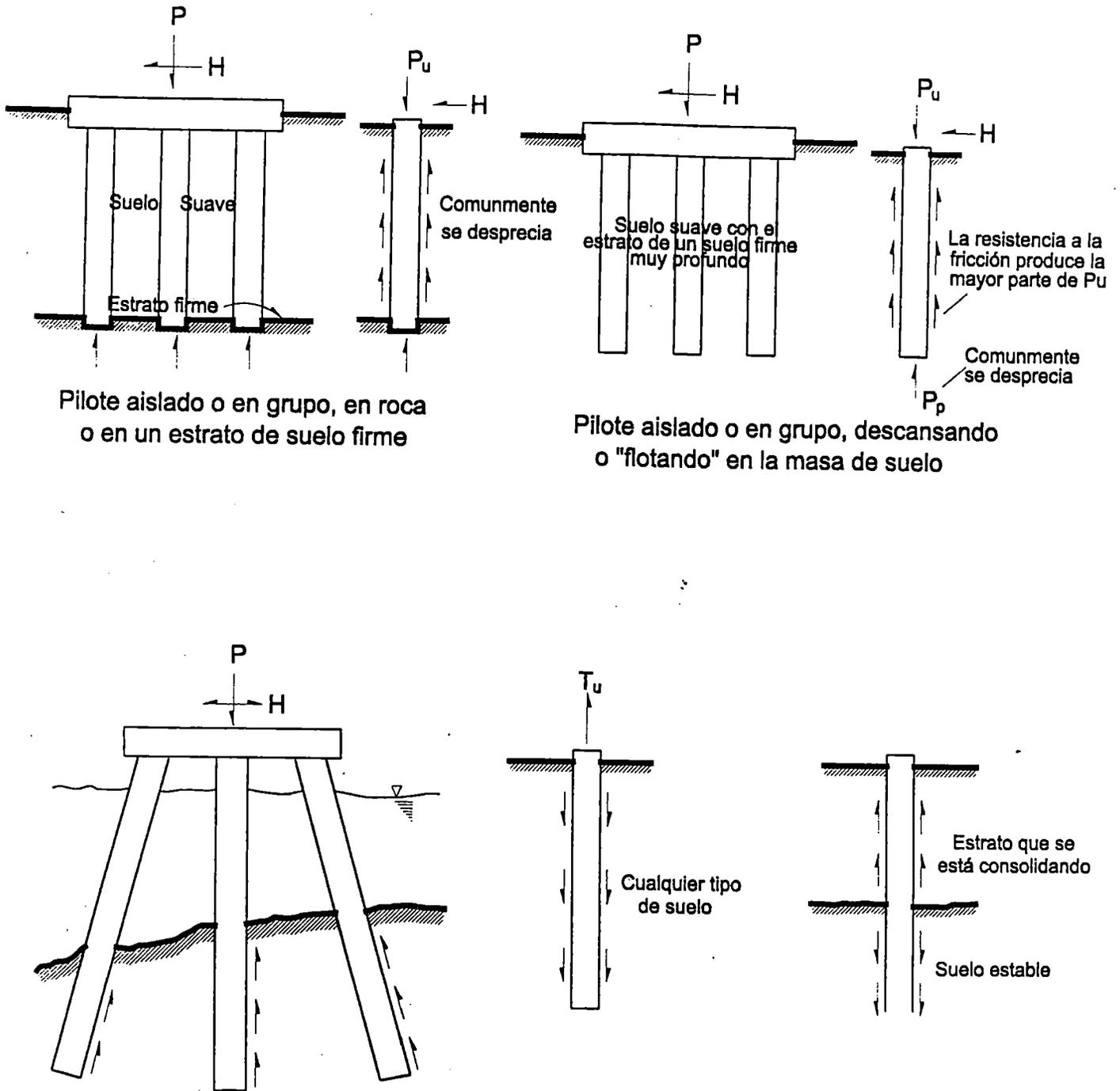


Fig. 1.1 Configuraciones típicas de los pilotes. Observar que los pilotes casi siempre están en grupo y el análisis es con frecuencia para un solo pilote.

Clase A : Para ser utilizados en cargas pesadas y/o longitudes grandes sin apoyo. El diámetro mínimo es 300 mm.

Clase B : Para cargas medianas. El diámetro mínimo es de 300 mm.

Clase C : Su uso bajo un permanente nivel freático o para trabajo temporal. El diámetro mínimo es de 300 mm.

La carga de diseño permisible basada en el material del pilote es :

$$P_a = A_p \cdot f_a$$

Donde:

$A_p$  = Area promedio de la sección del pilote.

$f_a$  = Esfuerzo de diseño admisible para el tipo de madera.

#### DE CONCRETO :

Pueden dividirse en dos categorías principales: vaciados in-situ y vaciados en cama de prefabricados.

Para efectos de la presente tesis se estudiarán solo los pilotes prefabricados, sin embargo como referencia general describiremos ambos tipos.

##### - Pilotes Vaciados In-Situ :

Se subdividen en dos tipos : con y sin funda.

El concreto de un pilote con funda es vaciado dentro de un forro de metal o tubo delgado que se deja en el terreno.

El tubo es delgado y su resistencia se desprecia para valuar la capacidad del pilote, sin embargo no debe colapsar bajo la presión del terreno.

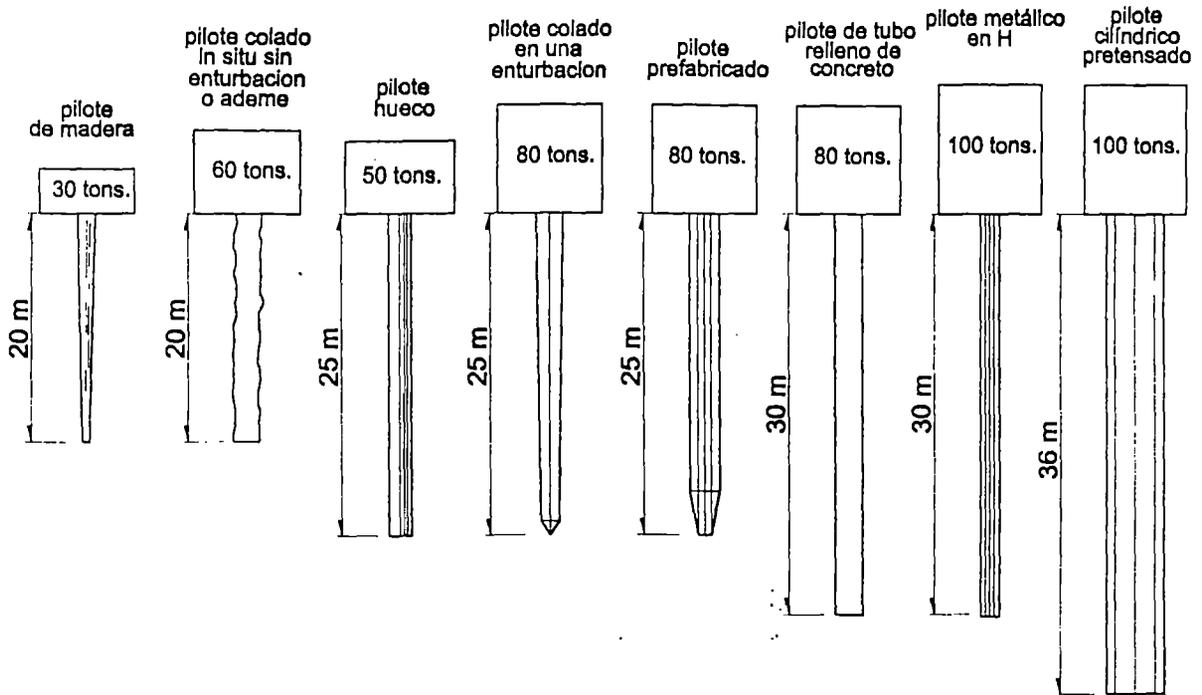


Fig. 1 Longitudes y cargas máximas de distintos tipos de pilotes

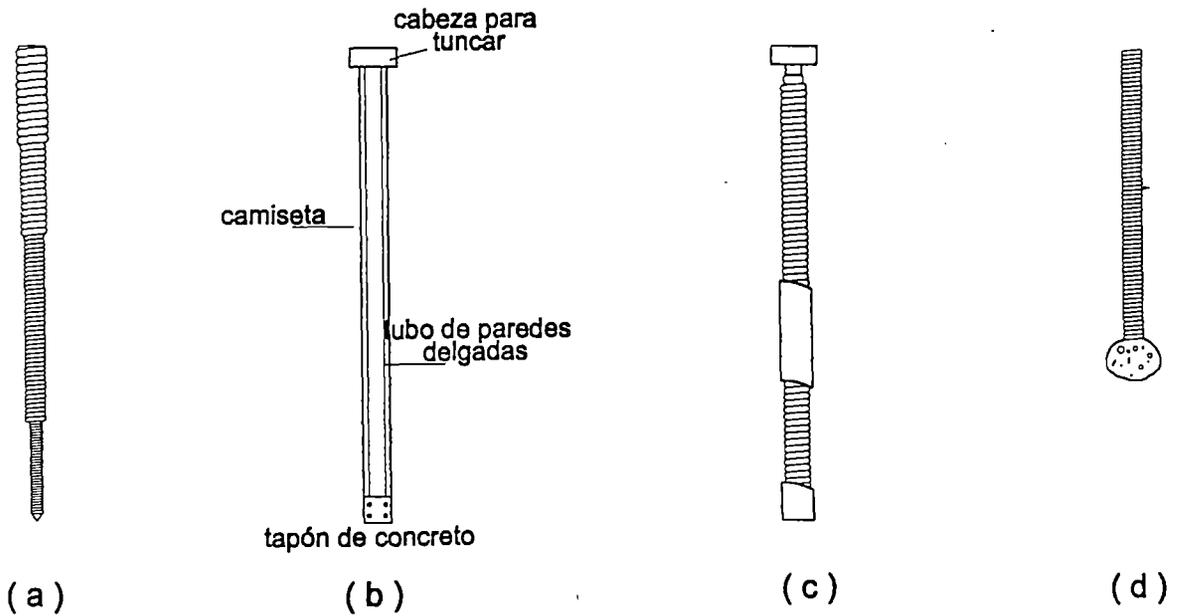


Fig. 2 Pilotes hincados con mandril  
 (a) Pilote Raymond  
 (b) Pilote Armco  
 (c) Pilote tipo Cobi  
 (d) Pilote Ademado Franki

Los forros muy delgados y tubos son soportados en el interior por un mandril.

Las figuras 2<sup>a</sup>, 2b, 2c muestran pilotes hincados con mandril, el forro 2d por ser grueso no se hinca con el mandril.

Cuando los pilotes no llevan funda se reduce el costo. Por lo general se hincaba un tubo abierto en el terreno, se limpiaba y se llenaba con concreto al ir sacando el tubo. Estos pilotes tenían imperfecciones.

Un medio mas efectivo para la continuidad del concreto al formar un pilote sin forro es el pilote Franki (figura 3).

- Pilotes prefabricados :

Los pilotes prefabricados de concreto necesitan refuerzo para el izaje e hincado.

La longitud trae problemas ya que si se subestima es un problema prolongarlos. Si la longitud se sobrestima se cortan en la longitud requerida.

Los pilotes pueden ser preesforzados, con esto se reduce la tensión y agrietamiento durante el hincado, además resiste la tensión.

El problema si es de una sola pieza viene a ser la longitud.

El agua de mar y la humedad del mismo atacan el refuerzo del pilote a través de las grietas en el concreto, el óxido hace que el concreto se caiga, por ello es preferible usar concreto denso y de alta calidad.

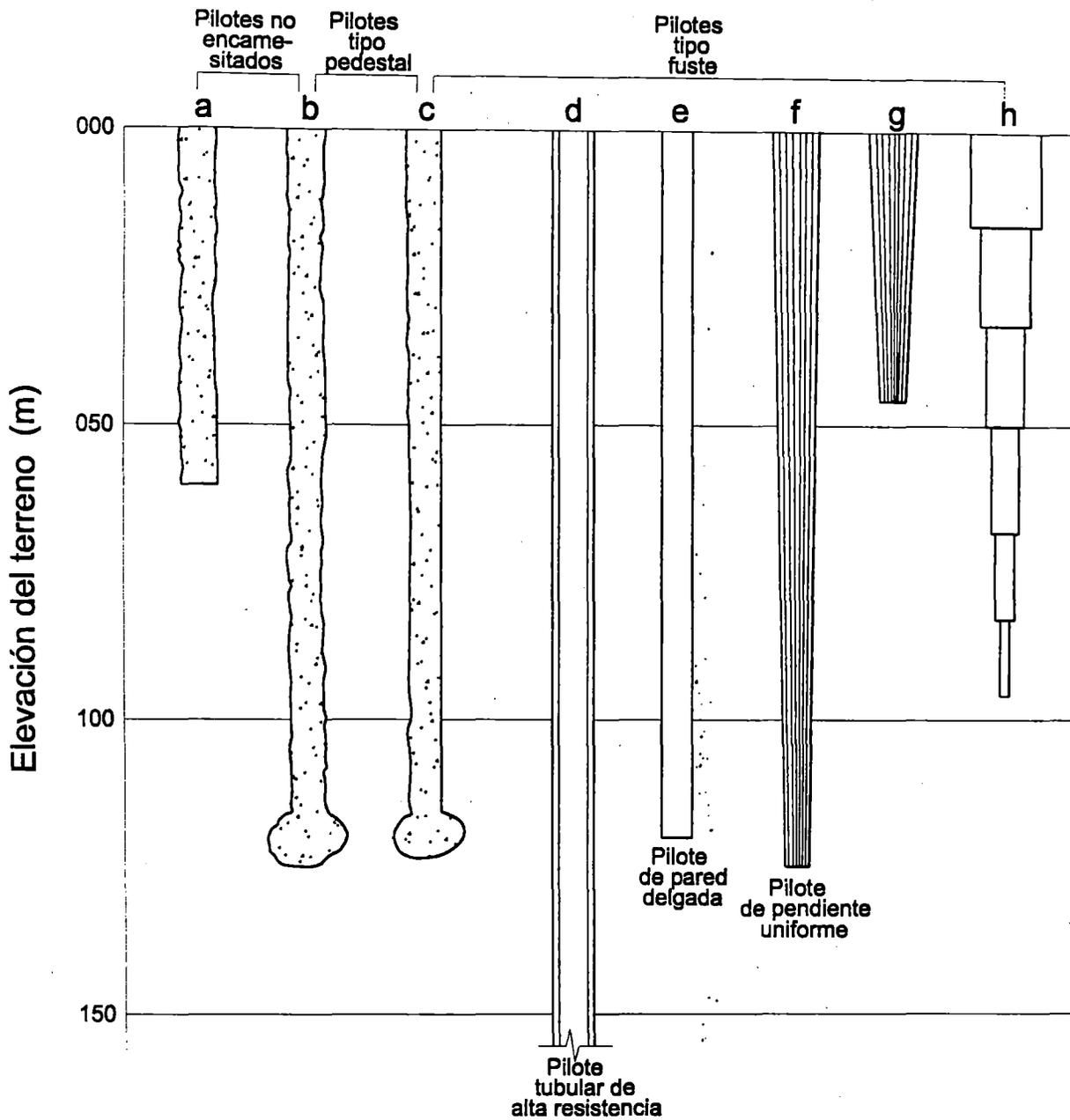


Fig. 4 Tipos comunes de pilotes vaciados in situ (patentados)

- (a) Pilote no encamesitado western
- (b) Pilote no encamesitado tipo pedestal
- (c) Pilote encamesitado tipo pedestal franki
- (d) Tubo soldado
- (e) Pilote encamesitado western
- (f) Pilote monotubo unión
- (g) Pilote Raymond.

Las profundidades indicadas visualmente varían.

En el concreto preesforzado el deterioro no es rápido ya que las grietas son reducidas al mínimo. Existen pilotes huecos cilindricos de concreto preesforzado con diámetros de hasta 1.5 mt y espesor de las paredes de 10 a 15 cm.

- De acero

En los pilotes de acero se utilizan como pilotes los tubos de acero que se llenan de concreto después de hincados y los perfiles H cuando el hincado es fuerte, existen grandes cargas de trabajo o las longitudes son poco comunes.

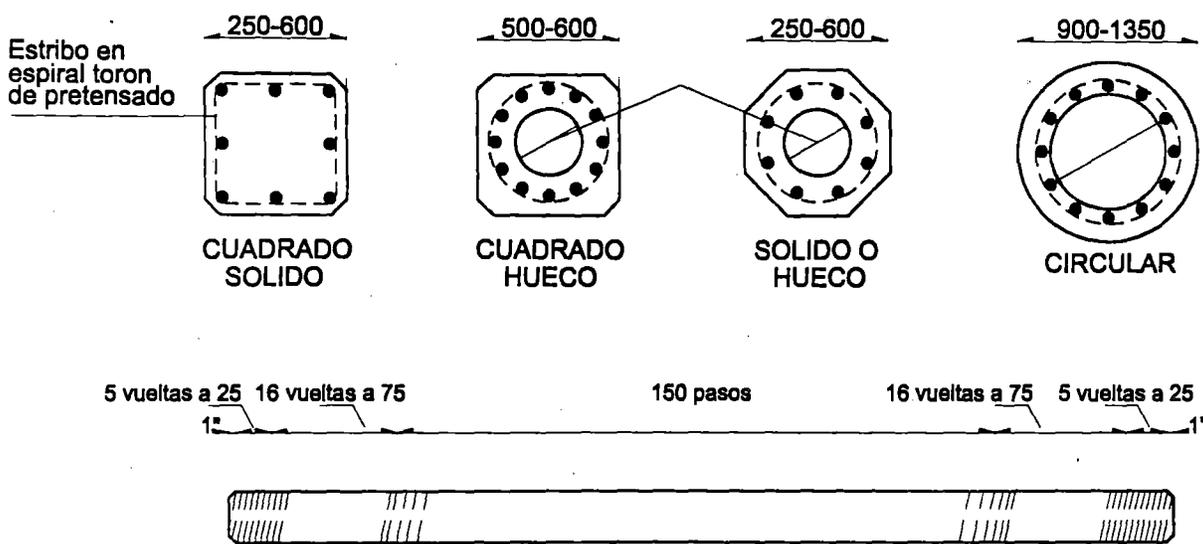
Penetran en terreno fácilmente y por ello se usan para alcanzar estratos profundos de gran capacidad de carga. A veces el hincado es difícil por el tipo de terreno y puede dañar las alas del perfil, por ello conviene reforzar las puntas.

Los tubos por lo general son hincados cerrados casi siempre son una placa en el extremo inferior, si se hincan con un extremo abierto deben limpiarse antes de llenarlos con concreto.

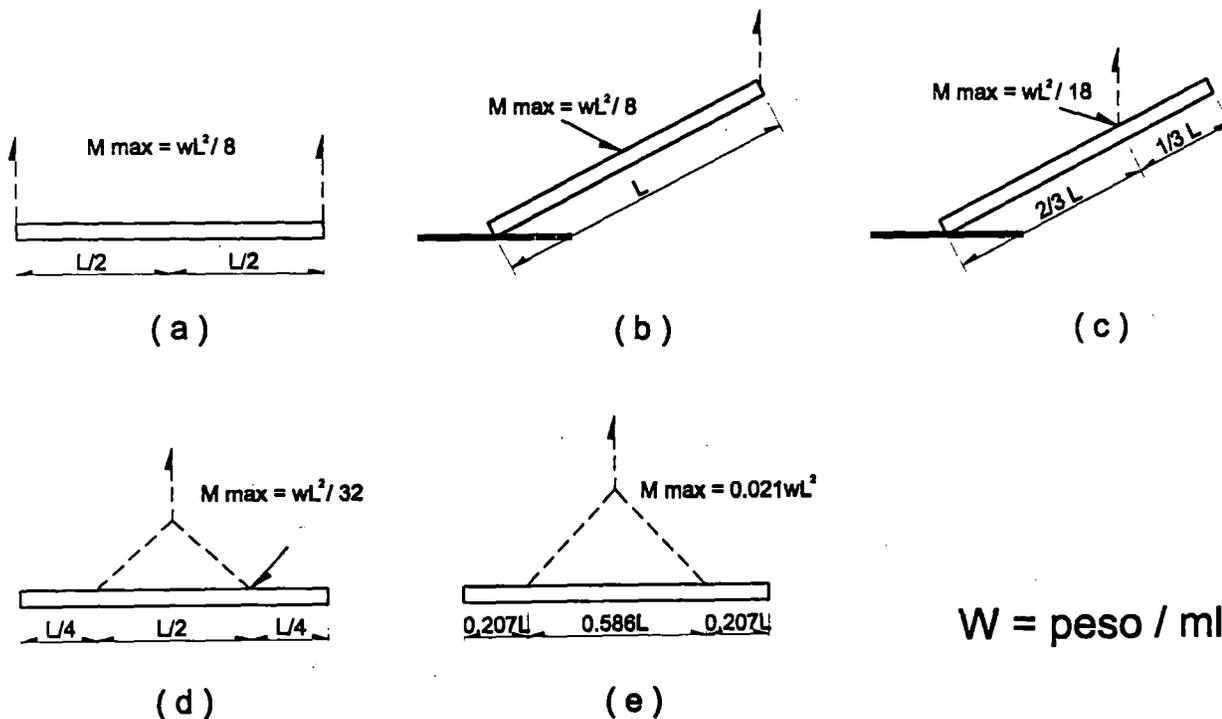
La corrosión no es un problema si el pilote esta bajo terreno natural, pero puede haber problemas en los rellenos ya que éstos tienen aire atrapado.

Cuando el pilote sobresale del nivel del suelo son atacadas las zonas arriba y abajo.

Para combatir la corrosión se pueden utilizar recubrimientos epóxicos o enfundar el pilote con concreto.

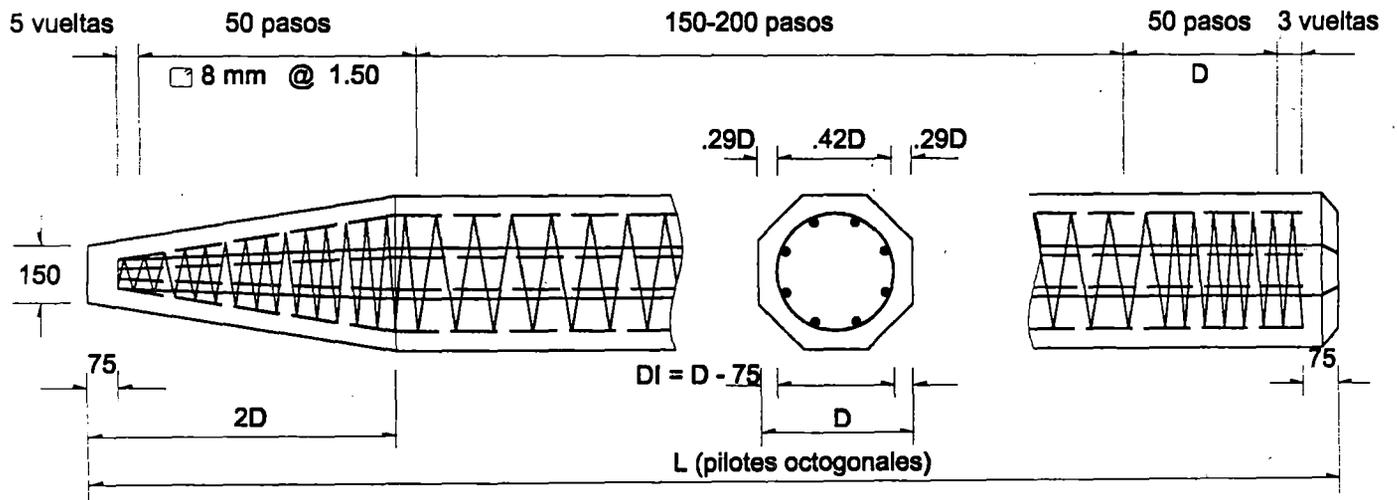
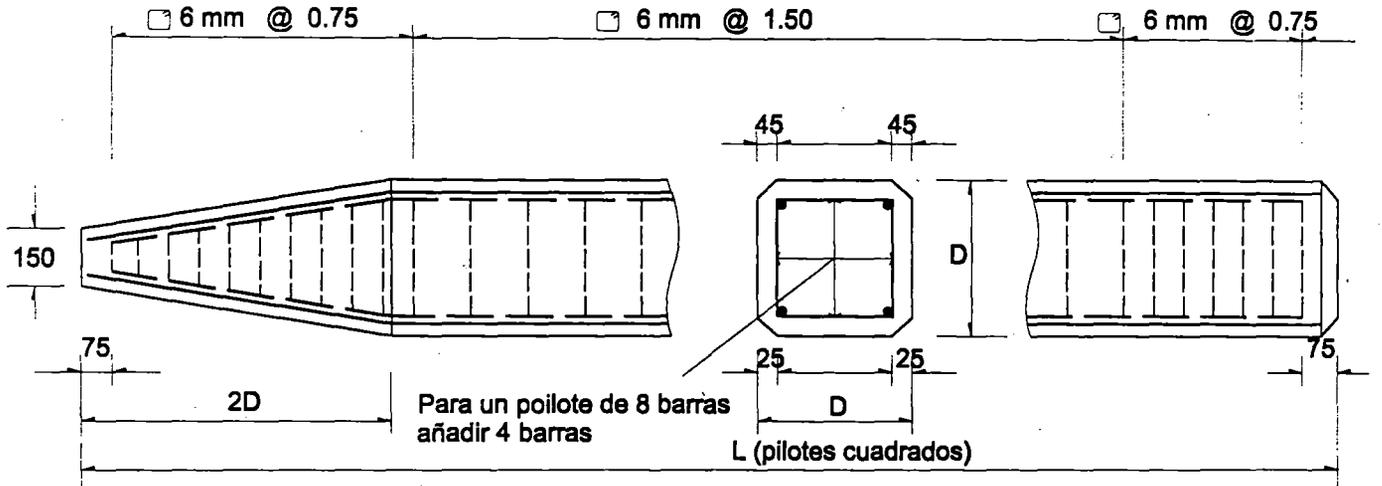


Pilote de concreto prensado típico (dimensiones en mm)



Ubicación de los puntos de los izajes para pilotes prefabricados con flectores resultantes

## Detalles típicos de Pilotes Prefabricados de Concreto



Dmm	400	500	600
US	5	4	3
SI	15	10	10

DI = Diámetro Interior

Todas las dimensiones están en milímetros

### **I.2.2.- POR EL METODO DE INSTALACION**

Los pilotes son colocados en el terreno por determinados métodos:

1.- Hincado con una sucesión constante de golpes en la cabeza del pilote utilizando un martillo de hincado. Esto produce un daño considerable y vibración local, la cual puede ser rechazada u observada por los códigos municipales o de construcción o agencias del medio ambiente y por supuesto daño a la propiedad vecina.

2.- Hincado utilizando un martillo vibratorio el cual sujeta la cabeza del pilote. Esto es utilizado cuando las vibraciones no son excesivas. Este método se aplica mas en depósitos con poca cohesión.

3.- Por "gateo" de los pilotes. Esto se aplica mas para elementos cortos.

4.- Perforando un hueco e insertando un pilote dentro de el o mas comúnmente llenando la cavidad con concreto el cual produce un endurecimiento posterior en el pilote. Una variada cantidad de técnicas y métodos existen para esta técnica y se presentan en la tabla N° 01 con algunas instalaciones típicas.

### **I.2.3.- POR EL DESPLAZAMIENTO DEL TERRENO**

Se clasifican en:

#### **I.2.3.1.- PILOTES DESPLAZANTES**

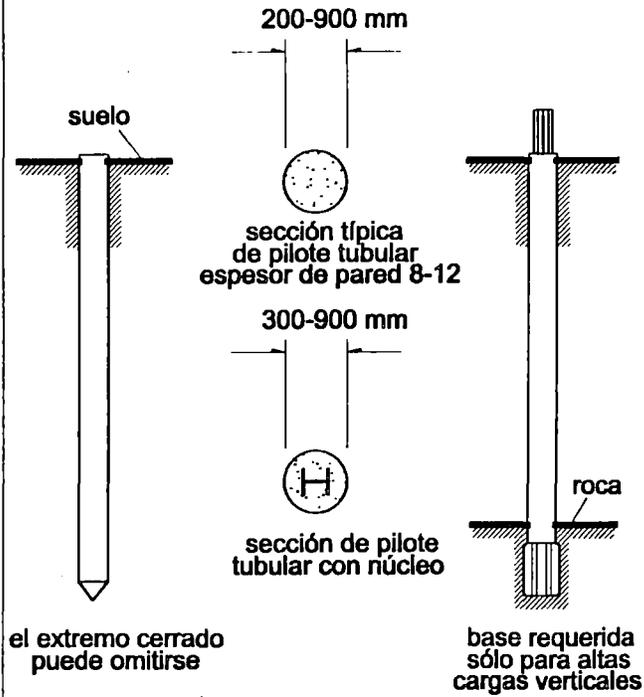
Se subdividen en pilotes de tipo hincado y pilotes tipo hincado y vaciado y situ.

##### **A.- TIPO HINCADO**

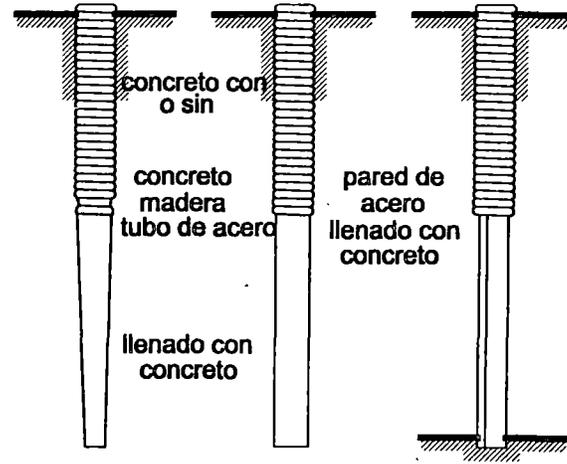
En esta categoría se encuentran los pilotes de sección sólida y de sección hueca con extremo cerrado y son:

Tabla 1

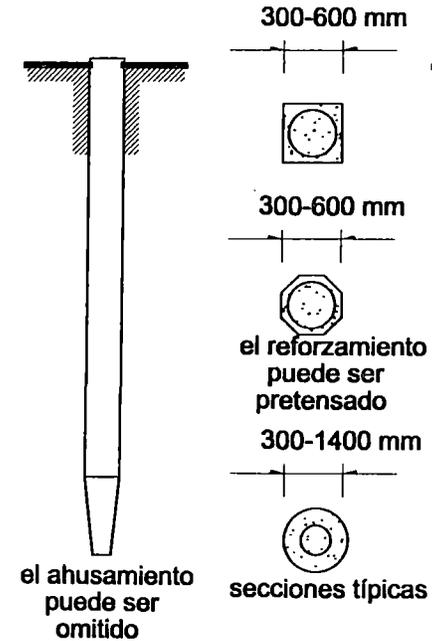
PILOTE DE CONCRETO  
VACIADO EN TUBOS DE ACERO



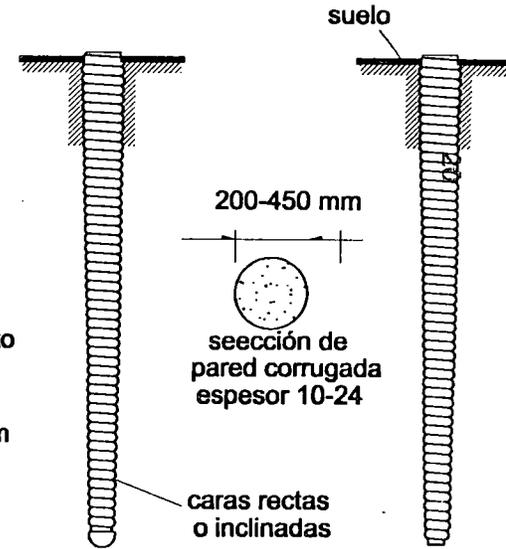
PILOTES COMPUESTOS



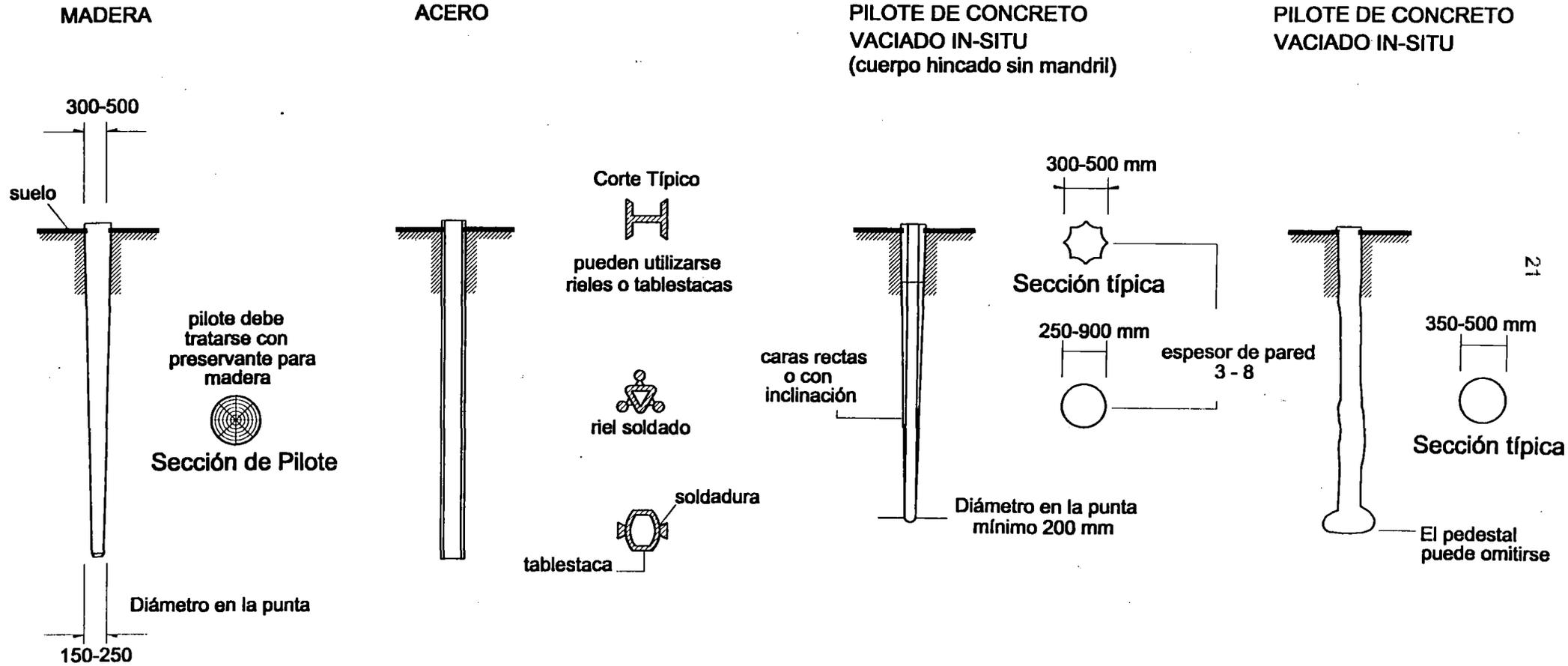
PILOTE DE CONCRETO  
PREFABRICADO Y PRETENSADO



PILOTE VACIADO IN-SITU  
(pared delgada hincada con mandril)



**Tabla 1**  
**PILOTES TIPICOS**



- a.- Madera de sección redonda o cuadrada.
- b.- Concreto prefabricado de sección sólida o tubular.
- c.- Concreto pretensado de sección sólida o tubular.
- d.- Tubo de Acero con extremos cerrados (también del tipo gateado).
- e.- Tubo de acero aflautado y cónico.
- f.- Cajón de acero.

#### **B.- TIPO HINCADO Y VACIADO IN-SITU**

Corresponden a este tipo:

- a.- Tubo de acero hincado y retirado después de vaciado el concreto.
- b.- Cascarón de concreto prefabricado y vaciado con concreto.
- c.- Cascaron de acero de pared delgada con mandril retirable y luego vaciado con concreto.

#### **I.2.3.2.- PILOTES DE PEQUEÑO DESPLAZAMIENTO**

También son hincados y gateados dentro de la tierra, pero poseen una pequeña sección transversal, estos son los siguientes:

- a.- Pilote prefabricado (sección tubular con extremo abierto).
- b.- Pilote de concreto pretensado (sección tubular con extremo abierto o cruciforme).
- c.- Pilote de acero de sección H.
- d.- Pilote de acero de sección tubular (extremo abierto).
- e.- Pilotes tornillo.
- f.- Pilotes del tipo cilindro roscado.

#### **I.2.3.3.- PILOTES NO DESPLAZANTES**

Conformado por un amplio rango de técnicas de perforación, la operación empieza removiendo el suelo por perforación. Si se desea se forra el hueco resultante, posteriormente se aloja el

concreto pudiéndose retirar el forro. Los tipos mas comunes son:

- a.- Concreto vaciado en hueco perforado por taladros rotatorios, método de la circulación invertida.
- b.- Tubo puesto en hueco perforado y vaciado in situ.
- c.- Unidades de concreto prefabricado puesto en el hueco.
- d.- Sección de acero puesto en hueco perforado.
- e.- Tubo de acero perforado en tierra.

Existe una categoría que no está considerada y es el pilote compuesto, que puede ser formado por combinación de unidades de pilotes en mas de una categoría.

<b>Tipo de Pilote :</b>	<b>MADERA</b>
<b>Longitud Máxima:</b>	35 mt.
<b>Longitud Optima:</b>	9-20 mt
<b>Especificaciones Del material :</b>	ASTM-D25 para pilotes; PI-54 para la calidad de la creosota. CI-60 para el tratamiento con la creosota (Standars of American Wood Preservers Assoc.)
<b>Máximo Esfuerzo Recomendado :</b>	Mediciones en la mitad de la longitud dan 4-6 M Pa para Cedro, Pino de Noruega, abeto, y dependiendo en el Codigo 5-8 M Pa para Pino del Sur, abeto Douglas, roble, nogal americano.
<b>Máxima Carga para Condiciones Normales :</b>	270 KN.
<b>Rango óptimo de Carga :</b>	130-125 KN.
<b>Desventajas :</b>	Dificultad para los empalmes. Vulnerable para dañarse durante el hincado duro. Vulnerable para colapsar sino esta tratada. Difícil para retirarla halándola y reemplazarla cuando se rompe durante el hincado.
<b>Ventajas :</b>	Comparativamente costo inicial bajo. Si permanece permanentemente sumergido, los pilotes son resistentes al colapso. Fácil de manipular.
<b>Observaciones :</b>	Buen comportamiento para pilotes de fricción en suelos granulares.

<b>Tipo de pilote :</b>	<b>ACERO</b>
<b>Longitud Máxima:</b>	Prácticamente ilimitado.
<b>Longitud Optima:</b>	12-50 mt.
<b>Especificaciones Del material :</b>	ASTM-A-36 para secciones estructurales. ASTM-A1 para secciones tipo riel.
<b>Máximo Esfuerzo Recomendado :</b>	$f_s = (0.35-0.5) f_y$
<b>Máxima Carga para Condiciones Normales :</b>	Esfuerzo máximo permisible x área.
<b>Rango óptimo de Carga :</b>	350-1050 KN.
<b>Desventajas :</b>	Vulnerable a la corrosión. La sección HP puede dañarse o deflectarse por obstrucciones.
<b>Ventajas :</b>	Fácil de empalmar. Alta capacidad de carga. Desplazamiento difícil. Capaz de penetrar a través de obstrucciones suaves.
<b>Observaciones :</b>	Mejor resultado para capacidad en roca. Reducir la capacidad permisible para ubicaciones en locaciones corrosivas o sino dar protección contra la corrosión.

**TIPO DE PILOTE :** PILOTE DE CONCRETO VACIADO  
IN SITU (CUERPO HINCADO SIN  
MANDRIL).

**Longitud Máxima:** 45 mt.

**Longitud Optima:** 9 - 25 mt.

**Especificaciones  
Del Material :** ACI

**Máximo Esfuerzo**

**Recomendado :**  $0.33 f'c$  ;  $0.4 f'c$  ; si es escalonado  $\leq 14$   
Los esfuerzos en el tubo =  $0.35 f_y$  si el  
espesor de la pared es  $\geq 3$  mm.

**Máxima Carga para  
Condiciones  
Normales :**

900 KN.

**Rango óptimo de  
Carga :** 450 - 700 KN.

**Desventajas :** Difícil para empalmar después de efectuado  
el vaciado.  
Desplazamiento considerable.

**Ventajas :** Puede ser reclavado.  
La pared del tubo no se daña fácilmente.

**Observaciones :** Mejor resultado para pilotes de fricción  
de longitud mediana.

**TIPO DE PILOTE :** PILOTE DE CONCRETO VACIADO  
IN-SITU.

**Longitud Máxima:** 36 MT.

**Longitud Optima:** 8 - 12 MT.

**Especificaciones  
Del material :** ACI

**Máximo Esfuerzo  
Recomendado :** 0.25 - 0.33 f'c

**Máxima Carga para  
Condiciones  
Normales :** 1300 KN

**Rango óptimo de  
Carga :** 350 - 900 KN.

**Desventajas :** El concreto debe colocarse en seco.  
El trabajo depende mucho en la calidad del  
trabajador.

**Ventajas :** Economía inicial.

**Observaciones :** La carga permisible en el pedestal del  
pilote esta controlada por la capacidad de  
carga del estrato inmediato bajo el  
pilote.

**TIPO DE PILOTE :** PILOTE DE CONCRETO VACIADO EN TUBOS DE ACERO.

**Longitud Máxima:** Prácticamente ilimitado.

**Longitud Optima:** 12 - 36 mt.

**Especificaciones Del material :** ASTM A36 para el interior.  
ASTM A252 para el tubo.  
ACI 318 para el concreto.

**Máximo Esfuerzo Recomendado :** 0.40 fy para reforzado < 205 M Pa.  
0.50 fy para núcleo < 175 M Pa.  
0.33 f'c para concreto.

**Máxima Carga para Condiciones Normales :** 1800 KN sin núcleo.  
18000 KN para secciones grandes con núcleo.

**Rango óptimo de Carga :** 700 - 110 sin núcleo.  
4500-14000 con núcleo.

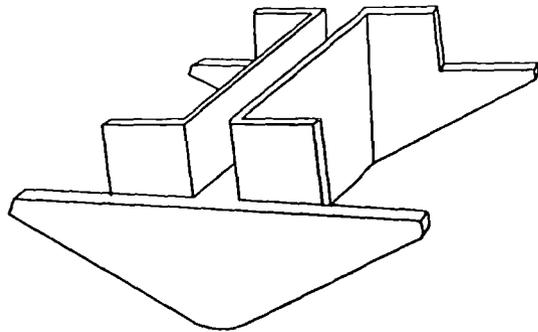
**Desventajas :** Alto costo inicial.  
Desplazamiento para pilotes cerrados en el extremo.

**Ventajas :** Mejor control durante su instalación.  
Ningún desplazamiento para instalación abierta en el extremo.  
Los pilotes de extremo abierto tienen un mejor comportamiento frente a obstrucciones.  
Capacidades de carga altas.  
Fácil de empalmar.

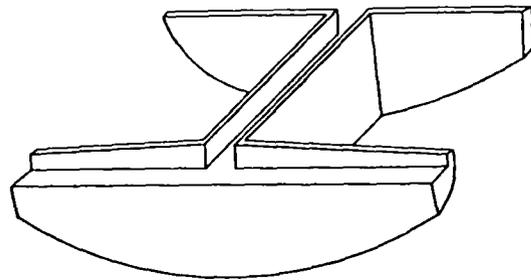
**Observaciones :** Provee una resistencia alta a la flexión, En la cual el pilote tenga carga lateral.

<b>TIPO DE PILOTE :</b>	<b>PILOTE COMPUESTO</b>
<b>Longitud Máxima:</b>	55 mt.
<b>Longitud Optima:</b>	18 - 36 mt.
<b>Especificaciones Del material :</b>	ACI Code 318 para concreto ASTM A36 para acero estructural. ASTM A252 para pilote tubular. ASTM D25 para madera.
<b>Máximo Esfuerzo Recomendado :</b>	El mismo que para el concreto de otros Pilotes. El mismo que para el acero que se usa en otros pilotes. El mismo que se usa para la madera para pilotes compuestos.
<b>Máxima Carga para Condiciones Normales :</b>	1800 KN sin núcleo.
<b>Rango óptimo de Carga :</b>	250 - 725 KN.
<b>Desventajas :</b>	La unión de dos materiales es difícil.
<b>Ventajas :</b>	Se puede obtener una longitud considerable a muy bajo costo.
<b>Observaciones :</b>	Las debilidades de algunos de los materiales utilizados gobernarán los esfuerzos máximos y la capacidad.

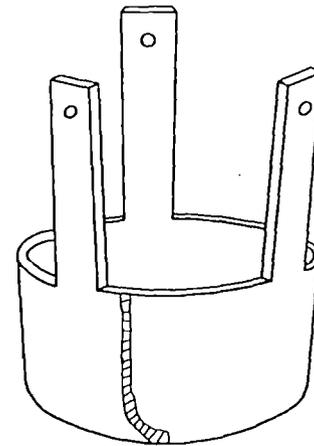
<b>TIPO DE PILOTE :</b>	<b>PILOTE PREFABRICADO DE CONCRETO</b>
<b>Longitud Máxima:</b>	30 mt para prefabricado 36 mt para preesforzado.
<b>Longitud Optima:</b>	12 - 15 mt para prefabricado. 18 - 30 mt para presforzado.
<b>Especificaciones Del material :</b>	ASTM A15 para refuerzo de acero. ASTM A82 ACI Code 318 para el concreto.
<b>Máximo Esfuerzo Recomendado :</b>	0.33f'c a no ser que los códigos de edificación local permitan menos. 0.4 fy para refuerzo a no ser que ser pretensado.
<b>Máxima Carga para Condiciones Normales :</b>	8500 KN para pretensado. 900 KN para prefabricado.
<b>Rango óptimo de Carga :</b>	350 - 3500 KN.
<b>Desventajas :</b>	Difícil para manipular a no ser que sea pretensado. Alto costo inicial. Considerable desplazamiento.
<b>Ventajas :</b>	Alta capacidad de carga. La resistencia a la corrosión se puede mejorar. Se puede obtener un hincado duro.
<b>Observaciones :</b>	Los pilotes cilíndricos son fabricados para poder tomar con facilidad los momentos flectores.



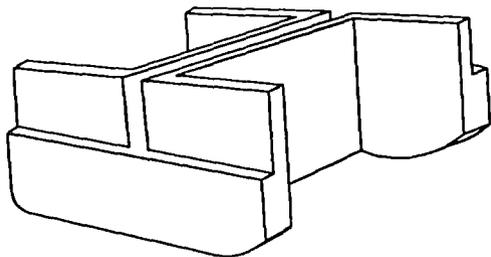
(a)



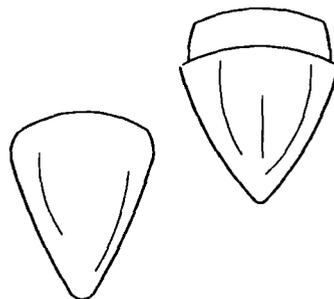
(c)



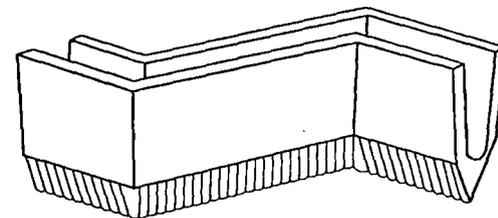
(e)



(b)

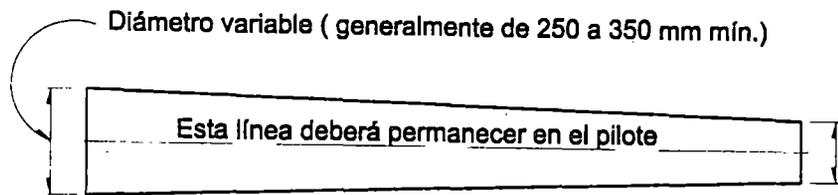


(d)

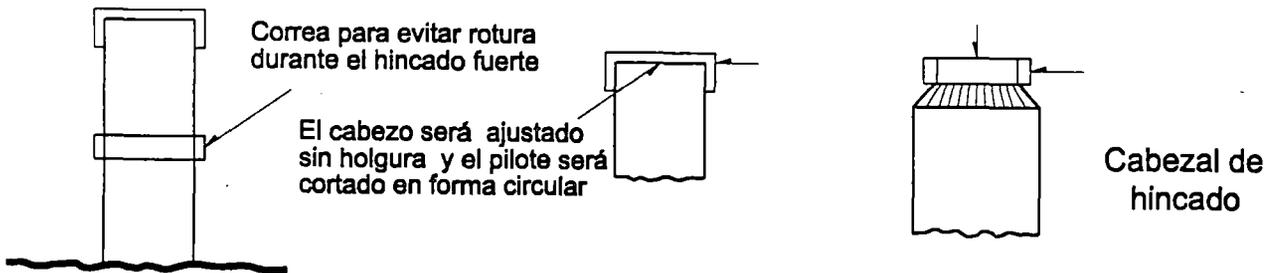


(f)

Se observan algunos tipos de puntas disponibles comercialmente. También existen puntas de muy alta resistencia para estratos bastante duros. Las puntas son utilizadas cuando hay un gran número de pilotes.  
(a), (b) y (c) son puntas para pilotes tipo H ; (d) para pilotes tubulares, (e) para pilotes de madera y (f) para tablestacas

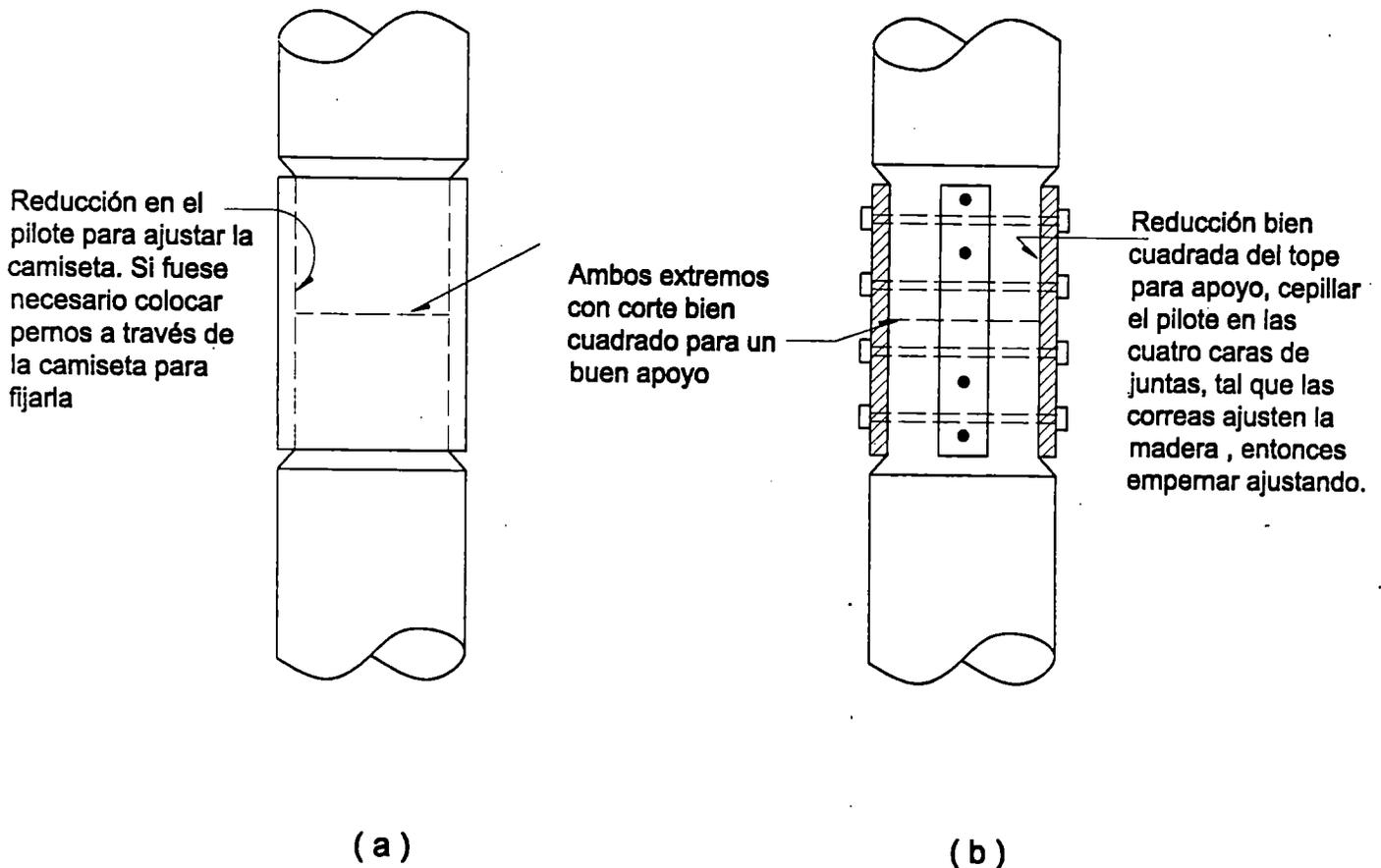


### Criterio de alineaciones para pilotes de madera



Herramientas para proteger al pilote durante las operaciones de hincado

## Uniones en Pilotes de Madera



- a) Usando una camiseta de metal con los extremos cuidadosamente desbastados (reducidos) para fijar y asentar
- b) Utilizando planchas de acero como uniones

CAPITULO II  
CAPACIDAD ESTATICA DE CARGA ULTIMA POR PUNTA

## **CAPITULO II CAPACIDAD ESTATICA DE CARGA ULTIMA POR PUNTA**

### **II.1 INTRODUCCION**

Estudiaremos diversos métodos para la determinación de la Capacidad estática de carga última por punta de un pilote, para ello nos basaremos en los resultados de pruebas de carga que son los parámetros mas confiables.

#### **II.1.1 Propiedades del suelo para el cálculo de la capacidad de carga.**

Los parámetros del suelo requeridos para el análisis de la capacidad estática del suelo (y grupo) consisten en el ángulo de fricción interna y la cohesión  $c$ . La controversia inmediata llega dado que algunos diseñadores utilizan los esfuerzos no drenados (o totales) donde otros (particularmente mas recientemente) utilizan los valores del esfuerzo efectivo.

Se requieren constantes de amortiguamiento y recuperación elástica de la deformación del suelo si es que se va a efectuar un análisis de ecuación de onda. El análisis de pilotes bajo carga lateral requerirá de la utilización del módulo de reacción de la subrasante o módulo lateral de esfuerzo-deformación.

Los parámetros del suelo pueden determinarse de los ensayos triaxiales de laboratorio en muestras no disturbadas. Si bien esto es muy satisfactorio para pilotes preexcavados no son muy buenos para pilotes hincados puesto que el suelo en la vecindad del pilote estará sujeto a un permanente remoldeo y cambio del contenido de agua y por lo general a un incremento de su densidad denominado empaquetamiento.

Dado que este cambio es indeterminado no hay forma de reproducir esto en algún ensayo de laboratorio con cierta confiabilidad. Debido a ello si se van a utilizar ensayos de laboratorio, estos serán en muestras originales in-situ no disturbadas.

Por estas razones existe una tendencia a usar mas el ensayo SPT y la mayoría de los pilotes son diseñados con los valores de  $N$  de este ensayos, en arenas y ensayos de resistencia a la compresión no confinados.

## **II.2 DETERMINACION DE LA CAPACIDAD ESTATICA POR PUNTA: METODOS DE VESIC, MEYERHOF, JAMBU, BOWLES Y TERZAGUI.**

### **II.2.1 INTRODUCCION**

La capacidad última por punta puede calcularse utilizando las ecuaciones de capacidad de carga que se usan para calcular las cimentaciones superficiales. El termino  $N_y$  puede usualmente despreciarse también como el ancho de la base  $B$  del pilote no sea tan grande. No se podrá despreciar en un pilote esbelto de base  $B$ . El cálculo de la capacidad de carga por punta varia ampliamente debido a que hay un desacuerdo en los factores de capacidad de carga  $N_i$ .

Observamos que algunos de los valores mas usuales pero no daremos alguna recomendación especial para los "mejores" puesto que la práctica local del diseñador y su preferencia gobernará los valores seleccionados.

Como previamente se definió los parámetros de suelo pueden ser ensayados en muestras no disturbadas, pero mas frecuentemente los datos de compresión no confinada así como del ensayo SPT o

también datos del ensayo del cono de penetración. En general la capacidad por punta se calcula como sigue:

$$P_{pu} = A_p \cdot ( c \cdot N'_c + \eta \cdot q \cdot N'_q + 1/2 B \cdot \gamma \cdot N'_\gamma )$$

Donde :

$A_p$  = Area efectiva de la punta del pilote que soporta, generalmente incluye una punta especial.

$C$  = Cohesión (o resistencia al corte no drenado s).

$B$  = Base del pilote ( usualmente solamente donde la punta es alargada.

$N'_c$  = Factor de capacidad de carga para cohesión ajustado para la forma y profundidad, cuando  $\phi = 0$  tenemos  $c = s$  y  $N'_c$  se toma igual a 9.0 .

$N'_q$  = Factor de capacidad de carga para efectos de sobrecarga  $q = \gamma \cdot L$  e incluye efectos de forma y efectos de profundidad.

$N'_\gamma$  = Factor de capacidad de carga para el ancho de la base igual a  $N_\gamma$  dado que esto no es afectado por los efectos de profundidad.

$q$  = Esfuerzo efectivo vertical (presión de sobrecarga) en la punta del pilote.

$\eta$  = 1 Para todo excepto para la fórmula de Vesic (1975) donde los factores  $N$  son :

$$\eta = ( 1 + K_o ) / 3$$

$K_o$  = Coeficiente de presión de tierra.

### II.2.2.- METODO DE VESIC

Para Vesic (1975) los factores de capacidad de carga  $N'_c$  y  $N'_q$  se pueden calcular de acuerdo a la siguiente relación:

$$N'_q = \frac{3}{3 - \text{Sen}\phi} \left[ \exp [(\pi/2 - \phi) \cdot \tan\phi] \cdot \tan^2(45 + \phi/2) \cdot I_{rr}^{(4\text{sen}\phi)/[3(1 + \text{sen}\phi)]} \right]$$

El índice de Rigidez reducida  $I_{rr}$  en esta ecuación se calcula utilizando la deformación volumétrica como sigue :

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + \varepsilon_v \cdot I_r}$$

El Índice de rigidez  $I_r$  se calcula utilizando el módulo de corte  $G$  y la resistencia al corte del suelo con la siguiente relación:

$$I_r = \frac{G'}{c + q \tan \phi} = \frac{G'}{s}$$

Cuando existen condiciones de suelo no drenado o el suelo esta en un estrato denso el término  $\varepsilon_v$  puede tomarse como cero e

$I_{rr} = I_r$  , estimamos el valor de  $I_r$  con la siguiente tabla :

Suelo	$I_r$
Arena ( $D_r = 0.5-0.8$ )	75-150
Limo o sedimento fluvial	50- 75
Arcilla	150-250

Se recomienda usar valores mas bajos para valores promedio efectivos mas altos significativos  $\eta q$  .

Dado que el método de Vesic esta basado en la teoria de la expansión de la cavidad, el comportamiento de la punta del

pilote es similar al de CPT. En estas razones Baldi y sus colaboradores sugirieron las siguientes relaciones para el calculo de  $I_r$  :

Para el Cono Holandes :

$$I_r = \frac{300}{f_R}$$

Para el cono eléctrico :

$$I_r = \frac{170}{f_R}$$

Donde :

$f_R$  = Relación de fricción.

El término  $N'_c$  para el factor de capacidad de carga se calcula como en las cimentaciones superficiales:

$$N'_c = (N'_q - 1) \cot \phi$$

Donde :

$\phi = 0$  (Para condiciones no drenadas)

$$N'_c = 4/3 ( \ln(I_{rr}) + 1 ) + \pi/2 + 1$$

Para el mismo caso Meyerhof recomienda utilizar :

$$N'_c = 4/3 ( \ln(I_{rr}) + 1 ) + 1$$

### II.2.3 METODO DE MEYERHOF

Los factores de capacidad de carga  $N'_c$  y  $N'_q$  mostrados en la figura 5 han sido propuestos por Meyerhof.

Estos factores incorporan los efectos de forma y profundidad y están dados como en un cierto rango ( desde  $N'_q$  y  $N_c$  hasta  $N'_c$ ).

Este gráfico es una composición de los ensayos de carga en un gran número de pilotes. Meyerhof también utiliza la relación de

profundidad crítica  $L_c/B$  la cual básicamente significa que si la profundidad de embebimiento excede la relación de profundidad crítica, la capacidad de carga (y resistencia a la fricción) alcanza un valor limitado. Notamos que hay una profundidad crítica para la resistencia lateral y un valor diferente para la resistencia por punta, particularmente donde la punta penetra dentro de un suelo firme o un estrato de arena densa o algún terreno similar.

La capacidad por punta límite en suelo no cohesivo esta dada para una relación  $L/B \geq L_c/B$  como la siguiente relación:

$$P_{pu} = A_p \cdot q \cdot N'_q \leq A_p \cdot (50N'_q) \cdot \tan\phi$$

Meyerhof también utiliza  $9S_u$  como la resistencia última en la arcilla ( $\phi = 0$ ). Para utilizar los factores  $N$  de Meyerhof se deben realizar los siguientes pasos:

1.- Calcular  $R_1 = L/B$  y obtener  $R_2 = L_c/B$  de las curvas críticas para el ángulo  $\phi$  determinado. Ver la figura.

2.- Ingresar a la curva con  $\phi_m$  Si  $R_1 > 0.5R_2$  y  $\phi$  es menos que  $30^\circ$  obtendremos factores de la curva superior  $N'_1$ .

Si  $R_1 < 0.5R_2$  se utilizara las líneas entre las curvas superior e inferior como sigue:

$$N'_c = N_c + (N'_c - N_c) \frac{R_1}{0.5R_2} -$$

3.- Si  $\phi > 30^\circ$ , y dependiendo en la relación  $L/B$ , proyectar las curvas reducidas mostradas en la figura sobre la parte superior derecha de la figura e interpolar como sea necesario.

El rango entre  $N_1$  y  $N'_1$  toma en cuenta otros factores de sitio tales como arena densa o suelta, suelos con diversos grados de

compresibilidad y para las arcillas el índice de sobreconsolidación (OCR).

#### II.2.4 METODO DE JAMBU

En el año de 1976 JAMBU calcula  $N'_q$  (con el ángulo  $\psi$  en radianes ) como sigue:

$$N'_q = ( \tan\phi + \sqrt{1 + \tan^2\phi} )^2 \cdot \exp(2\psi\tan\phi)$$

$N_c$  se puede obtener de la ecuación para  $\phi > 0$ . Utilizar  $N_c = 5.74$  cuando  $\phi = 0$  . El valor de  $\Psi$  se muestra en la figura y puede variar desde  $60^\circ$  en suelo suave compresible a  $105^\circ$  en suelos densos. La tabla da un rango seleccionado de valores de  $N'_c$  y  $N'_q$  utilizando las ecuaciones de Vesic y de Jambu. Los factores de capacidad de carga de Jambu no son tan diferentes de los de Meyerhof y se muestran en la figura 6.

La American Petroleum Institute (API 1984) ha formulado recomendaciones para el diseño de pilotes en arena, limos, arenas limosas y gravas basados en un rango de descripción de suelos desde muy suelto a muy denso. Esta publicación sugiere que utilizando  $N'_q$  desde un rango muy bajo de 8 para una arena muy suelta hasta 50 para una grava muy densa o una arena muy densa. La tabla indica que los valores están dados tan solo como guía.

#### II.2.5 METODO DE BOWLES

Los factores de capacidad de carga están basados en los parámetros de suelo producidos por los efectos del hincado (los cuales serian desconocidos en el estado inicial).

Despreciando el término  $N_q$  y haciendo un ajuste para el peso del pilote la ecuación puede reescribirse como sigue :

$$P_{pu} = A_p ( c.N'_c + \eta.q(N'_q-1) )$$

Esta ecuación da un valor para  $c = s$  y  $\phi = 0$  , los valores  $N'_q = 1$  y la capacidad última por punta sería:

$$P_{pu} = A_p.(9S_u)$$

La mayoría de diseñadores utilizan  $N_q$  y no  $(N_q-1)$  para  $\phi = 0$  dado que el factor reducido en un valor de 1 es demasiado refinamiento. En el diseño de la capacidad última por punta se divide por un factor de seguridad de 1.5 a 3.0 .

Tabla

Factores de Capacidad de Carga  $N'_c$  y  $N'_q$  conforme las ecuaciones de Vesic y de Jambu; con los valores de  $N'_c$  en la ecuación de Jambu se utiliza un factor de forma  $s_c = 1.3$

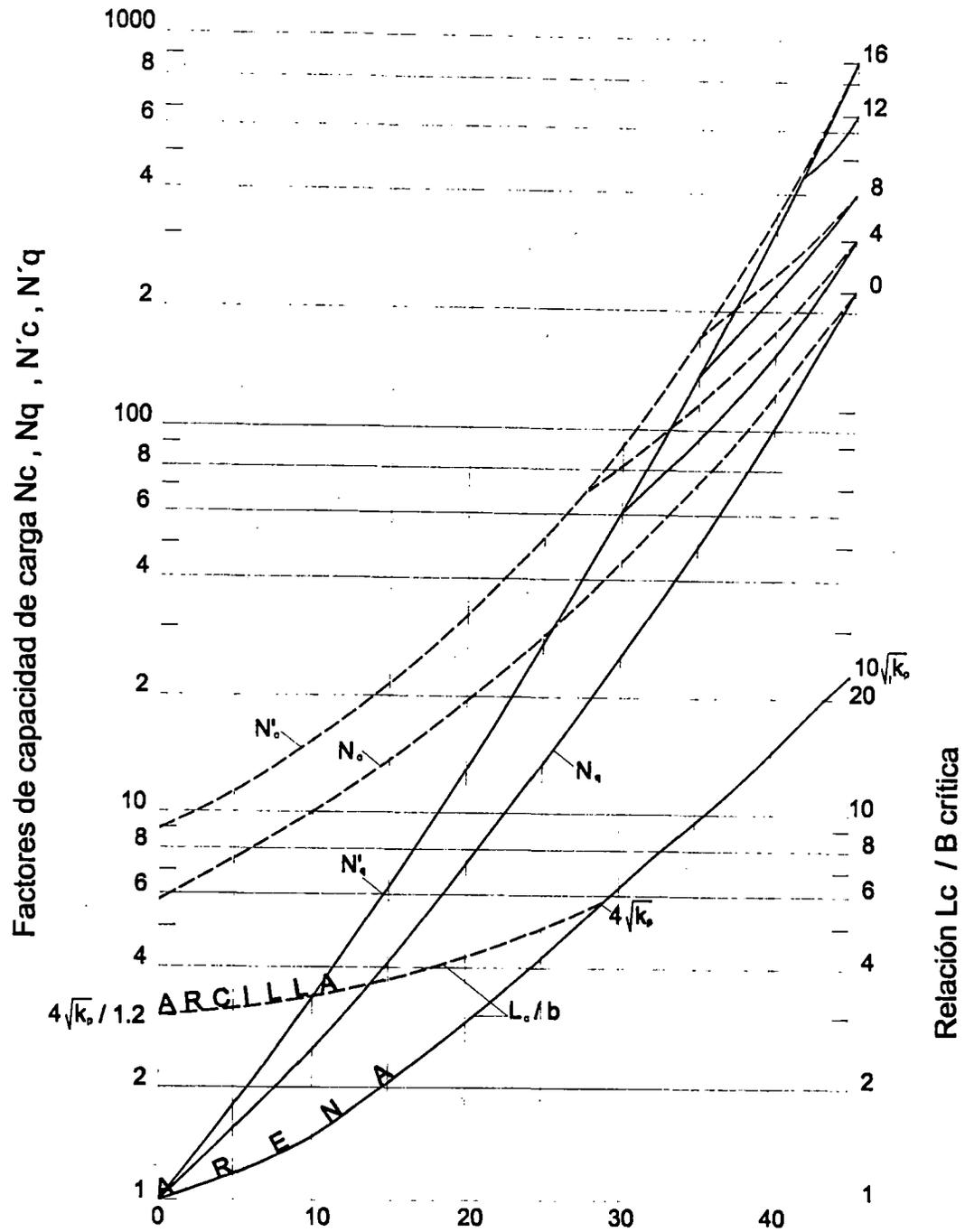


Fig. 5 Factores de capacidad de carga para cimentaciones profundas (según Meyerhof - 1976)

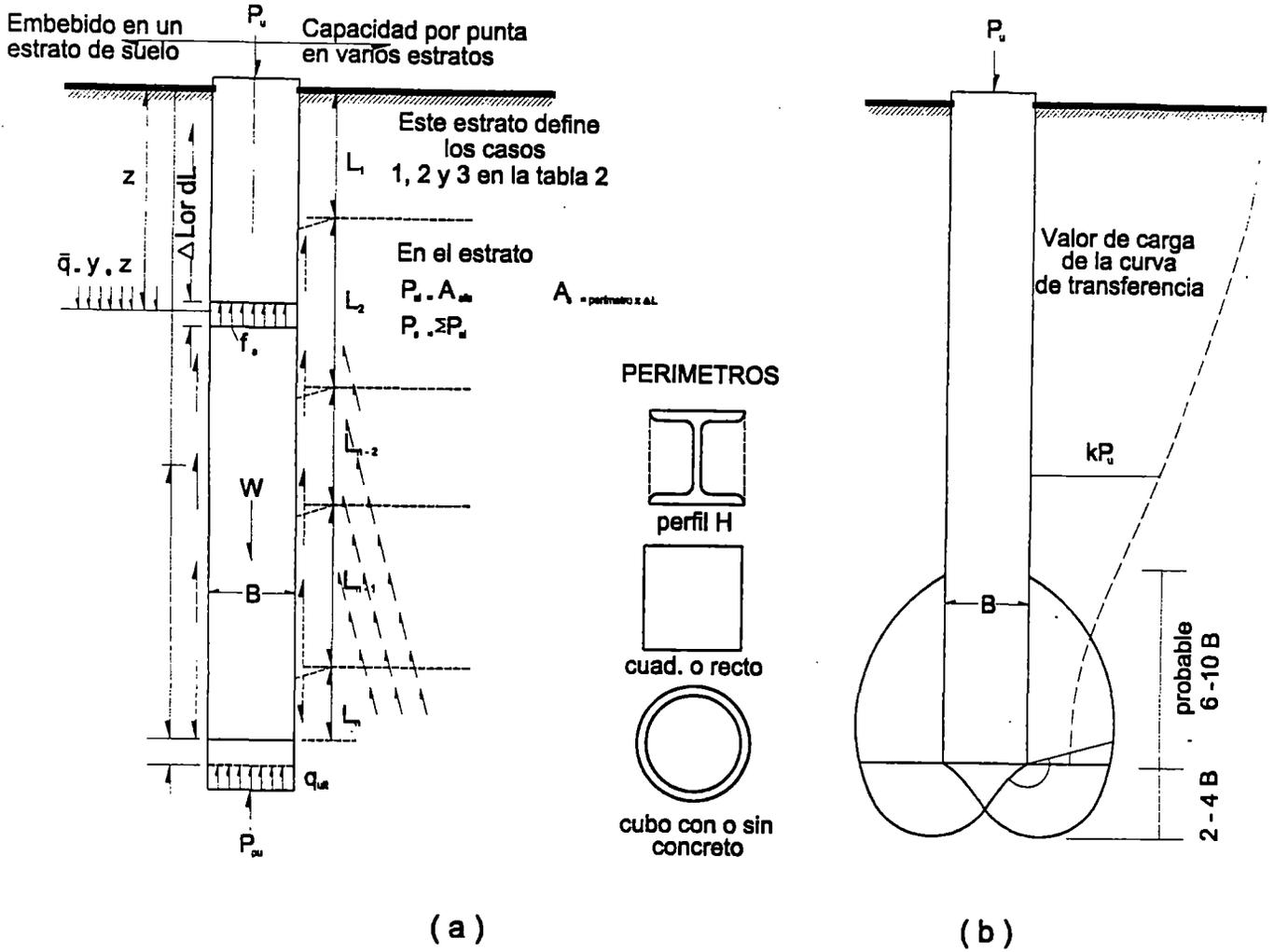


Fig. 6 ( a ) Desarrollo general de la capacidad del pilote en una masa de suelo uniforme o en estratos  
 ( b ) Zona cualitativa de interés para la capacidad última por punta

**Jambu**

$\phi$	$\psi$	=	75°	90°	105°
0°	N'c	=	1.00	1.00	1.00
	N'q	=	5.74	5.74	5.74
5°			1.50 5.69	1.57 6.49	1.64 7.33
10°			2.25 7.11	2.47 8.34	2.71 9.70
20°			5.29 11.78	6.40 14.83	7.74 18.53
30°			13.60 21.82	18.40 30.14	24.90 41.39
35°			23.08 31.53	33.30 46.12	48.04 67.18
40°			41.37 48.11	64.20 75.31	99.61 117.52
45°			79.90 78.90	134.87 133.87	227.68 226.68

**VESIC**

Irr =	10	50	100	200	500
N'q =	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
N'c =	6.97	9.12	10.04	10.97	12.19
	1.79 8.99	2.12 12.82	2.28 14.49	2.46 16.69	2.71 19.59
	3.04 11.55	4.17 17.99	4.78 21.46	5.48 25.43	6.57 31.59
	7.85 18.83	13.57 34.53	17.17 44.44	21.73 56.97	29.67 78.78
	18.34 30.03	37.50 63.21	51.02 86.64	69.49 118.53	104.03 178.98
	27.36 37.65	59.82 84.00	83.78 118.22	117.34 166.15	183.16 260.15
	40.47 47.04	93.70 110.48	134.53 159.13	193.13 228.97	311.50 370.04
	59.66 53.66	145.11 144.11	212.79 211.79	312.04 311.04	517.60 516.60

### II.2.6.- METODO DE TERZAGHI

Terzagui plantea la siguiente ecuación general para determinar la capacidad de carga estática por punta en un pilote de sección circular:

$$P_{pu} = A_p \cdot ( 1.3c \cdot N_c + \gamma \cdot L \cdot N_q + 0.4\gamma \cdot B \cdot N_\gamma )$$

Se debe tener presente dos diferencias sobre el apoyo de cimentación del pilote; en primera instancia sobre el suelo duro y el otro sobre el suelo homogéneo.

En primera instancia cuando el suelo situado dentro del espesor (L) es apreciable mucho mas compresible que el situado debajo de la base, la influencia que ejerce el suelo en la base circundante es igual a una sobrecarga  $L \cdot \gamma$ , en tales casos, los factores de capacidad de carga pueden tomarse directamente de la tabla siguiente:

$\phi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$
0	5.7	1.0	0.0
10	7.3	1.6	0.5
15	9.6	2.7	1.2
20	12.9	4.4	2.5
25	17.7	7.4	5.0
30	37.2	22.5	14.7
35	57.8	41.4	42.4
40	95.7	81.3	100.4
45	132.3	173.3	297.5
48	258.3	287.3	780.1
50	347.5	415.1	1153.2

## II.3.- ANALISIS ESTÁTICO PARA UN GRUPO DE PILOTES

### II.3.1.- COMPORTAMIENTO DE LOS PILOTES BAJO CARGA

El comportamiento de un grupo de pilotes es distinto a un pilote aislado, tanto en la capacidad de carga en lo que se refiere a asentamientos.

En un grupo de pilotes puede ocurrir el colapso de acuerdo a dos mecanismos diferentes, que son:

- El colapso como pilotes individuales en este caso el suelo comprendido dentro del grupo de pilotes no forma parte de la masa de suelo que se desplaza, sino que cada pilote individual se desplaza con respecto al suelo que lo rodea, como se muestra en la figura 7.
- Cuando los pilotes están colocados en grupos dejando entre sí un pequeño espacio. Los pilotes y el suelo contenido en el interior del grupo actúan conjuntamente como una sola unidad. A lo largo del perímetro del grupo aparece un plano de deslizamiento, produciéndose el "colapso del bloque" cuando el grupo se hunde e inclina como una unidad, como se muestra en la figura 8.

Es evidente que debe existir algún caso particular de espaciamiento en que la forma de colapso sea distinta para un pilote individual y para un bloque de pilotes.

Esta variación no solo depende del espaciamiento, forma del grupo y de la longitud de los pilotes.

La carga de colapso del grupo no es necesariamente la de un pilote individual multiplicada por el número de pilotes del mismo. En arena puede ser mayor que ésta; en arcillas

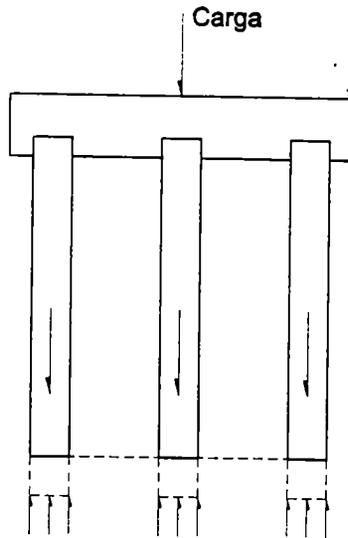


Fig. 7 Falla como pilotes aislados

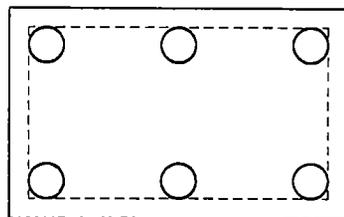
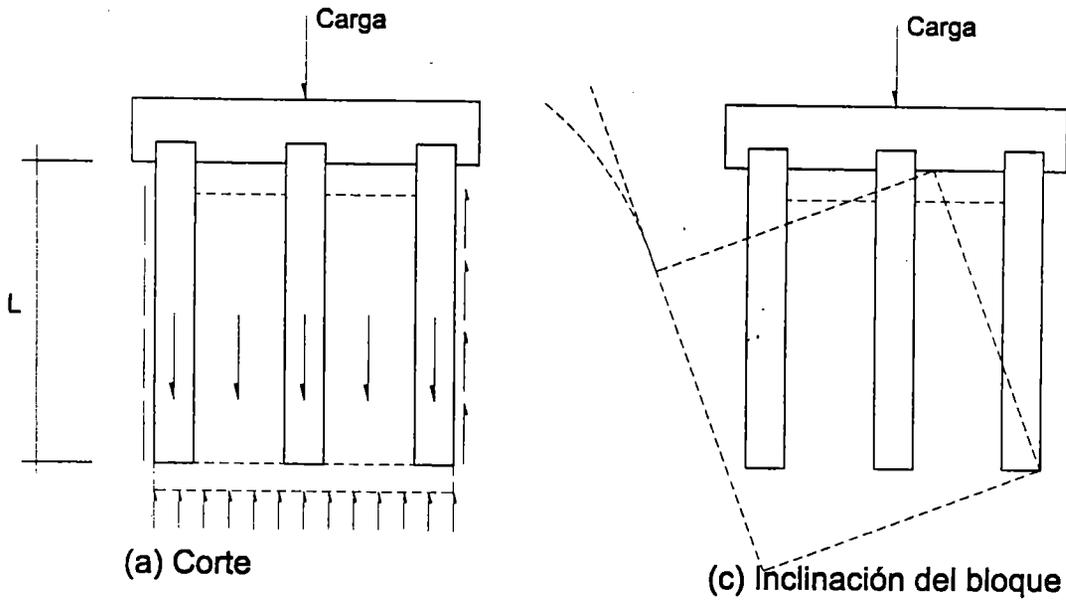


Fig. 8 Falla como bloque

Fig. 8 Falla como bloque

probablemente menor. La capacidad de carga de un grupo se desarrolla frente a los dos mecanismos de colapso.

Sin embargo existen algunas reglas, como espaciamiento, disposición de los pilotes en grupo, tipo de suelo y de la forma de ejecución de los mismos; que sirve como un marco de referencia para encasillar debidamente el criterio teórico y con la experiencia del proyectista lograr buenos resultados prácticos en el diseño del grupo de pilotes.

Se exige una separación mínima entre pilotes debido a que cuando se encuentran muy juntos, los efectos se traslapan, reduciéndose la capacidad individual del pilote. Evidentemente, que colocar los pilotes muy separados mejora la estabilidad lateral, pero por razones de economía no es posible ya que los cabezales serían muy grandes. Por estas razones se comentará respecto a un término llamado factor de grupo, espaciamiento y la capacidad de carga tanto para suelos granulares y cohesivos.

### **II.3.2.- GRUPO DE PILOTES EN SUELOS GRANULARES**

Para efectos de esta tesis en la que solo estudiaremos pilotes prefabricados, el efecto de hinca aumenta la densidad del suelo, luego los hincados muy cercanos se hacen muy dificultosos por estar el suelo muy denso. El efecto de compactación de un pilote en arena y grava se extiende como máximo una distancia de tres diámetros.

Se hinca inicialmente a los pilotes centrales y luego a los periféricos. Se tendrá además al grupo como una sola unidad e incluso como una pila formada por el área de todo el conjunto, probablemente con un factor de grupo mayor que la unidad.

Se establece en base a ensayos realizados por Kezdi, en un grupo de pilotes hincados respecto al espaciamiento en que se logra; para un espaciamiento de dos diámetros, tiene un factor de grupo igual a dos y para distancias de seis diámetros un factor de grupo igual a uno. Para condiciones intermedias se recomienda interpolar linealmente entre estos dos valores.

Sin embargo, este procedimiento es solo aplicable al caso de pilotes hincados en gravas y arenas. No deberá emplearse si estos estratos se encuentran sobre arcillas compresibles, en los casos en que los esfuerzos transmitidos por el grupo de pilotes a las arcillas puede provocar un sobrecarga o una consolidación excesiva.

El factor de grupo deberá emplearse únicamente para tener una idea previa de la carga de trabajo o plantear un presupuesto inicial a un anteproyecto.

Se suele recomendar una separación mínima de dos a tres diámetros entre centros.

#### II.3.2.1.- PILOTES SOBRE ARENA DENSA

$$P_g \geq n.P$$

$$S_g \gg S$$

Cuando el material situado debajo del nivel de la cimentación es demasiado compresible o inestable para soportarla, el peso de la estructura debe transferirse si es posible a un estrato mas adecuado en un nivel inferior.

Si este estrato está formado por arena, los pilotes se hincan a través de los materiales blandos, lo suficiente para que adquieran la capacidad de carga adecuada.

Si la arena esta moderadamente suelta los pilotes tendrán que hincarse una cantidad considerable. Si está algo compacta, puede no ser posible que la penetración sea mas que unos decímetros.

El apoyo proporcionado a los pilotes por la arena proviene en parte de la resistencia de la punta a penetrar más y en parte de la fricción entre el tramo inferior de los pilotes y la arena.

#### II.3.2.2.- PILOTES EN ARENA SUELTA

$$P_g \geq n.P$$

$$S_g = \alpha.S$$

Al hincar pilotes en una capa de arena suelta se compacta el material, en parte debido a la disminución en la relación de vacíos necesaria para compensar el volumen de pilotes y en parte al efecto compactador de las vibraciones producidas por el hincado.

El asentamiento en el conjunto se incrementa de acuerdo a un factor  $\alpha$ , que depende del número y espaciamiento de los pilotes.

La tabla A proporciona valores para  $\alpha$  encontrados por Terzagui y Peck, teniendo la siguiente distribución genérica en planta :

TABLA A

$B_g$ (ft)	$\alpha$
10	4
20	7
30	9
40	10
50	11
60	12

En la tabla B, se presenta las experiencias de Skempton, para estimar el factor de incremento para el asentamiento del grupo.

TABLA B

$B_g/D$	$\alpha$
1	1.0
5	3.5
10	5.0
20	7.5
40	10.0
60	12.0

### II.3.3.- GRUPO DE PILOTES EN SUELOS COHESIVOS

El comportamiento de las arcillas es diferente a los suelos granulares, ya que los pilotes hincados, como los excavados causan excesivo remoldeo del suelo principalmente en las arcillas blandas y sensitivas.

El efecto de reconsolidación, con el paso del tiempo recupera su resistencia original a rotura. Por ello la reconsolidación provoca un rozamiento negativo en el cuerpo del pilote. Esta reconsolidación es extremadamente lenta y puede que la resistencia original a rotura de toda la masa de terreno

próxima al grupo de pilotes no se alcance de nuevo durante la vida de la estructura. Los efectos de un rozamiento negativo son pequeños, y el caso de los pilotes excavados no llegan a producirse.

Cuando se aplica a un grupo de pilotes muy juntos, el suelo comprendido entre los pilotes se mueven hacia abajo junto con los pilotes, y en el instante de colapso, suelo y pilotes se mueven conjuntamente dando lugar al típico "falla en bloque". Idéntico proceso de colapso tiene lugar con los pilotes hincados y excavados.

### II.3.3.1.- PILOTES EN ARCILLAS BLANDAS

$$P_g \geq n.P$$

$S_g$  y  $S$  no están relacionados.

En lo que se refiera a la capacidad portante del conjunto debe verificarse que sea por lo menos igual a la sumatoria de capacidades individuales.

Esto se consigue usando la menor densidad de pilotes, mediante pilotes largos y espaciamientos mayores hasta un máximo espaciamiento de cuatro veces el diámetro.

Como aproximación tosca, el asentamiento de un grupo de pilotes de fricción puede calcularse con la suposición de que la arcilla comprendida entre la cabeza de los pilotes y el punto que señala su tercio inferior es incompresible y que la carga se aplica al suelo en dicho punto.

El aumento de la presión se calcula con la suposición de que la carga se distribuye con una inclinación de dos unidades verticales a una horizontal.

## II.4.- INFLUENCIA DE UN GRUPO DE PILOTES EN LA CAPACIDAD ESTÁTICA POR PUNTA.

### II.4.1.- CAPACIDAD DE CARGA EN GRUPO

Cuando se trata de grupos de pilotes, la falla del grupo puede ocurrir de acuerdo a dos mecanismos diferentes, que lo presentaremos en los siguientes párrafos.

En ambos casos la falla ocurre siguiendo el camino de menor resistencia, como ocurre en todo tipo de falla.

### II.4.2.- CASO A (Figura 7 )

El suelo comprendido dentro del grupo de pilotes no forma parte de la masa de suelo que se desplaza, sino que cada pilote individual se desplaza con respecto al suelo que lo rodea, a este efecto se le llama "Falla como pilotes individuales". Esta situación ocurre cuando la suma de las capacidades de carga de pilotes considerados individualmente es menor que la capacidad de carga del grupo de los pilotes considerados como un bloque. En este caso la capacidad de carga del grupo esta dada por la expresión:

$$Q'_g = n_p \cdot P_u$$

Donde:

$N_p$  = Número de pilotes del grupo.

$P_u$  = Capacidad de carga de cada pilote aislado.

### II.4.3.- CASO B (Figura 8 )

Se le denomina "Falla como grupo o bloque", corresponde al caso en que la masa de suelo comprendida dentro del grupo se desplaza junto con los pilotes en el momento de la falla; esta

mecanismo de falla ocurre cuando la capacidad de carga del grupo considerado como un bloque resulta menor que la suma de las capacidades de carga de los pilotes individuales.

Para calcular la capacidad de carga de un grupo de pilotes considerados como un bloque, se puede aplicar la fórmula estática, considerando todo el grupo y el suelo comprendido dentro de él como fuese un bloque cimentado a la profundidad de la punta de los pilotes. Esta dada por la siguiente expresión:

$$Q''_g = \sum S_s \cdot A_L + A_T \cdot q_d$$

Donde:

$\sum$  = Sumatoria de los estratos en estudio.

$S_s$  = Fricción lateral en la superficie lateral del grupo.

$A_L$  = Area lateral de los estratos contribuyentes.

$A_T$  = Area transversal en el fondo de los pilotes.

$q_d$  = Capacidad de carga del suelo bajo el grupo de los pilotes.

Una vez calculados  $Q'_g$  y  $Q''_g$  se comparan estos dos valores; el menor de los dos es la capacidad de carga del grupo de pilotes:

Si  $Q'_g < Q''_g$  ; Caso "A"  $\Rightarrow Q_g = Q'_g$

Si  $Q''_g < Q'_g$  ; Caso "B"  $\Rightarrow Q_g = Q''_g$

El análisis de los resultados que se obtienen de los cálculos, arrojan las siguientes conclusiones:

1.- Solo puede ocurrir que  $Q''_g < Q'_g$  para pilotes de fricción en arcilla.

En este caso se deben calcular ambos valores y tomar el menor.

2.- Para pilotes de fricción en arena y pilotes de punta, siempre se obtiene  $Q'_g < Q''_g$ . En consecuencia, en estos casos es

innecesario hacer el cálculo del caso "B", siendo suficiente trabajar con las capacidades de carga de los pilotes aislados.

Observaciones:

.- Los cálculos basados en la ecuación  $Q''_g$ , han demostrado que es muy difícil que se produzca una rotura por la base, salvo cuando el grupo consta de gran número de pilotes de fricción embebidos en limo o arcilla blanda o bien se trate de pilotes resistentes de punta que transfieren su carga a un estrato firme pero delgado, que es seguido en profundidad por un espeso depósito de limo o de arcilla blanda.

.- La capacidad de carga máxima admisible será afectada por un factor de seguridad adecuado ( $Q_g/FS$ )

.- Tomlinson hace una observación referente al reamoldamiento provocado por la perforación de los pilotes en suelos cohesivos. Para  $q_d = N_c \cdot c$ , la cohesión  $c$  en la punta se toma la resistencia inalterada (original) bajo el grupo. En cambio, al considerar la resistencia periférica a cizalladura, debe considerarse el efecto del tiempo admitiendo para  $S_s = c \cdot \alpha$  el valor de la cohesión completamente reamoldada, si se precisa que los pilotes actúen a plena carga poco tiempo después de la construcción, o bien, admitiendo la resistencia original a cizalladura si hasta un tiempo prudencial no han de trabajar los pilotes soportando la carga máxima. En otros casos es darle un factor de seguridad adecuado.

#### II.4.4 FACTOR DE GRUPO

En la forma en que ha sido presentada la capacidad de carga de un grupo de pilotes en la sección anterior, resulta innecesaria la utilización del factor de grupo de pilotes. Sin embargo,

debido a este factor se menciona frecuentemente en la bibliografía, se presenta a continuación su definición y algunas consideraciones al respecto.

Se denomina factor de grupo, a la relación entre la capacidad de carga de la grupo de pilotes para el caso de falla como bloque, caso "B" entre la suma de las capacidades de carga de los pilotes aislados, es decir:

$$F'_g = Q''_g / Q'_g, \text{ para } F_g \leq 1$$

La utilización clásica del factor de grupo encontrada en la bibliografía, es como un factor de reducción de la suma de las capacidades de carga de los pilotes aislados, es decir:

$$Q_g = F_g (N_p \cdot P_u)$$

Donde:

$F_g$  = Factor de grupo

$N_p$  = Número de pilotes

$P_u$  = Capacidad admisible de un pilote.

El concepto de factor de grupo solamente debe utilizarse en el caso de grupos de pilotes de fricción en arcilla, ya que en los demás casos el factor resultaría mayor que uno.

Sin embargo, para evitar confusiones, se recomienda no utilizar en ningún caso el factor de grupo directamente, sino más bien efectuar el cálculo de capacidad de carga del grupo de pilotes de la manera descrita en la sección anterior.

Cuando se quiera estimar directamente la reducción de la capacidad de carga para casos específicos como un predimensionamiento de un proyecto. Se utiliza las fórmulas para calcular el factor de grupo, que algunos autores relacionan independientemente de sus variables actuantes; como las acciones de escudo de los pilotes adyacentes y el

espaciamiento relativo, el diámetro de los pilotes, variación de las propiedades del suelo con la profundidad, estratificación y nivel de aguas freáticas y otros aspectos relacionados entre si; se dará los siguientes métodos como una alternativa de solución.

- Según Tomlinson

Para el caso de pilotes de fricción en suelos cohesivos; recomienda :

Separación a ejes	$F_g$
2B a 3B	0.70
8B	1.00

Factor de grupo en función del diámetro.

- Método Converse-Labarre.

Un método para asignar un valor de apoyo reducido a un grupo de pilotes consiste en el empleo de la fórmula como se indica en la figura que esta contenida en el Uniform-Building code de la International of building officials y en las especificaciones de la American Association of highway officials. En esta fórmula no aparecen las longitudes o distancias de empotramientos en los estratos de fricción. Ver figura 10.

$$F_g = 1 - \phi \{ (n-1)m - (m-1)n \} / 90nm$$

Donde:

$F_g$  = Factor de grupo

m = Número de hileras

n = Número de pilotes en una hilera.

$\phi$  =  $B/e_p$  , en donde  $\phi$  es numericamente igual al ángulo cuya tangente es  $B/e_p$  , expresada en grados.

$e_p$  = Espaciamiento de centro a centro en los pilotes

B = Diámetro de los pilotes.

## II.5.- INTERACCION ESTATICA SUELO-CARGA

Las diversas variable que influyen en el comportamiento de un pilote bajo carga y la naturaleza compleja de los fenómenos envueltos, han llevado a la técnica de efectuar pruebas de carga en uno o más pilotes.

Su uso cumple dos fines:

- 1.- Evaluar la interacción suelo-pilote que permita desarrollar criterios de diseño: tipo de pilote, longitudes requeridas, cargas de diseño óptimas.
- 2.- Verificar si el pilote diseñado puede desarrollar la capacidad especificada, un vez instalado.

En ambos casos, además, permite establecer criterios para su instalación.

Cuando resulta práctico, el pilote debe ser cargado hasta la falla del sistema, obteniéndose el factor de seguridad real del pilote tipo ensayado. Esto permitiría rediseñar el pilote haciéndolo más económico ó proporcionándole la seguridad que requiere.

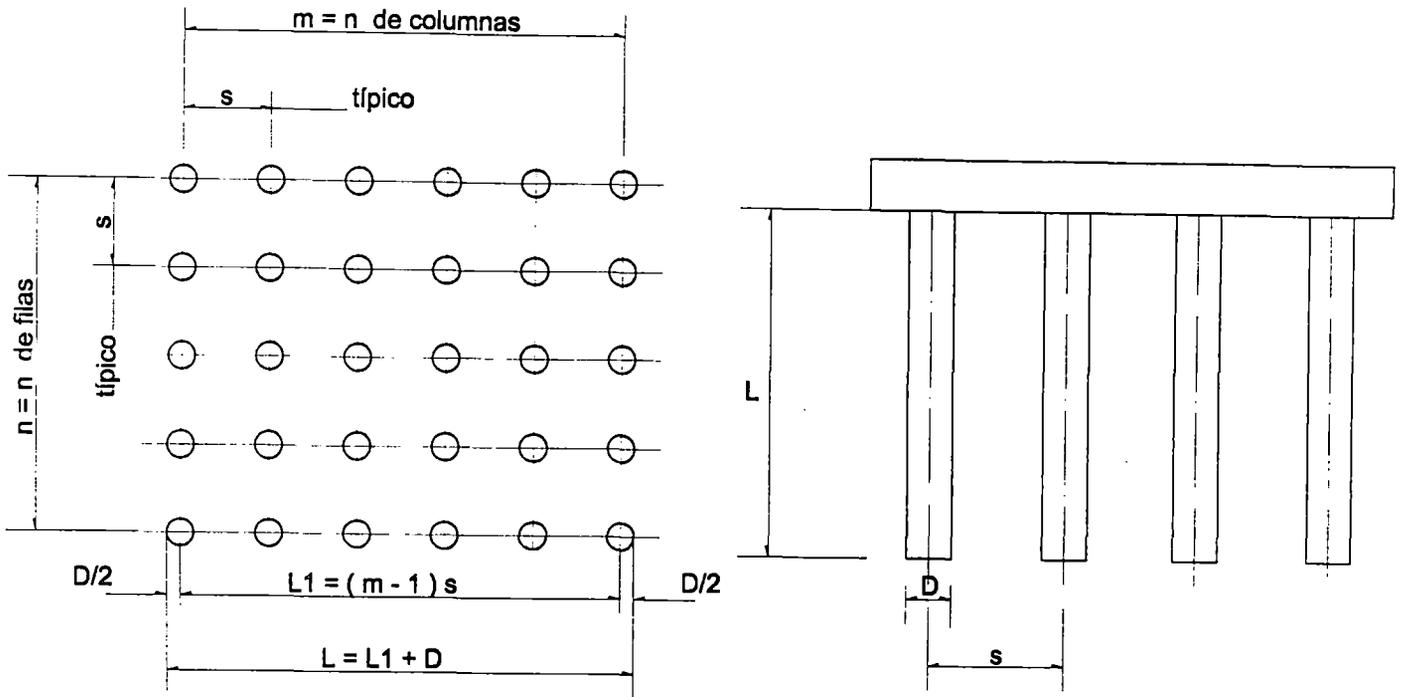


Fig. 10 Espaciamento entre pilotes

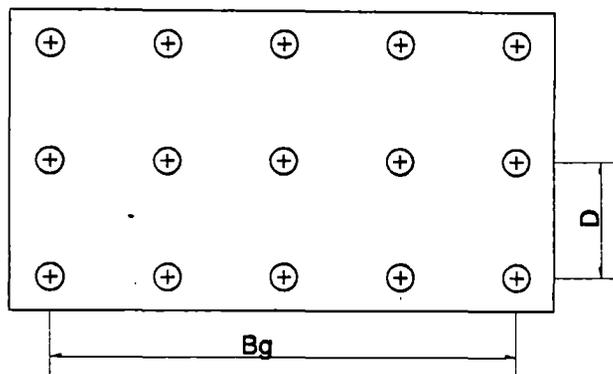
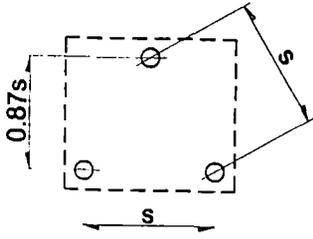
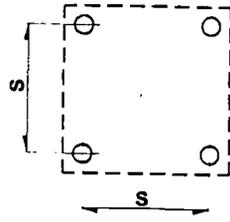


Fig. 9 Distribución en planta de Pilotes en arena suelta

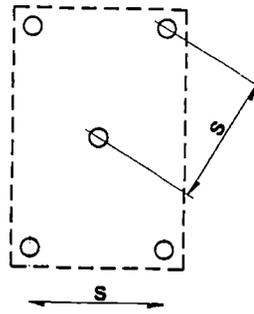
3 PILOTES



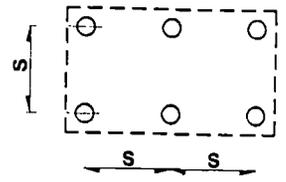
4 PILOTES



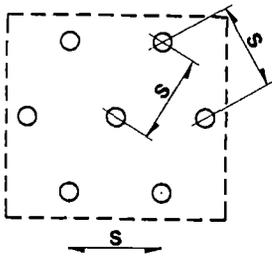
5 PILOTES



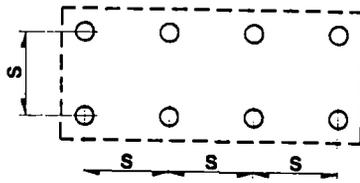
6 PILOTES



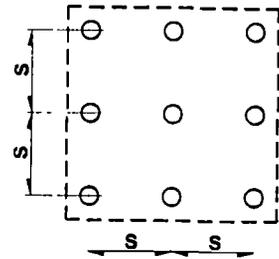
7 PILOTES



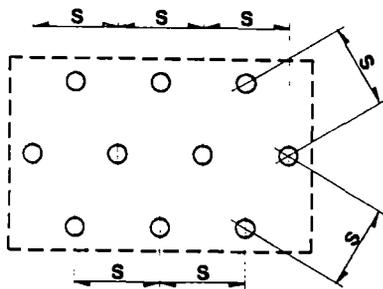
8 PILOTES



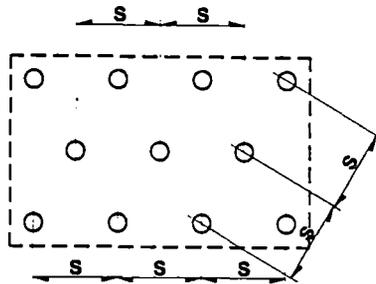
9 PILOTES



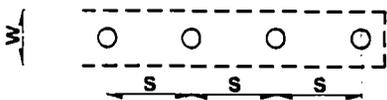
10 PILOTES



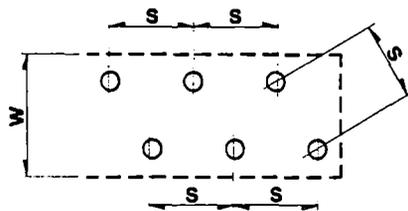
11 PILOTES



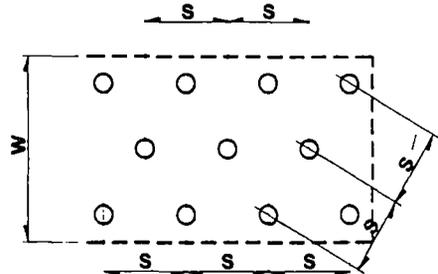
UNICA FILA PARA PARED



DOBLE FILA PARA PARED



TRIPLE FILA PARA PARED



CAPITULO III  
CAPACIDAD ESTATICA DE CARGA ULTIMA POR  
FRICCION

## CAPITULO III CAPACIDAD ESTÁTICA DE CARGA ÚLTIMA POR FRICCIÓN

### III.1.- INTRODUCCION

La determinación de la capacidad estática de carga última por fricción esta dada por la siguiente relación:

$$P_f = \sum A_g \cdot f_s (\Delta L)$$

Donde

$A_g$  = Area efectiva del pilote

$\Delta L$  = Incremento de longitud del pilote. Esto permite variaciones en el fusta y estratificación del suelo.

$f_s$  = Resistencia en las caras laterales.

$\sum$  = Suma de las contribuciones de los estratos o segmento del pilote.

Los siguientes son los métodos para determinar la resistencia en las caras laterales ( $f_s$ ).

### III.2.- DETERMINACION DE LA CAPACIDAD POR FRICCIÓN : METODOS DE TOMLIMSON, VIJAYVERGIYA Y BEJA.

#### III.2.1.- METODO DE TOMLIMSON O METODO $\alpha$

Este método fue propuesto por Tolimson en 1971 y sugiere que el cálculo de la resistencia en las caras laterales estará dada por la siguiente expresión:

$$f_s = \alpha \cdot c + q \cdot k \cdot \text{tg} \delta$$

Donde

$\alpha$  = Coeficiente extraído de la figura 11 o de la tabla 5.

$c$  = Cohesión promedio para el estrato en estudio.

- Q = Esfuerzo vertical efectivo en el elemento  $\Delta L$ .
- K = Coeficiente de presión lateral de tierra ubicado en un rango desde 1.00 hasta 1.75 , dependiendo del volumen de desplazamiento, densidad del suelo, etc. Generalmente se recomienda valores cercanos a  $k_0$ .
- $\delta$  = Angulo de fricción efectiva entre el suelo y el material del pilote (tabla 6),

En general k para pilotes se calcula como;

$$K = ( 1 - \text{Sen } \psi' ) \sqrt{\text{OCR}}$$

OCR = Relación de Sobreconsolidación.

$$\text{OCR} = \frac{\text{Presión de Sobreconsolidación}}{\text{Presión presente de sobrecarga}} = \frac{P_c}{P_o}$$

El método dado por Tomlimson tiene un rango de error de  $\pm 25 \%$ .

### III.2.2.- METODO DE VIJAYVERGIYA Y FOCHT O METODO $\lambda$

En 1972 Vijayvergiya y Focht presentaron un método alternativo para determinar  $f_s$ .

$$f_s = \lambda ( q + 2Su )$$

Donde:

$q, Su$  = Valores definidos por el método  $\alpha$  .

$\lambda$  = Coeficiente el cual puede obtenerse de la fig 12; este coeficiente se obtuvo al plotear los resultados de gran número de pruebas de carga.

Se considera que el rango de error en esta método es aproximadamente 10%.

### III.2.3.- METODO BETA ( $\beta$ )

Utilizando parámetros de esfuerzo efectivo se plantea la ecuación, la cual es aplicable a todos los suelos normalmente consolidados.

$$f_s = k \cdot q \cdot \text{tg}\delta$$

Lo que se puede simplificar como :

$$f_s = \beta \cdot q$$

si además el pilote está circundado por una sobrecarga  $q_s$ , la ecuación puede escribirse:

$$f_s = \beta ( q + q_s )$$

Donde :

$q$  = Presión efectiva de sobrecarga actuando en  $\Delta L$ .

$\beta = k \cdot \text{tg}\delta$  = Donde  $\text{tg}\delta$  es el coeficiente de fricción efectiva entre el suelo y pilote, por lo general se utiliza  $\text{tg}\phi'$  .  $k$  es el coeficiente de presión lateral de tierra y por lo general se utiliza  $k_0$ .

### III.2.4.- OTROS METODOS PARA CALCULAR Y/O ESTIMAR $f_s$

En 1970 Vesic propuso un método donde se utilizaba la densidad relativa ( $D_r$ ).

$$f_s = x_v^{101.54D_r^4} \quad (\text{Kpa})$$

Donde:

$x_v = 8.0$  , para pilotes de gran volumen de desplazamiento.

$x_v = 2.5$  , para pilotes vaciados in situ, pilotes de tubos, pilotes H.

En 1974 Meyerhof propuso un método en base a los datos del SPT:

$$f_s = x_m N \quad (\text{Kpa})$$

Donde :

$x_m = 2.0$  , para pilotes con gran desplazamiento de volumen

$x_m = 1.0$  , para pilotes de poco volumen.

$N$  = Número de golpes promedio contados en el estrato y con sus correcciones progresivas.

En 1971 Meyerhof, Thorburn y Mac Vicar sugieren un método en base al cono de penetración :

$$f_s = 0.005q_c \quad (\text{Kpa})$$

Donde :

$q_c$  = Resistencia a la penetración al cono (Kpa)

Cuando se utiliza el cono penetrómetro y se mide la fricción en la cara (  $q_{cs}$  ) :

$$f_s = q_{cs} \quad (\text{Pilotes de pequeño volumen desplazado})$$

$$f_s = 1.5-2.0 q_{cs} \quad (\text{Pilotes de gran volumen desplazado})$$

Tabla 05

Valores de los factores de adhesión para pilotes hincados en suelos cohesivos, suaves y muy suaves para utilizar en el diseño.

TABLA 05

CASO	CONDICIONES DEL SUELO	RELACION DE PENETRACION	FACTOR DE ADHESION $\alpha$
1	Arenas o gravas arenosas situadas encima de suelos cohesivos duros a muy duros.	< 20 >20	1.25 Fig 12
2	Arcillas suaves o sedimentos situados encima de suelos cohesivos duros a muy duros.	$8 < PR \leq 20$ >20	0.40 Fig 12
3	Suelos cohesivos duros a muy duros sin estratos sobre el que descansa.	$8 < PR \leq 20$ > 20	0.40 Fig 12

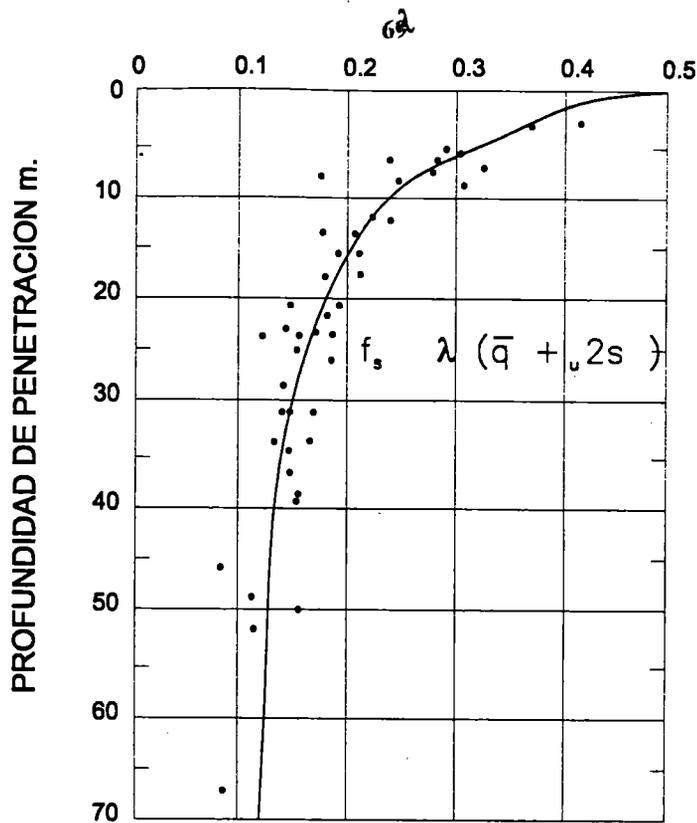
PR = Relación de sobreconsolidación.

PR = Profundidad de penetración en suelos cohesivos  
Diámetro del pilote

TABLA 6

Angulo de fricción ( $\phi$ ) entre diversos materiales utilizados como cimentación y suelo o roca.

<b>MATERIAL</b>	<b>Angulo de fricción en grados.</b>
<b>MASA DE CONCRETO O MAMPOSTERIA EN LO SIGUIENTE.</b>	
- Roca sólida y limpia	35
- Grava limpia, mixtura de arena-grava, arena gruesa.	29-31
- Arena limpia media a fina, medio limosa a arena gruesa, gravas arcillosas o limosas	24-29
- Arena fina limpia, arcillas o limos a arena media.	19-24
- Sedimentos arenosos finos, sedimentos no plásticos.	17-19
- Arcilla muy rígida y dura, residual o preconsolidada.	22-26
- Arcilla rígida y arcilla limosa.	17-19
<b>TABLESTACAS DE ACERO FRENTE A :</b>	
- Grava limpia, mixtura de arena-grava, rellenos de roca bien graduada con lajas	22
- Arena limpia, mixtura de arena limosa con grava.	17
- Arena limosa, grava o arena mezclada con sedimentos o arcilla.	14
- Sedimentos arenosos finos, sedimentos no plásticos.	11
<b>DIVERSOS MATERIALES ESTRUCTURALES</b>	
Mamposteria en mamposteria, roca ignea o roca metamorforica.	
- Roca suave labrada en roca suave labrada.	35
- Roca dura labrada en roca suave labrada.	33
- Roca dura labrada en roca dura labrada.	29
- Mamposteria en madera	26
- Acero en acero en union de tablestacas.	17
- Madera en suelo.	14-16



METODO  $\lambda$ : COEFICIENTE QUE DEPENDE EN LA PENETRACION

Fig.12

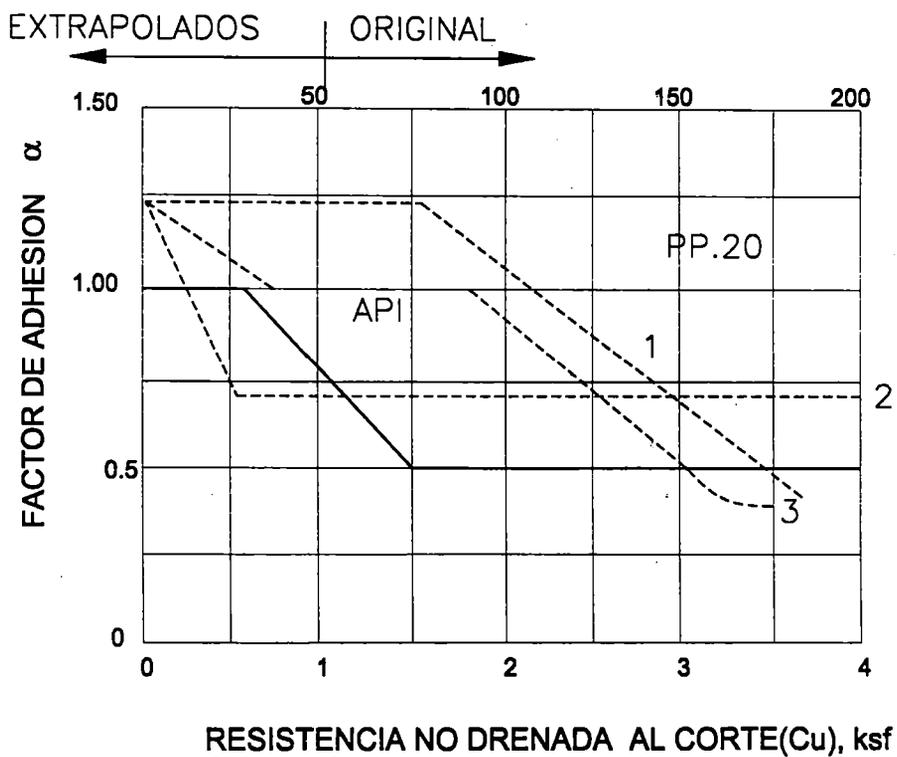
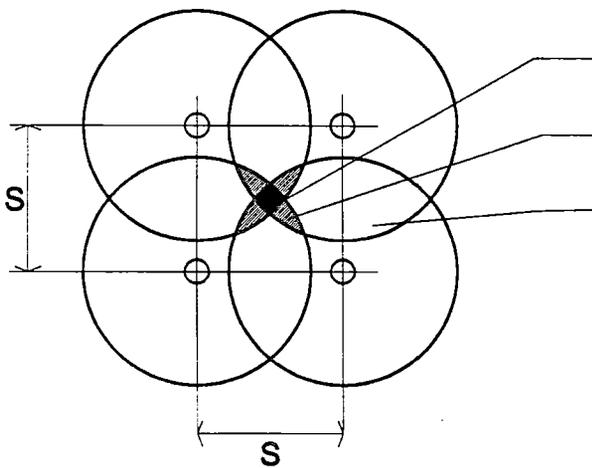
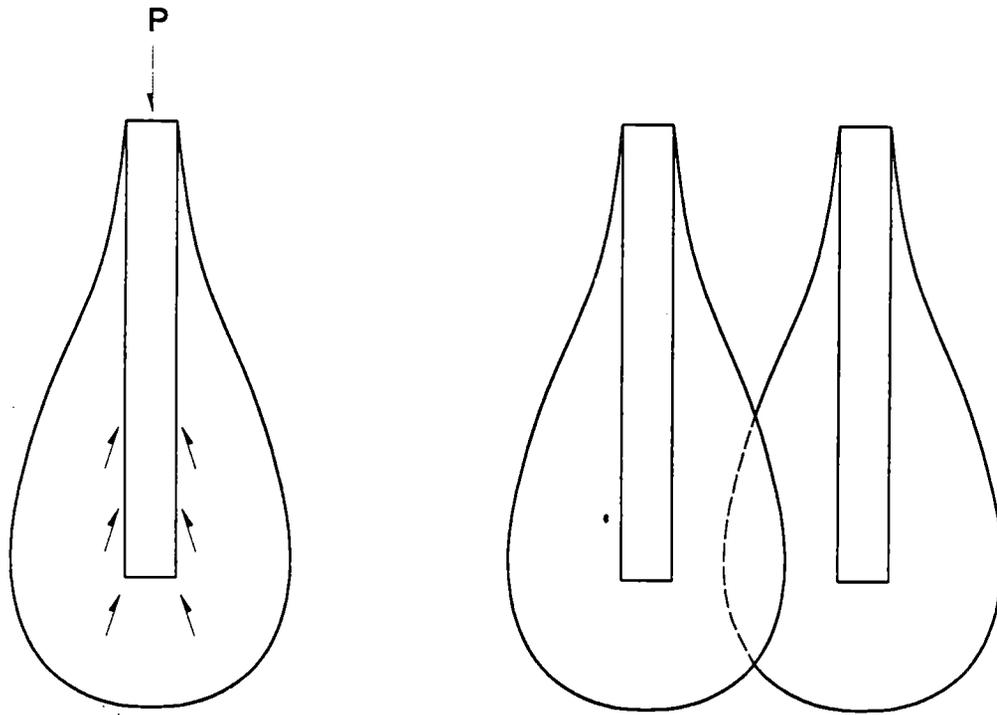


Fig.11 Relación entre el suelo y el factor adhesión. Referirse a la tabla para identificar el número de curva



4 pilotes contribuyen al esfuerzo en esta zona

3 pilotes contribuyen al esfuerzo en esta zona

2 pilotes contribuyen al esfuerzo en esta zona

Notese que un adecuado espaciamiento de los pilotes reduce las zonas de superposición y el número de pilotes contribuyendo en cualquier zona

Fig. 13 Esfuerzos alrededor de un pilote de fricción y los efectos de suma de un grupo de pilotes

### III.3.- DETERMINACION DE LA CAPACIDAD ESTATICA DE CARGA TOTAL

#### III.3.1.- INTRODUCCION

Los parámetros de suelo que se necesitan para efectuar el análisis de la capacidad estática de un pilote consisten en el ángulo de fricción interna y la cohesión  $c$ .

Existe alguna discrepancia puesto que algunos diseñadores utilizan el esfuerzo efectivo.

Cuando se efectúa el análisis por medio de la ecuación de onda, se necesitan parámetros de recuperación elástica y constantes de amortiguamiento. El análisis de un pilote sujeto a carga lateral requiere utilizar el módulo lateral de esfuerzo-deformación.

Los parámetros del suelo se pueden obtener de ensayos triaxiales en muestras no alteradas. Sin embargo los parámetros resultantes no son muy buenos para pilotes hincados ya que el suelo en la vecindad del pilote por efecto del hincado es remoldeado y cambia en su contenido de agua.

Estos procesos son indeterminados y no es muy práctico efectuar ensayos triaxiales a menos que la muestra sea inalterada.

Los parámetros del suelo pueden ser obtenidos in-situ mediante el cono de penetración, ensayo del presurometro o estimaciones del SPT.

Los pilotes hincados siempre producen algún remoldeamiento del suelo en la vecindad del pilote (3 a 5 diámetros del pilote).

Sin embargo existe un considerable lapso de tiempo antes que las cargas totales de diseño sean aplicadas, en este intervalo el exceso de la presión de poro se disipa y drena.

La capacidad del pilote para arcillas suaves se incrementa con el tiempo, recobrando mayor resistencia entre uno a tres meses. Esto se explica por la alta presión de poro y el volumen desplazado que produce consolidación del suelo muy cerca al pilote.

Tavenas y Audy en 1972 informaron de un incremento en la capacidad de carga de los pilotes en arena, ocurriendo la recuperación en aproximadamente un mes. El incremento de la resistencia no puede ser atribuido a la disipación del exceso de la presión de poro, pero puede ser debido a factores locales tales como la adhesión de los granos al pilote y la disipación de esfuerzos residuales de hincado.

Debido a lo complejo de predecir las condiciones cambiadas de suelo después del hincado, la mayoría de ensayos de laboratorio son efectuados en muestras de condiciones iniciales no alteradas.

En la figura se muestra el modelo de análisis de interacción considerando que las relaciones de interacción están determinadas por las propiedades del suelo y la longitud embebida del pilote.

### III.3.2.- CAPACIDAD DE CARGA ADMISIBLE

Se denomina capacidad de carga admisible de un pilote, a la capacidad de carga del suelo donde esta instalado para soportar las cargas transmitidas por el pilote.

En la figura como resultado de analizar esta figura se obtiene la primera ecuación básica.

$$P_u = P_p + P_f - W_p$$

Donde :

$P$  = Capacidad de carga admisible del pilote.

$P_p$  = Capacidad de carga en la punta.

$P_f$  = Sumatoria de la capacidad por fricción lateral.

$W_p$  = Peso del pilote.

Algunos diseñadores desprecian el peso del pilote ( $W_p$ ) debido al poco peso del mismo en comparación a la carga del suelo, obteniendo una variación de la ecuación :

$$P_u = P_p + P_f$$

### III.3.3.- FACTOR DE SEGURIDAD (FS)

El factor de seguridad es dependiente de las características del suelo y métodos de cálculo en que son tratados.

Tomlimson (1977), considera este factor de seguridad dependiente de la variabilidad de las propiedades del suelo, la confiabilidad del Ingeniero en estos métodos empíricos y de su experiencia.

Los factores son:

- Tomlimson, dan  $FS = 2.5$ , valido para arcillas y para arenas, con este valor obtiene un asentamiento de carga de trabajo que es improbable que exceda 10 mm.
- NAVFAC, dan  $FS = 3$ , para cargas permanentes  
 $FS = 2$ , para cargas temporales
- CHELLIS (1961), obtiene  $FS = 1.5$  a  $2.0$ , cuando se determina con ensayos de carga la resistencia de falla del pilote.

Debido a la incertidumbre en el cálculo de la carga última, es preferible realizar un ensayo de carga sobre un pilote de prueba del mismo tipo, y medida que el propuesto para el trabajo permanente y confirmar que el asentamiento en carga de

trabajo es aceptable, tomando preferentemente los ensayos en la etapa de falla última, para así obtener un FS real.

### III.3.4.- CAPACIDAD DE CARGA ADMISIBLE MAXIMA

Se expresa de la siguiente forma:

$$P_a = P_u / FS$$

Donde:

$P_a$  = Capacidad de carga admisible máxima.

$P_u$  = Capacidad de carga admisible.

FS = Factor de Seguridad.

### III.4.- SISTEMA ESTRUCTURAL IDEALIZADO EN EL SISTEMA SUELO-PILOTE.

Dado que es posible construir e hincar pilotes extremadamente grandes, ellos son ampliamente utilizados para estructuras construidas en suelo suave. La capacidad de carga de un pilote puede incrementarse la profundidad de su embebimiento.

Sin embargo, la rigidez de un pilote en la dirección horizontal es pequeña, lo cual lo hace difícil para un diseño asismico.

Los desplazamientos y esfuerzos de un pilote cuando se sujeta a fuerzas horizontales en su parte superior son calculadas por la teoría de una viga en una cimentación elástica. Con el carácter de la cimentación elástica diferirá de acuerdo a las condiciones de suelo, el problema descansa en la suposiciones utilizadas para esas variables. En este caso, el desarrollo de un método de ensayo el cual cuidadosamente indica la condición del suelo en el lugar es un punto de gran importancia.

El modelo mas simple considerado en esta oportunidad para esta cimentación elástica esta basado en la suposición que la fuerza de reacción es directamente proporcional al desplazamiento:

$$p = k.D.y$$

Donde:

y = Desplazamiento del pilote

p = Fuerza de reacción actuando en una unidad de longitud del pilote

k = Coeficiente de terreno

D = Diámetro del pilote.

En esta oportunidad, la ecuación relacionando la flexión del pilote donde EI es la rigidez a la flexión del pilote es:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -k.D.y$$

La solución de esta ecuación utilizando C1, C2, C3, C4 como constantes de la integral es:

$$y = e^{-\beta x} ( C_1.\cos\beta x + C_2.\text{Sen}\beta x ) + e^{\beta x} ( C_3.\text{Cos}\beta x + C_4.\text{Sen}\beta x )$$

Donde:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{kd}{4EI}}$$

Donde se asume que la longitud del pilote es infinita y la fuerza horizontal  $H_0$  y el momento de flexión  $M_0$  esta actuando en la cabeza del pilote como se muestra en la figura y las condiciones de borde serán:

$$\begin{aligned} \text{Cuando } x=0 & \quad EI \frac{d^3 y}{dx^3} = H_0, & \quad EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M_0 \\ \text{Cuando } x=\infty & \quad y = 0 \end{aligned}$$

La solución de la ecuación diferencial de cuarto orden que satisface esas condiciones en entonces:

$$y = \frac{e^{-\beta x}}{2\beta^2 EI} \left[ \left( \frac{H_0}{\beta} + M_0 \right) \cos \beta x - M_0 \operatorname{Sen} \beta x \right]$$

Donde la ecuación anterior, los desplazamientos y el ángulo de rotación de la cabeza del pilotes será:

$$y_0 = \frac{1}{2\beta^2 EI} \left( \frac{H_0}{\beta} + M_0 \right)$$

$$i_0 = \frac{1}{2\beta^2 EI} (H_0 + 2\beta M_0)$$

El máximo momento de flexión producido en el pilote será:

$$M_{\max} = \frac{H_0}{2\beta} e^{-\beta x_0} \sqrt{1 + \left( 1 + \frac{2\beta M_0}{H_0} \right)^2}$$

Donde  $x_0$  es la profundidad de la sección de corte en el cual el momento de flexión es máximo y es producido y esta dado por :

$$\cot \beta x_0 = 1 + \frac{2\beta M_0}{H_0}$$

De acuerdo a estas ecuaciones, la profundidad de la sección de corte en la cual el momento máximo de flexión llega a ser mas bajo y el valor del momento máximo de flexión llega a ser tan pequeño como el coeficiente de reacción del terreno llega a ser mas pequeño y la rigidez a la flexión del pilote llega a ser mas grande.

Especialmente cuando  $M_0$  no actúa, la relación entre el desplazamiento horizontal de la cabeza del pilote y la fuerza horizontal es:

$$H_0 = 2\beta^3 Eiy_0$$

Donde la relación entre  $H_0$  e  $y_0$  es

$$K = 2\beta^3 EI$$

Puede considerarse como un coeficiente expresando la rigidez de la cimentación piloteada.

La deflexión de la cimentación piloteada súbitamente llega a ser mas grande en la superficie del terreno. La deflexión en la cabeza del pilote depende enteramente de la rigidez a la flexión del pilote y de la rigidez del terreno en la superficie y no esta relacionada a la profundidad en la cual el pilote esta embebido. Sin embargo desde que la rigidez a la flexión de un pilote y la rigidez del terreno en su superficie son generalmente pequeños, una estructura colocada en la cabeza del pilote es fácilmente movida por una fuerza horizontal.

Cuando la zapata es colocada en la cimentación y la cimentación piloteada se utiliza como cimentación piloteada compuesta, se sabe que la rigidez crecerá tanto que para un pilote simple. En este caso seria aconsejable utilizar condiciones de borde de  $i_0 = 0$  en  $x = 0$  :

$$M_0 = - ( H_0 / 2\beta )$$

Tal que la relación entre desplazamiento de la cabeza del pilote y la fuerza horizontal será:

$$H_0 = 4\beta^3 EI y_0$$

$$k = 4\beta^3 EI$$

La rigidez se duplicara en el caso de un pilote de cabeza libre.

El valor de  $k$  esta determinado por la aplicación de la fuerza horizontal en la parte superior del pilote, medidas del

desplazamiento horizontal y comparando con los resultados calculados. Resultados de dos ensayos en pilotes se describen a continuación. A los pilotes de acero tubulares de 50.8 y 101.6 cm de diámetro se aplicaron fuerzas horizontales en las cabezas de los pilotes dejando las cabezas de los pilotes libres. Los valores de  $k$  obtenidos se muestran a continuación:

**COEFICIENTE DE REACCION DEL SUELO PARA PILOTE TUBULAR**

Grava	0.5-3.5 (promed 2.5 kg/cm <sup>2</sup> )
Arena-Grava	0.7-1.8 (promed 1.1 kg/cm <sup>2</sup> )
Arena	0.2-2.0 (promed 0.9 kg/cm <sup>2</sup> )
Arena-Arcilla	0.4-1.5 (promed 1.0 kg/cm <sup>2</sup> )
Arcilla	0.1-0.9 (promed 0.5 kg/cm <sup>2</sup> )

Dado que el valor de  $k$  tendera a decrecer con el incremento del desplazamiento de la cabeza del pilote, las medidas fueron hechas fijando el desplazamiento de la cabeza del pilote en 1 cm.

Similares experimentos fueron llevados a cabo en pilotes de concreto reforzado de 30 a 40 cm de diámetro, obteniendo los resultados dados en la siguiente tabla.

**COEFICIENTE DE REACCION DEL SUELO PARA PILOTES DE CONCRETO ARMADO.**

Arcilla muy suave o limo.	0.3-1.5 kg/cm <sup>3</sup>
Limo o arcilla	1.5-3.0 kg/cm <sup>3</sup>
Arcilla firme	3.0-15.0 kg/cm <sup>3</sup>
Arcilla dura	15.0 kg/cm <sup>2</sup>
Arena	3.0-9.0 kg/cm <sup>2</sup>

Matsumoto condujo ensayos de campo de resistencia de carga horizontal de pilotes en terreno con un estrato de superficie extremadamente suave de 14 mt de espesor sobre un estrato de arena y grava dura. Este estrato superficial fue un deposito de arcilla suave de 9 mt de espesor sobre una turba de 5 mt con un valor de  $N$  de 0 hasta 2 a través del estrato. El pilote fue de concreto armado de 45 cm de diámetro, 7 cm de espesor y 15 mt fueron hincados hasta alcanzar el terreno de base, y la carga horizontal fue aplicada a la cabeza del pilote. En la figura 14 indica la relación entre la carga y los desplazamientos horizontales de la cabeza del pilote. En este caso, como el terreno es muy suave no hay relación lineal desde el comienzo entre la carga y el desplazamiento. Por consiguiente, si el valor de  $k$  se calcula para cada estado de carga utilizando la ecuación  $y_0$ , es de aproximadamente 0.4 kg/cm<sup>3</sup> cuando el desplazamiento es muy pequeño y aproximadamente 0.23 kg/cm<sup>3</sup> cuando el desplazamiento es de 10mm, en un rango amplio.

Un grupo de pilotes fue ensayado utilizando pilotes de la misma dimensión. Como se muestra en la figura 16, seis pilotes fueron hincados dentro de un terreno 1.1 mt y 1.2 mt aparte. En la cabeza de los pilotes se colocó un bloque de concreto de 1 mt de espesor y 3.2 mt de longitud y 3.0 mt de ancho.

Al mismo tiempo las cabezas estaban embebidas en una profundidad de 30 cm en el bloque de concreto como se muestra en la figura 16. La relación entre la carga y el desplazamiento cuando la carga horizontal fue aplicada al bloque en la cabeza del pilote se indica en la figura 17.

Como una referencia el valor agrupado de seis pilotes del valor obtenido de un ensayo de un solo pilote es una curva sombreada.

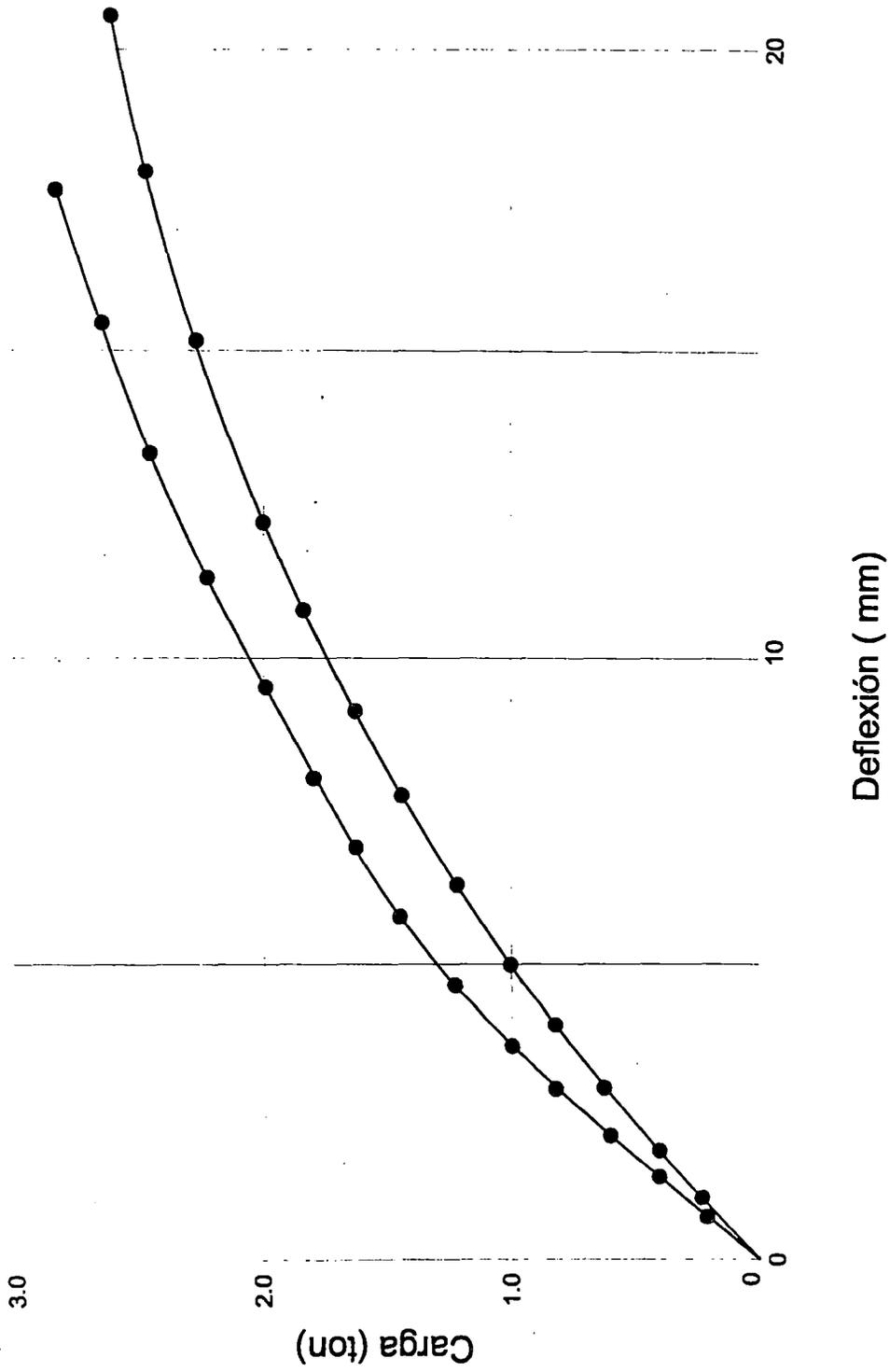


Fig. 14 Curvas de la carga de Deflexión de un solo pilote

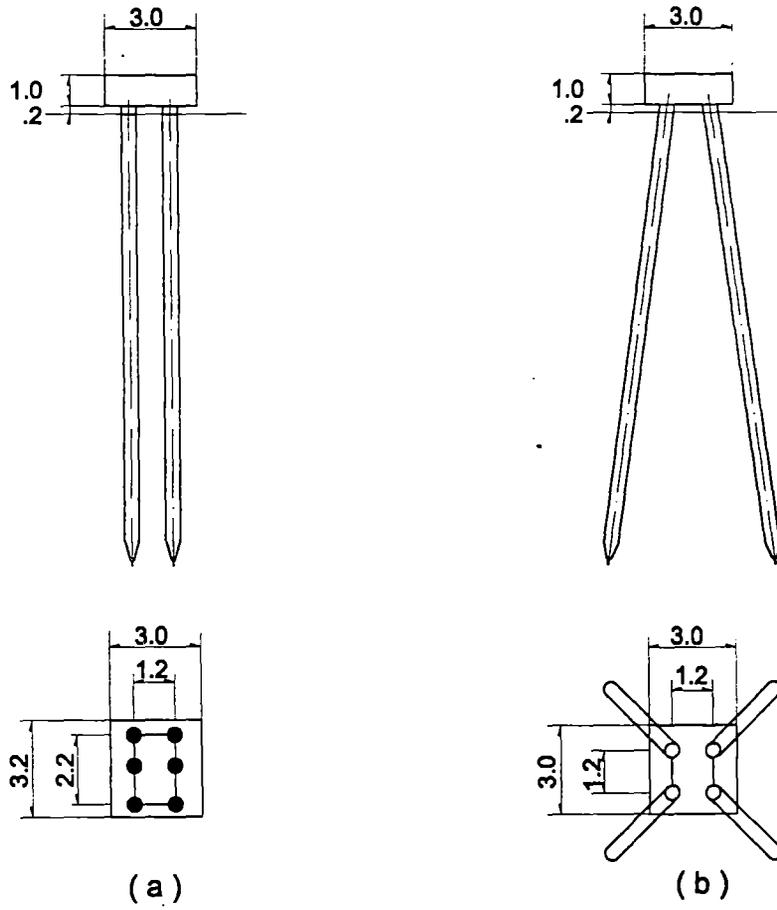


Fig. 16

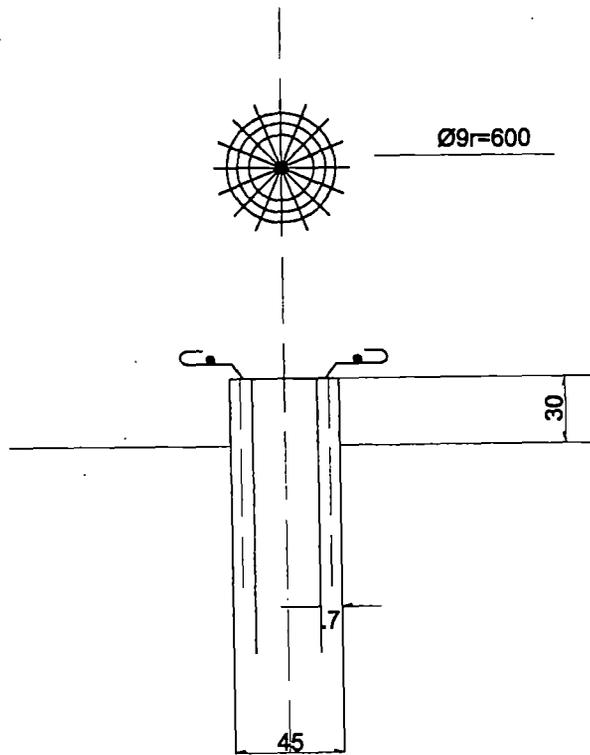


Fig. 16

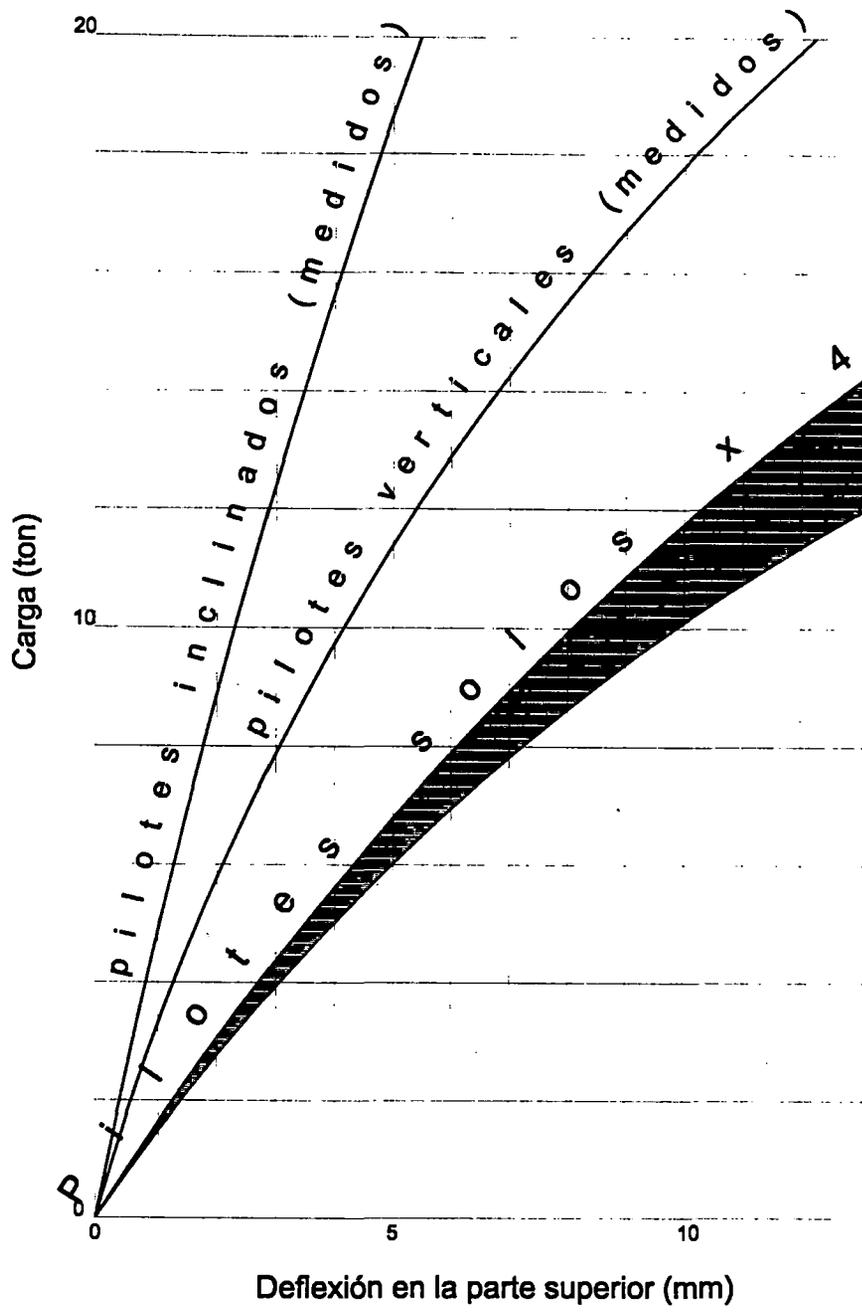
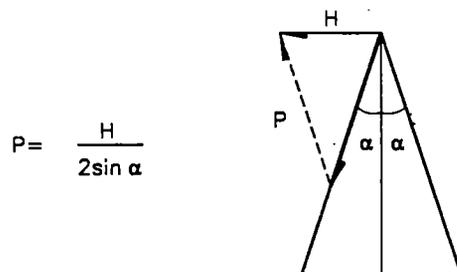
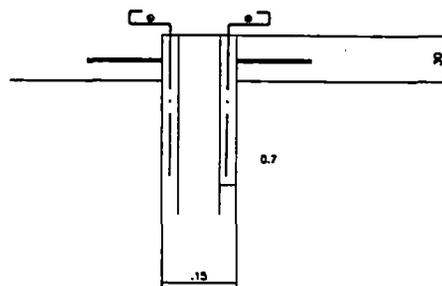
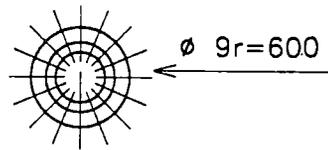
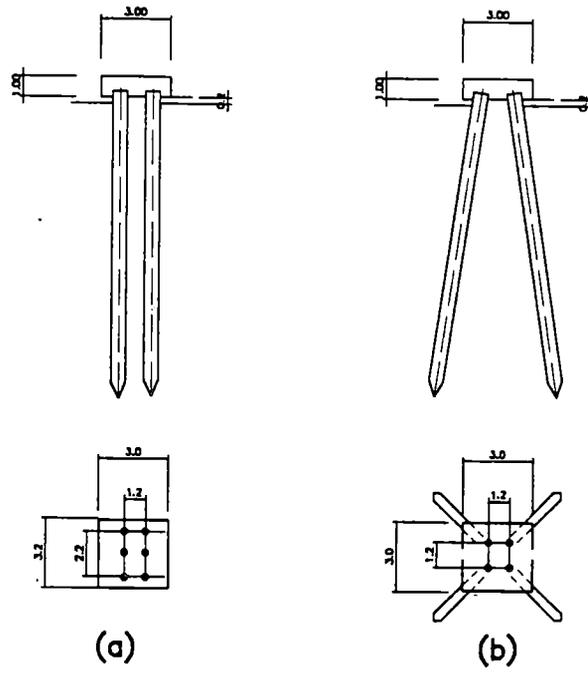


Fig. 17 Curvas de Deflexión de carga para pilotes en grupo



$$P = \frac{H}{2 \sin \alpha}$$

Fig. 18 Fuerza Horizontal



$$P = \frac{H}{2 \sin \alpha}$$

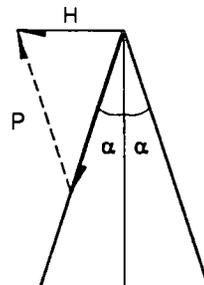


Fig. 18 Fuerza Horizontal

en la figura 17. Los desplazamientos observados son ligeramente mas que  $1/2$  de este valor. Como el desplazamiento de un pilote individual cuando el extremo mas inferior esta fijado esta pensado en ser aproximadamente 1.2 del desplazamiento de un pilote de cabeza libre este resultado indica que un grupo de pilotes las cabezas de los pilotes son aproximadamente fijas. Esta condición se asume que existe debido a que las cabezas no pueden rotar libremente, como ellos hacen cuando los pilotes son libres, debido al bloque.

Cuando la cimentación llega a ser mas grande y muchos grupos de pilotes son colocados en fila, la rotación de la cabeza del pilote esta restringida aun mas y se asume que la rigidez de la cimentación del pilote aproximara la suma de las rigideces de los pilotes individuales asumidas a ser fijadas en las cabezas. En el caso de los pilotes agrupados, el problema es la forma en la cual la carga aplicada a la cimentación será llevada por cada pilote. En este caso, las medidas de los esfuerzos actuando en cada pilote mostraron que la carga fue llevada mas o menos uniformemente por los seis pilotes. Similares resultados han sido obtenidos en un cantidad de ensayos a escala hechos por K. Kubo. Esto puede ser considerado como una característica de los pilotes en grupo.

Como los cálculos anteriores y los experimentos indican, los pilotes verticales descansando en una rigidez horizontal y cuando las estructuras soportados por estos pilotes son sujetas a sismos, hay un riesgo de un desplazamiento horizontal grande. Por consiguiente no es común colocar pilotes verticales soportando resistencia horizontal; frente a las cargas horizontales se utilizaran pilotes inclinados.

Y. Matsumoto llevo a cabo ensayos en grupos de pilotes inclinados similares a los ensayos en pilotes verticales que fueron hincados en forma radial y con un ángulo diagonal de  $12^{\circ}30'$ , como se muestra en la figura 16. El bloque colocado en estos pilotes fue de 1 mt de espesor 2 mt de ancho y 3 mt de largo. Los desplazamientos horizontales en la cabeza del pilote cuando las cargas horizontales son aplicadas en el cabezal se indican en la figura 17.

Estos son ligeramente menos que  $1/2$  del valor para pilotes verticales compuestos. Además mientras que este efecto es considerado a donde fueron seis pilotes verticales agrupados y solamente cuatro pilotes inclinados, esto puede ser visto que los pilotes inclinados son mas rígidos que los pilotes verticales.

La rigidez horizontal de un grupo de pilotes inclinados puede ser calculada utilizando los siguientes métodos:

Para simplicidad, se ha asumido que la parte inferior de los pilotes esta soportada por terreno duro y el asentamiento del terreno es despreciable. La rigidez del grupo de pilotes inclinados es una combinación de la rigidez resultante de la posición diagonal de los pilotes y la rigidez debido al embebimiento, pero cuando el ángulo de inclinación es pequeño se piensa que las dos rigideces pueden ser separadas.

La rigidez producida por la posición diagonal de los pilotes es debido a la tensión de un pilote y la compresión del otro debido a la fuerza axial.

Cuando la fuerza  $H$  aplicada a la parte superior del pilote es separada en direcciones axiales de los dos pilotes inclinados, la componente de fuerza  $P$  es:

$$P = \frac{H}{2\text{Sen}\alpha}$$

De acuerdo a esto, la tensión o contracción del pilote cuando L es la longitud del pilote, E es el Módulo de Young y A la sección del pilote, es PL/AE, por consiguiente de la figura 18 el desplazamiento horizontal es:

$$y = \frac{P.L}{E.A.\text{Sen}\alpha} = \frac{L.H}{2E.A.\text{Sen}^2\alpha}$$

Así, la rigidez debido a la posición diagonal de los pilotes en el grupo de pilotes inclinados es:

$$k_1 = \frac{2E.A.\text{Sen}^2\alpha}{L}$$

De la ecuación la rigidez de un grupo de pilotes inclinados debido al embebimiento de los pilotes es:

$$k_2 = 2\mu\beta^3E.I$$

Por consiguiente cuando el coeficiente de rigidez de un grupo de pilotes inclinados es k, la siguiente ecuación podrá ser utilizada:

$$k = \frac{2E.A.\text{Sen}^2\alpha}{L} + 2\mu\beta^3E.I$$

Donde se ha asumido como un valor confiable tomar  $\mu$  de 3 a 4, dependiendo de la condición de conexión entre la cimentación y los pilotes.

Donde los pilotes son de fricción llega a ser difícil la determinación del valor de  $L$  en la ecuación anterior. Un método es llevar a cabo cálculos suponiendo que los pilotes son soportados elásticamente por el suelo circundante en la dirección de los ejes de los pilotes. Sin embargo, en este caso los valores calculados deberán tener una tolerancia considerable.

De acuerdo a la ecuación última la rigidez llega a ser mas grande con el incremento del ángulo de inclinación, sin embargo cuando el ángulo de inclinación el grande la fuerza axial actuando en el pilote llega a ser pequeña. Por consiguiente, es necesario considerar que la carga vertical de soporte será mas pequeña que para un pilote vertical, así la operación de hincado del pilote será difícil y que cuando el suelo asiente durante un sismo el pilote puede curvarse.

CAPITULO IV  
METODOS DE INSTALACION DE CIMENTACIONES  
PILOTEADAS PREFABRICADAS

## CAPITULO IV METODOS DE INSTALACION DE CIMENTACIONES PILOTEADAS PREFABRICADAS.

### IV.1.- INTRODUCCION

Generalmente se hincan por medio de un martinete. El martinete trabaja entre un par de guías paralelas que están suspendidas por una grúa.

Originalmente se levantaba el martillo que caía desde el extremo superior de las guías a la cabeza del pilote, este martillo es conocido como martillo de caída y se utiliza en la construcción del pilote Franki.

Hoy en día la mayor parte de los martillos de impacto son del tipo diesel o vapor.

Los martinetes a vapor tienen un martillo que es levantado por la presión y dejado caer con o sin la ayuda de la presión de aire comprimido o vapor.

Si cae solamente por gravedad, el martillo es de acción sencilla.

Si la presión de vapor o aire comprimido se adicionan a la energía descendente se denominado de doble acción o diferencial.

Algunos tipos de martinetes necesitan un amortiguador o cojín entre martillo y pilote para prevenir daño al pilote, este cojín es importante en las ondas de esfuerzo desarrolladas en el pilote durante el hincado.

#### IV.2.- CLASIFICACION DE MARTINETES

Esta clasificación se basa en la energía por golpe.

En un martillo de caída es el producto del peso del martillo por su altura.

Parte de la energía es perdida por rozamiento con las guías.

Los martillos a vapor si son bien mantenidos y trabajan con la presión adecuada tendrán una eficiencia del 70% de la energía nominal.

En la tabla 7 se dan los pesos, alturas y otros datos de los martinets de acción sencilla, de doble acción y de acción diferencial.

Hay martinets que aplican energías mayores y son usado en cimentaciones de gran longitud y diámetro en trabajos en alta mar y proporciona energías entre 7,000 a 25000 kg-mt.

Los martillos Diesel son de dos tipos, de extremo abierto y de extremo cerrado.

Desde el extremo inferior del martillo y el bloque del yunque está la cámara donde la explosión se produce.

En los de extremo cerrado el martillo cae por gravedad, a medida que cae se inyecta combustible a la cámara de combustión entre el martillo y el yunque y con el impacto se enciende el combustible que levanta el martillo.

La presión de los gases en combustión actúan sobre el yunque y dan una fuerza adicional descendente.

En los martinets de extremo cerrado la cubierta forma una cámara de rebote; en la que se comprime el aire al subir el martillo, el recorrido del mismo es limitado acortando por ello su carrera y es por esto que el número de golpes por minuto aumenta respecto a los martinets de extremo abierto.

TABLA 7

## DIVERSOS TIPOS DE MARTILLOS PARA HINCAR PILOTES

MARTILLOS DE ACCION SIMPLE					
TIPO	Peso Total del Martillo (lb)	Peso del Cabezal (lb)	Altura de Caída in.	Golpes por minuto	Energía por golpe ft-lb
<b>Mc-Kiernan-Terry Corporation.</b>					
SS	12,460	5,000	39	60	16,250
S8	18,300	8,000	39	55	26,000
S10	22,380	10,000	39	55	32,500
S14	31,700	14,000	32	60	37,500
S20	38,650	20,000	36	60	60,000
<b>Vulcan Iron Works</b>					
2	6,700	3,000	29	70	7,260
1	9,700	5,000	36	60	15,000
06	11,200	6,500	36	60	19,500
08	16,750	8,000	39	50	26,000
010	18,750	10,000	39	50	32,500
014	27,500	14,000	36	60	42,000
016	30,250	16,250	36	60	48,750
020	41,670	20,000	36	60	60,000
<b>Raymond Concrete Pile Division-Raymond International, Inc.</b>					
1	11,000	5,000	36	60	15,000
1s	12,500	6,500	36	58	19,500
0	16,100	7,500	39	52	24,375
2/0	18,550	10,000	39	50	32,500
3/0	21,225	12,500	39	48	40,625
4/0	23,800	15,000	39	46	48,758
5/0	26,450	17,500	39	44	56,875
22x	31,750	22,050	31	58	56,900
30x	52,000	30,000	30	70	75,000
8/0	34,000	25,000	39	40	81,250
40X	62,000	40,000	39	64	100,000
<b>British Steel Piling Co., Ltd.</b>					
4b	4,595	3,360	54		
5b	5,820	4,480	54		
6b	7,060	5,600	54		
7b	7,840	6,720	54		
9b	10,080	8,960	54		
9c	10,870	8,960	72		
10b	13,100	11,200	54		
10c	13,220	11,200	72		
12b	15,456	13,440	54		
12c	15,904	13,440	72		

**MARTILLOS DE ACCION DOBLE**

Tipo	Peso Total del Martillo (lb)	Peso del Cabezal (lb)	Altura de Caída (inch)	Golpes por minuto	Energía por golpe ft-lb
<b>MacKiernan-Terry Corp.</b>					
N° 6	2,900	400	8 3/4	275	2,500
N° 7	5,000	800	9 1/2	225	4,150
9B3	7,000	1,600	17	145	8,750
10B3	10,850	3,000	19	105	13,100
11B3	14,000	5,000	19	95	19,150
C5	11,880	6,500	18	100	16,000
C826	17,750	8,000	18	90	24,000
<b>Vulcan Iron Works Inc.</b>					
18C	4,139	1,800	10.5	150	3,600
30C	7,036	3,000	12.5	133	7,260
50C	11,782	5,000	15.5	120	15,100
65C	14,886	6,500	15.5	117	19,200
80C	17,885	8,000	16.5	111	24,450
140C	27,984	14,000	15.5	103	36,000
200C	39,050	20,000	15.5	98	50,200
400C	83,000	40,000	16.5	100	113,488
<b>Union Iron Works of New Jersey Inc.</b>					
00	21,000	6,000	36	85	54,900
0A	17,000	5,000	21	90	22,050
1	10,500	1,850	21	130	13,100
1 A	10,500	1,600	18	120	10,020
1 1/2 <sup>a</sup>	9,200	1,500	18	125	8,680
2	6,600	1,025	16	145	5,755
3	5,200	820	13 1/2	150	4,390
3 <sup>a</sup>	4,700	700	14	160	3,660
4	2,800	370	12	200	2,100
5	1,625	210	9	250	1,010
<b>Raymond Concrete Pile Division, Raymond International, Inc</b>					
65C	14,675	6,500	16	100	19,500
65CH	14,615	6,500	16	130	19,500
80CH	17,782	6,000	16 1/2	130	24,450
150C	32,500	15,000	18	100	48,750

<b>MARTILLOS DIESEL</b>					
<b>Tipo</b>	<b>Peso Total del Martillo (lb)</b>	<b>Peso del Cabezal (lb)</b>	<b>Altura de Caída (inch)</b>	<b>Golpes por minuto</b>	<b>Energía por golpe ft-lb</b>
<b>McKiernan-Terry Corp.</b>					
DE10	3,100	1,100	108	48	6000-9000
DE20	5,375	2,000	113	48	12000-18800
DE30	8,125	2,800	129	48	16800-30100
DE40	9,825	4,000	129	48	24000-43000
IDH-J22	10,880	4,850	120	48	39100-48500
<b>Link-Belt</b>					
105	3,885	1,445	35.23	90-98	6,500
180	4,550	1,725	37.60	90-95	
312	10,375	3,857	30.89	100-105	15,000
520	12,545	5,070	43.17	80-84	26,300
<b>Delmag Mshinenfabrick (The Foundation Equipment Corp.)</b>					
D5	2,401	1,100		42-60	9,100
D12	5,440	2,750		42-60	22,600
D22	10,054	4,850		42-60	39,800
D30	12,320	6,600		39-60	23/54,200
D44	19,842	8,819		42-60	72,300

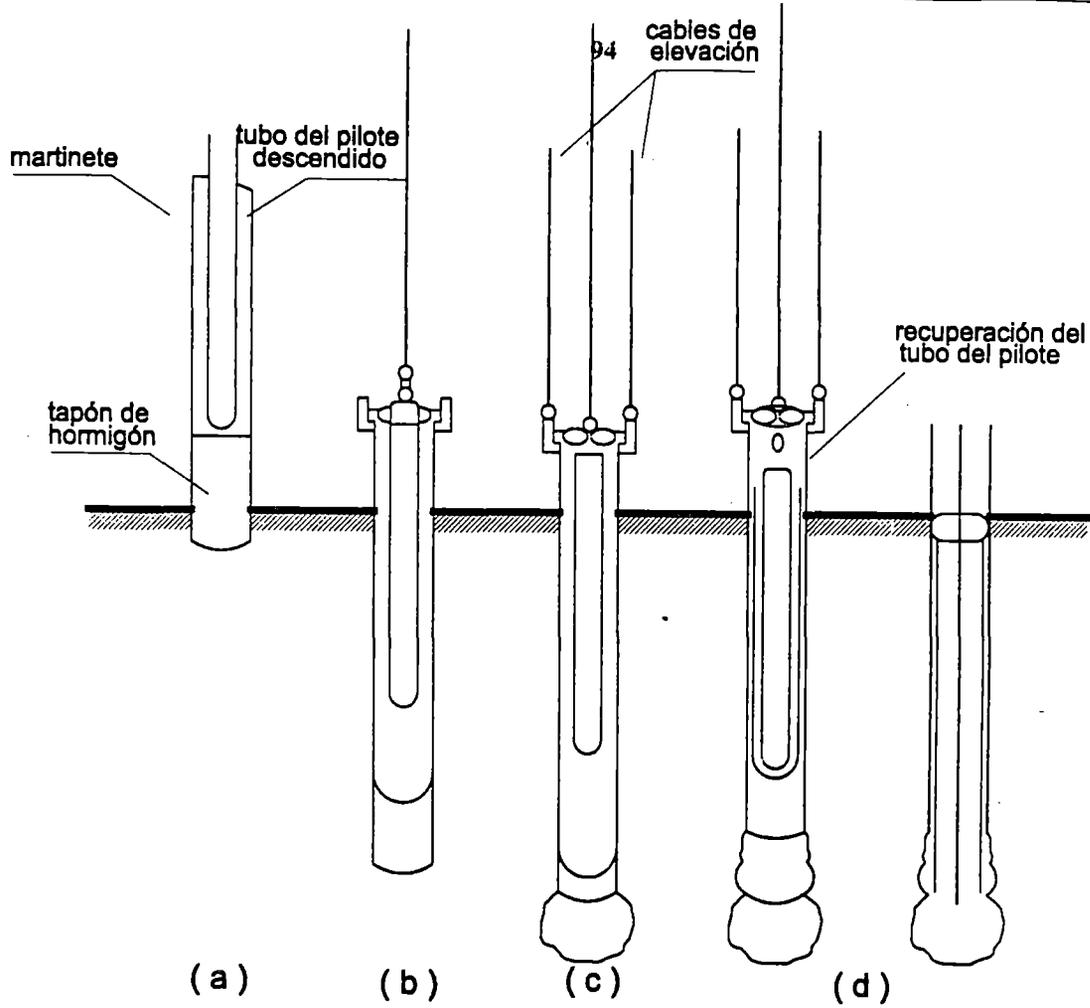


Fig. 3 Pilote Franki

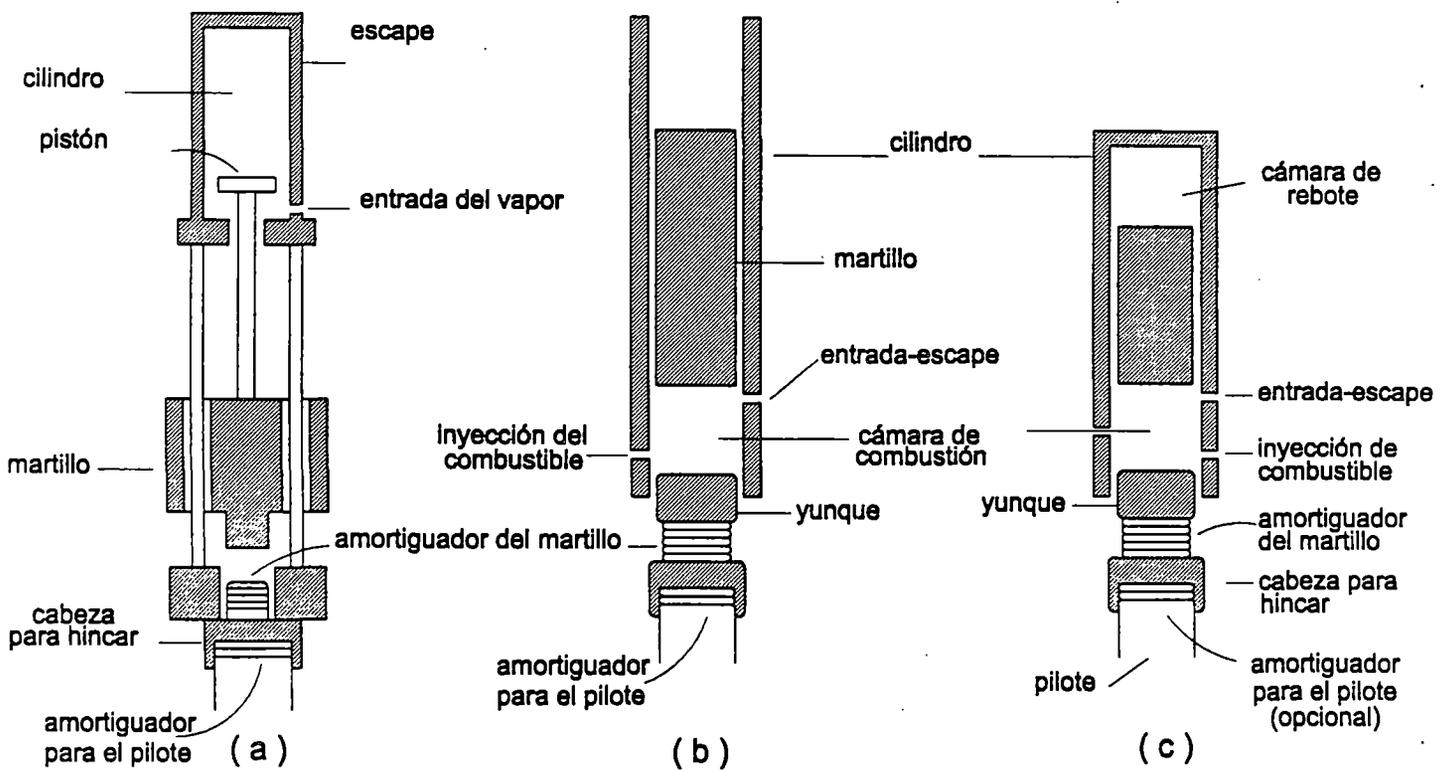
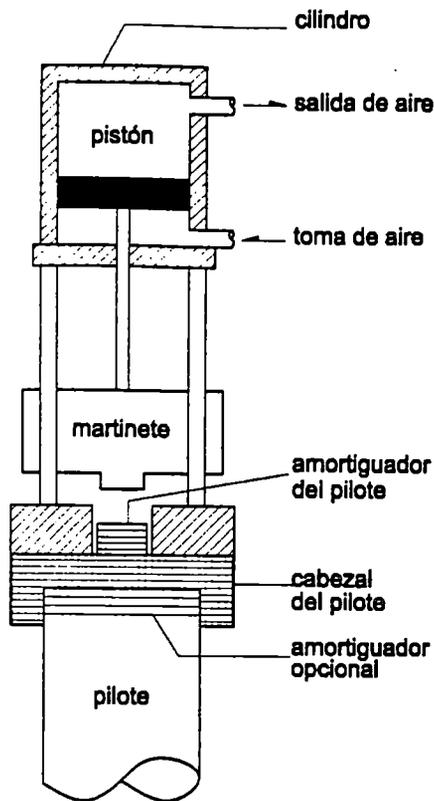


Fig. 19 Martinetes

(a) De vapor de acción sencilla

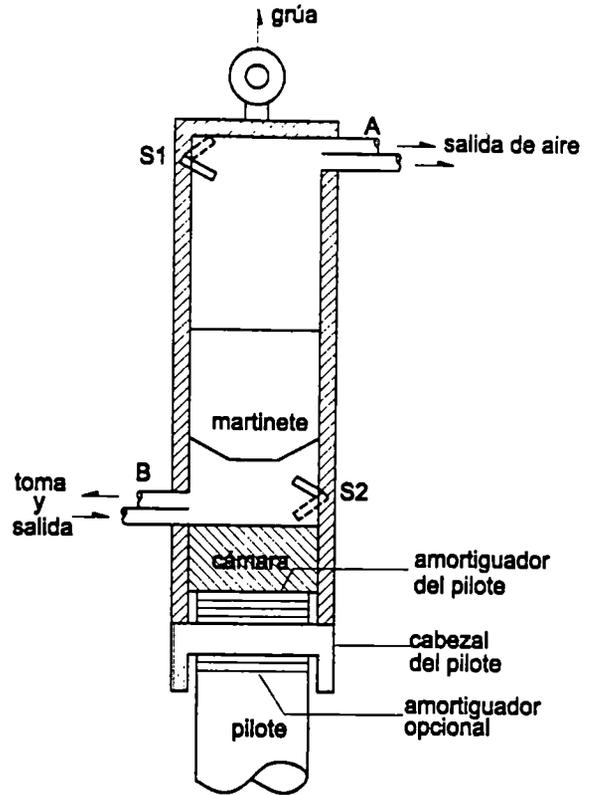
(b) Martillo Diesel de extremo abierto

(c) Martillo Diesel de extremo cerrado



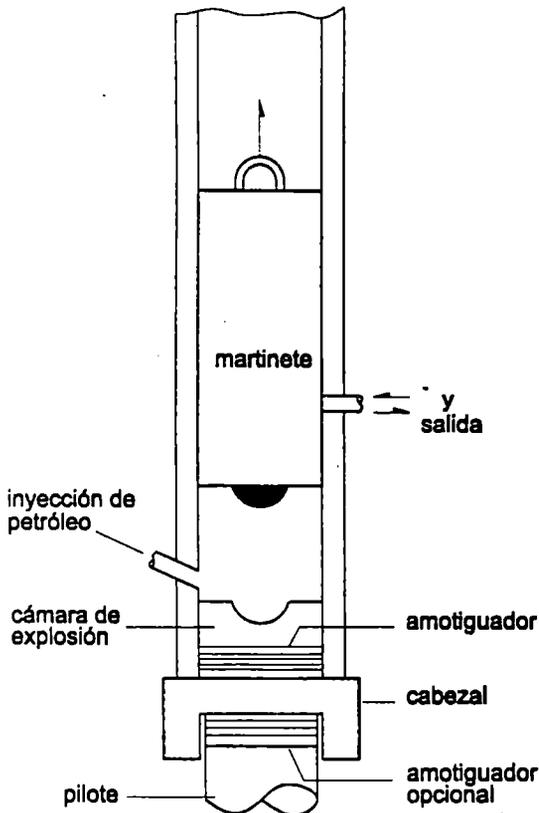
**a) Martillo de Acción Simple:**

Al extremo del pistón, la toma abre con vapor y sube el pistón. En la última parte de la subida, el vapor es expulsado y la toma descarga permitiendo al pistón caer.



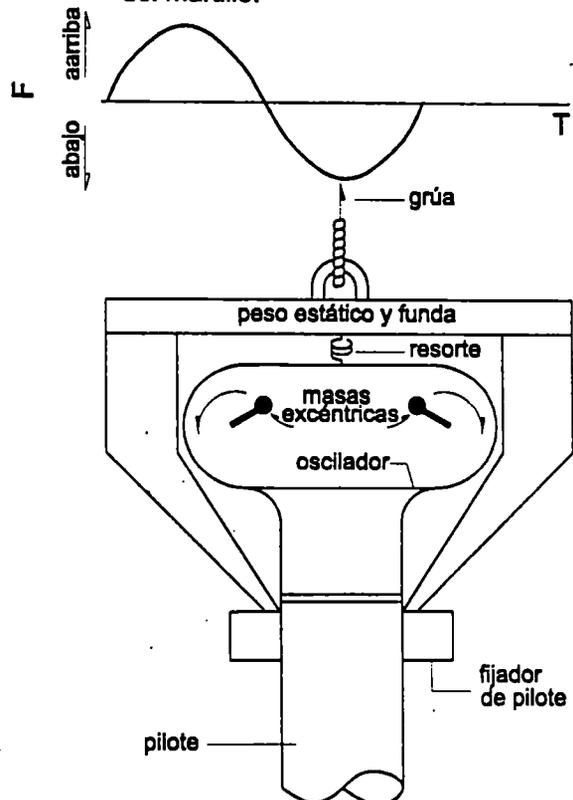
**b) Martillo de Acción Doble :**

El pistón en la posición inferior suelta S2, la cual abre la admisión, cierra la válvula de descarga en B y abre el escape en A; el martillo entonces eleva la presión de vapor en B. El pistón en la posición superior suelta S1, la cual admite B y abre el escape; la válvula de escape A se cierra, el vapor ingresa y acelera la caída del martillo.



**c) Martillo Diesel :**

La grúa inicialmente carga el pistón, este es elevado y cae. En un momento determinado se inyecta el combustible, el pistón choca en la cámara explosiva, Como resultado el pistón sube nuevamente



**d) Martillo Vibratorio :**

Una fuente de poder externa (motor eléctrico o bomba eléctrica-hidráulica) rota masas excéntricas en las direcciones mostradas. Las fuerzas horizontales se cancelan y la verticales se suman.

#### IV.- MARTINETES VIBRATORIOS

El principio de las vibraciones ha sido extensivamente empleado por la Ingeniería de la ex Union Sovietica en el hincado de pilotes. Un martillo vibratorio consiste en un oscilador accionado por un motor eléctrico que está ubicado en la cabeza del pilote. La operación de oscilación se ilustra en la figura. Las masas excéntricas  $m/2$  son montadas con igual excentricidad "e" del centro. En el instante 1 la fuerza centrífuga de las masas excéntricas se suman y la fuerza horizontal se hace nula. En el instante 2 después de un ciclo, las fuerzas horizontales causadas por las dos masas excéntricas se anulan cada una y no existe componentes en la dirección vertical.

De la posición 1 a la posición 2 las fuerzas horizontales se balancean en cada instante y las fuerzas vertical se suman.

La fuerza vertical máxima es:

$$P_{\max} = m.e.w^2$$

Esta fuerza varía sinusoidalmente :

$$P_t = m.e.w^2.\text{sen}(wt)$$

Donde:

$m/2$  = Masa excéntrica

e = Excentricidad

w = Frecuencia angular de rotación

Las figuras 19 y 20 muestran el detalle de un martillo vibratorio.

La tabla muestra las especificaciones de los martillos Sovieticos.

La tabla muestra las especificaciones del hincador/extractor MKT americano.

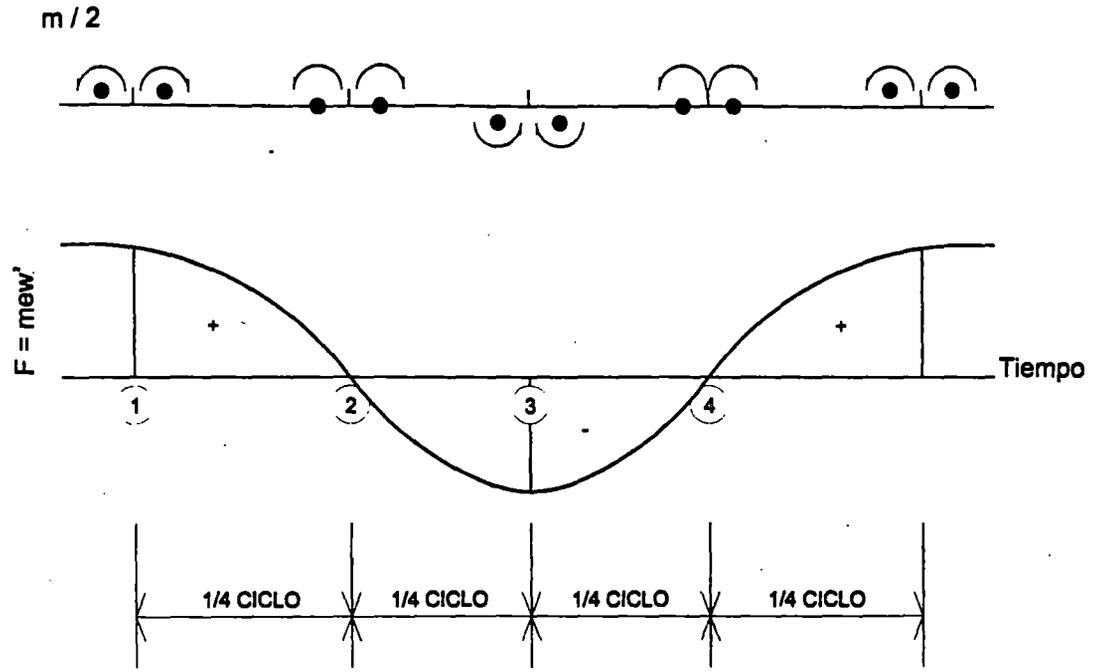


Fig. 19 Principio del oscilador mecánico

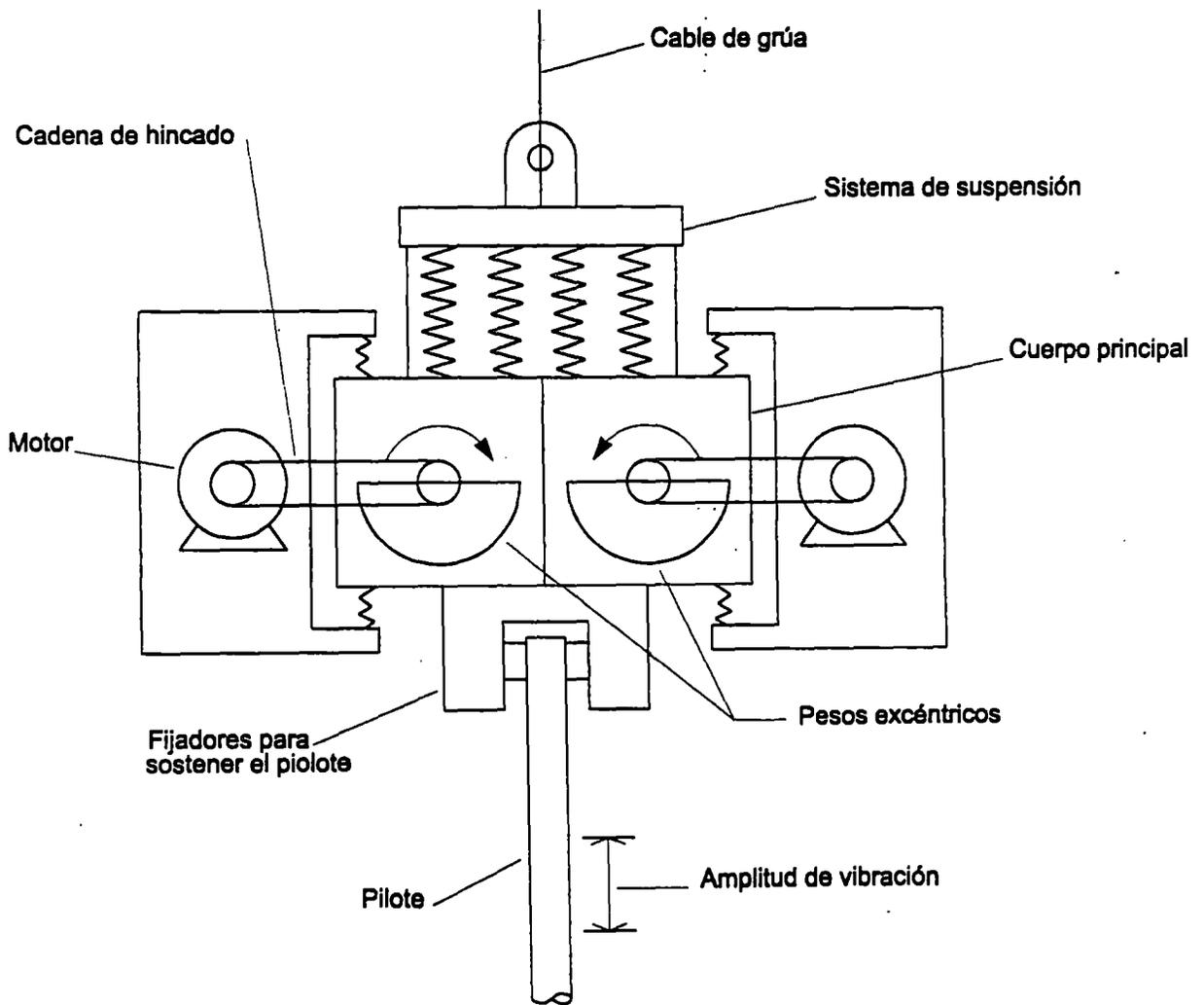


Fig. 20 Detalle del martillo vibratorio

Albert G. Bodine, diseñó un martillo sónico Bodine, el cual hinca un pilote en su frecuencia fundamental.

La ventaja sobre los otros es su alta frecuencia de operación sobre los 100 Hz, contrario al rango de frecuencia de 8 a 220 Hz para las máquinas Soviéticas o Francesas.

En general la pérdida de energía del martillo vibratorio es considerablemente menor que los martillos convencionales, debido a que en este último, la energía de impacto se disipa mucho ya sea por compresión en el bloque de amortiguamiento o en vencer la inercia del propio pilote y la fricción en los casos que posiblemente pueda desarrollarse entre golpes ampliamente espaciados.

Una gran desventaja del martillo vibratorio es que durante la operación de hincado la capacidad de carga de un pilote no puede ser estimada.

En la actualidad la capacidad última del pilote  $P_u$  puede solamente ser estimada utilizando métodos estáticos.

En 1970 Davison desarrolló una ecuación, la cual propone estimar la capacidad del vibrador Bodine (Bodine Resonant Driver), utilizado principalmente por la Raymond Concrete Pile Company.

La ecuación Bodine Resonant Driver es:

$$P_u = \frac{A (hp) + Br_p}{R_p + \Omega S_L}$$

Donde :

A = 550 ft.lb/sg (FPS) = 0.746 KJ/sg (SI)

B = Peso del martillo Bodine= 22,000 lb (FPS)=98 KN (SI)

$R_p$  = Velocidad Final de Penetración

$\Omega$  = Frecuencia en Hz.

$S_L$  = Factor de pérdida = ft.sg/ciclo, mt.sg/ciclo

Hp= Horse Power entregado al pilote

#### IV.- SISTEMAS DE PROTECCION DE LAS CIMENTACIONES PILOTEADAS

Los martinets difieren mucho en la manera en que aplican la energía al amortiguador del martinete. Los martinets diesel ejercen fuerzas de duración grande, en comparación con las ejercidas por los de vapor. La energía total realmente transmitida por un martinete, puede determinarse mejor haciendo medidas continuas de la velocidad del martillo al aproximarse al pilote y cuando invierte la dirección, y sube nuevamente. Estas medidas han demostrado que la eficiencia de los martinets bien conservados tienen poca relación con los factores de eficiencia dados por los fabricantes y que las eficiencias de los que reciben un mal mantenimiento o se operan incorrectamente pueden ser extremadamente bajas.

Los bloques amortiguadores de los pilotes pueden describirse como blandos o duros. Para un martinete y pilote dado, si el amortiguador es blando, la onda de esfuerzo inducida es más larga y su esfuerzo máximo es menor que si el amortiguador fuese duro. Los esfuerzos menores alargan la vida del martinete y dañan menos al pilote, sin embargo si la fuerza máxima generada con el amortiguador blando no es suficiente para

producir la capacidad máxima deseada en el pilote, puede ser necesario un amortiguador más duro.

Los amortiguadores del martinete y del pilote pueden considerarse como resortes que tienen un módulo igual a su rigidez como columna  $AE/L$ , donde A y L son respectivamente el área transversal y la altura del amortiguador, y E es el módulo de elasticidad del material. Tanto las dimensiones como el módulo de elasticidad son importantes para determinar el módulo del resorte. Relativamente pocos materiales se han encontrado convenientes como amortiguadores. Para amortiguadores blandos, la madera y el asbesto son los más comunes. Los amortiguadores duros, usualmente consisten en discos alternados de aluminio y de micarta, aunque se han producido y usado otros materiales semejantes a la micarta. Estos materiales pueden ser baratos o poseer larga vida en relación a su costo. Otros materiales, como la viruta de madera o los cables de acero enrollados, se utilizan frecuentemente, pero no son convenientes, ya que sus propiedades no pueden controlarse. Como los amortiguadores absorben mucha energía, no es raro que los de madera lleguen a arder.

La experiencia indica que hay amortiguadores blandos y duros, pero sólo deberán usarse aquellos que tengan características conocidas. La falta de control en los materiales de amortiguación da lugar a que se utilicen subterfugios en cierto grado.

De acuerdo con las fórmulas dinámicas una pequeña penetración corresponde a una capacidad de carga elevada; de esta manera, un pilote inadecuado puede , manipulando los materiales

amortiguadores, parecer como aceptable a un inspector desprevenido.

Para los mejores resultados, debe elegirse el tipo y dimensiones del bloque amortiguador y las características del martinete de manera que satisfagan dos puntos de vista:

1.- Asegurar que se desarrolle en el pilote una fuerza máxima de hincado, cuando menos igual a la capacidad de carga máxima deseada para el pilote en cuestión, sin sujetarlo a esfuerzos excesivos.

2.- Transmitir al pilote la mayor cantidad de energía disponible en el martinete.

El segundo requisito conduce a la economía en el hincado; que algunas veces tiene que sacrificarse en beneficio del primero.

El significado de los requisitos se ilustra en la figura que se refiere a pilotes largos hincados con martinetes Vulcan de acción sencilla funcionando con una eficiencia de 75 por ciento. Si se necesita una capacidad de carga máxima de 360 Ton, es evidente que sería necesario un pilote con una impedancia mínima de 1140 kg-seg/cm; que se necesitaría el martinete 010 si se va a elegir esa impedancia, y que un amortiguador de aluminio y micarta sería efectivo, mientras que la capacidad no podría obtenerse ni remotamente, con el amortiguador de triplay de pino, mas blando. Se podría usar un martinete más ligero, si la impedancia del pilote se aumentara. Por otra parte, si se necesitara una capacidad máxima de solamente 45 Tn, podría hincarse un pilote con una impedancia mucho menor y un amortiguador mas blando sería más eficiente para transmitir la energía.

La figura es estrictamente aplicable, solamente si los esfuerzos en la cabeza del pilote no se modifican por las ondas reflejadas durante el periodo de impacto. En los pilotes cortos no es probable que pueda satisfacerse esta condición y es necesario hacer análisis más complejos; los pilotes cortos pueden hincarse frecuentemente a las capacidades requeridas con martinets algo mas pequeños que los indicados en la figura , a causa de los reflejos de compresión en la punta del pilote. En la figura también se supone implícitamente que el pilote es estructuralmente capaz de soportar los esfuerzos de hincado. A continuación se entrega en una tabla algunas valores de elasticidad para algunos materiales que se utilizan como amortiguadores.

El pilote considerado tiene lado de 12 pulgadas o 30 cm, sección cuadrada:

MATERIAL	E (ksi)	E (Mpa)
Micarta	450	3100
Madera dura, pino	45	310
Discos de asbesto	45	310
Madera laminada	35	240
Pino	25	170
Madera suave, goma	30	205

#### IV.5.- RESISTENCIA AL HINCADO

##### IV.5.1.- INTRODUCCION

Los pilotes que se hincan por medio de martinets de impacto, ordinariamente se clavan hasta obtener una resistencia que se mida por el número de golpes necesarios para la penetración en los últimos 2 o tres centímetros. Para los pilotes de madera

hincados con martinetes de vapor que aplican una energía del orden de 2000 kg-m, este número final de golpes no debe ser mayor de 3 o 4 , para reducir el peligro de romper o de astillar los pilotes.

Además, es probable que el daño sea menor si se hincan con un martinete diesel, aun con la misma energía. Comúnmente, se especifican resistencias de 6 a 8 golpes en los últimos 2 o 3 cm para los pilotes de concreto y acero. El especificar más de 10 golpes usualmente es un requisito excesivo.

#### **IV.5.2.- USO DE JET, BARRENAS Y PULSETAS**

Si los pilotes deben atravesar estratos compactos de arena o grava, con objeto de pasar a depósitos inferiores suaves, puede aflojarse arena o la grava con jet o chiflones. En este procedimiento se descarga un chorro de agua cerca de la punta o ea los costados del pilote con un tubo de 5 a 7.5 cm de diámetro. La bomba para el jet debe ser capaz de descargar 1890 lt/min, a una presión de 10 a 15 kg/cm<sup>2</sup>. El agua afloja la arena y la hace movediza, de manera que el pilote puede fácilmente atravesarla.

El uso de barrenas rotatorias con equipo especialmente adaptado, es útil para penetrar en semejantes depósitos así como en suelos firmes o duros cohesivos a profundidad considerable.

Los estratos relativamente delgados de arcilla firmes o de roca blanda a poca profundidad, pueden atravesarse algunas veces con pultsetas, es decir , puntas duras de metal que se claven en el terreno y se sacan antes de introducir los pilotes. El uso de

jet y barrenas son técnicas relativamente comunes mientras que el de la pulseta es más raro.

#### **IV.5.3.- PERFORACION PREVIA AL HINCADO**

Cuando se hincan pilotes a través de arcilla plástica saturada, desalojan un volumen de suelo que puede ser igual al de los pilotes. Este desalojamiento usualmente produce una elevación del terreno que puede levantar las estructuras adyacentes o los pilotes ya hincados. Si la capacidad de carga de los pilotes depende de que éstos se apoyen en un manto firme debajo de la arcilla plástica, la elevación puede producir mermas en la capacidad de carga; en muchos casos, pueden rehincarse los pilotes que se han levantado para darles un apoyo firme.

El desplazamiento de material puede producir no solo elevaciones del terreno, sino también movimientos laterales perjudiciales, especialmente si hay excavaciones adyacentes con profundidades mayores a aquéllas en que se hincan los pilotes. Si los pilotes son del tipo compuesto, de elevación puede producir separación en las uniones.

Cuando hay la posibilidad de que los desalojamientos sean perjudiciales, éstos pueden reducirse bastante quitando parte del suelo en el espacio que va a ocupar cada pilote. Esto se hace perforando previamente con una herramienta cortadora o con una máquina rotatoria combinada con jet de agua que transforman la arcilla en la que va a hincarse el pilote en un lodo espeso. A estos procedimientos se les llama de perforación previa.

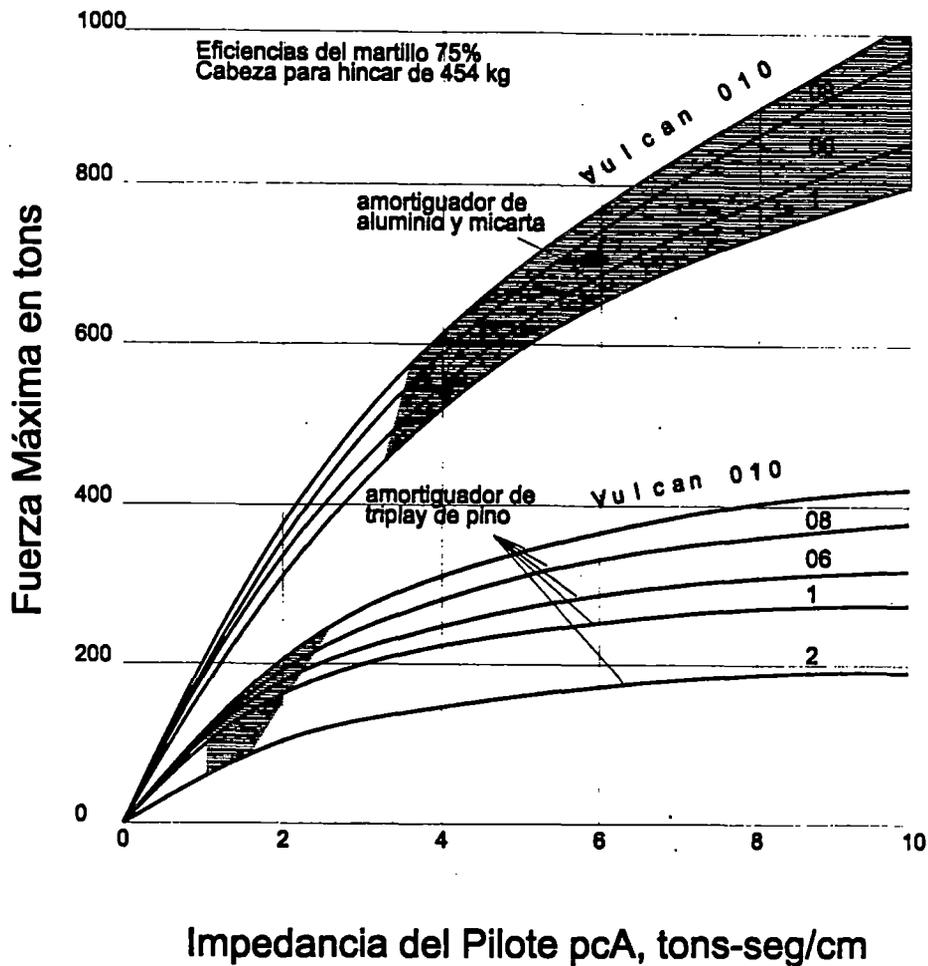


Fig. 21 Relación entre la Fuerza máxima de hincado y la impedancia del pilote pcA para martinets Vulcan de acción sencilla de varias energías, y para bloques amortiguadores duros (de aluminio-micarta) y blandos (de triplay y de pino). Las condiciones asociadas a la máxima transmisión de energía de hincado del martillo al pilote están indicadas por las áreas sombreadas (según Parola - 1970)

CAPITULO V  
CAPACIDAD DINAMICA DE CARGA ULTIMA

## **CAPITULO V CAPACIDAD DINAMICA DE CARGA**

### **V.1.- INTRODUCCION**

El análisis se basa en asumir la existencia de una relación directa, entre la capacidad portante de un pilote y la resistencia final obtenida durante el proceso de instalación por hincado.

### **V.2.- FUNDAMENTO**

Se ha propuesto y utilizado un gran número de fórmulas dinámicas para el hincado de pilotes. Estas se apoyan en la hipótesis de que la máxima capacidad de soporte es equivalente a la fuerza dinámica de hincado. Esto a su vez supone el principio de que la energía que el martinete transmite por golpe al pilote es igualado a la resistencia de hincado multiplicado por la penetración de la punta del pilote.

### **V.3.- APLICABILIDAD DEL ANALISIS DINAMICO,**

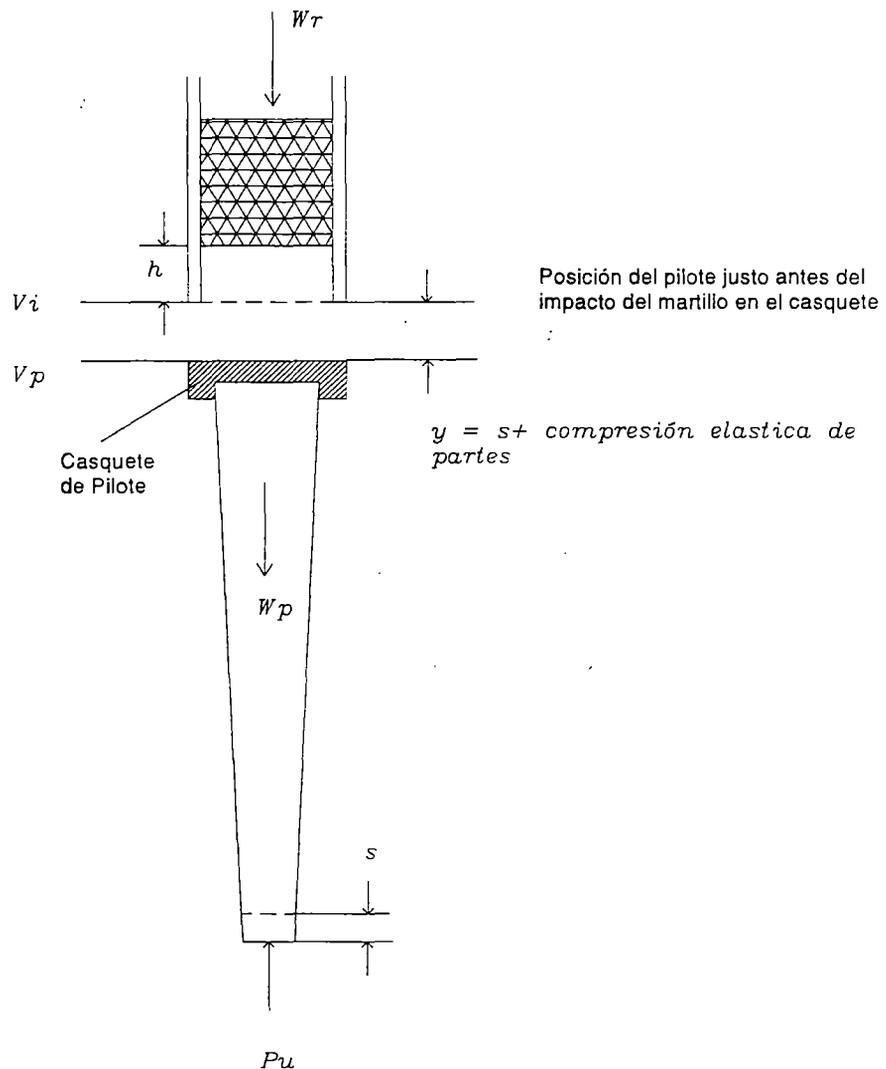
Parece obvio que a la mayor resistencia de un pilote al hincado, corresponde la mayor capacidad del pilote para soportar la carga. Tomando como punto de partida este aparente axioma, muchos ingenieros han concluido que sería posible calcular la capacidad de un pilote, conociendo la energía aplicada por el martillo y la penetración del pilote por cada golpe del martinete.

Las expresiones resultantes para la capacidad de carga se conocen como Fórmula Dinámicas, ay su variedad y número solo se iguala a sus inconvenientes.

#### V.4.- ESTUDIO DE LAS FORMULAS DINAMICAS CLASICAS

##### V.4.1.- INTRODUCCION

La fórmula dinámica de la capacidad del pilote llamada la Fórmula Racional del Pilote, depende del principio de impulso de momento.



- $P_u$  = Última capacidad del pilote
- $S$  = Valor del punto de penetración por impacto
- $V_i$  = Velocidad del martinete al momento del impacto
- $V_p$  = Velocidad del pilote al final del período de restitución
- $W_p$  = Peso del pilote incluido el peso del casquete
- $W_r$  = peso del martinete
- $h$  = altura de caída del martillo

Si nos remitimos a la figura observamos que en el instante del impacto, el momento del martillo es:

$$M_r = \frac{W_r \cdot V_i}{g}$$

Al final del período de compresión, el momento del pistón es:

$$M = \frac{W_r \cdot V_i}{g} \cdot I$$

Con una velocidad de:

$$V_{ce} = \left( \frac{W_r \cdot V_i}{g} - I \right) - \frac{g}{W_r} \quad \text{..... (a)}$$

Si asumimos en este instante el momento del pilote  $M_p = I$ , la velocidad del pilote es:

$$V_{ce} = \frac{g}{W_p} \cdot I \quad \text{..... (b)}$$

Asumiendo que el pilote y martillo no se han separado al final del período de compresión, la velocidad instantánea del pilote y martillo son iguales, por tanto combinando las ecuaciones (a) y (b) tenemos:

$$I = V_i \cdot \frac{W_r \cdot W_p}{g \cdot (W_r + W_p)} \quad \text{..... (c)}$$

Al final del período de restitución, el momento del pilote es:

$$I + nI = \frac{W_p}{g} \cdot V_p \quad \text{..... (d)}$$

Sustituyendo la ecuación (c) por I y resolviendo para la velocidad del pilote:

$$V_p = \frac{W_r + n W_r}{W_r + W_p} v_i \quad \dots\dots\dots (e)$$

Al final del período de restitución, el momento del pistón es:

$$\frac{W_r \cdot V_i}{g} - I - nI = \frac{W_r \cdot V_r}{g} \quad \dots\dots\dots (f)$$

Sustituyendo por I y resolviendo para  $V_r$ , obtenemos:

$$V_r = \frac{W_r - n W_p}{W_r + W_p} v_i \quad \dots\dots\dots (g)$$

La energía total disponible en el período en el pilote y martillo al final del periodo de restitución es:

$$\left( \frac{1}{2} m v^2 \right)_{\text{pilote}} + \left( \frac{1}{2} m v^2 \right)_{\text{martillo}}$$

Y sustituyendo (e) y (g) y simplificando tenemos:

$$\frac{W_r}{2g} V_r^2 + \frac{W_p}{2g} V_p^2 = e h \cdot W_r \cdot h \frac{W_r + n W_p}{W_r + W_p}$$

Si el sistema fuera 100% eficiente, la capacidad última  $P_u$  multiplicado por el desplazamiento "s" sería:

$$P_u \cdot s = e h \cdot W_r \cdot h$$

El desplazamiento instantáneo en la cabeza del pilote es:

$$s + K_1 + K_2 + K_3$$

Del cual solamente s es permanente, y el dato actual de energía al sistema del pilote es:

$$e h W_r h = P_u (s + K_1 + K_2 + K_3) = P_u (s + C)$$

Reemplazando el término equivalente de energía con el equivalente de la ecuación (h) :

$$P_u = \frac{e_h \cdot W_r \cdot h}{s+c} \cdot \frac{(W_r + n^2 \cdot W_p)}{(W_r + W_p)} \dots\dots\dots (i)$$

Una inspección cuidadosa de la ecuación de Hiley ó ecuación (i) y una separación de términos resulta en :

Energía = Trabajo + pérdida de impacto + pérdida de cabezal + pérdida del pilote + pérdida en el suelo.

$$e_h \cdot W_r \cdot h = P_u \cdot s + e_h \cdot W_h \frac{W_p \cdot (1-n^2)}{W_p + W_r} + P_u \cdot K_1 + P_u \cdot K_2 + P_u \cdot K_3$$

Los mejores resultados de la fórmula dinámica como una herramienta de la predicción de la capacidad del pilote son obtenidos cuando un estudio más detallado se hace de los varios factores de pérdida.

La lista de símbolos utilizados es la siguiente:

- A = Sección del pilote
- E = Módulo de elasticidad
- e<sub>h</sub> = Eficiencia del martillo
- E<sub>h</sub> = Energía del martillo
- g = Aceleración de la gravedad
- h = Altura de caída del martillo
- I = Cantidad de impulso causando compresión o cambio de momento.
- k<sub>1</sub> = Compresión elástica del amortiguador superior y cabezal; se calcula según PuL/AE.
- k<sub>2</sub> = Compresión elástica del pilote
- k<sub>3</sub> = Compresión elástica del suelo

- L = Longitud del pilote  
 m = Masa  
 Mr = Momento del martillo  
 n = Coeficiente de restitución  
 nI = Cantidad de impulso causando restitución  
 Pu = Capacidad última de pilote  
 s = Cantidad de penetración de punta por golpe  
 Vce = Velocidad del pilote y martillo al final del periodo de compresión.  
 Vi = Velocidad del pistón en el momento de impacto  
 Vp = Velocidad del pilote al final del periodo de restitución  
 Vr = Velocidad del pistón al final del periodo de restitución  
 Wp = Peso del pilote incluye peso del cabezal y amortiguador  
 Wr = Peso del martillo

#### V.4.2.- DIVERSAS FORMULA DINAMICAS

Todas las fórmulas dinámicas del hincado de pilotes excepto la fórmula de Gates mostrada en el resumen de fórmulas son obtenidas de las ecuaciones ya planteadas.

Siendo que la interpretación depende de la experiencia en tratar con suelos variables y condiciones de martillo así las fórmulas dinámicas no tienen muy buena relación con la expresión de campo especialmente cuando son usados en diferentes lugares.

Si definimos el término de impacto en la ecuación de Hiley como:

$$C_1 = \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p}$$

Y reordenándola tenemos :

$$C_1 = \frac{1 + n^2 W_p / W_r}{1 + W_p / W_r}$$

Y tomando  $n^2 W_p / W_r = 0$  , obtenemos:

$$C_1 = \frac{1}{1 + W_p / W_r}$$

El cual llega a ser el punto inicial de las diversas fórmulas dinámicas, la fórmula Engineer News (comúnmente llamada ENR) fue publicada en 1888 y fue desarrollada para pilotes de madera usando un martillo de caída con un factor de seguridad aproximado de (FS = 6).

La fórmula ha sido modificada para diferentes equipos de hincado y es probablemente la más usada de las varias fórmulas dinámicas del pilote.

Ello fue obtenido por reducir toda la compresión elástica en un factor simple  $c = 1$  pulg, con  $e_h = 1 = c_h$  obtenido para el martillo de caída.

Todas la fórmulas dinámicas comunes para los pilotes, igualan la energía aplicada por el martillo al trabajo hecho por el pilote, al penetrar su punta una distancia  $s$  contra una resistencia  $P_u$ , con varios márgenes para las pérdidas de energía asociadas al procedimiento. Los aspectos del fenómeno de transmisión de esfuerzos que dependen del tiempo se ignoran; y como se demostrará en el siguiente acápite, estos son de importancia fundamental. Por ejemplo en la fórmula del Engineering News, todas las pérdidas de energía asociadas a

cada golpe de un martinete de vapor de acción simple, se supone que son equivalentes al trabajo que habría hecho una penetración de 0.25 cm contra la resistencia  $P_u$ . Todo el trabajo efectuado durante la penetración útil  $s$  y la penetración que se supone perdida, es:

$$W_r \cdot h = P_u \cdot (s + 0.25)$$

Donde  $W_r$  es el peso del martillo expresado en las mismas unidades que  $R$  y  $s$  esta en cm.

Si  $h$  se expresa en metros y si se supone un factor de seguridad de 6, la resistencia en condiciones de trabajo es:

$$P_u = \frac{16.68 \cdot W_r \cdot h}{s + 0.25}$$

Para otros martinetes de vapor que no sean los de acción sencilla el numerador se reemplaza por  $2E$ , donde  $E$  es la energía del martillo por golpe.

#### V.4.3.- RESUMEN DE VARIAS FORMULAS DINAMICAS DEL PILOTE

##### 1.- CODIGO NACIONAL DE CONSTRUCCION DEL CANADA

El cual usa un factor de seguridad (FS) de 3 y usa fórmulas de aproximación siguientes:

$$P_u = \frac{e_h \cdot E_h \cdot C_1}{s + C_2 \cdot C_3} \quad C_1 = \frac{W_r + n^2 \cdot (0.5W_p)}{W_r + W_p}$$

$$C_2 = \frac{3P_u}{2A} \quad C_3 = \frac{1}{E} + 0.0001 \text{ (inch}^3/\text{k)}$$

Notar que el producto  $C_2 \cdot C_3$  da unidades de  $s$ .

2.- Fórmula de Danish que usa un FS de 3 a 6 .

$$P_u = \frac{e_h \cdot E_h}{s + C_1} \quad C_1 = \sqrt{\frac{e_h \cdot E_h \cdot L}{2 A \cdot E}} \quad (\text{unidades de } s)$$

3.- Fórmula de Eytelwein : usa un FS = 6

$$P_u = \frac{e_h \cdot E_h}{s + 0.1(W_p/W_r)}$$

4.- Fórmula de Gates , usa un FS = 3

$$P_u = a \sqrt{e_h \cdot E_h \cdot (b - \log s)}$$

$P_u$  = Kips o KN ,                       $E_h$  = Kips-ft o KN-mt

Considerando la siguiente tabla:

Descripción	s	a	b
Fps	Inch	27.0	1.0
SI	Mm	104.5	2.4

$e_h$  = 0.75 para martillos de caída libre y 0.85 para otros martillos.

5.- Fórmula de Jambu que usa un FS de 3 hasta 6

$$P_u = \frac{e_h \cdot E_h}{k_u \cdot s} \quad C_d = 0.75 + 0.15 \frac{W_p}{W_r}$$

$$k_u = C_d \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{@}{C_d}} \right) \quad @ = \frac{e_h \cdot E_h \cdot L}{A \cdot E \cdot s^2}$$

6.- AASHTO ( FS = 6 )

$$P_u = \frac{2 \cdot h \cdot (W_r + A_r \cdot p)}{s + 0.1}$$

Donde para martillos de doble acción :  $A_r$  = Area de sección transversal del pistón y  $p$  = presión de vapor o aire.

Para martillos de acción simple y de gravedad :  $A_r.p = 0$  .

### 7.- Fórmula de Navy-McKay ( FS = 6 )

$$P_u = \frac{e_h \cdot E_h}{s(1 + 0.3C_1)} \qquad C_1 = \frac{W_p}{W_r}$$

### 8.- Fórmula de PCUBC

Código de Construcción de la Costa del Pacífico, usa un FS= 4

$$P_u = \frac{e_h \cdot E_h \cdot C_1}{s + C_2} \qquad C_1 = \frac{W_r + k \cdot W_p}{W_r + W_p}$$

Donde :  $k = 0.25$  para pilotes de acero

$k = 0.10$  para otros pilotes

$$C_2 = \frac{P_u \cdot L}{A \cdot E}$$

En general se empieza con  $C_2 = 0.0$  y calculamos el valor de  $P_u$ , reducimos el valor obtenido en un 25% , luego calculamos y así obtenemos un nuevo valor de  $P_u$ .

Se usa este nuevo valor de  $P_u$  para calcular un nuevo  $C_2$ , etc, hasta que el  $P_u$  usado sea aproximadamente igual al  $P_u$  calculado.

### 9.- Fórmula de los Martillos Delmag

En la deducción de esta fórmula se incluye un factor que considera la elasticidad del sistema suelo-pilote.

$$E_{total} = E_{util} + E_{perdida}$$

$$E_c = P_d \cdot S + E_p$$

Donde:

$E_c$  = Energía cinética instantánea en el impacto

$E_e$  = Energía perdida por la elasticidad del sistema suelo-pilote.

$$E_c = 1/2 ( M_m + M_p ) V^2$$

Donde:

$M_m$  = Masa del pistón del martillo

$M_p$  = Masa del pilote

$V$  = Velocidad del conjunto pistón-pilote ocurrido el impacto.

Cantidad de movimiento  $C$  :

$C$  antes del impacto =  $C$  después del impacto

$$M_m \cdot V_m + M_p \cdot V_p = ( M_m + M_p ) \cdot V$$

$$V = \frac{M_m \cdot V_m + M_p \cdot V_p}{M_m + M_p}$$

Se tomará en cuenta en la fórmula Delmag un factor de seguridad igual a 2 (  $FS = 2$  ).

$$P_d = \frac{E_m \cdot W_m}{2 (s + 1/2 Se) \cdot (W_m + W_p)}$$

El factor de elasticidad  $Se$ , se obtiene mediante un registro gráfico, tal como se muestra a continuación durante las pruebas de hinca.

Por caída libre del pistón:

$$h = V_m^2 / (2g)$$

$$V_p = \sqrt{(2gh)}$$

$$V_c = 0.0$$

Reemplazando:

$$V = \frac{M_m \cdot \sqrt{2gh}}{M_m + M_p}$$

$$E_c = 1/2 (M_m + M_p) \cdot \left( \frac{W_m}{M_m + M_p} \right)^2 (2gh)$$

$$E_c = W_m^2 \cdot h / (M_m + M_p)$$

$$E_c = E_m \cdot W_m / (M_m + M_p)$$

$E_e$  = Energía perdida por elasticidad del sistema suelo pilote.

$$E_e = P_e \cdot S_e / 2$$

$$\frac{E_m \cdot W_m}{W_m + W_p} = P_d \cdot S + P_d \cdot \frac{S_e}{2}$$

Por lo tanto :

$$P_d = \frac{E_m \cdot W_m}{(S + 1/2 S_e) \cdot (W_m + W_p)}$$

## V.5.- ANALISIS DINAMICO POR MEDIO DE UNA ONDA DE ESFUERZOS INDUCIDA.

### V.5.1.- INTRODUCCION

Consideramos la ecuación de onda como el análisis de la ecuación diferencial de impacto de una varilla delgada sujeta a la resistencia lateral  $R$ , como se muestra en la figura 21.a, donde la unidad de deformación es:

$$e = \frac{du}{dy}$$

La fuerza en la parte superior del elemento se calcula como:

$$P_t = EAe = EA \frac{du}{dy}$$

La fuerza en la parte inferior del elemento es:

$$P_b = P_t - \Delta P \pm R$$

Y la fuerza neta (el cual produce aceleración del elemento) sobre el elemento de longitud es:

$$P_{net} = \Delta P = P_t - P_b \pm R \quad (a)$$

o también; reemplazando en (a):

$$P_{net} = AE \frac{du}{dy} - (AE \frac{du}{dy} - AE \frac{d^2u}{dy^2} dy) \pm R$$

luego

$$P_{net} = AE \frac{d^2u}{dy^2} dy \pm R$$

Pero la fuerza no balanceada  $P_{net}$  es también:

$$P_{net} = Ma = \frac{W}{g} \ddot{u} = \frac{W}{g} \frac{d^2u}{dt^2}$$

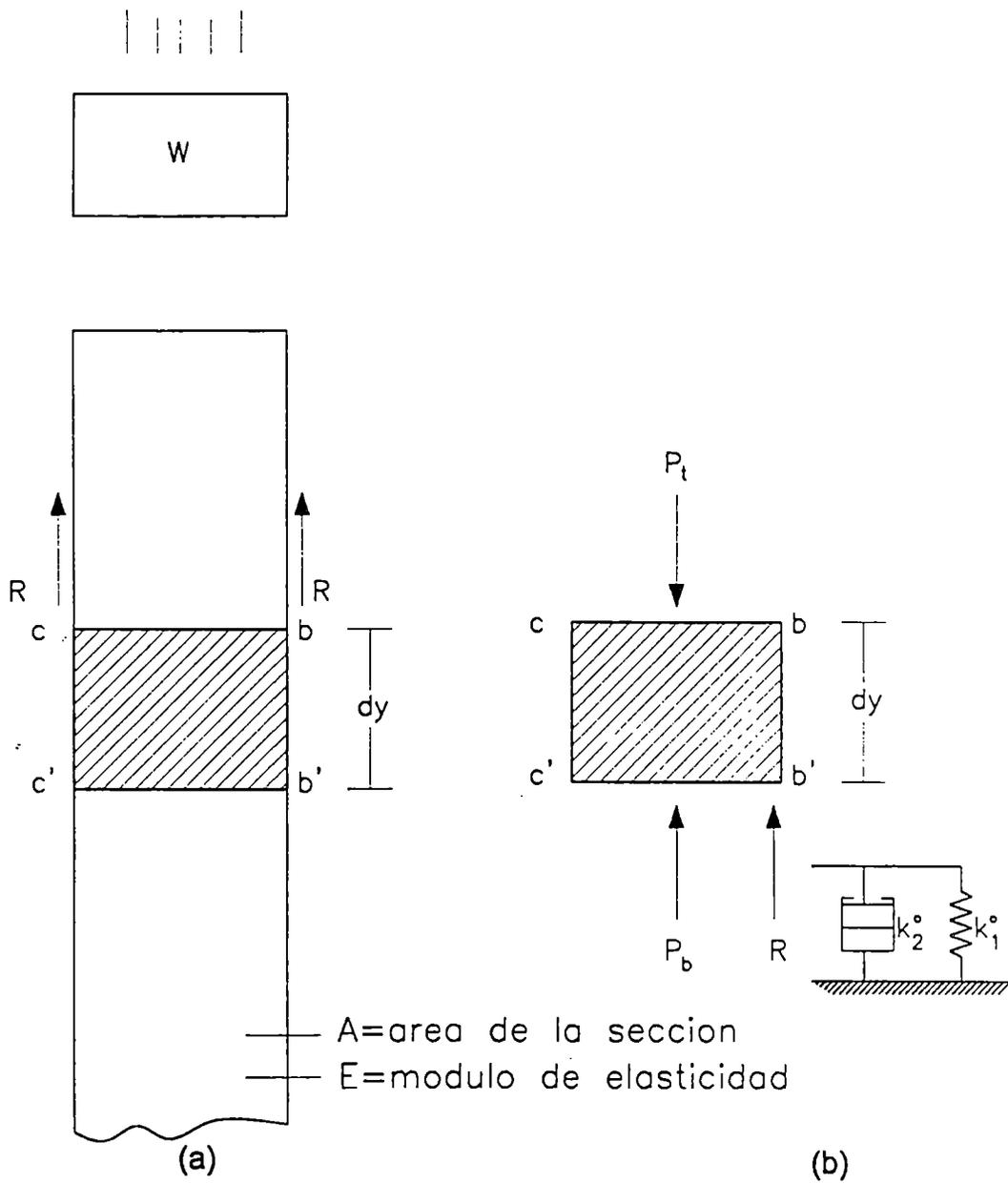


Fig. 21 a) Transmisión de esfuerzos en una longitud de barra elástica  
 b) Consideración de la naturaleza viscoelástica del pilote

Igualando valores de  $P_{net}$  e introduciendo

$$\rho = \frac{W}{gA\Delta y}$$

Tenemos:

$$\frac{d^2u}{dt^2} - \frac{E d^2u}{\rho dy^2} + R \left( \frac{u}{W} \right) = 0 \quad (b)$$

Esta es la ecuación diferencial de la ecuación de onda, la cual tiene varias formas de resolución. Antes de esto analizaremos  $R$ , de la fig. 21.b notamos que la fuerza de corte en el elemento diferencial es:

$$R = K^*_1 u dy + K^*_2 \frac{du}{dt} dy$$

Donde notamos el efecto del resorte elástico del suelo  $k^*_1$ , y el amortiguamiento del suelo  $k^*_2$ , que se encuentran en paralelo. Así es que en la ecuación (a) se considera la naturaleza viscoelástica del suelo. En el modelo físico a estudiar se tomará en cuenta estos puntos.

Para la ecuación (b) existen soluciones teóricas, estas se resuelven con aproximaciones numéricas, que son eficientes cuando se cuenta con datos precisos.

Expresemos  $d^2u/dt^2$  en diferencias finitas usando el método de diferencias finitas de dos pasos atrás, es decir:

$$Y'' = \frac{Y_n - 2Y_{n-1} + Y_{n-2}}{(\Delta x)^2}$$

Cambiando términos tenemos:

$$\frac{D_n - 2D'_{n-1} + D_{n-2}}{T^2} = \frac{d^2u}{dt^2}$$

Multiplicando ambos miembros por  $T^2$  y considerando que:

$$\left( \frac{d^2 u}{dt^2} \right) T^2 = F_{am} \frac{gT^2}{W_m}$$

Entonces tenemos que:

$$D_m - 2 D'_m + D''_m = F_{am} \frac{gT^2}{W_m}$$

Esta es la aproximación que se utiliza para el estudio realizado.

## V.6.- FORMULACION DEL ANALISIS DE LA ECUACION DE ONDA.

### V.6.1.- INTRODUCCION

El modelo teórico supone que el pilote está compuesto por una serie de elementos (fig. 22), cada uno de peso  $W_n$ , conectados por un resorte de rigidez  $K$  asociados a propiedades elásticas al material del pilote, a la resistencia en las caras del pilote que amortiguan las vibraciones, se suponen de naturaleza viscoelásticas, con una constante  $K'$  representando la características de los suelos.

La resistencia en la punta es representada también por un elemento viscoelástico, además de los elementos como el martillo y cabezal representado por elementos adecuados con pesos y rigidez, como también las propiedades de los amortiguadores representados por elementos adecuados.

Para el desarrollo de este modelo teórico en la solución del problema específico, debe introducirse la velocidad del martillo en el impacto, así con valores numéricos de todos los pesos, rigideces, factores de amortiguamiento y resistencias. Sin embargo usualmente no es necesario asignar valores

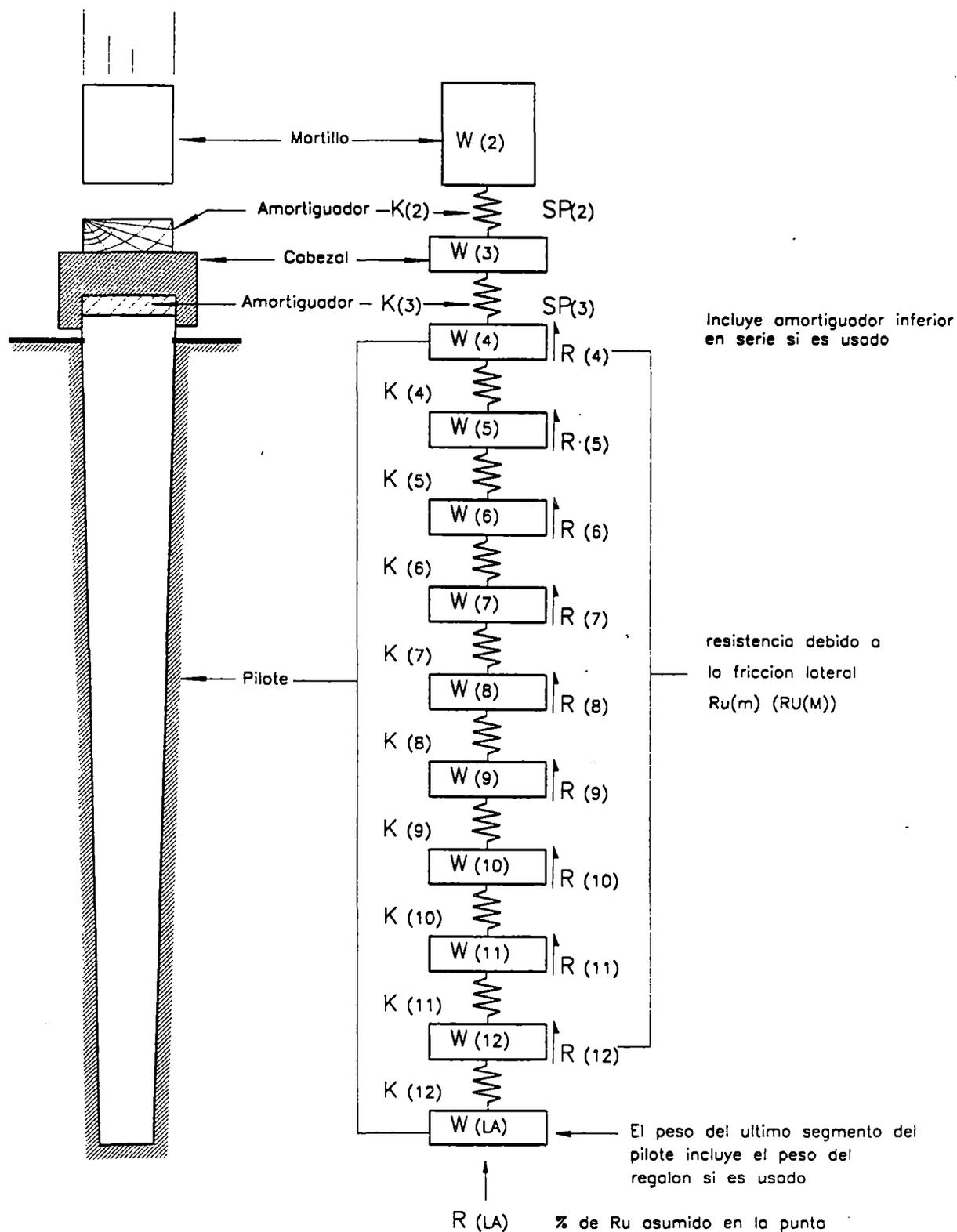


Fig. 22. a) Pilote real en profundidad aproximada de empotramiento.  
 b) Modelo mecánico ideal de diferencias finitas de un pilote, considerado como base para la solución de la ecuación onda y el análisis dinámico del hincado de pilotes. Los segmentos de pilotes y resortes subscritos corresponden a 12 elementos en el sistema (10 segmentos son del del pilote). El peso del segmento del piloete es concentrado en la base del resorte. Note que  $R(LA)$  incluye la resistencia de la cara del elemento más bajo del pilote.

numéricos específicos a la resistencia de la punta y a la resistencia lateral por fricción. Sólo es necesario estimar la fracción de la resistencia total del pilote que va a desarrollar la punta y suponer la ley en que la resistencia lateral está distribuida a lo largo del pilote.

La ecuación de onda puede ser usada para determinar:

- 1.- Si el pilote puede ser hincado usando la combinación martillo pilote dados.
- 2.- Si el pilote alcanzará la capacidad de carga última deseada usando estimados de la capacidad última y obteniendo resultados en golpes/10 cm.
- 3.- Que los valores de los esfuerzos de hincado no excederán los esfuerzos permitidos en el pilote.

Este método reemplaza la ecuación diferencial describiendo una onda de choque a lo largo del pilote con un equivalente numérico (figura 23).

#### V.6.2.- DESCRIPCION BASICA DEL METODO

- 1) En el principio de  $t=1$  ( $\Delta t = 1$ ) el martinete  $W(2)$  impacta sobre el soporte con una velocidad inicial  $V(2,1)$  o el  $v_1$  de la figura.
- 2) Esta velocidad  $V(2,1)$  desplaza el resorte del amortiguador superior  $SP(2)$  en el fin del primer intervalo en  $D(2,2)$  de acuerdo a la ecuación.

$$y_1 = v_1 \Delta t$$

- 3) Este desplazamiento produce una fuerza en el amortiguador superior  $F(2,2)$  calculado como:



$$F = Kv$$

- 4) La fuerza  $F(2,2)$  acelera el cabezal  $W(3)$  hacia abajo de acuerdo a:

$$F = ma$$

Ningún otro evento importante ocurre durante este intervalo.

- 5) Al final del siguiente intervalo ( $DT=2$ )

- a.- El amortiguador superior se movió una distancia, debido a la velocidad  $v_2$ , de:

$$Y_2 = v_2 \Delta t$$

- b.- El cabezal se mueve una distancia basada en la aceleración producida por  $F(2,2)$  para obtener una velocidad de:

$$V_3 = at$$

el cual produce un desplazamiento  $[D(3,2)]$  de:

$$Y_3 = v_3 \Delta t$$

- c.- Resultando una nueva fuerza en el amortiguador superior debido al desplazamiento neto  $y_1 - y_2$  para obtener dicha fuerza como:

$$F_{(2,2)} = K_2 (y_1 - y_2)$$

- d.- Y también resulta una fuerza  $F(3,2)$  entre el cabezal y el primer segmento del pilote basada en el desplazamiento  $y_2$  y en la constante del resorte del primer segmento del pilote  $K = SP(3)$  como una fuerza  $F_3$  de la fig. 23.

$$F_{(i-1)} = K_s Y_s$$

Este proceso continúa para todos los elementos con sus resortes y resistencias de suelo incluyendo la punta obteniendo la información deseada para cada intervalo de tiempo.

En el siguiente párrafo queremos desarrollar el método en forma detallada, a continuación se detallan los símbolos a emplear:

A = Área de la sección transversal del pilote (cm<sup>2</sup>).

C<sub>m</sub> = Compresión o desplazamiento relativo del resorte del elemento m en t=1 (cm).

C'<sub>m</sub> = Compresión o desplazamiento relativo del resorte del elemento en t=i-1 (cm).

D<sub>m</sub> = Desplazamiento del elemento m en t=i (cm).

D'<sub>m</sub> = Desplazamiento del elemento m en t=i-1 (cm).

D''<sub>m</sub> = Desplazamiento del elemento m en t=i-2 (cm).

D<sub>sm</sub> = Desplazamiento plástico del suelo en t=i (cm).

D<sub>sm</sub>' = Desplazamiento plástico del suelo en t=i-1 (cm).

E = Módulo de elasticidad del pilote (Tn/cm<sup>2</sup>).

E<sub>f</sub> = Eficiencia del martinete.

G = Aceleración de la gravedad (g = 9.807 m/s<sup>2</sup>).

i-1 = Intervalo de tiempo antes de T=i (actual).

J<sub>p</sub> = Constante de amortiguación de la punta del pilote (s/m).

J<sub>s</sub> = Constante de amortiguación debido a la fricción (s/m).

K<sub>m</sub> = Constante de resorte del segmento del pilote incluyendo cabezal, amortiguador superior e inferior (Tn/cm).

K'<sub>m</sub> = Constante de resorte del suelo (Tn/cm).

DL = Longitud del segmento del pilote (mt).

M<sub>m</sub> = Masas.

DEMS = Deformación elástica máxima del suelo (cm).

$\Delta T = T$  = Intervalo de tiempo usado en cómputo (Sg).

$\ddot{u}$  = Segunda derivada del desplazamiento  $u$  con respecto al tiempo.

$V_m$  = Velocidad del elemento  $m$  en  $t=i$  (m/s)

$V_m'$  = Velocidad del elemento  $m$  en  $t=i-1$  (m/s).

Por inspección de la figura 24.a el desplazamiento instantáneo  $D_m$  de cualquier elemento es la suma del desplazamiento instantáneo de una unidad de tiempo atrás ( $D_m'$ ) más el producto de la velocidad instantánea del elemento en el intervalo de tiempo:

$$D_m = D_m' + V_m T \quad (1)$$

Y la compresión neta del elemento (figura 24.b) es calculada como:

$$B - C$$

o en términos de desplazamiento:

$$C_m = D_m - D_{m+1} \quad (2)$$

La fuerza resultante en el resorte del elemento  $K_m$  es simplemente:

$$F_m = K_m \cdot C_m \quad (3)$$

La fuerza acelerante  $F_{am}$  en cualquier elemento  $m$  es (fig 24):

$$F_{am} = F_{m-1} - F_m - R_m \quad (4)$$

$$-F_{m-1} + F_{am} + F_m + R_m = 0$$

La velocidad del elemento  $m$  es computada de la ecuación de la velocidad:

$$V = V_0 + at$$

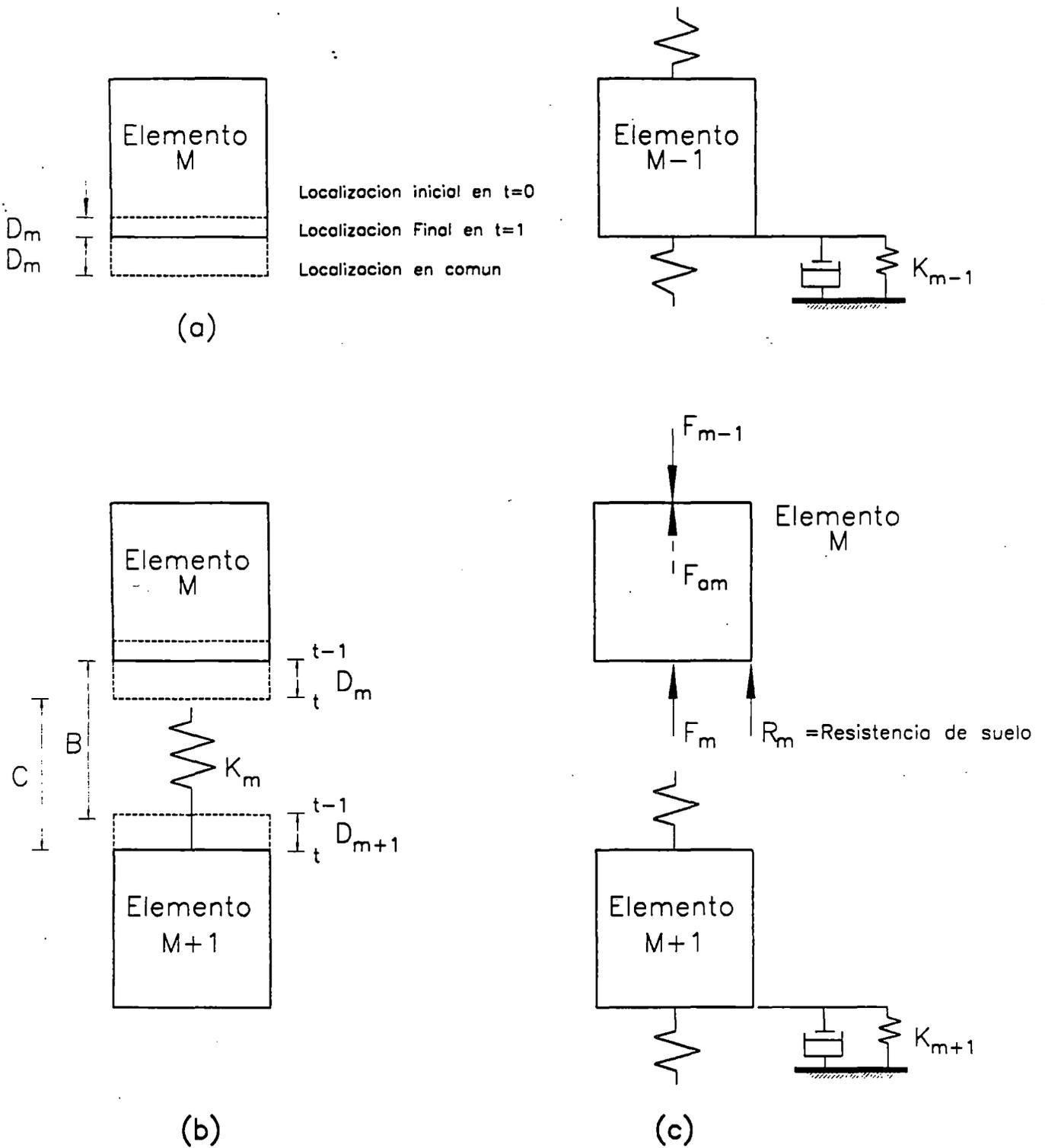


Fig. 24 Fuerza y Desplazamiento del elemento

Note que la resistencia del suelo se muestra como  $R(m)$  para el elemento M; el cual es efecto del resorte elástico del suelo y el amortiguador del suelo que se encuentran en paralelo.

El cual llega a ser en este caso (desde que  $a = F_{am}/m$  ó  $a = F_{am}g/W_m$ )

$$V_m = V_m' + F_{am} \frac{g}{W_m} T \quad (5)$$

La ecuación final general del elemento-desplazamiento puede ser obtenida multiplicando la ecuación anterior por  $T$ , para obtener.

$$V_m T = V_m' T + F_{am} \frac{g}{W_m} T^2$$

Reordenando la primera ecuación tenemos que:

$$V_m \cdot T = D_m' - D_m''$$

Y por analogía:

$$V_m' T = D_m' - D_m''$$

Reemplazando en la ecuación (a):

$$D_m = 2D_m' - D_m'' + F_{am} \frac{g}{W_m} T^2 \quad (6)$$

Esta ecuación es la aproximación por diferencias finitas obtenidas anteriormente en base a la cual se desarrolla un programa de computo.

### V.6.3.- SOLUCION DE OTROS FACTORES.

A continuación se estudiará los detalles restantes en la solución de la ecuación de onda.

Las velocidades de los elementos del pilote pueden calcularse como:

$$V_m = V'_m + (F_{m-1} / F_m / R_m) \frac{gI}{Wm} \quad (7)$$

y la fuerza  $F_m$  es :

$$F_m = (D_m / D_{m+1}) K_m \quad (b)$$

La Resistencia última del pilote  $R_u$  puede ser distribuida en alguna manera a los elementos del pilote de tal forma que la suma de las resistencias sea  $R_u$ . La distribución puede ser basada en el porcentaje de carga llevada por la resistencia en el friccionante y en la punta de acuerdo a sondeos y pruebas de suelos.

La constante del resorte del suelo se calcula como:

$$K_m' = \frac{R_{um}}{DEMS}$$

En el programa se considera que el primer segmento del pilote no adquiere resistencia de suelo debido al hincado y otras perturbaciones de superficie.

Las resistencias instantáneas de los elementos del pilote son calculadas como sigue (fig 25.1):

Denominando  $D_{sm}$  a la deformación plástica en la cara del pilote definida como la cantidad en exceso de DEMS, tenemos:

$$D_m / DEMS \leq D_{sm} \leq D_m + DEMS$$

o usando la aproximación:

$$D_{sm} = +D_m \pm DEMS$$

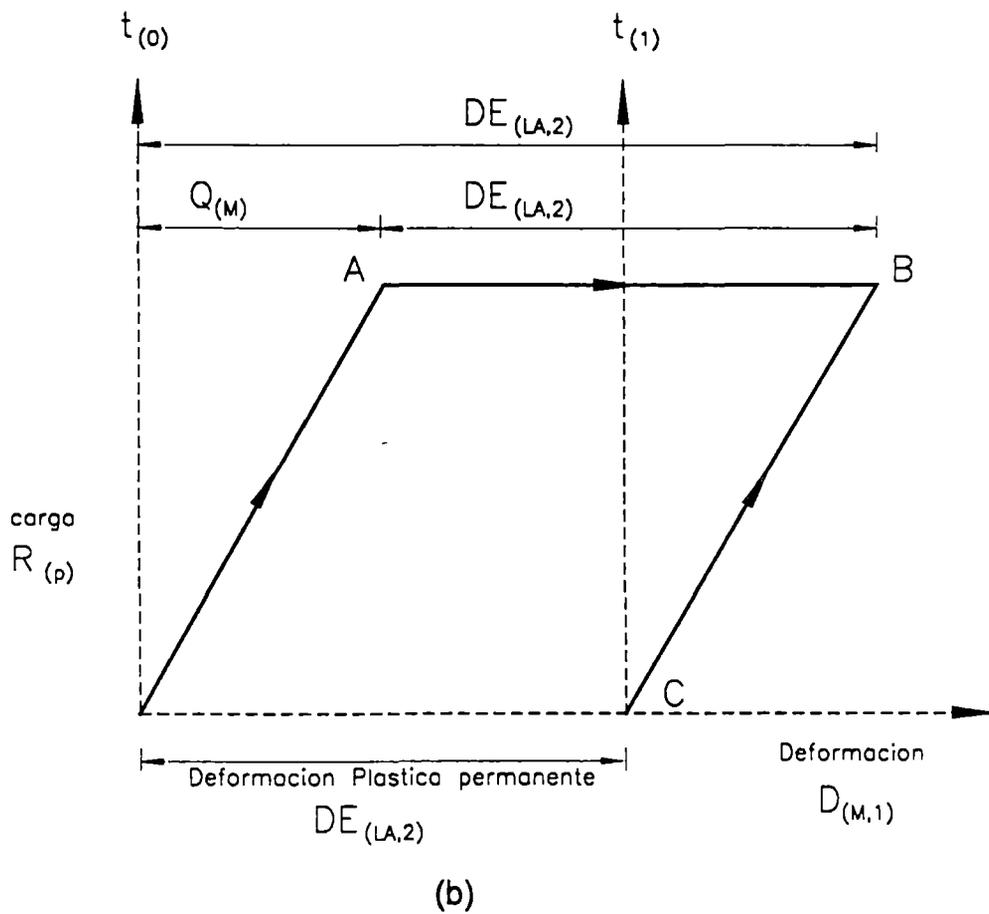
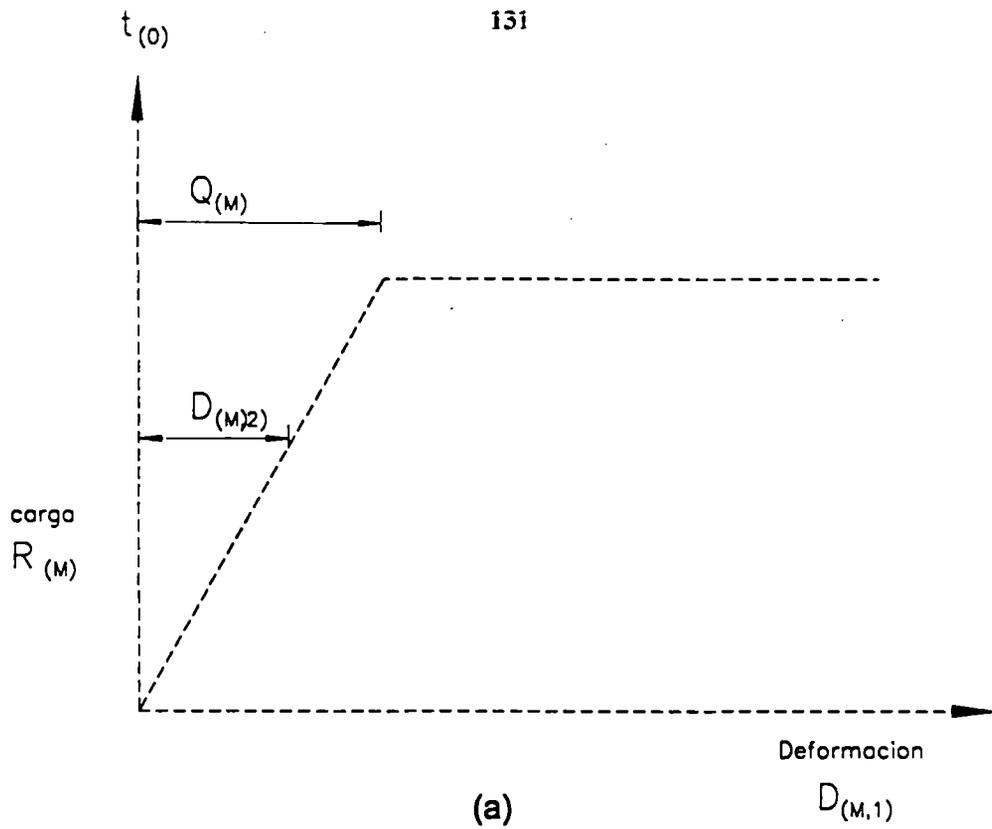


Fig. 25.1 Deformación plástica del suelo

desde que  $D_m$  puede ser también (+) o (-). Esto requiere usar una subrutina de computo [SUBROUTINE NO 1 para halla DE (M,2)] para encontrar  $D_{sm}$ . La deformación plástica del suelo.

Con la deformación plástica del suelo evaluada, la deformación elástica es la deformación total menos la deformación plástica  
o

$$D_e = D_m \text{ / } D_{sm}$$

Y la resistencia del suelo (elástica) es:

$$R_e = (D_m \text{ / } D_{sm}) K'_m \quad (c)$$

Pero teniendo presente el amortiguamiento (fig 11 5d) modificamos la ecuación. Esto es logrado por asumir que  $R_m$  es la suma de dos resistencias, elástica y amortiguamiento, el cual puede ser escrita como:

$$R_m = R_e + R_d \quad (d)$$

y asumiendo más aún que la resistencia al amortiguamiento puede ser escrita como:

$$R_d = R_e J_s V_m \quad (e)$$

Esto es función de la velocidad del elemento, la resistencia elástica y factor de amortiguamiento, combinando términos tenemos:

$$R_m = (D_m \text{ / } D_{sm}) K'_m (1 + J_s V_m) \quad (B)$$

Se debe notar que para una carga en la punta del pilote de 100% se tiene  $K'_m = 0$  y ningún amortiguamiento ocurre aún si  $J_s$  es diferente de 0.

Para la resistencia en la punta por analogía se tiene:

$$R_p = (D_p / D_{sp}) K'_p (1 + J_p \cdot V_p) \quad (8a)$$

Notar que nuevamente que la definición de  $D_{sm}$  y (y  $D_{sp}$ ) limita el desplazamiento elástico en la ecuación (8) a:

$$D_m / D_{sm} \leq DEMS$$

Para la punta del pilote (fig 25.2) es evidente que  $D_{sp}$  es un resultado permanente y ninguna inversión de signos es posible, así como fue verdad la resistencia en la cara, por tanto:

Y tiene que ser chequeado usando una subrutina de

$$D_{sp} \geq D_p - DEMS$$

Computo [SUBROUTINE NO.2 para hallar  $DE_{(LA.2)}$ . Si ploteamos desplazamiento versus tiempo, el desplazamiento  $D_{sm}$  ó  $D_{sp}$  retrasa  $D_m$  o (o  $D_p$ ) por la cantidad de DEMS.

El desarrollo idealizado de la resistencia del suelo de un pilote según las figuras 25.1 y 25.2. las partes (a), (b), (c) no incluyen amortiguamiento.

- (a)  $D_{(M.2)} < DEMS$  : Desplazamiento de elementos es menor que el DEMS.
- (b) Desplazamiento de punta es mayor que DEMS, cuando el desplazamiento de la punta  $D_{(LA.2)}$  es menor que DEMS usa la ecuación (a).
- (c) Desplazamiento general idealizado para el elemento m. Al principio del registro el tipo y desplazamientos serán 0. El desplazamiento llega a  $D_{(M.2)}$  entonces se tiene  $R_{jm} = DEMS (K'_m)$ , entonces ocurre la deformación plástica  $DE_{(M.2)}$ ; las condiciones de suelo varían de la posición B a C al final

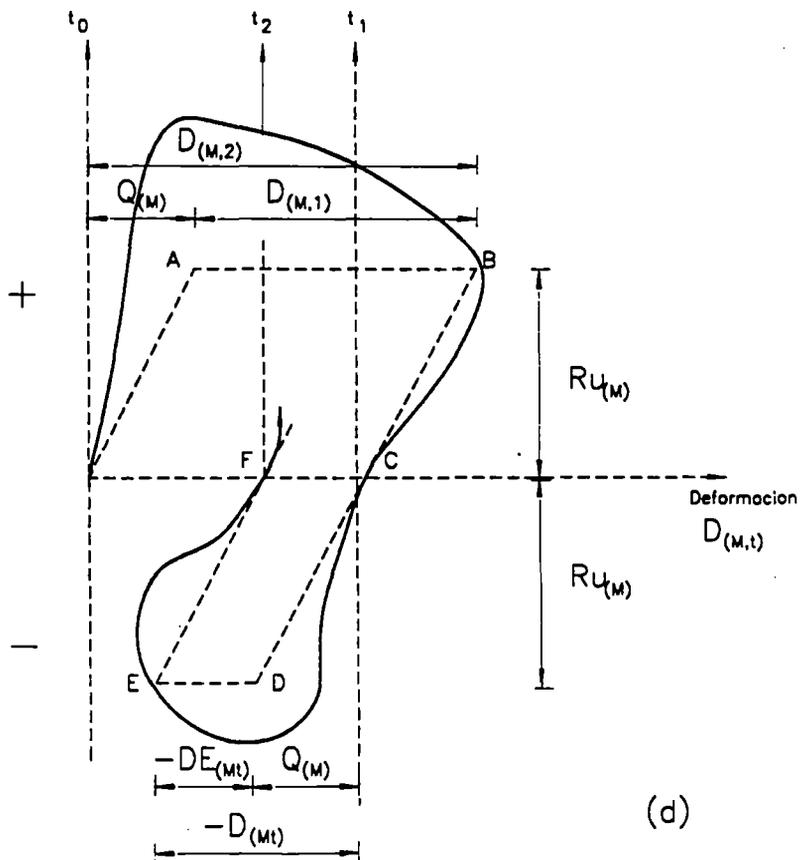
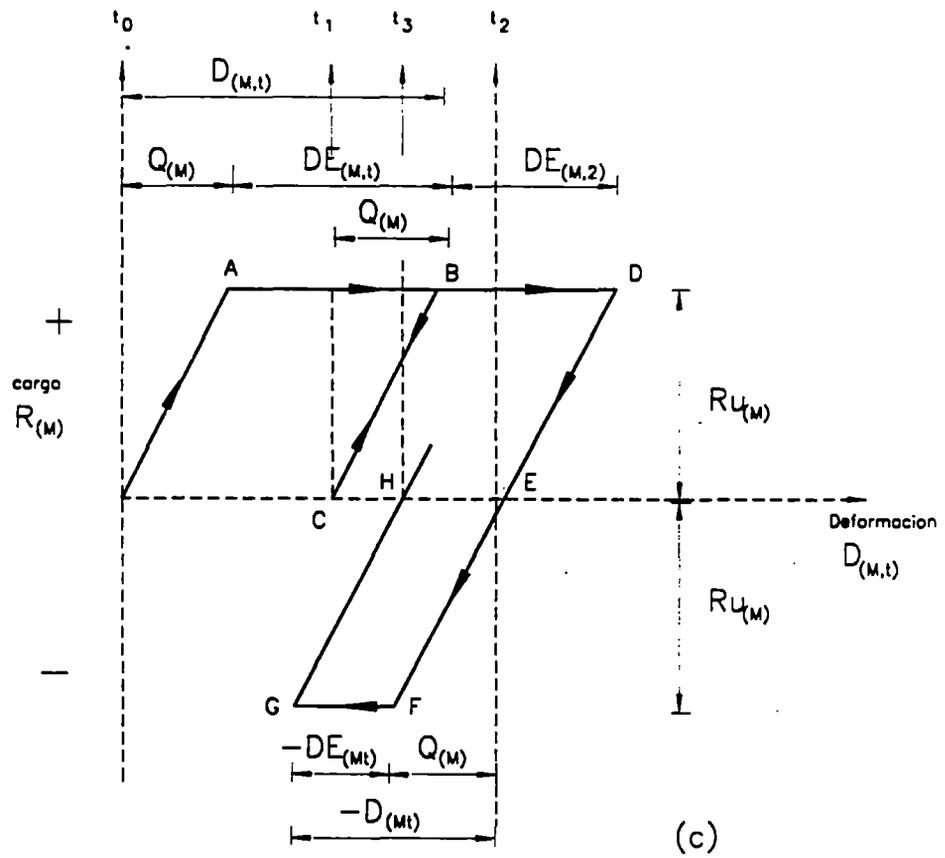


Fig. 25.2 Deformación plástica del suelo

del primer intervalo de tiempo. Para el próximo intervalo, se repite el mismo ciclo anterior en el área CBDE hasta el fin de  $DT = 2$ .

Después se muestra la variación de un desplazamiento negativo pero solo de las caras del elemento del pilote (no puede haber desplazamiento negativo para la punta), según EFGH ( $DT=3$ ). El cuarto intervalo de tiempo empieza del desplazamiento inicial H.

- (d) Se considera la situación general de (a), (b), (c) pero con el amortiguamiento incluido.

#### **V.7.- INCIDENCIA DE LOS DIVERSOS PARAMETROS EN LA DETERMINACION DE LA CAPACIDAD DINAMICA DE CARGA DE LA CIMENTACION PILOTEADA.**

Los amortiguadores del martinete y del pilote pueden considerarse como resortes que tienen un módulo igual a su rigidez como columna  $AE/L$ , donde A y L son respectivamente el área de la sección transversal y la altura del amortiguador, E es el módulo de Elasticidad estos datos son importantes para determinar el módulo del resorte.

Hay amortiguadores blandos y duros, pero sólo deberán usarse aquellos que tengan características conocidas. La falta de control en las propiedades de los materiales de amortiguación, da lugar a que se utilicen subterfugios en cierto grado, para el cálculo de  $R_u$ .

Este instrumento, el cual puede ser de madera micarta y sándwichs de placas de aluminio, u otros materiales, evita el impacto del martillo de metal sobre el cabezal, por tanto incrementa la vida del martillo. Este elemento es considerado

sin tener peso aunque ello pudiera pesar tanto como 50Kg (generalmente de 20 a 40 Kg).

Un amortiguador inferior es colocado entre el cabezal y el pilote, con el cual esta en contacto directo, es usado para reducir los esfuerzos de hincado en el pilote. Este amortiguador es de material suave tal como plancha de madera de 3 a 6 cm. de espesor, para los pilotes usados en construcción su uso es muy restringido, y no se analizará su influencia en el análisis del pilote.

Generalmente el amortiguador superior (y el inferior) descansa sobre la cabeza del pilote y unidos de tal forma que ellos solo transmiten FUERZAS COMPRESIVAS (una situación idealizada fig. 26.b).

Desde que el amortiguador superior (y el inferior) son de material diferente al martillo o el cabezal; estamos interesados con la pérdida de energía en el impacto del martillo. La energía puede ser representada en el diagrama fuerza-desplazamiento de la fig. 27, donde el área DBC es energía despedida y el área ABC es energía de entrada. De la ecuación de energía (tipo de impulso):

$$e ( M_1 . V_1 + M_2 . V_1 ) = M_1 . V_f + M_2 . V_f'$$

donde

$M_1$  = masa del martillo

$M_2$  = masa del amortiguador superior = 0

Calculo de  $K'$ :

Siendo el área:

$$DBC = \frac{1}{2} K'_{xx} = \frac{1}{2} M V_f^2 \dots\dots (1)$$

$$ABC = \frac{1}{2} K d d = \frac{1}{2} M v_1^2 \dots\dots (2)$$

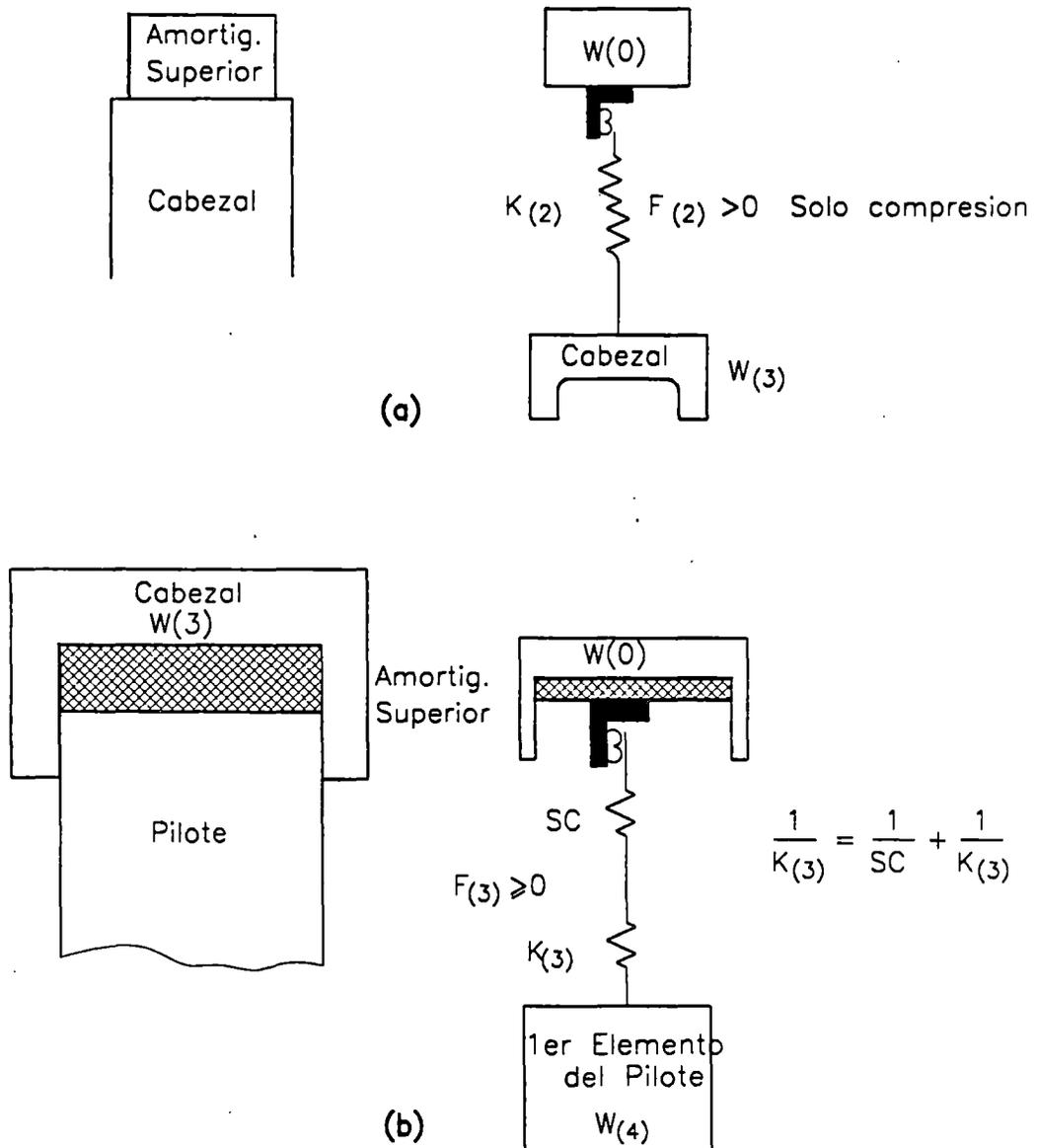


Fig. 26 Accesorios del Martillo y Pilote

- a) El sistema del cabezal y amortiguador superior transmiten sólo fuerzas de compresión
- b) El sistema amortiguador inferior y cabezal transmiten sólo fuerzas de compresión

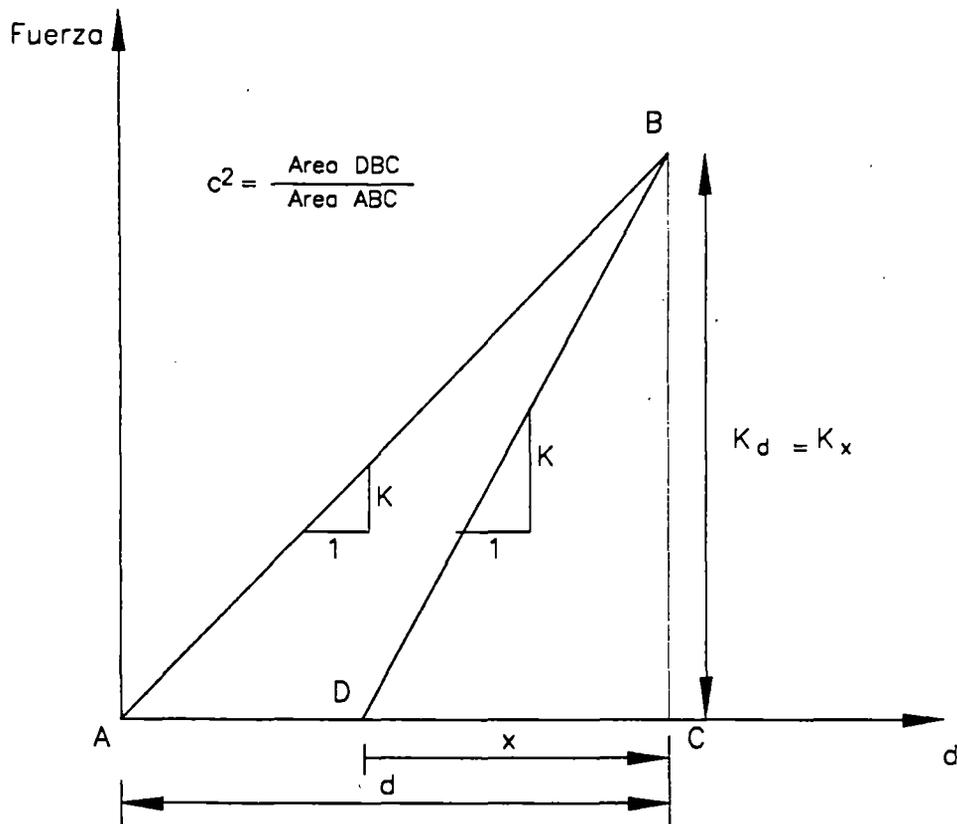


Fig. 27 .Características de Coeficiente de Restitución en el pilote y amortiguador superior o amortiguador inferior (si se usa)

(1)/(2)

$$\frac{K' x}{K d^2} = e^2$$

$$K' = Ke^2 \frac{d^2}{x^2} \quad \dots\dots (a)$$

Del gráfico:

$$Kd = K' x$$

Reemplazando en (a):

$$K' = Ke^2 \frac{(K' x)}{(K')^2}$$

$$K' = \frac{K}{e^2}$$

 $V_1, V_1 =$  velocidades iniciales. $(V_1 = 0$  para  $M_2)$  por tanto:

$$e = \frac{V_f}{V_i}$$

$$e^2 = \frac{V_f^2}{V_i^2}$$

La ecuación de la energía cinética es:

$$K_e = \frac{1}{2} Mv^2$$

Por tanto, es evidente que en la figura 27:

$$e = \frac{V_f^2}{V_i^2} = \frac{\text{área : } DBC}{\text{área : } ABC}$$

Referente a la fig. 28, el cual representa la fuerza de deformación de resorte con restitución, computamos las fuerzas de resorte del amortiguador superior como:

$$F = KC_2 \quad (f)$$

Hasta que el cambio en compresión  $(C_2 - C'_2)$  entre los dos intervalos de tiempo sea negativo.

En este tiempo un  $C_{max}$ , es introducido.

$$C_{max} = C'_2$$

Y la fuerza instantánea del amortiguador superior es computada como:

$$K C_{max} + \frac{K (C - C_{max})}{e^2} \quad (g)$$

La ecuación (9) es usada hasta que  $C_2 - C'_2 \geq 0$ , entonces la ecuación (f) es usada nuevamente, este ciclo se repite cuantas veces sea requerido.

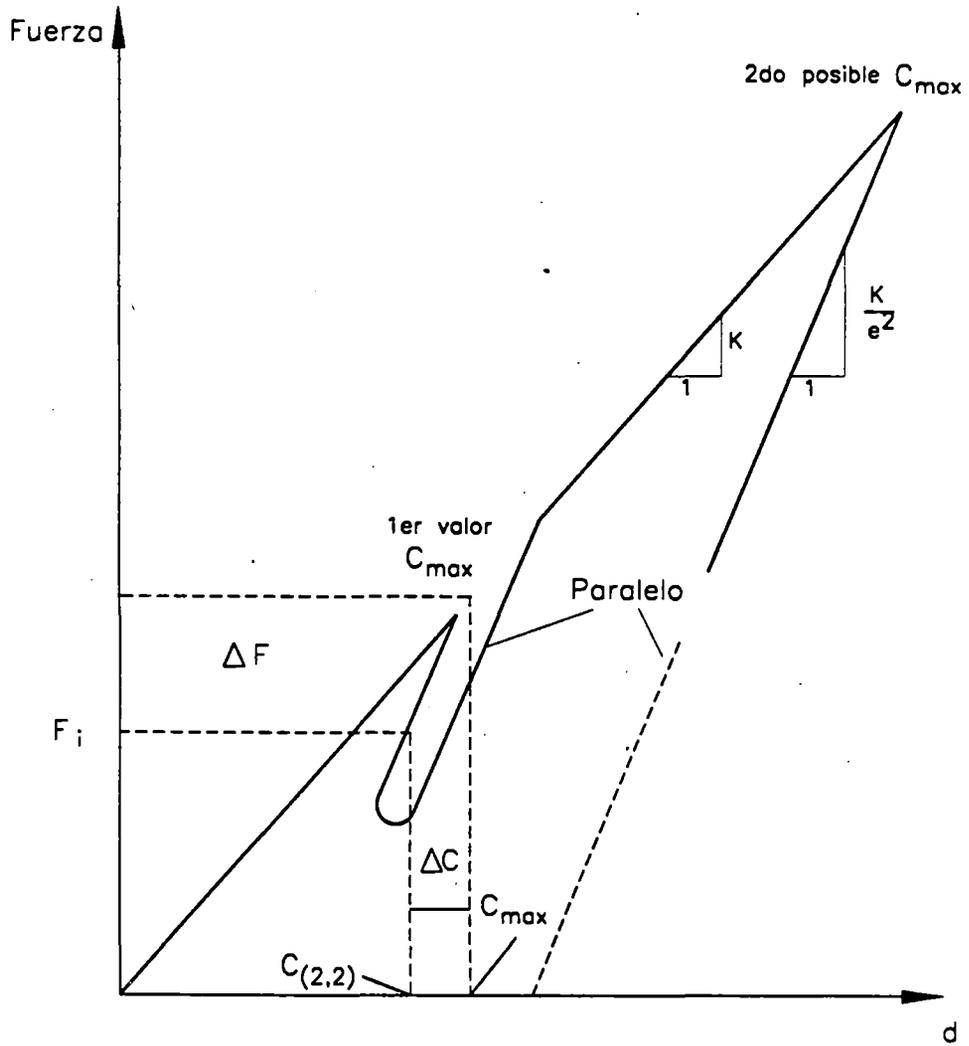
Subrutinas.

Las subrutinas son requeridas para el amortiguador superior (fuerzas y deformaciones en resorte de este amortiguador [SP(2)] y la cabeza.

Notar que cuando un amortiguador es usado, entonces el resorte SP (3) es obtenido como sigue:

$$\frac{1}{SP(3)} = \frac{1}{SC} + \frac{1}{SP(3)} \quad (g)$$

Esta ecuación es obtenida considerando que como dos resortes en serie, la fuerza es la misma en ambos resortes y que la deformación total es la suma de las deformaciones individuales.



$$F_i = K C_{\max} - \Delta F$$

$$\Delta F = K \Delta C / e^2$$

Fig. 28 Diagrama Fuerza - vs - Desplazamiento para el amortiguador superior e inferior si es usado con su respectiva restitución. El concepto es usado en la subrutina 3 y 4

Aquí  $SP(3)$  es el resorte equivalente de la combinación de efectos del resorte del amortiguador inferior SC y el resorte computado el primer segmento del pilote:

$$SP(3) = AE/\Delta L$$

Las subrutinas de computo N°3 y N°4 chequean las fuerza en los resortes 2 y 3 son siempre cero o en compresión:

$$F(2,2) \geq 0$$

$$F(3,2) \geq 0$$

Y más aún chequean cuando hay una restitución así seguimos usando la subrutina N° 3 tenemos:

- 1.- Chequear compresión real y la compresión en un intervalo de tiempo anterior como:

$$C(2,1) = C(2,1)$$

$$C(2,2) = C(2,1) \geq 0$$

y mientras se mantenga esta condición

$$F(2,2) = C(2,2)*SP(2)$$

- 2.- Si  $C(2,2) \mid C(2,1) < 0$  entonces

$$C(2,1) = CMAX \text{ y la ecuación (9).}$$

- 3.- Continuar usando la ecuación (9) con este valor de CMAX hasta que se llegue a la ecuación (a). Entonces se usa

$$F(2,2) = C(2,2)*SP(2)$$

Hasta que la diferencia de compresión del resorte sea negativa nuevamente, etc.

- 4.- Chequear que  $F(2,2) \geq 0$ . Si  $F(2,2)$  es un valor de tensión (-) se coloca cero por razones previamente establecidas.
- 5.- Repetir los pasos del 1 al 4 hasta que sea requerido.

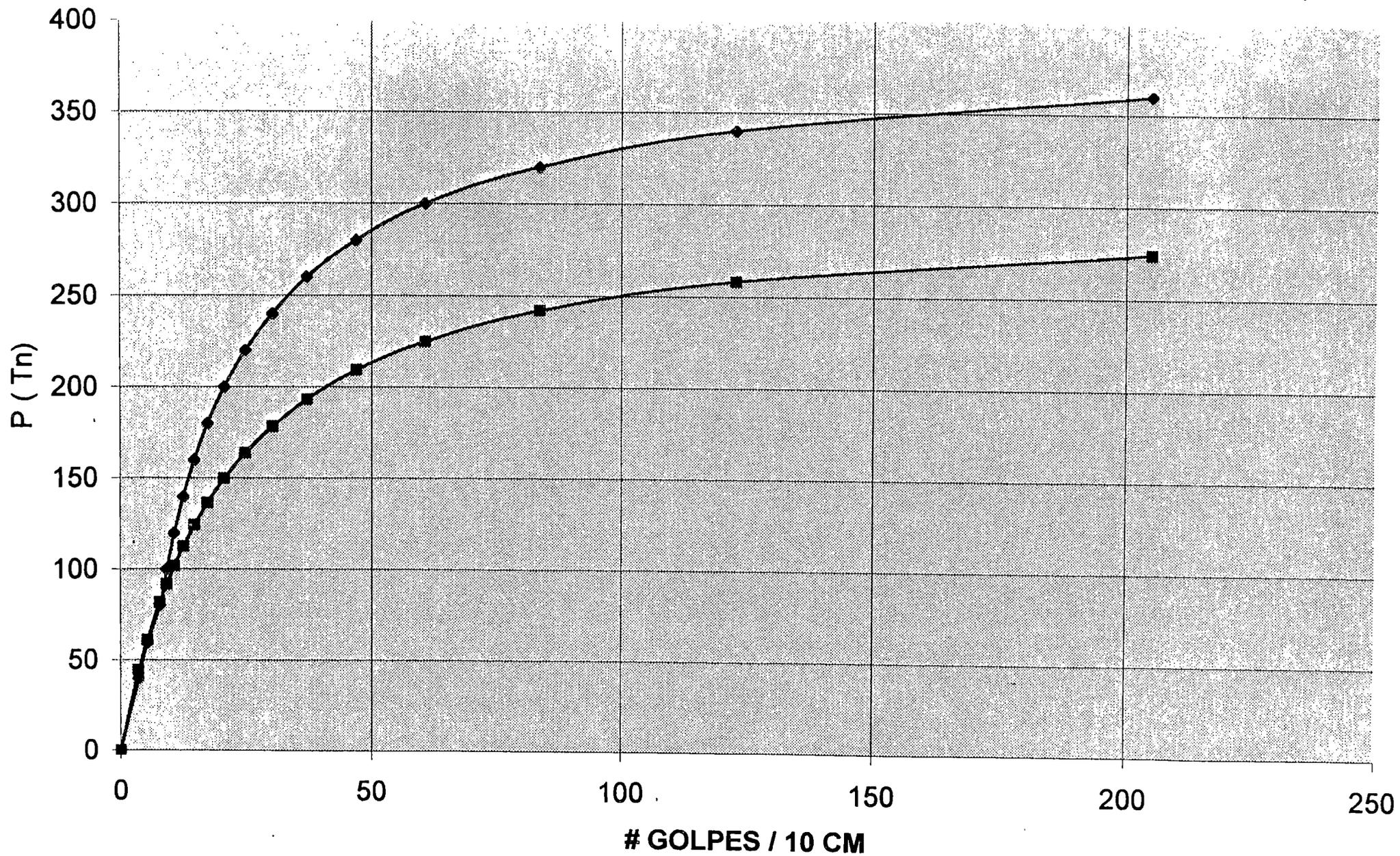
## CALCULO DE LA CAPACIDAD DINAMICA DE CARGA

### CUADRO COMPARATIVO DE LA CAPACIDAD DINAMICA DE CARGA Ecuación de Onda VS Fórmula Martillos Delmag

P (Toneladas)

# golpes/10 cm	P (Ecuacion de Onda)	P (Fórmula Delmag)
0	0	0
4	40	44
5	60	61
8	80	82
9	100	92
11	120	102
12	140	113
15	160	124
17	180	137
21	200	150
25	220	164
30	240	178
37	260	193
47	280	209
61	300	225
84	320	242
123	340	258
205	360	274

# CAPACIDAD DINAMICA DE CARGA AMPLIACION MUELLE SIDER



—●— ECUACION DE ONDA —■— FORMULA MARTINI LOS DEF MAG

CAPITULO VI  
INTERACCION DEL SISTEMA SUELO-PILOTE-  
MARTINETE:  
ANALISIS DE LA CIMENTACION PILOTEADA DEL  
MUELLE SIDER PERU EN LA CIUDAD DE CHIMBOTE

**CAPITULO VI.- ITERACCION DEL SISTEMA SUELO-PILOTE-MARTINETE; ANALISIS DE LA CIMENTACION PILOTEADA DEL MUELLE SIDER-PERU EN LA CIUDAD DE CHIMBOTE**

**VI.1.- EVALUACION DE LAS CARGAS ESTATICAS Y DINAMICAS.**

Para la evaluación de las cargas que están actuando en el muelle consideraremos como las mas importantes la que produce el impacto del barco y la fuerza sísmica, ambas para el caso de cargas laterales y para las cargas verticales calcularemos la capacidad dinámica de carga por los dos métodos : ecuación de onda y fórmula de los martillos Delmag y verificaremos su relación con la capacidad estática de carga que será determinada con las fórmulas de capacidad de carga.

**VI.1.1.- CALCULO DE LA FUERZA DE IMPACTO DE BARCO**

**VI.1.1.1.- DISEÑO ESTANDAR**

Los siguientes estándares y reportes son ampliamente tomados como diseño estándar.

- Technical Standersds for port and harbour facilities in Japan
- British Standard BS349
- EAU (German Standard)
- Diversas informaciones acerca del diseño de defensas estandadas por PIANC Report (Reporte de la Comisión Internacional para el mejoramiento del diseño de sistemas de defensas).

**VI.1.1.2.- ENERGIA DE ACODERAMIENTO**

La energía de acoderamiento se calcula por medio de la siguiente ecuación cinética:

$$E_f = \frac{W_a}{2g} V^2 \cdot C_m \cdot C_c \cdot C_s$$

Donde:

$E_f$  = Energía de Acoderamiento (tf-m)

$g$  = Aceleración de la gravedad (9.8 m/sg<sup>2</sup>)

$W_a$  = Desplazamiento de agua del barco (tn)

$V$  = Velocidad de acoderamiento en el momento del impacto a la defensa (m/sg).

$C_m$  = Factor de masa virtual (Como un barco hace contacto con la defensa y su movimiento es rápidamente detenido por las defensas la masa de agua moviéndose con el barco se añade a la energía del barco).

Es denominada "Factor de Masa" y el peso del agua es generalmente llamada "Peso Adicional".

$C_e$  = Factor de Excentricidad. (En el caso cuando un barco contacta una defensa en un punto cerca de su proa o popa, la fuerza de reacción da un movimiento rotacional, el cual disipara una parte de la energía del barco).

$C_e = K^2 / (A^2 + K^2)$

Donde :

$K$  = Radio de rotación del barco (usualmente 1/4 de la longitud del barco.

$A$  = Distancia de la línea paralela al barco medida del centro de gravedad del barco al punto de contacto (usualmente 1/4-1/5 de la longitud del barco).

$C_c$  = Factor de configuración del barco.

Esta es la porción de la energía de acoderamiento la cual es absorbida por el efecto de amortiguamiento del agua entre la aproximación del barco y el muro de muelle.

$C_s$  = Factor de suavidad.

Esta es la porción de la energía de acoderamiento la cual es absorbida por la deformación del casco del barco y defensa.

Para efectos de este cálculo utilizaremos el Japanese Standard

**- Factor de Masa**

La fórmula de Stelson era lo que se recomendaba en el pasado, la siguiente fórmula de Ueda es regularmente tomada en el diseño:

$$C_m = 1 + \frac{\pi \cdot d}{2 \cdot C_b \cdot B} \cdot \frac{d}{B}$$

Donde:

- $W_a$  = Desplazamiento del barco
- $C_b$  = Coeficiente de bloque =  $[ W_a / (L \cdot B \cdot d \cdot w_o) ]$
- $d$  = Profundidad (mt)
- $B$  = Manga o ancho
- $L$  = Longitud del barco
- $w_o$  = Peso específico del agua (tf/m<sup>3</sup>)

**- Factor de Excentricidad (\*1)**

Se toma usualmente entre 0.25L-0.2L para una pared de muelle continua. En el caso de un dolphin, la distancia entre dos dolphins principales se toma como A. K es usualmente tomada como 0.25L y K se toma entre (0.3-0.35)L para el dolphin.

Entonces  $C_e$  esta usualmente entre 0.5-0.61 y aproximadamente 0.7 para dolphin.

**- Factor de configuración de acoderamiento**

Se recomienda usualmente tomar 1.0

**- Factor de Suavidad**

Se recomienda usualmente tomar 1.0

**- Velocidad de Acoderamiento**

La velocidad de acoderamiento deberá ser determinada con la consideración de la clase de barco, condición de carga, condiciones climáticas, dirección y resistencia de la corriente viento, utilización de remolcador, etc.

Para grandes barcos la velocidad de acoderamiento es de 10-15 cm/sg .

#### **VI.1.1.3.- CÁLCULO DE LA ENERGIA DE ACODERAMIENTO Y FUERZA DE IMPACTO DE BUQUE DE ACUERDO A LA DEFENSA DISEÑADA.**

Se diseñara una defensa para el Muelle SiderPeru y se calculara la fuerza de impacto lateral que se produce para compararla con la fuerza sísmica.

#### **CONDICIONES DE DISEÑO**

Clase de Barco	=	Ore Carrier
Tonelaje (Dead Weight)	=	43,000 DWT
Desplazamiento(Tonelaje W)	=	52,900 DT
Longitud (Eslora L)	=	225.00 mt
Ancho (Manga B)	=	33.00 mt
Profundiad	=	8.00 mt
Profundidad Cargado (d)	=	11.50 mt
Velocidad de Acoderamiento	=	0.10 mt/sg (V)

#### **CONDICIONES DE ACODERAMIENTO**

Se considera 1/4 la distancia del punto de contacto a el centro de gravedad del barco.

La energía de acoderamiento deberá ser absorbida por dos unidades de defensas.

#### **CÁLCULO PARA LA ENERGIA DE ACODERAMIENTO : PIANC, JAPANESE ESTÁNDAR.**

Calculo del Factor de masa : Primero calcularemos el Coeficiente de Bloque Cb:

$$C_b = W / (L.B.d.w_0)$$

Ahora calculamos el Factor de masa (  $C_m$  ) :

$$C_m = 1 + (\pi/2C_b).(d/B)$$

Calculamos el Factor de excentricidad (  $C_e$  ) :

$$C_e = K^2 / (A^2 + K^2)$$

$K$  = Radio de Rotación del barco (0.25L)

$A$  = Distancia del punto de contacto del centro de gravedad del barco.

$$A = 0.25 L = 1/4$$

$$C_e = 0.5$$

Energía de acoderamiento (  $E$  ) :

$$E = \frac{W_a}{2g} V^2 . C_m . C_c . C_s$$

Reemplazamos los valores encontrados :

$$C_b = \text{Coeficiente de Bloque} = 0.60$$

$$C_m = \text{Factor de Masa} = 1.91$$

$$C_e = \text{Factor de excentricidad} = 0.5$$

$$C_s = \text{Factor de Suavidad} = 1.0$$

$$C_c = \text{Factor de Configuración} = 1.0$$

Reemplazando :

$$E = \frac{52.900 \times 0.10^2}{2 \times 9.8} \times 0.5 \times 1.91 \times 1.0 \times 1.0$$

$$E = 25.80 \text{ Tn-mt}$$

### SELECCIÓN DE LA DEFENSA

Como se va a trabajar con defensas SUMITOMO la performance de la defensa la cual esta medida conforme los ensayos requeridos por PIANC (1984).

Se diseñará conforme a la Energía Absorbida por la defensa :  
25.8 Tn-mt.

Tomaremos 02 unidades de la defensa tipo LMD-600mmHx1500mmL  
(CL2) KT la cual tiene las siguientes características :

Energía Absorbida por la Defensa = 14.2 ton-m x 2 ud = 28.4 t-m

Energía Absorbida=28.4 Tn-mt > Energía Acoderamiento = 25.8 t-m

La Fuerza absorbida por la defensa será extraída del gráfico del fabricante.

Fuerza absorbida = 58.30 Tn = 571.34 KN

Presión en el Casco = 96.20 Tn/m<sup>2</sup> < 100.0 Tn/m<sup>2</sup>

Para la presión en el casco consideramos una tolerancia de 10%.

Para efectos del calculo de la fuerza lateral que ingresa a la estructura tomamos como tal la Fuerza Absorbida = 571.34 KN.

#### VI.1.2.- CALCULO DE FUERZA DE SISMO

Para ello utilizaremos un programa de Análisis Estructural Tridimensional el cual nos proporcionara la fuerza que produce la fuerza sísmica y nos determinara cual es el pilote que mas carga lleva.

Determinaremos la longitud efectiva: es la longitud a partir de la cual asumimos que el pilote esta perfectamente empotrado en el suelo, es decir una porción de altura es despreciada y a partir de allí se considera al pilote como empotramiento perfecto.

#### CALCULO DE LA LONGITUD EFECTIVA DEL PILOTE

$l$  = Longitud Efectiva

$l_a$  = Longitud sobre el fondo = 13 mt

$l_s$  = Longitud desde el fondo al punto de empotramiento

$l = l_a + l_s$

Según ACI comité 343

$$L_s = 1.8 \times T$$

Donde :

$$T = \text{Valor de dimensión} = (E I / N)^{1/5}$$

$$E = \text{Módulo de elasticidad del concreto} = 3 \times 10^6 \text{ lb/pulg}^2$$

$$I = \text{Momento de inercia} = (40\text{cm})^4 / 12 = 5125 \text{ pulg}^4$$

$$N_s = \text{Módulo de Balastro o Módulo de Reacción de la subrasante del suelo} = 30 \text{ lb/pulg}^2$$

Reemplazando términos calculamos T:

$$T = 55.20 \text{ pulg} = 1.40 \text{ m.}$$

$$\text{Tenemos : } L_s = 1.80 \times 1.40 = 2.50 \text{ m.}$$

Longitud efectiva será:

$$L = l_a + l_s = 15.50 \text{ m.}$$

#### EVALUACION DE LA FUERZA SISMICA

Cálculo de las constantes de rigidez para ingresar al programa :

$$C1 = 12 \times E \times I / L^3$$

$$C2 = 6 \times E \times I / L$$

$$C3 = A \times E / L$$

$$\text{FUERZA SISMICA} \quad H = \frac{Z.U.S.C}{R_d} P$$

Donde :

$$Z = \text{Factor de Zona} = 1.0$$

$$U = \text{Factor de Uso} = 1.3$$

$$S = \text{Factor de Suelo: } T = 0.90, S = 1.40$$

$$C = \text{Coeficiente Sísmico} = 0.30$$

$$R_d = \text{Reducción por ductilidad} = 5.0$$

$$H = \frac{1 \times 1.30 \times 1.40 \times 0.30}{5} \times P$$

$$H = 0.11 P$$

$$P = D + 0.50 L$$

Donde :

$$D = \text{Peso propio}$$

$$L = \text{Sobrecarga} : 1 \text{ Tn/m}^2$$

Cálculo del peso propio :

Se calculara la fuerza sísmica en cada pilote en el eje mas desfavorable es decir aquel donde hayan 12 pilotes.

PESO PROPIO : PESO MUERTO ( D ) :

$$\text{- PESO DE LA ESTRUCTURA} = 8,251.00 \text{ Tn}$$

$$\text{- PESO DE } \frac{1}{2} \text{ DE LOS PILOTES} = 1,137.00 \text{ Tn}$$

$$\text{PESO PROPIO TOTAL ( D )} = 9,388.00 \text{ Tn}$$

SOBRECARGA ( L ) : 1.00 Tn/m<sup>2</sup>

CARGA VIVA (L) :

$$L = 1 \text{ Tn/m}^2 \times 25.60 \text{ mt} \times 180.40 \text{ mt} = 4618.00 \text{ Tn}$$

Peso de la estructura para el cálculo de la Carga Sísmica : (P)

$$P = 9,388.00 + 50 \% ( 4,618.00 ) = 11,697.00 \text{ Tn}$$

CARGA SISMICA : ( H )

$$H = 0.11 P = 0.11 \times 11,697.00 = 1,286.67 \text{ Tn}$$

Carga sísmica para el análisis estructural tridimensional :

$$H = ( 25.60 / 180.40 ) \times 1286.67 = 182.58 \text{ Tn}$$

$$H = 1,789 \text{ KN}$$

Como la carga sísmica (H) es mayor que la carga de impacto de acoderamiento de buque  $\rightarrow H = 1,789.00 \text{ KN} > P_{\text{impacto}} = 571.34 \text{ KN}$ ,

tomaremos para el análisis de carga lateral la carga de sismo (H).

## VI.2.- ANALISIS ESTATICO : CAPACIDAD POR PUNTA Y FRICCION

Calcularemos la capacidad estática de carga por punta y por fricción conforme lo estudiado en el Capítulo II y III.

### VI.2.1.- CAPACIDAD ESTATICA DE CARGA

Tomaremos en consideración para la capacidad estática de carga las consideraciones siguientes :

$$P_{\text{estatico}} = P_{\text{fricción}} + P_{\text{punta}}$$

$$P = P_f + P_p.$$

#### VI.2.1.1.- CAPACIDAD DE CARGA POR PUNTA

Se evaluarán los distintos métodos analizados en el capítulo II de la presente tesis, se determinara un resumen final y se tomará un valor para la Capacidad de Carga por Punta.

##### 1.- METODO DE MEYERHOF

Basado en numerosas pruebas de carga este método evalúa la capacidad estática de carga de la siguiente forma :

$$P_p = A_p \times ( c.N_c + \eta.q.N'_q + \frac{1}{2} \times \delta.B.N'_\delta.S\delta )$$

Simplificando y despreciando términos pequeños :

$$P_p = A_p \times ( \eta.q.N'_q )$$

$$\eta = ( 1 + 2 K_c ) / 3 \quad , \quad K_c = 1 + \text{Sen } \phi$$

$$\phi = 37^\circ \quad \rightarrow \quad \eta = 0.618$$

$$q = \delta_{\text{sum}} \times D_f$$

$$\delta_{\text{sum}} = ( 1850 - 1000 ) \text{ kg/m}^3$$

$$D_f = 4.40 \text{ mt}$$

$$L/B = 440/40 = 11 \quad \rightarrow \quad \phi = 37^\circ \quad : \quad N'_q = 200.00$$

$$P_p = ( 0.40 )^2 \times ( 0.618 \times 850 \times 4.40 \times 200 )$$

$$P_p = 74.00 \text{ Tn}$$

**2.- METODO DE VESIC**

$$P_p = A_p \times (\eta \cdot q \cdot N'_q)$$

$$N'_q \rightarrow \text{Por Vesic} : N'_q = f(I_{rr})$$

$I_{rr}$  = Índice de reducción de rigidez

$$I_{rr} = 200 \quad y \quad \phi = 35^\circ \rightarrow N'_q = 155.00 \quad (\text{grava arenosa})$$

$$P_p = (0.40)^2 \times (0.618 \times 850 \times 4.40 \times 155.00)$$

$$P_p = 57.32 \quad \text{Tn}$$

**3.- METODO DE BOWLES**

$$P_p = A_p \times (\delta \cdot D_f \cdot d_q \cdot N'_q)$$

$$L/B = 4.40/0.40 = 11.0 > 1.0 \rightarrow \text{Calculamos } d_q :$$

$$D_q = 1 + 2 \operatorname{tg} \phi (1 + \operatorname{sen} \phi) \cdot \operatorname{tg}^{-1} (L/B)$$

$$= 37^\circ$$

$$L = 4.40 \quad \text{mt}$$

$$B = 0.40 \quad \text{mt}$$

$$\text{Por lo tanto} : d_q = 1.381$$

$$N_q \rightarrow \text{Según Bowles} \quad N'_q = 48.90$$

$$P_p = (0.40)^2 \times (850 \times 4.40 \times 1.381) \cdot 48.90$$

$$P_p = 40.00 \quad \text{Tn}$$

**4.- METODO DE JAMBU**

$$P_p = A_p \times (q \cdot N'_q)$$

$$N_q \rightarrow \text{Según Jambu} \quad \phi = 37^\circ \quad y \quad \phi = 90^\circ \rightarrow N_q = 48.75$$

$$P_p = (0.40)^2 \times (850 \times 4.40 \times 48.75)$$

$$P_p = 29.17 \quad \text{Tn}$$

## 5.- METODO DE TERZAGHI

$$P_p = A_p \times ( c \cdot N_c + q \cdot N'_q + \frac{1}{2} \times \delta \cdot B \cdot N'_\delta )$$

Reduciendo :

$$P_p = A_p \times ( q \cdot N'_q ) \text{ Según Terzaghi, para } \phi = 25^\circ , N_q = 61.35$$

$$P_p = ( 0.40 )^2 \times ( 850 \times 4.40 \times 61.35 ) \quad P_p = 36.71 \text{ Tn}$$

## 6.- RESUMEN GENERAL PARA EL CALCULO DE LA CAPACIDAD ESTÁTICA DE CARGA

Mayerhof	: $P_p = 74.00 \text{ Tn}$	Vesic	: $P_p = 57.32 \text{ Tn}$
Bowles	: $P_p = 40.00 \text{ Tn}$	Jambu	: $P_p = 29.17 \text{ Tn}$
Terzaghi	: $P_p = 36.71 \text{ Tn}$		

Tomamos como capacidad estática de carga:  $P_{\text{estático}} = 57.00 \text{ Tn}$

Esto porque los métodos de Vesic, Meyerhof y Bowles están basados en pruebas de carga (tomamos un promedio de los valores descartando aquellos que aparentemente están fuera de contexto)

## VI.2.1.2.-CALCULO DE LA CAPACIDAD DE CARGA POR FRICCIÓN

$$P_f = \text{Area Lateral} \times f_s$$

$f_s$  = Resistencia por fricción en las caras laterales

Siendo el ángulo de fricción  $\phi = 37^\circ$  (arena) se ha considerado un valor de  $f_s$  correspondiente a la resistencia a la fricción lateral según el método  $\lambda$  ó método de Vijayvergiya y Focht (1972)

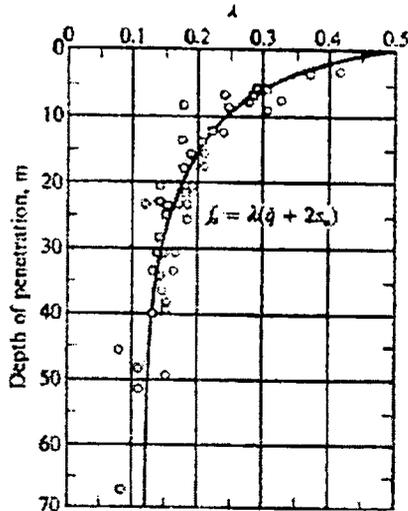
La resistencia en las caras laterales ( $f_s$ ) del pilote es igual a la siguiente relación:  $f_s = \lambda (q + 2Su)$

Donde:

$q$  = Esfuerzo efectivo vertical en elemento  $L$

$S_u$  = Cohesión promedio (  $c$  ) para el estrato de suelo en estudio

$\lambda$  = Coeficiente el cual puede ser obtenido de la figura



Para nuestro caso, considerando una profundidad promedio de 2.2 m tendremos:

$S_u$  = 3.1 tn/m<sup>2</sup> (consideramos un valor muy bajo para la cohesión)

$q$  = 2.2 x 0.850 Tn/m<sup>3</sup> = 1.87 tn/m<sup>2</sup>

$\lambda$  = 0.40 (tomado del gráfico)

$F_s$  = 0.40 ( 2.2 + 3.1 ) = 2.12 tn/m<sup>2</sup>

$P_f$  = 4.4 m x 0.40 m x 4 caras x 2.12 tn/m<sup>2</sup> = 15 tn

#### VI.2.1.3.- CAPACIDAD DE CARGA ESTÁTICA TOTAL

$P = P_p + P_f$                        $P = 57.00 \text{ Tn} + 15.00 \text{ Tn} = 72.00 \text{ Tn}$

$P = 72.00 \text{ Tn}$

#### VI.3 ANALISIS DINAMICO: FORMULAS DINAMICAS CLASICAS Y

ANALISIS POR MEDIO DE LA ECUACION DE ONDA

Para el análisis en estado dinámico consideraremos dos alternativas:

Fórmulas de los Martillos Delmag y Análisis por medio de una onda de esfuerzos inducidos

### VI.3.1 Fórmula de los Martillos Delmag

Se aplicará la fórmula proporcionada por el fabricante de los martillos Delmag

$$W = \frac{E \times R}{s + cL} (R + P)$$

W = capacidad dinámica de carga (Tn)

R = Peso del pistón = 2.2 Tn

P = Peso del pilote = 6.144 Tn

L = Longitud del pilote = 16.00 m

C = Factor de material = 0.30

E = Energía del martillo = 5.5 Tn-m

S = Rechazo

Para cada valor de W obtenemos un "s" respectivo el cual lo vamos ploteando en una gráfica (pag 144). Encontramos que de acuerdo a esta fórmula la curva va haciéndose asintótica a partir de los 75 golpes/10 cm para un valor de capacidad dinámica de carga de 240 Tn. En la misma gráfica posteriormente se ploteará los resultados del análisis por medio de la ecuación de onda a fin de comparar ambos resultados

### VI.3.2.- Análisis por medio de una onda de esfuerzos inducidos.

Se estudiará el viaje de una onda de esfuerzos inducidos a través de toda la longitud del pilote, para ello se utilizara un programa de computo para el análisis.

Se adjunta el listado respectivo y en la misma gráfica que muestra los valores de W vs S de acuerdo a la fórmula Delmag, ploteamos los resultados encontrados por el análisis de la ecuación de onda.

Encontramos que la curva va haciendose asintotá para un rechazo de 75 golpes/ 10cm obteniendo una capacidad dinámica de carga de 320.00 Tn.

### VI.4.- INFLUENCIA DE LA CAPACIDAD DE CARGA POR GRUPO DE PILOTES.

Los pilotes tienen un espaciamento de 3.50 mt como mínimo, por lo que la relación espaciamento/diámetro sería la siguiente:

$$\text{Espaciamento}/(\text{diámetro o lado}) = 3.50/0.40 = 8.75$$
 , como 8.75 es mayor que  $8B = 8(0.40\text{mt}) = 3.2$  mt tenemos que la capacidad de todo el grupo no se ve afectada por factores de reduccion ya que la distancia entre pilotes es lo suficientemente mayor como para que los bulbos de presiones no se superpongan.

$$P_{\text{grupo}} = \sum P_{\text{pilote individual}}$$

$$P_{\text{grupo}} = N \times P_{\text{pilote individual}}$$

## VI.5.- INTERACCION ENTRE LA CAPACIDAD ESTATICA Y DINAMICA DE CARGA : INTERPRETACION DE RESULTADOS OBTENIDOS.

### VI.5.1.- DISEÑO DE PILOTES DE CONCRETO ARMADO

#### VI.5.1.1.- CALCULO DEL $P_{UTIL}$ : DISEÑO :

Para la cuantía asumida :  $A_s = 4\phi 1" + 4\phi 3/4" = 31.68 \text{ cm}^2$

$$P_{nominal} = 0.85 f'_c ( A_g / A_s ) + A_s \cdot f_y$$

$$P_{no} = 0.85 \times 350 \times ( 40 \times 40 / 31.68 ) + 31.68 \times 4200$$

$$P_{no} = 599.00 \text{ Tn}$$

Carga de Diseño :  $P_{util} ( P_{uo} )$

$$P_{uo} = \phi P_{no}$$

$$P_{uo} = 0.70 \times 599.00$$

$$P_{uo} = 419.30 \text{ Tn}$$

Tendrá que efectuarse la reducción por esbeltez : R

$$\text{Longitud Efectiva ( ver 2.7 )} = 15.50 \text{ mt}$$

Reducción por esbeltez ( R ) :

$$R = 1.23 - 0.008 K_1 / r < 1.00$$

$$R = [ ( 40^4 / 12 ) / 40^2 ] ^*$$

$$R = 11.55 \text{ cm}$$

$$R = 1.23 - 0.008 \times 0.80 \times 1550 / 11.55$$

$$R = 0.37$$

$$P_{admissible} = 0.37 P_{uo}$$

$$P_{admissible} = 0.37 \times 419.30 = 155.14 \text{ Tn}$$

$$P_{admissible} = 155.14 \text{ Tn}$$

#### VI.5.1.2.- VERIFICACION DEL IZAJE

Consideramos que el pilote va a ser izado por 2 puntos de acuerdo al diagrama de momentos flectores tenemos que la

ubicación de los puntos de izaje estan a 1/5 de la longitud del pilote y el Momento máximo sera igual a :

$$M_{\max} = 0.0212 w \cdot L^2$$

Donde :

$$W_D = 0.40 \times 0.40 \times 2.40 \text{ Tn/m}^3 = 0.384 \text{ Tn/mt}$$

$$L = 15.50 \text{ mt}$$

Amplificando según el RNC

$$W_u = 1.50 W_D$$

$$W_u = 1.5 \times 0.384 = 0.576 \text{ Tn/mt}$$

Cálculo del momento máximo :

$$M_{\max} = 0.0212 \times 0.576 \times 15.50^2$$

$$M_{\max} = 2.94 \text{ Tn-mt}$$

Este momento será mayor debido a los movimientos de aleteo y transporte por la grúa , por ello consideramos que los momentos deben amplificarse de la siguiente forma :

100 % en el voladizo

50 % en el centro de la luz

De lo anteriormente expuesto tenemos :

$$W_D = 0.576 \text{ Tn/mt}$$

$$R = ( 3.20 \times 2 \times W_D \times 2 + 9.08 \times 1.5 \times W_D ) / 2$$

$$R = 5.07 \text{ Tn}$$

Momento Máximo :

$$M = 2 \times W_D \times 3.20 \times 3.20 / 2 = 3.93 \text{ Tn-mt}$$

Cálculo del acero para el momento mas desfavorable :

$$A_s = M / ( f_s \cdot j \cdot d ) = 393000 \text{ kg/cm} / ( 2100 \times 0.868 \times 34 )$$

$$A_s = 6.34 \text{ cm}^2$$

Como en la zona de flexión tenemos  $A_s = 31.68 \text{ cm}^2 > 6.34 \text{ cm}^2$  el área de acero es correcta.

**VI.5.1.3.- DISEÑO POR CORTANTE**

$$V_{\max} = R = 5.07 \text{ Tn}$$

$$v_u = 5070 \text{ kg} / ( 40 \times 33 \text{ cm}^2 ) = 3.84 \text{ kg/cm}^2$$

$$v_c = 0.85 \times 0.53 \times (350)^* = 8.43 \text{ kg/cm}^2$$

Como  $v_c > v_u \rightarrow$  solo necesito estribo mínimo :

Utilizaremos estribos de 3/8" @ 20 cm reforzando en la punta y la cabeza con un espaciamiento @ 10 cm en una longitud igual a  $2d = 66 \text{ cm}$ .

**VI.1.5.4.- DISEÑO DEL GANCHO DE IZAJE**

Se diseña con la finalidad de poder resistir la fuerza de tracción al momento de levantar el pilote.

Análisis del gancho de izaje :

$$A_s = R / ( 0.40 \times F_y ) = 5070 \text{ kg} / ( 0.40 \times 4200 \text{ kg/cm}^2 )$$

$$A_s = 3.01 \text{ cm}^2$$

Entonces utilizaremos 1  $\phi$  1" :

Longitud del gancho :

$$L_g = F / ( \pi \cdot D \cdot \sum u ) \rightarrow$$

$$u = 3.2 \times ( f'c )^* / D$$

$$u = 23.57 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sum u = 23.57 \times 1 = 23.57 \text{ kg/cm}^2$$

$$F = R / \text{Sen } 60^\circ = 5070 / \text{Sen } 60^\circ = 5854 \text{ kg}$$

$$L_g = 5854 \text{ kg} / ( \pi \times 2.54 \times 23.75 ) = 30.89 \text{ cm}$$

$$L_{\text{disponible}} = ( 10 \text{ cm} + 35 \text{ cm} ) \times 2 = 90 \text{ cm}$$

$$L_{\text{disponible}} > L_{\text{gancho diseño}} \rightarrow \text{OK}$$

## VI.5.2.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### VI.5.2.1.- SOLICITACIONES AXIALES MAXIMAS

#### VI.5.2.1.1.- FUERZA SISMICA

La fuerza sísmica es menor que la carga de impacto de barco por lo que se verificara para esta última.

#### VI.5.2.1.2.- IMPACTO DE BARCO

Se ha considerado que el impacto lo realiza una embarcación de 43,000 Tn y para este impacto se ha efectuado una corrida en nuestro programa de Análisis Estructural Tridimensional, el cual muestra que en el pilote N° 39 una fuerza máxima de compresión igual a  $940.10 \text{ Kn} = 95.93 \text{ Tn}$ , tenemos que :

$$P_{uo} = 419.30 \text{ Tn} > P_{\text{máximo impacto buque}} = 95.93 \text{ Tn} \quad \text{OK}$$

Por lo tanto es suficiente el diseño del pilote.

#### VI.5.2.1.3.- IMPACTO POR CLAVADO DE MARTILLO DELMAG D-22

Hemos efectuado una corrida en nuestro programa de análisis dinámico por medio de una ecuación de onda de esfuerzos inducidos y para la carga de diseño de  $P_{\text{dinámico}} = 280 \text{ Tn}$ , hemos encontrado una fuerza máxima de compresión de :

$$P_{\text{máximo impacto clavado}} = 354.00 \text{ Tn}, \text{ tenemos :}$$

$$P_{uo} = 419.30 > P_{\text{máximo impacto clavado}} = 354.00 \text{ Tn} \quad \text{OK}$$

Por lo tanto es suficiente el diseño del pilote.

### VI.5.2.2.- SOLICITACIONES LATERALES MAXIMAS

#### VI.5.2.2.1.- IMPACTO DE BUQUE

Cuando el buque impacta en la defensa se produce una sollicitación horizontal en la estructura, esta se repartirá a todos los pilotes produciendo fuerzas axiales, fuerzas cortantes y desplazamientos horizontales en los mismos, los cuales deberán estar en el rango de lo tolerable.

Para poder evaluar estas cantidades, hemos utilizado el

programa de Análisis de carga lateral por medio de elementos finitos habiendo encontrado los momentos a lo largo del pilote, el diagrama de esfuerzo cortante y los desplazamientos laterales.

Verificando del punto VI.5.1.3 (Diseño por cortante) tenemos de los resultados del programa de análisis de carga lateral por elementos finitos:

$$\text{Corte Máximo } ( V_{\max} ) = 6.73 \text{ Kn} = 0.69 \text{ Tn}$$

$$v_u = 690 \text{ kg} / ( 40 \times 34 \text{ cm}^2 ) = 0.51 \text{ kg/cm}^2$$

Observamos que es incluso mucho menor que el esfuerzo por corte que produce el izaje →

$$v_c = 8.43 \text{ kg/cm}^2 > v_u = 0.51 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{OK}$$

Para la máxima flexión que produce el impacto de buque tenemos:

$$\text{Momento Máximo } ( M_{\max} ) = 28.71 \text{ Kn-mt} = 2.93 \text{ Tn-mt}$$

$$A_s \text{ requerido} = M / (f_s \cdot j \cdot d) = 293,000 / (2100 \times 0.868 \times 34)$$

$$A_s \text{ requerido} = 4.73 \text{ cm}^2$$

Observamos que el  $A_s \text{ diseño} = 31.68 \text{ cm}^2 > A_s \text{ requerido} = 4.73 \text{ cm}^2$

Por lo que el diseño es conforme.

Para el desplazamiento máximo hemos obtenido :

$$\text{Desplazamiento Máximo} = 1.48 \text{ cm}$$

Este valor esta dentro del rango admisible, por lo que el diseño es conforme.



D =	1.33129	1.43952	1.54345	1.64150	1.73150	1.81117	1.87875	1.93369	1.97662	2.00889	2.03160
F =	96.104	94.443	92.126	88.943	84.603	79.020	72.497	65.665	59.183	53.428	48.370
ELEM NO	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
DT =	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
DESP =	1.72616	1.73248	1.73164	1.72548	1.71690	1.70933	1.70581	1.70838	1.71790	1.73449	1.75799
D =	2.04616	2.05248	2.05164	2.04548	2.03690	2.02933	2.02581	2.02838	2.03790	2.05449	2.07799
F =	43.752	39.414	35.546	32.674	51.303	80.851	104.551	123.093	138.008	149.954	158.084
ELEM NO	11	11	11	11	8	8	8	8	8	8	8
DT =	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
DESP =	1.78831	1.82525	1.86820	1.91598	1.96701	2.01982	2.07363	2.12847	2.18497	2.24373	2.30468
D =	2.10831	2.14525	2.18820	2.23598	2.28701	2.33982	2.39363	2.44847	2.50497	2.56373	2.62468
F =	163.596	176.854	183.358	177.955	159.745	132.932	113.282	94.284	82.780	83.460	76.797
ELEM NO	7	7	7	7	7	7	8	8	10	10	10
DT =	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77
DESP =	2.36673	2.42787	2.48567	2.53790	2.58301	2.62026	2.64956	2.67105	2.68476	2.69052	2.68822
D =	2.68673	2.74787	2.80567	2.85790	2.90301	2.94026	2.96956	2.99105	3.00476	3.01052	3.00821
F =	69.504	69.015	67.214	64.205	60.356	56.115	51.823	47.606	43.402	39.110	34.756
ELEM NO	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
DT =	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88
DESP =	2.67818	2.66148	2.63989	2.61553	2.59038	2.56594	2.54327	2.52323	2.50686	2.49538	2.48996
D =	2.99818	2.98148	2.95989	2.93553	2.91038	2.88594	2.86327	2.84323	2.82686	2.81538	2.80996
F =	30.581	26.982	24.341	22.845	32.168	54.493	76.119	93.397	105.666	112.925	115.933
ELEM NO	11	11	11	11	7	8	8	8	8	8	7
DT =	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
DESP =	2.49118	2.49876	2.51151	2.52774	2.54591	2.56505	2.58489	2.60564	2.62751	2.65042	2.67385
D =	2.81118	2.81876	2.83151	2.84774	2.86591	2.88505	2.90489	2.92564	2.94751	2.97042	2.99385
F =	124.128	126.857	123.873	120.517	115.713	102.767	90.523	76.015	55.253	52.196	48.657
ELEM NO	7	7	7	6	6	6	7	7	10	10	11
DT =	100	101	102	103	104	105	106	107			
DESP =	2.69706	2.71924	2.73971	2.75779	2.77264	2.78312	2.78783	2.78554			
D =	3.01706	3.03924	3.05971	3.07779	3.09264	3.10312	3.10783	3.10554			
F =	48.531	47.978	47.051	45.764	44.023	41.657	38.544	34.761			
ELEM NO	11	11	11	11	11	11	11	11			

-----  
 LAS FUERZAS EN LOS SEGMENTOS DEL PILOTE SON  
 -----

FUERZA MAX EN EL ELEMENTO	DT	FUERZA ULTIMA DE COMP : TN	V(M,2) ULTIMA, MT/SEG	
2	247.44	17.	.00	-.71
3	264.37	16.	.00	-.09
4	256.68	19.	-32.18	-.02
5	252.65	21.	-51.51	-.12
6	247.61	24.	-63.19	-.28
7	243.57	22.	-81.00	-.38
8	227.35	24.	-65.38	-.41
9	178.78	21.	-46.78	-.33
10	128.72	29.	-20.07	-.33
11	97.08	32.	34.76	-.30

FUERZA MIN EN PIL. DE CONCRETO DT = 109	FUERZA ULT DE RESORTE TN	V(M,2) ULTIMO MT/SEG		
2	.00	109.	.00	-.71
3	.00	109.	.00	-.09
4	-65.09	38.	-18.65	.09
5	-104.42	37.	-33.12	-.05
6	-124.74	40.	-53.61	-.22
7	-148.24	40.	-70.89	-.29
8	-135.49	41.	-71.12	-.45
9	-92.35	43.	-45.75	-.43
10	-21.83	108.	-17.19	-.44
11	.00	9.	26.71	-.52

FUERZ MIN NEGATIVA = -148.2410 TN EN ELEMENTO 7 EN ITERACION 40

\*\*\*\* DE CARGA ULTIMA LLEVADA POR LA PUNTA DEL PILOTE : :900

\*\* DATOS GENERALES DE ENTRADA \*\*

-----

Nº DE SEGMENTOS DEL PILOTE = 8.0 LONGITUD DEL ELEMENTO = 2.000 MT

Nº DE ELEMENTOS INCLINADOS (INCLUYE MARTINETE Y CABEZAL) = 10

MODULO DE ELASTICIDAD DEL PILOTE = 210.9 TN/CM2

PESO/MT DE PILOTE = .3840 TN SECCION DEL PILOTE =1600.000 CM2

PESOS DE LOS ELEMENTOS, TN : MARTINETE = 2.200 CABEZAL = .2500

PESO FINAL DE PUNTA = .7680 PUNTA H. = .0000

ALTURA DE CAIDA = 2.500 MT EFICIENCIA DEL MARTILLO = .75

CONSTANTE DE AMORTIGUAMIENTO LATERAL, SJ= .165 CONSTANTE DE AMORTIGUAMIENTO EN LA PUNTA, PJ= .495

CONSTANTE DE RESORTE TN/CM : RES.CAP.= 150.000 RESOR.CUSHI. = .000

1º SEG DEL PILOTE = 1687.200 2º SEG DEL PILOTE = 1687.200

COEF DE RESTITUCION CAP BLOCK = .500 COEF DE RESTITUCION DEL CUSHION = 1.000

\*\*\*\*\* RESISTENCIA ULTIMA ASUMIDA DEL PILOTE = 60.00 TN

I	RU(I), TN
4	.00
5	1.00
6	1.00
7	1.00
8	1.00
9	1.00
10	1.00
11	54.00

INTERVALO DE TIEMPO = .0003300 SEG

NUMERO DE ITERACIONES = 76 DEMS = .320 CM DESP PROMEDIO = 1.8895 CM NO DE VALORES USADOS = 3  
#GOLPES/10cms= 5.29

DT =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
DESP =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
D =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
F =	.000	.000	5.067	36.946	90.510	134.087	141.791	122.883	140.349	142.879	195.849
ELEM NO	11	11	4	4	4	4	4	4	5	4	4
DT =	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
DESP =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
D =	.00002	.00011	.00048	.00167	.00481	.01191	.02580	.04971	.08622	.13597	.19686
F =	234.248	233.390	210.992	234.264	232.220	259.602	275.177	254.584	254.301	261.628	247.414
ELEM NO	4	4	5	5	5	4	4	4	5	5	5
DT =	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
DESP =	.00000	.01338	.08113	.15024	.22446	.30673	.39756	.49471	.59438	.69310	.78924
D =	.26437	.33338	.40113	.47024	.54446	.62673	.71756	.81471	.91438	1.01310	1.10924
F =	250.949	252.421	235.437	227.623	211.410	182.250	173.071	168.178	166.208	148.802	131.872
ELEM NO	6	6	6	7	7	10	10	9	9	9	11

DT =	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
DESP =	.88298	.97501	1.06480	1.14988	1.22666	1.29216	1.34553	1.38813	1.42220	1.44915	1.46873
D =	1.20298	1.29501	1.38480	1.46988	1.54666	1.61216	1.66553	1.70813	1.74220	1.76915	1.78873
F =	129.934	128.543	126.728	122.919	116.189	107.057	97.232	88.505	81.595	75.827	69.860
ELEM NO	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
DT =	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
DESP =	1.47974	1.48170	1.47620	1.46695	1.45834	1.45361	1.45376	1.45779	1.46415	1.47202	1.48192
D =	1.79974	1.80170	1.79620	1.78695	1.77834	1.77361	1.77376	1.77779	1.78415	1.79202	1.80192
F =	62.920	55.587	49.547	51.151	75.002	85.199	89.359	110.295	118.627	121.121	133.705
ELEM NO	11	11	11	10	10	10	9	9	9	6	6
DT =	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
DESP =	1.49499	1.51195	1.53229	1.55441	1.57658	1.59799	1.61938	1.64264	1.66980	1.70177	1.73754
D =	1.81499	1.83195	1.85229	1.87441	1.89658	1.91799	1.93938	1.96264	1.98980	2.02177	2.05754
F =	141.987	163.652	163.745	141.270	126.872	124.863	109.729	102.658	110.576	107.265	90.204
ELEM NO	7	7	7	7	8	8	9	9	10	10	10
DT =	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	
DESP =	1.77431	1.80847	1.83692	1.85826	1.87295	1.88260	1.88862	1.89114	1.88883	1.87978	
D =	2.09431	2.12847	2.15692	2.17826	2.19295	2.20260	2.20862	2.21114	2.20883	2.19978	
F =	83.788	81.664	77.049	71.285	65.902	61.817	58.874	56.037	52.130	46.674	
ELEM NO	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	

-----  
 LAS FUERZAS EN LOS SEGMENTOS DEL PILOTE SON  
 -----

FUERZA MAX EN EL ELEMENTO	DT	FUERZA ULTIMA DE COMP : TN	V(M,2) ULTIMA, MT/SEG	
2	244.89	17.	.00	-.70
3	305.65	15.	.00	-.59
4	275.18	18.	-20.59	-.01
5	261.63	21.	-.41	-.02
6	252.42	24.	-40.80	-.01
7	241.05	21.	-62.52	-.03
8	230.36	23.	-41.86	-.30
9	173.90	25.	-17.27	-.45
10	182.25	28.	-10.10	-.56
11	134.73	31.	46.67	-.51

FUERZA MIN EN PIL. DE CONCRETO DT =	78	FUERZA ULT DE RESORTE TN	V(M,2) ULTIMO MT/SEG	
2	.00	78.	.00	-.70
3	.00	78.	.00	-.59
4	-49.61	46.	-10.37	.07
5	-61.12	35.	-15.05	-.11
6	-74.33	41.	-31.02	.15
7	-96.20	39.	-27.71	.00
8	-81.91	40.	-23.24	-.36
9	-65.60	42.	-10.99	-.55
10	-12.44	77.	-2.39	-.55
11	.00	9.	34.35	-.74

FUERZ MIN NEGATIVA = -96.1982 TN EN ELEMENTO 7 EN ITERACION 39



DT =	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
DESP =	.77232	.85425	.93408	1.00927	1.07631	1.13252	1.17730	1.21213	1.23917	1.25961	1.27305
D =	1.09232	1.17425	1.25408	1.32927	1.39631	1.45252	1.49730	1.53213	1.55917	1.57961	1.59304
F =	162.055	160.482	158.214	153.203	144.410	132.699	120.364	109.621	101.201	94.075	86.511
ELEM NO	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
DT =	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
DESP =	1.27827	1.27490	1.26462	1.25101	1.23811	1.22867	1.22318	1.22032	1.21834	1.21633	1.21466
D =	1.59827	1.59490	1.58462	1.57101	1.55811	1.54867	1.54318	1.54032	1.53834	1.53633	1.53466
F =	77.641	68.365	60.896	62.451	82.942	90.234	85.664	101.100	105.063	104.164	115.062
ELEM NO	11	11	11	10	10	10	9	9	9	6	6
DT =	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
DESP =	1.21428	1.21574	1.21853	1.22130	1.22283	1.22300	1.22309	1.22532	1.23170	1.24285	1.25748
D =	1.53428	1.53574	1.53853	1.54130	1.54283	1.54300	1.54309	1.54532	1.55170	1.56285	1.57748
F =	121.176	141.367	141.125	120.246	114.053	113.194	107.952	104.246	113.268	109.018	91.810
ELEM NO	7	7	7	7	8	8	9	10	10	10	10
DT =	67	68	69	70	71						
DESP =	1.27266	1.28499	1.29191	1.29261	1.28805						
D =	1.59266	1.60499	1.61191	1.61261	1.60805						
F =	88.398	85.317	79.470	72.758	67.074						
ELEM NO	11	11	11	11	11						

LAS FUERZAS EN LOS SEGMENTOS DEL PILOTE SON

FUERZA MAX EN EL ELEMENTO	DT	FUERZA ULTIMA DE COMP : TN	V(M,2) ULTIMA, MT/SEG	
2	244.95	17.	.00	-.71
3	305.73	15.	.00	-.64
4	275.50	18.	-8.81	-.60
5	261.74	21.	-14.75	-.87
6	252.39	24.	-24.55	-.74
7	240.62	21.	-5.61	-.79
8	230.52	23.	-16.91	-.69
9	198.03	30.	10.96	-.44
10	211.00	28.	41.96	-.15
11	168.54	31.	67.07	-.24

NUMERO DE ITERACIONES = 72    DEMS = .320 CM    DESP PROMEDIO = 1.2909 CM    NO DE VALORES USADOS = 3  
 #GOLPES/10cms= 7.75

FUERZA MIN EN PIL. DE CONCRETO	DT =	FUERZA ULT DE RESORTE TN	V(M,2) ULTIMO MT/SEG
2	72	.00	-.71
3	72	.00	-.64
4	46.	6.18	-.63
5	35.	-22.23	-.76
6	42.	-21.91	-.75
7	39.	-11.16	-.84
8	40.	-30.73	-.61
9	42.	-5.27	-.55
10	8.	47.34	-.37
11	9.	63.30	-.31

FUERZ MIN NEGATIVA = -62.0920 TN    EN ELEMENTO 7    EN ITERACION 39



DT =	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
DESP =	.67456	.74753	.81850	.88492	.94338	.99141	1.02868	1.05673	1.07762	1.09235	1.10040
D =	.99456	1.06753	1.13850	1.20492	1.26338	1.31141	1.34868	1.37673	1.39762	1.41235	1.42040
F =	190.196	188.504	185.821	179.659	168.918	154.850	140.307	127.867	118.200	109.896	100.864
ELEM NO	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
DT =	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
DESP =	1.10056	1.09255	1.07811	1.06070	1.04405	1.03043	1.01994	1.01101	1.00176	.99129	.97989
D =	1.42056	1.41255	1.39811	1.38070	1.36405	1.35043	1.33994	1.33101	1.32176	1.31129	1.29989
F =	90.209	79.187	70.506	71.910	89.397	94.103	86.997	92.954	93.342	88.373	97.944
ELEM NO	11	11	11	10	10	10	10	9	9	6	6
DT =	56										
DESP =	.96838										
D =	1.28838										
F =	101.597										
ELEM NO	7										

LAS FUERZAS EN LOS SEGMENTOS DEL PILOTE SON

FUERZA MAX EN EL ELEMENTO	DT	FUERZA ULTIMA DE COMP : TN	V(M,2) ULTIMA, MT/SEG
2	245.02	17.	.00
3	305.81	15.	.00
4	275.82	18.	37.94
5	261.84	21.	63.84
6	252.35	24.	94.25
7	240.19	21.	101.60
8	230.65	23.	73.53
9	223.38	30.	54.03
10	235.82	28.	76.67
11	198.31	31.	74.46

FUERZA MIN EN PIL. DE CONCRETO	DT =	FUERZA ULT DE RESORTE TN	V(M,2) ULTIMO MT/SEG
2	57	.00	-.72
3	57.	.00	-.68
4	46.	47.19	-.09
5	48.	63.46	-.25
6	42.	85.15	-.25
7	39.	120.79	-.08
8	41.	74.39	-.43
9	42.	51.58	-.44
10	8.	73.27	-.40
11	9.	74.88	-.34

FUERZ MIN NEGATIVA = -47.3780 TN EN ELEMENTO 4 EN ITERACION 46



DT =	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
DESP =	.58674	.65172	.71481	.77339	.82421	.86501	.89564	.91772	.93320	.94290	.94618
D =	.90674	.97172	1.03481	1.09339	1.14421	1.18501	1.21564	1.23772	1.25320	1.26290	1.26618
F =	215.007	213.264	210.196	202.911	190.320	174.095	157.627	143.774	133.071	123.716	113.305
ELEM NO	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11

DT =	45	46	47	48	49	50	51	52
DESP =	.94185	.92975	.91167	.89095	.87098	.85364	.83867	.82432
D =	1.26185	1.24975	1.23167	1.21095	1.19098	1.17364	1.15867	1.14432
F =	100.988	88.404	78.713	79.839	94.587	96.970	88.170	85.262
ELEM NO	11	11	11	10	10	10	10	9

-----  
 LAS FUERZAS EN LOS SEGMENTOS DEL PILOTE SON  
 -----

	FUERZA MAX EN EL ELEMENTO	DT	FUERZA ULTIMA DE COMP : TN	V(M,2) ULTIMA, MT/SEG
2	245.08	17.	.00	-.73
3	305.89	15.	.00	-.73
4	276.13	18.	18.20	-.12
5	261.95	21.	37.98	-.01
6	252.32	24.	24.25	-.23
7	239.76	21.	32.85	-.73
8	230.77	23.	53.67	-.66
9	245.75	30.	85.26	-.68
10	257.86	28.	75.58	-.63
11	224.65	31.	84.75	-.47

	FUERZA MIN EN PIL. DE CONCRETO	DT =	FUERZA ULT DE RESORTE TN	V(M,2) ULTIMO MT/SEG
2	.00	53.	.00	-.73
3	.00	53.	.00	-.73
4	-45.75	46.	12.15	-.12
5	-25.80	48.	50.31	-.01
6	-8.22	50.	52.00	-.23
7	-4.24	39.	29.02	-.73
8	.00	6.	54.41	-.66
9	.00	7.	82.61	-.68
10	.00	8.	66.99	-.63
11	.00	9.	82.68	-.47

FUERZ MIN NEGATIVA = -45.7522 TN EN ELEMENTO 4 EN ITERACION 46

\*\*\*\* % DE CARGA ULTIMA LLEVADA POR LA PUNTA DEL PILOTE : .900

\*\* DATOS GENERALES DE ENTRADA \*\*

Nº DE SEGMENTOS DEL PILOTE = 8.0 LONGITUD DEL ELEMENTO = 2.000 MT

Nº DE ELEMENTOS INCLINADOS (INCLUYE MARTINETE Y CABEZAL) = 10

MODULO DE ELASTICIDAD DEL PILOTE = 210.9 TN/CM2

PESO/MT DE PILOTE = .3840 TN SECCION DEL PILOTE =1600.000 CM2

PESOS DE LOS ELEMENTOS, TN : MARTINETE = 2.200 CABEZAL = .2500

PESO FINAL DE PUNTA = .7680 PUNTA H. = .0000

ALTURA DE CAIDA = 2.500 MT EFICIENCIA DEL MARTILLO = .75

CONSTANTE DE AMORTIGUAMIENTO LATERAL, SJ= .165 CONSTANTE DE AMORTIGUAMIENTO EN LA PUNTA, PJ= .495

CONSTANTE DE RESORTE TN/CM : RES.CAP.= 150.000 RESOR.CUSHI. = .000

1º SEG DEL PILOTE = 1687.200 2º SEG DEL PILOTE = 1687.200

COEF DE RESTITUCION CAP BLOCK = .500 COEF DE RESTITUCION DEL CUSHION = 1.000

\*\*\*\*\* RESISTENCIA ULTIMA ASUMIDA DEL PILOTE = 140.00 TN

I	RU(I), TN
4	.00
5	2.33
6	2.33
7	2.33
8	2.33
9	2.33
10	2.33
11	126.00

INTERVALO DE TIEMPO = .0003300 SEG

NUMERO DE ITERACIONES = 44 DEMS = .320 CM DESP PROMEDIO = .8080 CM NO DE VALORES USADOS = 2  
#GOLPES/10cms= 12.38

DT =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
DESP =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
D =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
F =	.000	.000	5.067	36.946	90.511	134.094	141.825	122.980	140.182	143.221	196.322
ELEM NO	11	11	4	4	4	4	4	4	5	4	4
DT =	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
DESP =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
D =	.00002	.00011	.00048	.00165	.00472	.01159	.02490	.04742	.08095	.12492	.17585
F =	234.838	234.113	210.833	234.086	232.136	260.880	276.452	255.904	254.781	262.057	247.910
ELEM NO	4	4	5	5	5	4	4	4	5	5	5
DT =	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
DESP =	.00000	.00000	.00154	.04230	.08651	.13812	.19723	.26099	.32558	.38834	.44866
D =	.22831	.27747	.32154	.36230	.40651	.45812	.51723	.58099	.64558	.70834	.76866
F =	250.669	252.282	235.862	233.267	262.734	277.584	271.145	265.668	266.783	252.051	240.005
ELEM NO	6	6	6	7	10	10	10	9	9	9	11

DT =	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
DESP =	.50739	.56521	.62121	.67277	.71674	.75108	.77583	.79263	.80331	.80852	.80754
D =	.82739	.88521	.94121	.99277	1.03674	1.07108	1.09583	1.11263	1.12331	1.12852	1.12754
F =	237.005	235.271	231.838	223.453	209.104	190.914	172.773	157.748	146.176	135.860	124.141
ELEM NO	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11

-----  
 LAS FUERZAS EN LOS SEGMENTOS DEL PILOTE SON  
 -----

	FUERZA MAX EN EL ELEMENTO	DT	FUERZA ULTIMA DE COMP : TN	V(M,2) ULTIMA, MT/SEG
2	245.15	17.	.00	-.74
3	305.97	15.	.00	-.77
4	276.45	18.	-10.21	-.74
5	262.06	21.	6.68	-.27
6	252.28	24.	19.34	-.18
7	239.32	21.	35.27	-.20
8	240.27	30.	38.12	-.11
9	266.78	31.	44.73	-.17
10	277.58	28.	71.34	-.51
11	248.08	31.	124.14	-.25

NUMERO DE ITERACIONES = 45    DEMS = .320 CM    DESP PROMEDIO = .8080 CM    NO DE VALORES USADOS = 2  
 #GOLPES/10cms= 12.38

	FUERZA MIN EN PIL. DE CONCRETO	DT = 45	FUERZA ULT DE RESORTE TN	V(M,2) ULTIMO MT/SEG
2	.00	45.	.00	-.74
3	.00	45.	.00	-.77
4	-36.15	45.	-36.15	-.59
5	.00	3.	1.65	-.44
6	.00	4.	20.24	-.27
7	.00	5.	30.59	-.25
8	.00	6.	41.46	-.17
9	.00	7.	63.31	-.28
10	.00	8.	57.07	-.49
11	.00	9.	110.27	-.48

FUERZ MIN NEGATIVA = -36.1491 TN    EN ELEMENTO 4    EN ITERACION 45



	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
DT =											
DESP =	.43717	.48847	.53801	.58321	.62104	.64965	.66916	.68124	.68759	.68878	.68399
D =	.75717	.80847	.85801	.90321	.94104	.96965	.98916	1.00124	1.00759	1.00878	1.00399
F =	256.671	254.822	250.997	241.626	225.727	205.791	186.153	170.075	157.733	146.562	133.660
ELEM NO	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11

-----  
 LAS FUERZAS EN LOS SEGMENTOS DEL PILOTE SON  
 -----

	FUERZA MAX EN EL ELEMENTO	DT	FUERZA ULTIMA DE COMP : TN	V(M,2) ULTIMA, MT/SEG
2	245.21	17.	.00	-.75
3	306.05	15.	.00	-.81
4	276.77	18.	-5.15	-1.10
5	262.16	21.	16.29	-.63
6	252.24	24.	31.32	-.48
7	238.89	21.	50.50	-.45
8	253.45	30.	54.42	-.33
9	284.66	31.	58.47	-.33
10	293.47	28.	82.74	-.63
11	268.93	31.	133.66	-.36

NUMERO DE ITERACIONES = 45    DEMS = .320 CM    DESP PROMEDIO = .6868 CM    NO DE VALORES USADOS = 3  
 #GOLPES/10cms= 14.56

	FUERZA MIN EN PIL. DE CONCRETO	DT = 45	FUERZA ULT DE RESORTE TN	V(M,2) ULTIMO MT/SEG
2	.00	45.	.00	-.75
3	.00	45.	.00	-.81
4	-31.53	45.	-31.53	-.97
5	.00	3.	8.16	-.81
6	.00	4.	29.50	-.58
7	.00	5.	43.65	-.52
8	.00	6.	54.67	-.38
9	.00	7.	75.15	-.43
10	.00	8.	67.58	-.61
11	.00	9.	118.38	-.57

FUERZ MIN NEGATIVA = -31.5301 TN    EN ELEMENTO 4    EN ITERACION 45

\*\*\*\*  $\xi$  DE CARGA ULTIMA LLEVADA POR LA PUNTA DEL PILOTE : .900

\*\* DATOS GENERALES DE ENTRADA \*\*

Nº DE SEGMENTOS DEL PILOTE = 8.0 LONGITUD DEL ELEMENTO = 2.000 MT

Nº DE ELEMENTOS INCLINADOS (INCLUYE MARTINETE Y CABEZAL) = 10

MODULO DE ELASTICIDAD DEL PILOTE = 210.9 TN/CM2

PESO/MT DE PILOTE = .3840 TN SECCION DEL PILOTE =1600.000 CM2

PESOS DE LOS ELEMENTOS, TN : MARTINETE = 2.200 CABEZAL = .2500

PESO FINAL DE PUNTA = .7680 PUNTA H. = .0000

ALTURA DE CAIDA = 2.500 MT EFICIENCIA DEL MARTILLO = .75

CONSTANTE DE AMORTIGUAMIENTO LATERAL, SJ= .165 CONSTANTE DE AMORTIGUAMIENTO EN LA PUNTA, PJ= .495

CONSTANTE DE RESORTE TN/CM : RES.CAP.= 150.000 RESOR.CUSHI. = .000

1º SEG DEL PILOTE = 1687.200 2º SEG DEL PILOTE = 1687.200

COEF DE RESTITUCION CAP BLOCK = .500 COEF DE RESTITUCION DEL CUSHION = 1.000

\*\*\*\*\* RESISTENCIA ULTIMA ASUMIDA DEL PILOTE = 180.00 TN

.I	RU(I), TN
4	.00
5	3.00
6	3.00
7	3.00
8	3.00
9	3.00
10	3.00
11	162.00

INTERVALO DE TIEMPO = .0003300 SEG

NUMERO DE ITERACIONES = 43 DEMS = .320 CM DESP PROMEDIO = .5811 CM NO DE VALORES USADOS = 3  
#GOLPES/10cms= 17.21

DT =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
DESP =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
D =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
F =	.000	.000	5.067	36.946	90.511	134.098	141.841	123.029	140.098	143.391	196.558
ELEM NO	11	11	4	4	4	4	4	4	5	4	4
DT =	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
DESP =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
D =	.00002	.00011	.00048	.00163	.00467	.01144	.02447	.04633	.07848	.11988	.16661
F =	235.132	234.473	210.753	233.997	232.090	261.517	277.086	256.559	255.017	262.267	248.153
ELEM NO	4	4	5	5	5	4	4	4	5	5	5
DT =	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
DESP =	.00000	.00000	.00000	.00553	.03985	.08004	.12689	.17795	.22968	.27960	.32722
D =	.21318	.25528	.29197	.32553	.35985	.40004	.44689	.49795	.54968	.59960	.64722
F =	250.524	252.203	236.052	249.113	287.562	307.627	306.128	295.206	300.777	290.253	277.726
ELEM NO	6	6	6	10	10	10	10	9	9	9	11

DT =	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
DESP =	.37341	.41879	.46246	.50189	.53420	.55764	.57245	.58027	.58274	.58030
D =	.69341	.73879	.78246	.82189	.85420	.87764	.89245	.90027	.90274	.90030
F =	274.243	272.279	268.101	257.828	240.500	218.968	197.991	181.006	168.006	156.063
ELEM NO	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11

-----  
 LAS FUERZAS EN LOS SEGMENTOS DEL PILOTE SON  
 -----

	FUERZA MAX EN EL ELEMENTO	DT	FUERZA ULTIMA DE COMP : TN	V(M,2) ULTIMA, MT/SEG
2	245.27	17.	.00	-.76
3	306.13	15.	.00	-.85
4	277.09	18.	33.32	-1.43
5	262.27	21.	34.14	-.83
6	252.20	24.	47.13	-.67
7	238.45	21.	68.85	-.57
8	264.86	30.	70.80	-.49
9	300.78	31.	60.35	-.45
10	307.63	28.	114.58	-.64
11	287.70	31.	156.06	-.25

	FUERZA MIN EN PIL. DE CONCRETO DT =	44	FUERZA ULT DE RESORTE TN	V(M,2) ULTIMO MT/SEG
2	.00	43.	1.31	-.76
3	.00	44.	.00	-.85
4	.00	2.	.07	-1.43
5	.00	3.	25.09	-.83
6	.00	4.	41.66	-.67
7	.00	5.	64.18	-.57
8	.00	6.	68.81	-.49
9	.00	7.	70.60	-.45
10	.00	8.	92.87	-.64
11	.00	9.	142.06	-.25

FUERZ MIN NEGATIVA = .0000 TN EN ELEMENTO 4 EN ITERACION 1

\*\*\*\* % DE CARGA ULTIMA LLEVADA POR LA PUNTA DEL PILOTE : .900

\*\* DATOS GENERALES DE ENTRADA \*\*

Nº DE SEGMENTOS DEL PILOTE = 8.0 LONGITUD DEL ELEMENTO = 2.000 MT

Nº DE ELEMENTOS INCLINADOS (INCLUYE MARTINETE Y CABEZAL) = 10

MODULO DE ELASTICIDAD DEL PILOTE = 210.9 TN/CM2

PESO/MT DE PILOTE = .3840 TN SECCION DEL PILOTE = 1600.000 CM2

PESOS DE LOS ELEMENTOS, TN : MARTINETE = 2.200 CABEZAL = .2500

PESO FINAL DE PUNTA = .7680 PUNTA H. = .0000

ALTURA DE CAIDA = 2.500 MT EFICIENCIA DEL MARTILLO = .75

CONSTANTE DE AMORTIGUAMIENTO LATERAL, SJ= .165 CONSTANTE DE AMORTIGUAMIENTO EN LA PUNTA, PJ= .495

CONSTANTE DE RESORTE TN/CM : RES.CAP.= 150.000 RESOR.CUSHI. = .000

1º SEG DEL PILOTE = 1687.200 2º SEG DEL PILOTE = 1687.200

COEF DE RESTITUCION CAP BLOCK = .500 COEF DE RESTITUCION DEL CUSHION = 1.000

\*\*\*\*\* RESISTENCIA ULTIMA ASUMIDA DEL PILOTE = 200.00 TN

I	RU(I), TN
4	.00
5	3.33
6	3.33
7	3.33
8	3.33
9	3.33
10	3.33
11	180.00

INTERVALO DE TIEMPO = .0003300 SEG

NUMERO DE ITERACIONES = 42 DEMS = .320 CM DESP PROMEDIO = .4879 CM NO DE VALORES USADOS = 3  
#GOLPES/10cms= 20.50

DT =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
DESP =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
D =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
F =	.000	.000	5.067	36.946	90.511	134.099	141.850	123.053	140.057	143.476	196.675
ELEM NO	11	11	4	4	4	4	4	4	5	4	4

DT =	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
DESP =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
D =	.00002	.00011	.00047	.00163	.00465	.01136	.02425	.04580	.07728	.11747	.16226
F =	235.278	234.653	210.714	233.951	232.067	261.834	277.402	256.885	255.134	262.371	248.273
ELEM NO	4	4	5	5	5	4	4	4	5	5	5

DT =	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
DESP =	.00000	.00000	.00000	.00000	.02083	.05634	.09773	.14306	.18910	.23349	.27570
D =	.20621	.24531	.27898	.30972	.34083	.37634	.41773	.46306	.50910	.55349	.59570
F =	250.451	252.161	236.176	257.171	295.628	318.231	320.112	307.513	313.898	306.229	293.964
ELEM NO	6	6	11	10	10	10	10	10	9	9	11

DT =	34	35	36	37	38	39	40	41	42
DESP =	.31651	.35648	.39474	.42890	.45618	.47498	.48557	.48955	.48849
D =	.63651	.67648	.71474	.74890	.77618	.79498	.80557	.80955	.80849
F =	290.178	287.935	283.311	272.210	253.660	230.759	208.595	190.763	177.122
ELEM NO	11	11	11	11	11	11	11	11	11

-----  
 LAS FUERZAS EN LOS SEGMENTOS DEL PILOTE SON  
 -----

	FUERZA MAX EN EL ELEMENTO	DT	FUERZA ULTIMA DE COMP : TN	V(M,2) ULTIMA, MT/SEG
2	245.34	17.	3.73	-.77
3	306.21	15.	.00	-.82
4	277.40	18.	63.78	-1.53
5	262.37	21.	57.60	-1.07
6	252.16	24.	69.41	-.85
7	238.01	21.	83.07	-.66
8	274.44	30.	86.00	-.63
9	313.90	31.	79.28	-.64
10	320.11	29.	143.36	-.51
11	304.32	31.	177.12	-.17

	FUERZA MIN EN PIL. DE CONCRETO DT =	43	FUERZA ULT DE RESORTE TN	V(M,2) ULTIMO MT/SEG
2	.00	40.	4.56	-.77
3	.00	43.	.00	-.82
4	.00	2.	38.12	-1.53
5	.00	3.	45.04	-1.07
6	.00	4.	58.94	-.85
7	.00	5.	81.78	-.66
8	.00	6.	86.05	-.63
9	.00	7.	72.53	-.64
10	.00	8.	124.46	-.51
11	.00	9.	164.46	-.17

FUERZ MIN NEGATIVA = .0000 TN EN ELEMENTO 4 EN ITERACION 1

\*\*\*\* % DE CARGA ULTIMA LLEVADA POR LA PUNTA DEL PILOTE : .900

\*\* DATOS GENERALES DE ENTRADA \*\*

Nº DE SEGMENTOS DEL PILOTE = 8.0 LONGITUD DEL ELEMENTO = 2.000 MT

Nº DE ELEMENTOS INCLINADOS (INCLUYE MARTINETE Y CABEZAL) = 10

MODULO DE ELASTICIDAD DEL PILOTE = 210.9 TN/CM2

PESO/MT DE PILOTE = .3840 TN SECCION DEL PILOTE =1600.000 CM2

PESOS DE LOS ELEMENTOS, TN : MARTINETE = 2.200 CABEZAL = .2500

PESO FINAL DE PUNTA = .7680 PUNTA H. = .0000

ALTURA DE CAIDA = 2.500 MT EFICIENCIA DEL MARTILLO = .75

CONSTANTE DE AMORTIGUAMIENTO LATERAL, SJ= .165 CONSTANTE DE AMORTIGUAMIENTO EN LA PUNTA, PJ= .495

CONSTANTE DE RESORTE TN/CM : RES.CAP.= 150.000 RESOR.CUSHI. = .000

1º SEG DEL PILOTE = 1687.200 2º SEG DEL PILOTE = 1687.200

COEF DE RESTITUCION CAP BLOCK = .500 COEF DE RESTITUCION DEL CUSHION = 1.000

\*\*\*\*\* RESISTENCIA ULTIMA ASUMIDA DEL PILOTE = 220.00 TN

I	RU(I), TN
4	.00
5	3.67
6	3.67
7	3.67
8	3.67
9	3.67
10	3.67
11	198.00

INTERVALO DE TIEMPO = .0003300 SEG

NUMERO DE ITERACIONES = 42 DEMS = .320 CM DESP PROMEDIO = .4056 CM NO DE VALORES USADOS = 3  
#GOLPES/10cms= 24.65

DT =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
DESP =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
D =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
F =	.000	.000	5.067	36.946	90.512	134.101	141.858	123.077	140.015	143.561	196.793
ELEM NO	11	11	4	4	4	4	4	4	5	4	4
DT =	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
DESP =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
D =	.00002	.00011	.00047	.00162	.00462	.01129	.02404	.04527	.07611	.11512	.15809
F =	235.425	234.832	210.674	233.906	232.043	262.151	277.717	257.211	255.251	262.474	248.392
ELEM NO	4	4	5	5	5	4	4	4	5	5	5
DT =	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
DESP =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00411	.03541	.07167	.11164	.15245	.19182	.22912
D =	.19961	.23598	.26698	.29529	.32411	.35541	.39167	.43164	.47245	.51182	.54912
F =	250.377	252.118	242.018	263.973	301.440	326.641	332.383	322.804	325.087	320.597	308.794
ELEM NO	6	6	11	10	10	10	10	10	9	9	11

DT =	34	35	36	37	38	39	40	41	42
DESP =	.26501	.30002	.33331	.36262	.38534	.39994	.40671	.40720	.40291
D =	.58501	.62002	.65331	.68262	.70534	.71994	.72671	.72720	.72291
F =	304.596	301.958	296.878	285.063	265.468	241.357	218.105	199.474	185.234
ELEM NO	11	11	11	11	11	11	11	11	11

-----  
 LAS FUERZAS EN LOS SEGMENTOS DEL PILOTE SON  
 -----

FUERZA MAX EN EL ELEMENTO	DT	FUERZA ULTIMA DE COMP : TN	V(M,2) ULTIMA, MT/SEG	
2	245.40	17.	5.12	-.80
3	306.29	15.	.00	-.71
4	277.72	18.	67.22	-1.74
5	262.47	21.	68.18	-1.30
6	252.12	24.	82.95	-1.07
7	237.98	26.	95.53	-.83
8	282.58	30.	100.68	-.78
9	325.09	31.	91.86	-.77
10	332.38	29.	152.95	-.62
11	319.22	31.	185.23	-.27

FUERZA MIN EN PIL. DE CONCRETO DT =	43	FUERZA ULT DE RESORTE TN	V(M,2) ULTIMO MT/SEG	
2	.00	38.	3.24	-.80
3	.00	43.	.00	-.71
4	.00	2.	42.63	-1.74
5	.00	3.	55.41	-1.30
6	.00	4.	69.51	-1.07
7	.00	5.	93.12	-.83
8	.00	6.	100.00	-.78
9	.00	7.	83.32	-.77
10	.00	8.	133.36	-.62
11	.00	9.	171.91	-.27

FUERZ MIN NEGATIVA = .0000 TN EN ELEMENTO 4 EN ITERACION 1



DT =	34	35	36	37	38	39	40	41
DESP =	.21918	.24966	.27837	.30320	.32170	.33247	.33579	.33313
D =	.53918	.56966	.59837	.62320	.64170	.65247	.65579	.65313
F =	317.933	314.755	309.016	296.440	275.961	250.896	226.748	207.372
ELEM NO	11	11	11	11	11	11	11	11

LAS FUERZAS EN LOS SEGMENTOS DEL PILOTE SON

FUERZA MAX EN EL ELEMENTO		DT	FUERZA ULTIMA DE COMP : TN	V(M,2) ULTIMA, MT/SEG
2	245.46	17.	5.72	-.82
3	306.37	15.	.00	-.68
4	278.03	18.	78.67	-1.62
5	262.58	21.	91.82	-1.45
6	252.07	24.	110.24	-1.19
7	239.03	26.	109.80	-.93
8	289.57	30.	110.63	-.87
9	333.26	31.	129.95	-.93
10	341.13	29.	174.33	-.45
11	332.01	31.	207.37	-.22

FUERZA MIN EN PIL. DE CONCRETO DT = 42		FUERZA ULT DE RESORTE TN	V(M,2) ULTIMO MT/SEG	
2	.00	37.	3.03	-.82
3	.00	42.	.00	-.68
4	.00	2.	69.18	-1.62
5	.00	3.	77.12	-1.45
6	.00	4.	95.85	-1.19
7	.00	5.	106.78	-.93
8	.00	6.	113.63	-.87
9	.00	7.	103.53	-.93
10	.00	8.	161.39	-.45
11	.00	9.	192.49	-.22

FUERZ MIN NEGATIVA = .0000 TN EN ELEMENTO 4 EN ITERACION 1

\*\*\*\*  $\bar{E}$  DE CARGA ULTIMA LLEVADA POR LA PUNTA DEL PILOTE : .900

\*\* DATOS GENERALES DE ENTRADA \*\*

Nº DE SEGMENTOS DEL PILOTE = 8.0 LONGITUD DEL ELEMENTO = 2.000 MT

Nº DE ELEMENTOS INCLINADOS (INCLUYE MARTINETE Y CABEZAL) = 10

MODULO DE ELASTICIDAD DEL PILOTE = 210.9 TN/CM2

PESO/MT DE PILOTE = .3840 TN SECCION DEL PILOTE = 1600.000 CM2

PESOS DE LOS ELEMENTOS, TN : MARTINETE = 2.200 CABEZAL = .2500

PESO FINAL DE PUNTA = .7680 PUNTA H. = .0000

ALTURA DE CAIDA = 2.500 MT EFICIENCIA DEL MARTILLO = .75

CONSTANTE DE AMORTIGUAMIENTO LATERAL, SJ= .165 CONSTANTE DE AMORTIGUAMIENTO EN LA PUNTA, PJ= .490

CONSTANTE DE RESORTE TN/CM : RES.CAP.= 150.000 RESOR.CUSHI. = .000

1º SEG DEL PILOTE = 1687.200 2º SEG DEL PILOTE = 1687.200

COEF DE RESTITUCION CAP BLOCK = .500 COEF DE RESTITUCION DEL CUSHION = 1.000

\*\*\*\*\* RESISTENCIA ULTIMA ASUMIDA DEL PILOTE = 260.00 TN

I	RU(I), TN
4	.00
5	4.33
6	4.33
7	4.33
8	4.33
9	4.33
10	4.33
11	234.00

INTERVALO DE TIEMPO = .0003300 SEG

NUMERO DE ITERACIONES = 41 DEMS = .320 CM DESP PROMEDIO = .2709 CM NO DE VALORES USADOS = 2  
#GOLPES/10cms= 36.91

DT =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
DESP =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
D =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
F =	.000	.000	5.067	36.946	90.512	134.105	141.875	123.126	139.932	143.732	197.028
ELEM NO	11	11	4	4	4	4	4	4	5	4	4

DT =	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
DESP =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
D =	.00002	.00011	.00047	.00161	.00458	.01114	.02363	.04425	.07384	.11064	.15022
F =	235.717	235.190	210.921	233.815	231.993	262.783	278.346	257.860	255.483	262.678	248.628
ELEM NO	4	4	4	5	5	4	4	4	5	5	5

DT =	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
DESP =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00180	.02965	.05980	.09093	.12128	.15005
D =	.18740	.21906	.24559	.26987	.29489	.32180	.34965	.37980	.41093	.44128	.47005
F =	250.226	252.027	251.049	274.572	310.139	335.234	348.271	346.924	343.281	342.120	334.950
ELEM NO	6	6	11	10	10	10	10	10	11	9	11

DT =	34	35	36	37	38	39	40	41
DESP =	.17744	.20374	.22820	.24889	.26354	.27081	.27098	.26542
D =	.49744	.52374	.54820	.56889	.58354	.59081	.59098	.58542
F =	330.155	326.311	319.868	306.614	285.410	259.539	234.579	214.484
ELEM NO	11	11	11	11	11	11	11	11

-----  
 LAS FUERZAS EN LOS SEGMENTOS DEL PILOTE SON  
 -----

	FUERZA MAX EN EL ELEMENTO	DT	FUERZA ULTIMA DE COMP : TN	V(M,2) ULTIMA, MT/SEG
2	245.53	17.	3.69	-.84
3	306.45	15.	.00	-.63
4	278.35	18.	79.67	-1.76
5	262.68	21.	98.27	-1.60
6	252.03	24.	123.41	-1.36
7	240.04	26.	122.25	-1.08
8	295.62	30.	121.91	-.99
9	342.12	32.	141.94	-1.05
10	348.27	29.	182.70	-.55
11	343.28	31.	214.48	-.30

	FUERZA MIN EN PIL. DE CONCRETO	DT = 42	FUERZA ULT DE RESORTE TN	V(M,2) ULTIMO MT/SEG
2	.00	42.	.00	-.84
3	.00	42.	.00	-.63
4	.00	2.	70.56	-1.76
5	.00	3.	85.13	-1.60
6	.00	4.	107.75	-1.36
7	.00	5.	116.87	-1.08
8	.00	6.	125.35	-.99
9	.00	7.	114.15	-1.05
10	.00	8.	168.95	-.55
11	.00	9.	198.98	-.30

FUERZ MIN NEGATIVA = .0000 TN EN ELEMENTO 4 EN ITERACION 1

\*\*\*\* t DE CARGA ULTIMA LLEVADA POR LA PUNTA DEL PILOTE : .900

\*\* DATOS GENERALES DE ENTRADA \*\*

Nº DE SEGMENTOS DEL PILOTE = 8.0 LONGITUD DEL ELEMENTO = 2.000 MT

Nº DE ELEMENTOS INCLINADOS (INCLUYE MARTINETE Y CABEZAL) = 10

MODULO DE ELASTICIDAD DEL PILOTE = 210.9 TN/CM2

PESO/MT DE PILOTE = .3840 TN SECCION DEL PILOTE =1600.000 CM2

PESOS DE LOS ELEMENTOS, TN : MARTINETE = 2.200 CABEZAL = .2500

PESO FINAL DE PUNTA = .7680 PUNTA H. = .0000

ALTURA DE CAIDA = 2.500 MT EFICIENCIA DEL MARTILLO = .75

CONSTANTE DE AMORTIGUAMIENTO LATERAL, SJ= .165 CONSTANTE DE AMORTIGUAMIENTO EN LA PUNTA, PJ= .495

CONSTANTE DE RESORTE TN/CM : RES.CAP.= 150.000 RESOR.CUSHI. = .000

1º SEG DEL PILOTE = 1687.200 2º SEG DEL PILOTE = 1687.200

COEF DE RESTITUCION CAP BLOCK = .500 COEF DE RESTITUCION DEL CUSHION = 1.000

\*\*\*\*\* RESISTENCIA ULTIMA ASUMIDA DEL PILOTE = 280.00 TN

I	RU(I), TN
4	.00
5	4.67
6	4.67
7	4.67
8	4.67
9	4.67
10	4.67
11	252.00

INTERVALO DE TIEMPO = .0003300 SEG .

NUMERO DE ITERACIONES = 40 DEMS = .320 CM DESP PROMEDIO = .2134 CM NO DE VALORES USADOS = 3  
#GOLPES/10cms= 46.86

DT =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
DESP =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
D =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
F =	.000	.000	5.067	36.946	90.512	134.107	141.883	123.150	139.890	143.817	197.146
ELEM NO	11	11	4	4	4	4	4	4	5	4	4
DT =	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
DESP =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
D =	.00002	.00011	.00047	.00160	.00455	.01107	.02342	.04374	.07274	.10849	.14651
F =	235.863	235.368	211.148	233.769	231.967	263.099	278.659	258.183	255.598	262.779	248.745
ELEM NO	4	4	4	5	5	4	4	4	5	5	5
DT =	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
DESP =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.01317	.03929	.06592	.09202	.11691
D =	.18175	.21136	.23600	.25860	.28203	.30730	.33317	.35929	.38592	.41202	.43691
F =	250.150	251.980	254.549	278.666	313.348	338.053	351.644	354.330	352.635	350.661	346.092
ELEM NO	6	6	11	10	10	10	10	10	11	11	11

DT =	34	35	36	37	38	39	40
DESP =	.14061	.16315	.18374	.20057	.21160	.21563	.21291
D =	.46061	.48315	.50374	.52057	.53160	.53563	.53291
F =	341.572	337.205	329.833	315.643	293.683	267.220	241.729
ELEM NO	11	11	11	11	11	11	11

-----  
 LAS FUERZAS EN LOS SEGMENTOS DEL PILOTE SON  
 -----

	FUERZA MAX EN EL ELEMENTO	DT	FUERZA ULTIMA DE COMP : TN	V(M,2) ULTIMA, MT/SEG
2	245.59	17.	5.22	-.85
3	306.53	15.	.00	-.64
4	278.66	18.	75.95	-1.55
5	262.78	21.	116.01	-1.61
6	251.98	24.	143.05	-1.37
7	241.00	26.	141.87	-1.22
8	300.92	30.	133.96	-1.09
9	348.85	32.	185.40	-1.05
10	354.33	30.	202.39	-.47
11	352.63	31.	241.73	-.25

	FUERZA MIN EN PIL. DE CONCRETO	DT =	FUERZA ULT DE RESORTE TN	V(M,2) ULTIMO MT/SEG
2	.00	35.	.94	-.85
3	.00	41.	.00	-.64
4	.00	2.	79.45	-1.55
5	.00	3.	102.32	-1.61
6	.00	4.	134.73	-1.37
7	.00	5.	134.61	-1.22
8	.00	6.	131.89	-1.09
9	.00	7.	152.76	-1.05
10	.00	8.	190.30	-.47
11	.00	9.	221.06	-.25

FUERZ MIN NEGATIVA = .0000 TN EN ELEMENTO 4 EN ITERACION 1



DT =	34	35	36	37	38	39	40
DESP =	.10695	.12601	.14301	.15628	.16397	.16499	.15962
D =	.42695	.44601	.46301	.47628	.48397	.48499	.47962
F =	352.086	347.184	338.854	323.749	301.113	274.165	248.230
ELEM NO	11	11	11	11	11	11	11

-----  
 LAS FUERZAS EN LOS SEGMENTOS DEL PILOTE SON  
 -----

	FUERZA MAX EN EL ELEMENTO	DT	FUERZA ULTIMA DE COMP : TN	V(M,2) ULTIMA, MT/SEG
2	245.65	17.	3.37	-.87
3	306.61	15.	.00	-.61
4	278.97	18.	76.23	-1.66
5	262.88	21.	118.20	-1.71
6	251.93	24.	151.92	-1.48
7	241.92	26.	154.77	-1.35
8	305.55	30.	143.91	-1.20
9	354.40	32.	195.08	-1.15
10	360.31	30.	210.59	-.56
11	366.45	29.	248.23	-.32

	FUERZA MIN EN PIL. DE CONCRETO DT =	41	FUERZA ULT DE RESORTE TN	V(M,2) ULTIMO MT/SEG
2	.00	41.	.00	-.87
3	.00	41.	.00	-.61
4	.00	2.	78.83	-1.66
5	.00	3.	105.48	-1.71
6	.00	4.	144.82	-1.48
7	.00	5.	146.07	-1.35
8	.00	6.	141.02	-1.20
9	.00	7.	162.57	-1.15
10	.00	8.	197.21	-.56
11	.00	9.	227.05	-.32

FUERZ MIN NEGATIVA = .0000 TN EN ELEMENTO 4 EN ITERACION 1



DT =	34	35	36	37	38	39
DESP =	.07738	.09328	.10705	.11705	.12159	.11978
D =	.39738	.41328	.42705	.43705	.44159	.43978
F =	361.508	356.711	347.494	331.181	307.607	280.182
ELEM NO	11	11	11	11	11	11

-----  
 LAS FUERZAS EN LOS SEGMENTOS DEL PILOTE SON  
 -----

FUERZA MAX EN EL ELEMENTO	DT	FUERZA ULTIMA DE COMP : TN	V(M,2) ULTIMA, MT/SEG	
2	245.72	17.	6.38	-.88
3	306.69	15.	.00	-.61
4	279.28	18.	67.60	-1.44
5	262.98	21.	130.27	-1.59
6	251.88	24.	156.52	-1.39
7	242.80	26.	170.63	-1.42
8	309.61	30.	172.78	-1.34
9	357.49	32.	227.66	-1.00
10	364.66	31.	236.64	-.57
11	379.63	30.	280.18	-.24

FUERZA MIN EN PIL. DE CONCRETO DT = 40	FUERZA ULT DE RESORTE TN	V(M,2) ULTIMO MT/SEG		
2	.00	34.	1.10	-.88
3	.00	40.	.00	-.61
4	.00	2.	75.96	-1.44
5	.00	3.	118.90	-1.59
6	.00	4.	158.19	-1.39
7	.00	5.	166.29	-1.42
8	.00	6.	154.02	-1.34
9	.00	7.	203.32	-1.00
10	.00	8.	218.31	-.57
11	.00	9.	254.04	-.24

FUERZ MIN NEGATIVA = .0000 TN EN ELEMENTO 4 EN ITERACION 1

\*\*\*\* % DE CARGA ULTIMA LLEVADA POR LA PUNTA DEL PILOTE : .900

\*\* DATOS GENERALES DE ENTRADA \*\*

-----

Nº DE SEGMENTOS DEL PILOTE = 8.0 LONGITUD DEL ELEMENTO = 2.000 MT

Nº DE ELEMENTOS INCLINADOS (INCLUYE MARTINETE Y CABEZAL) = 10

MODULO DE ELASTICIDAD DEL PILOTE = 210.9 TN/CM2

PESO/MT DE PILOTE = .3840 TN SECCION DEL PILOTE =1600.000 CM2

PESOS DE LOS ELEMENTOS, TN : MARTINETE = 2.200 CABEZAL = .2500

PESO FINAL DE PUNTA = .7680 PUNTA H. = .0000

ALTURA DE CAIDA = 2.500 MT EFICIENCIA DEL MARTILLO = .75

CONSTANTE DE AMORTIGUAMIENTO LATERAL, SJ= .165 CONSTANTE DE AMORTIGUAMIENTO EN LA PUNTA, PJ= .495

CONSTANTE DE RESORTE TN/CM : RES.CAP.= 150.000 RESOR.CUSHI. = .000

1º SEG DEL PILOTE = 1687.200 2º SEG DEL PILOTE = 1687.200

COEF DE RESTITUCION CAP BLOCK = .500 COEF DE RESTITUCION DEL CUSHION = 1.000

\*\*\*\*\* RESISTENCIA ULTIMA ASUMIDA DEL PILOTE = 340.00 TN

I	RU(I), TN
4	.00
5	5.67
6	5.67
7	5.67
8	5.67
9	5.67
10	5.67
11	306.00

INTERVALO DE TIEMPO = .0003300 SEG

NUMERO DE ITERACIONES = 39 DEMS = .320 CM DESP PROMEDIO = .0814 CM NO DE VALORES USADOS = 3  
#GOLPES/10cms= 122.84

DT =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
DESP =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
D =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
F =	.000	.000	5.067	36.946	90.513	134.112	141.908	123.223	139.766	144.071	197.497
ELEM NO	11	11	4	4	4	4	4	4	5	4	4
DT =	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
DESP =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
D =	.00002	.00011	.00047	.00158	.00449	.01085	.02282	.04228	.06957	.10240	.13619
F =	236.300	235.902	211.825	233.630	231.886	264.042	279.596	259.149	255.940	263.078	249.090
ELEM NO	4	4	4	5	5	4	4	4	5	5	5
DT =	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
DESP =	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00841	.02307	.03722
D =	.16634	.19082	.21085	.22937	.24888	.27007	.29171	.31168	.32841	.34307	.35722
F =	249.917	251.828	262.207	287.406	319.737	343.537	369.469	387.304	382.828	373.252	370.968
ELEM NO	6	6	11	10	10	10	11	11	11	11	11

DT =	34	35	36	37	38	39
DESP =	.05104	.06397	.07479	.08180	.08344	.07897
D =	.37104	.38397	.39479	.40180	.40344	.39897
F =	369.443	365.348	355.654	338.187	313.517	285.480
ELEM NO	11	11	11	11	11	11

-----  
 LAS FUERZAS EN LOS SEGMENTOS DEL PILOTE SON  
 -----

FUERZA MAX EN EL ELEMENTO	DT	FUERZA ULTIMA DE COMP : TN	V(M,2) ULTIMA, MT/SEG	
2	245.78	17.	5.16	-.90
3	306.77	15.	.00	-.58
4	279.60	18.	68.38	-1.54
5	263.08	21.	130.96	-1.66
6	251.83	24.	160.00	-1.45
7	243.82	27.	178.88	-1.50
8	313.16	30.	183.30	-1.44
9	359.62	32.	235.72	-1.10
10	369.67	32.	244.21	-.65
11	387.30	30.	285.48	-.31

FUERZA MIN EN PIL. DE CONCRETO DT = 40	FUERZA ULT DE RESORTE TN	V(M,2) ULTIMO MT/SEG
--	--------------------------	----------------------

2	.00	40.	.00	-.90
3	.00	40.	.00	-.58
4	.00	2.	75.41	-1.54
5	.00	3.	118.88	-1.66
6	.00	4.	162.77	-1.45
7	.00	5.	175.98	-1.50
8	.00	6.	163.94	-1.44
9	.00	7.	210.76	-1.10
10	.00	8.	225.35	-.65
11	.00	9.	259.16	-.31

FUERZ MIN NEGATIVA = .0000 TN EN ELEMENTO 4 EN ITERACION 1



DT =	34	35	36	37	38
DESP =	.02812	.03815	.04624	.05056	.04954
D =	.34812	.35815	.36624	.37056	.36954
F =	375.513	372.760	363.314	344.968	319.065
ELEM NO	11	11	11	11	11

-----  
 LAS FUERZAS EN LOS SEGMENTOS DEL PILOTE SON  
 -----

FUERZA MAX EN EL ELEMENTO		DT	FUERZA ULTIMA DE COMP : TN	V(M,2) ULTIMA, MT/SEG
2	245.84	17.	9.24	-.91
3	306.85	15.	.00	-.62
4	279.91	18.	62.67	-1.33
5	263.18	21.	136.84	-1.45
6	251.78	24.	156.92	-1.34
7	245.37	27.	182.66	-1.44
8	316.26	30.	221.93	-1.48
9	361.02	32.	259.57	-.95
10	375.06	33.	276.28	-.67
11	393.32	31.	319.06	-.21

FUERZA MIN EN PIL. DE CONCRETO DT = 39		FUERZA ULT DE RESORTE TN	V(M,2) ULTIMO MT/SEG	
2	.00	33.	3.47	-.91
3	.00	39.	.00	-.62
4	.00	2.	68.89	-1.33
5	.00	3.	131.18	-1.45
6	.00	4.	162.29	-1.34
7	.00	5.	184.80	-1.44
8	.00	6.	192.59	-1.48
9	.00	7.	243.81	-.95
10	.00	8.	250.79	-.67
11	.00	9.	290.17	-.21

FUERZ MIN NEGATIVA = .0000 TN EN ELEMENTO 4 EN ITERACION 1

**CAPITULO VII**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **CAPITULO VII**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Se ha efectuado el cálculo de la capacidad estática de carga y capacidad dinámica de carga de una unidad de cimentación estándar ubicada en el Muelle SiderPeru Chimbote, los resultados encontrados después de aplicar las diversas formulaciones que los investigadores de la Ingeniería de Cimentaciones en el mundo han propuesto en los últimos años (muchas de estas fórmulas relacionadas a numerosas pruebas de carga y expuestas en Congresos y publicaciones) y merecen las siguientes conclusiones:

#### **1. - Cálculo de la Capacidad Estática de Carga**

##### **1.1. Capacidad de Carga por Punta**

Los métodos propuestos por Meyerhof, Vesic y Bowles, son de mayor confiabilidad ya que están sustentados por pruebas de carga y consideran parámetros importantes tales como la variación limitada de los factores de capacidad de carga con la profundidad o el número de golpes que provee el Ensayo SPT (por mencionar solo dos puntos) y que no son tomados en cuenta por otras relaciones propuestas.

La capacidad estática por punta calculada para el presente proyecto es de 57 Ton.

##### **1.2. - Capacidad de Carga por Fricción**

Para el caso propuesto del Muelle SiderPeru en Chimbote, el aporte de la capacidad de carga por fricción que soporta el pilote es de 15 Ton, creemos que las relaciones propuestas en la presente tesis son las más adecuadas, por estar sustentadas también en innumerables pruebas de carga.

La capacidad de carga estática total para el presente proyecto es de 72 Ton.

#### **2.- Capacidad Dinámica de Carga de la Unidad de Cimentación**

En cuanto a la capacidad dinámica de carga esta se ha calculado por dos métodos:

### **2.1. Capacidad Dinámica de carga por medio de la fórmula de los martillos Delmag.**

La propuesta de la firma Delmag esta basada en un principio físico: Cantidad de Movimiento.

La obtención de la fórmula de los martillos Delmag parte del supuesto que un elemento rígido (el pistón) golpee a otro elemento rígido (el pilote), esto No es cierto puesto que el pilote es un elemento flexible.

Por tal motivo no podemos considerar a la fórmula propuesta por los martillos Delmag como una relación válida para el cálculo de la capacidad dinámica de carga.

Creemos que es en ese punto donde se ha producido el mayor error para el cálculo de la capacidad dinámica de carga ya que durante años se ha estado aplicando esta relación de forma sistemática y todo cálculo de ingeniería de cimentaciones profundas en nuestro país ha estado basado en esta fórmula o en cualquier otra fórmula dinámica de las que existen y se manejan en los códigos de construcción, sin embargo todas estas, lo reiteramos, no efectan una interpretación correcta del impacto del pistón en el pilote.

Sin embargo se ha procedido a efectuar el cálculo de la capacidad dinámica de carga vs el número de golpes por cada diez centímetros de rechazo, en el caso de nuestro estudio de la unidad de cimentación del Muelle SiderPeru, la curva del rechazo está graficada por encima de la curva del análisis de la ecuación de onda, esto puede resultar lo inverso para otro caso.

Para nuestro estudio la curva de rechazo vs capacidad de carga llega a ser asintótica en 330 Ton, si consideramos un factor de seguridad:  $FS = 3.0$ , podemos tener una capacidad dinámica de carga por medio de la fórmula Delmag de 110 Ton.

## **2.2. - Capacidad Dinámica de Carga por medio del análisis de una ecuación de onda de esfuerzos inducidos.**

Este análisis del impacto del pistón en el cabezal del pilote es mucho más realista y mucho más confiable.

La ingeniería de cimentaciones profundas en el Perú debería apuntar a la utilización de este análisis; existe mucha resistencia aún debido no a un rechazo del fundamento que sustenta el análisis sino que para poder efectuarlo se requiere herramientas de cálculo basadas en el método de elementos finitos que hace poco accesible a la gran mayoría de ingenieros.

Esto se ha venido superando con la creación de programas interactivos de análisis y la utilización de gráficos basados en el método que hacen mucho más fácil su manejo.

La tendencia actual es que dentro de algunos años la determinación de la capacidad dinámica de carga se efectuará con el método de la onda de esfuerzos inducidos, dejando de lado las fórmulas dinámicas clásicas.

Para nuestro estudio la curva de rechazo vs capacidad dinámica de carga llega a ser asintótica a 270 Ton, si consideramos un factor de seguridad  $FS = 3.0$ , podemos decir que tenemos una capacidad dinámica de carga por medio del análisis de la onda de esfuerzos inducida de 90 Ton.

Concluimos por los motivos expuestos, que la forma más confiable para el cálculo de la capacidad dinámica de carga es el método de análisis de la ecuación de onda de esfuerzos y cuyo resultado es de 90 Ton.

## **3. - Correlación entre el cálculo de la capacidad estática de carga y la capacidad dinámica de carga.**

Se está demostrando en la presente tesis que el cálculo de la capacidad estática de carga no puede estar desligado del cálculo de la capacidad dinámica de carga, tal como se ha venido realizando en los proyectos de ingeniería, en los cuales la capacidad dinámica de carga se verificaba con la

"prueba de hinca" y luego si el presupuesto de obra o proyecto lo permitía, con una prueba de carga.

Este procedimiento no debería mantener un divorcio entre ambos métodos, es decir efectuando el cálculo estático sólo a nivel de proyecto y el dinámico durante la obra, ya que estamos demostrando que es muy sencillo efectuar ambos cálculos a nivel de proyecto de ingeniería.

Para nuestro proyecto si efectuamos la correlación entre la capacidad estática de carga donde tenemos un valor de 72 Ton y la capacidad dinámica de carga donde tenemos un valor de 90 Ton, observamos que no existe mayor diferencia en los valores proporcionados por ambos métodos.

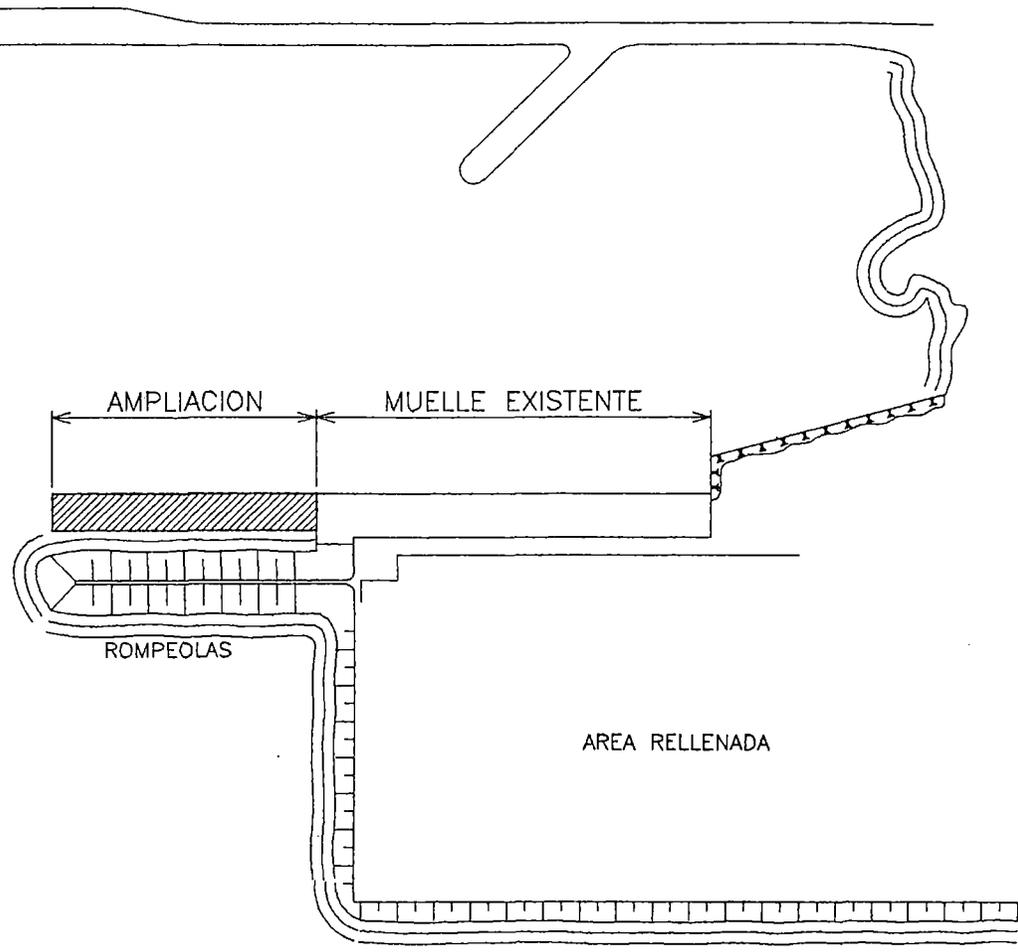
Efectuando un correcto análisis tanto estático como dinámico aún en condiciones de distintos estratos o múltiples variables, deberíamos llegar a resultados que cada vez tiendan a ser más realistas y se acerquen al verdadero comportamiento de la unidad de cimentación estándar.

Estas son las principales conclusiones que aporta la presente tesis a la ingeniería de cimentaciones profundas:

- a) Es perfectamente posible efectuar un análisis estático y dinámico en la etapa de proyecto de ingeniería.
- b) Se deben descartar las fórmulas dinámicas que inducen a un error permanente. Su fácil aplicación no significa el camino correcto.
- c) Se debe en definitiva calcular la capacidad dinámica de carga de una unidad de cimentación profunda considerando como válido el análisis de una onda de esfuerzos inducidos.
- d) La correlación entre los valores obtenidos por el análisis estático y dinámico debe ser efectuado en el

proceso de proyecto de ingeniería y es ahí donde mejor podremos detectar errores, ya sea en el cálculo estático o dinámico

- e) Con el apoyo de herramientas tan importantes como la computadora, ahora es mucho más fácil para el Ingeniero Civil efectuar el análisis dinámico, y por lo tanto ver la posibilidad de introducir este aporte en el Reglamento Nacional de Construcciones y en la Norma Peruana de Cimentaciones.



UBICACION GENERAL



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

PROYECTO: <b>AMPLIACION DE MUELLE SIDER PERU</b>		LAMINA: <b>A-01</b>
PLANO: <b>PLANO DE UBICACION</b>	REV.: JORGE MIRANDA SANCHEZ 821301E	FECHA: FEB. 98
	ESCALA: 1/500	

**REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

**BIBLIOGRAFIA**

- Robert D. Chellis  
Cimentaciones Profundas  
Editorial Diana, México
  
- F.B.Hildebrand  
Métodos de Aplicación Matemática  
Prentice - Hall, 1952
  
- E.A.L. Smith  
Impact and Longitudinal Wave Transmission  
ASME, 1955
  
- Macari Bros. Const. Co  
Chf.Engr.And Couneel  
Windsor, Connecticut
  
- Harward University  
Soil Mechanics  
Cambridge, Massachusetts
  
- J. Lowe and E. Jones  
Capacity of Driven Piles Computed by Stress Waves.  
ASCE, 1980
  
- D.M. Holloway, J.M.Eaudibert and A.R. Dover  
Recent Advances in predicting Pile Driveability.  
OFFSHORE 1978
  
- Peck, Henson y Thornborn  
Ingeniería de Cimentaciones  
Limusa, 1982

- Fuentes Ortíz, César  
Estructuras Especiales (Apuntes de clase)  
Universidad Nacional de Ingeniería.
  
- Agüero Martínez, Domingo  
Estudio del Comportamiento Dinámico del Hincado de  
Pilotes por medio de la Ecuación de Onda. Universidad  
Nacional de Ingeniería