



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TRABAJO DE GRADO
Previo a la obtención del título de:
INGENIERO CIVIL

TEMA:

**"INVESTIGACIÓN DE LOS EFECTOS DE ESBELTEZ EN PILOTES LARGOS
HINCADOS EN SUELOS BLANDOS POTENTES CON MOVIMIENTO DIFERENCIAL
DE CAMPO LIBRE".**

AUTOR:

José Miguel Torres González

DIRECTOR DE GRADO:

Dr. Msc. Jaime Argudo

GUAYAQUIL – ECUADOR

2011.

TRABAJO DE GRADO

TEMA:

"INVESTIGACIÓN DE LOS EFECTOS DE ESBELTEZ EN PILOTES LARGOS HINCADOS EN SUELOS BLANDOS POTENTES CON MOVIMIENTO DIFERENCIAL DE CAMPO LIBRE".

Presentado a la Facultad de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil

REALIZADO POR:

JOSÉ MIGUEL TORRES GONZÁLEZ

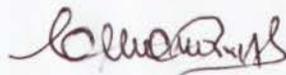
Para dar cumplimiento con uno de los requisitos para optar por el título de:

INGENIERO CIVIL

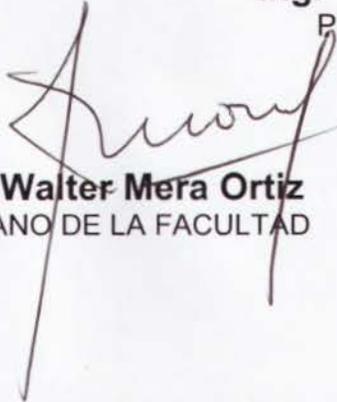
Tribunal de sustentación:



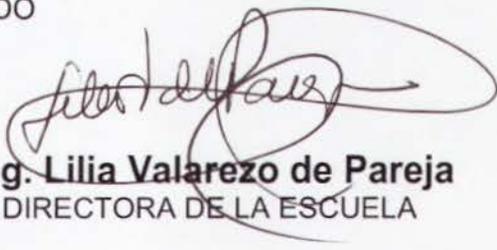
Ing. Jaime Argudo Rodríguez
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Claudio Luque Rivas
PROFESOR INVITADO



Ing. Walter Mera Ortiz
DECANO DE LA FACULTAD



Ing. Lilia Valarezo de Pareja
DIRECTORA DE LA ESCUELA



ÍNDICE

CAPÍTULO I

I.- INTRODUCCION.

1.1 ANTECEDENTES	.....	2
1.2 OBJETIVOS	.....	2
1.3 METODOLOGÍA	.....	3
1.4 ALCANCE	.....	4

CAPÍTULO II

II.- CARGA LATERAL SOBRE UN PILOTE INDIVIDUAL.

2.1 DEFINICIÓN DE CARGA LATERAL	.....	6
2.2 CONDICIÓN DE EMPOTRAMIENTO DEL PILOTE	.....	9
2.2.1 Cabeza empotrada del pilote	.....	9
2.2.2 Cabeza libre del pilote	.....	9
2.3 RELACIÓN ENTRE LA LONGITUD Y LA SECCION DEL PILOTE.	.....	10
2.3.1 Relación experimental	.....	10
2.3.2 Factores de rigidez y módulo de suelo	.....	11



CAPÍTULO III

III.- MECANISMOS DE FALLA DE UN PILOTE INDIVIDUAL.

3.1 FALLAS FRÁGILES	.....	14
3.1.1 Capacidad portante del suelo.	.....	14
3.1.2 Fallas frágiles del pilote.	.....	15
3.2 FALLAS DÚCTILES	.....	17
3.2.1 Pilotes de Cabeza Libre.	.....	17
3.2.2 Pilotes de Cabeza Empotrada.	.....	18

CAPÍTULO IV

IV.- EFECTOS DE ESBELTEZ.

4.1 DEFINICIÓN ACERCA DE LOS EFECTOS DE ESBELTEZ	.....	21
4.2 LONGITUD EFECTIVA DE PANDEO Y RELACIÓN DE ESBELTEZ	.....	22



CAPÍTULO V

V.- ANÁLISIS SUELO-PILOTE.

5.1 MODELOS PROPUESTOS	25
5.1.1 Modelo geotécnico propuesto	25
5.1.2 Modelo estructural propuesto	26
5.2 MÉTODOS DE ANÁLISIS	28
5.2.1 Método de Evans y Duncan	29
5.2.2 Software LPILE V. 6.0	31

CAPÍTULO VI

VI.- RESULTADOS DEL ANÁLISIS.

6.1 CASOS PROPUESTOS	34
6.2 CONSIDERACIONES ESPECIALES	35
6.3 TABLA DE RESULTADOS	37

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN



1.1 Antecedentes:

En los suelos de algunos sectores de la ciudad de Guayaquil se puede encontrar estratos de suelo blando de gran potencia (refiérase a espesores mayores a 25 metros) que al ser sometidos a la acción de movimientos sísmicos funcionan como una gran estructura en oscilación con respecto al estrato inferior cuya consistencia es generalmente mucho mayor y proporciona un basamento de escasa deformación lateral comparado con las deformaciones laterales experimentadas en campo libre por el estrato de suelo blando.

Concurrentemente, los pilotes de una cimentación profunda generalmente se diseñan empotrados en el suelo resistente o portante de las cargas de gravedad transmitidas en la punta, bajo los suelos blandos y deben por tanto acomodar los desplazamientos laterales experimentados por los suelos blandos por la acción del sismo a lo largo del fuste de los pilotes.

Los análisis de interacción suelo-estructura generalmente consideran los efectos de las cargas sísmicas de la superestructura sobre el sistema en interacción suelo-pilote, pero pueden omitir los efectos de las deformaciones propias del suelo blando en campo libre que los pilotes deben acomodar. Es posible que cuando los suelos blandos son muy potentes, el diseño estructural de los pilotes resulte gobernado por los efectos derivados de su esbeltez y estabilidad frente a deformaciones laterales grandes.

1.2 Objetivos:

- Investigar los efectos de esbeltez en los pilotes individuales hincados en estratos de suelos blandos potentes con movimientos diferenciales de campo libre relativo al empotramiento de la punta del pilote.



- Investigar la reducción de la capacidad de carga estructural por los efectos de esbeltez.
- En cuanto al mecanismo de falla, se busca un comportamiento dúctil gobernado por la plasticidad del pilote.

1.3 Metodología

Se cumplirán los siguientes procedimientos:

- Caracterización estratigráfica simplificada de suelos blandos potentes en la ciudad de Guayaquil.
- Análisis de las deformaciones laterales del pilote individual considerando los movimientos de campo libre de los suelos blandos.(LPILE v6)
- Dimensiones y capacidad estructural del pilote considerando efectos de esbeltez.
- Análisis de las deformaciones laterales del pilote considerando, los movimientos de campo libre de los suelos blandos y la carga lateral aplicada.
- Comparación de resultados usando métodos convencionales para dimensionamiento de pilotes sometidos a carga lateral utilizando modelos de interacción suelo-pilote sin/con consideración de efectos de esbeltez.
- Comparación de resultados obtenidos con y sin la consideración de los efectos introducidos por los movimientos relativos entre el campo libre del suelo y su basamento.



1.4 Alcance

La investigación se realizará usando estratigrafías típicas y simplificadas de los suelos de Guayaquil, mas los resultados obtenidos podrán ser generalizados a suelos similares en cualquier otro sitio.

Además se asumirá que:

- La capacidad de carga del pilote gobernada por la capacidad del suelo será mayor a las solicitaciones aplicadas a la cimentación.
- El cortante aplicado al pilote no gobernará como mecanismo de falla del pilote, se considerará que el material (hormigón) con su acero de refuerzo por corte es adecuado para no producir fallo por cortante.
- El método convencional para determinar esfuerzos y deformaciones en el análisis del pilote sometido a carga lateral, será el de Evans y Duncan.
- La longitud de empotramiento en el estrato denso será tal que se evitara falla por estabilidad, derivada de una insuficiente longitud de empotramiento de la punta del pilote en el estrato denso.
- Los efectos del izado del pilote no gobiernan el diseño del pilote, ya que de ser requerido se usaran empalmes.
- El punto de unión o acople de los empalmes en los tramos de pilote será considerada como una conexión más resistente (a corte y flexión, tracción y compresión axial) que el mismo pilote.
- Los desplazamientos máximos de origen sísmico del suelo blando con respecto al basamento será producto de un análisis simplificado que idealiza al suelo blando como un oscilador elástico de un grado de libertad y permite estimar los desplazamientos del suelo en campo libre dentro del orden de 10 y 20 cms., siendo:

$$Sd = \frac{Sa \cdot T^2}{(2\pi)^2}$$

Sd: Desplazamiento máximo del suelo

Sa: Desplazamiento máximo del suelo en campo libre (0.25g – 0.30g).



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA - CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CAPÍTULO II

CARGA LATERAL SOBRE UN PILOTE INDIVIDUAL



2.1 Definición de carga lateral.

Las estructuras cimentadas sobre pilotes generalmente a más de las cargas verticales producidas por las cargas gravitacionales de la estructura, están sujetas a momentos y fuerzas laterales (cortantes).

El cortante lateral sobre pilotes puede ser originado por acción de cargas de viento, del tráfico, mar, presión de la tierra, sismos, sobre la estructura y la cimentación. Los momentos flectores en los pilotes pueden originarse por la excentricidad de las cargas verticales, la condición de empotramiento del pilote en la cimentación de la estructura, el momento de volteo resultante de las cargas laterales en relación a la rigidez del empotramiento de la punta provista por el estado portante y la resistencia lateral del suelo.

Cuando un pilote está sujeto a cargas laterales y momentos flectores, esta estructura tenderá a flectarse como se muestra en la figura #1.

La deflexión del pilote causa deformaciones en la masa de suelo y para generar equilibrio el suelo debe generar reacciones a lo largo de la longitud del pilote para balancear las cargas y momentos aplicados.

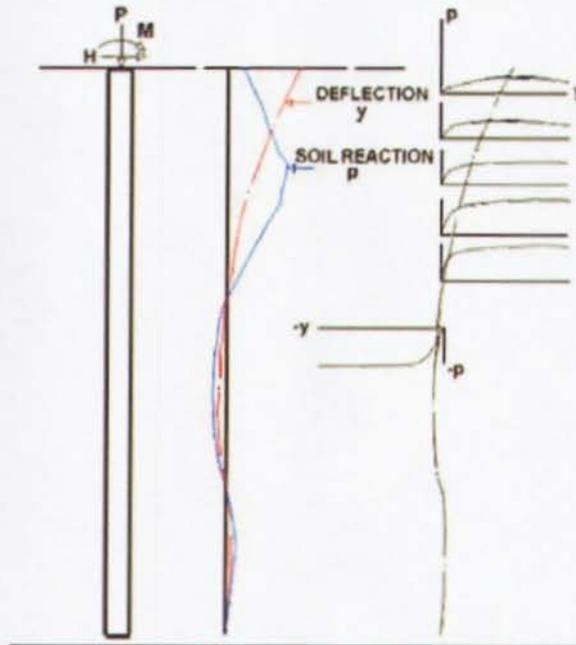


Figura #1: Reacción del suelo sometido a Cargas y Momentos.
Ref.: "Pile Foundations Under Lateral Loads".

Por motivos de la no-linealidad del suelo en cuanto a parámetros mecánicos, la reacción del suelo no será lineal con relación a la deflexión del pilote; por ende a cada punto a lo largo de la longitud del pilote existe una relación no lineal entre la reacción o presión que ejerce el suelo sobre el frente del pilote (p) y la deflexión del pilote (y), como se muestra en la figura #1.

En el diseño de pilotes sometidos a cargas laterales, se necesita saber la deflexión del pilote, particularmente en la cabeza del mismo, para **satisfacer requerimientos de serviciabilidad y estabilidad** frente a los efectos del segundo orden, así mismo es importante conocer los momentos flectores y esfuerzos cortantes correspondientes al ϕV_c para el dimensionamiento en la geometría del pilote.



El desplazamiento en la cabeza del pilote está en función de:

- Tipo de suelo.
- Posición del pilote. (pilotes inclinados)
- Rigidez del pilote
- Condiciones de Carga
- Condiciones de empotramiento pilote-estructura y pilote suelo en la punta.
- Desplazamiento de la masa de suelo a lo largo del frente del pilote

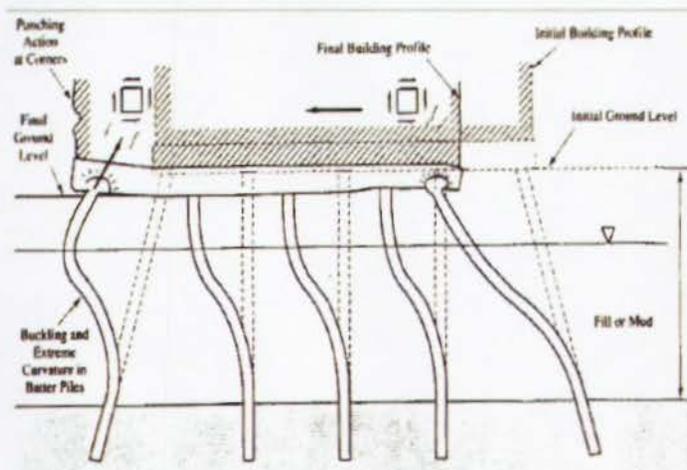


Figura #2: Desplazamiento diferencial de campo libre en la cabeza del pilote.
Ref.: Coduto "Deep Foundations", Capítulo N° 16, Figura 3.

La flexibilidad de un pilote con cabeza libre es mayor que la de un pilote restringido por lo que es aún más necesario en el primer caso evaluar los desplazamientos laterales de la cabeza con el fin de satisfacer los requerimientos expuestos anteriormente.



2.2 Condición de empotramiento del pilote.

2.2.1 Cabeza empotrada del pilote.

Un pilote cuya conexión con la superestructura no permite la rotación en su cabeza se la denomina condición de **cabeza empotrada**.

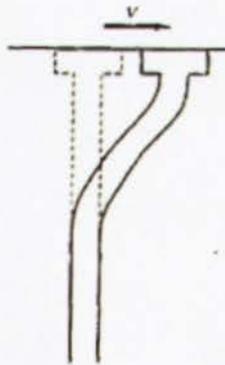


Figura #3: Cabeza empotrada de un pilote.

Esta condición genera un momento flector en la cabeza del pilote que en situaciones estáticas o dinámicas resulta ser máximo a lo largo del fuste del pilote. En un análisis de segundo orden el momento máximo no siempre se encuentra en la cabeza del pilote, por eso es que es muy importante un correcto análisis de esfuerzos y momentos flectores a lo largo del pilote.

2.2.2 Cabeza libre del pilote.

Por otro lado si la conexión del pilote con la superestructura no se le restringe la rotación a la cabeza del mismo a esta condición se la denomina condición de **cabeza libre**.

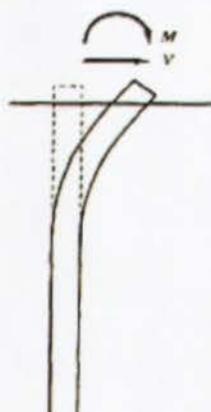


Figura #4: Cabeza libre de un pilote.

Esta condición es la más desfavorable ya que soporta la cuarta parte de la carga axial que soporta la condición empotrada y por ende presenta menor resistencia al desplazamiento lateral.

2.3 Relación entre la longitud y la sección del pilote.

El primer paso para determinar el comportamiento estructural de un pilote individual en interacción con los estratos de suelo propuestos en el modelo geotécnico, es el de identificarlo ya sea como una unidad corta y rígida o como una unidad larga y flexible.

2.3.1 Relación Experimental.

Un pilote para ser considerado como largo, su relación Longitud/diámetro de la sección, debe ser como mínimo entre 30 – 35 veces, si el pilote es hincado en dentro de suelo blando y si se usan pilotes de rigidez considerable como la del hormigón.

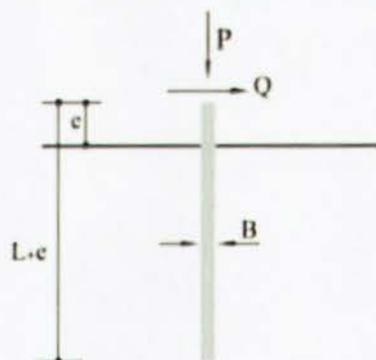


Figura #5: Longitud total de un pilote hincado.

Esto quiere decir que a esa distancia el pilote no sufrirá deformación alguna producto de las cargas externas aplicadas en la cabeza del pilote en condiciones estáticas.

2.3.2 Factores de rigidez y Modulo del suelo.

Esto se hará mediante el cálculo de los factores R y T para el pilote y el modelo geotécnico propuesto. El factor R está gobernado básicamente por la rigidez del pilote y la compresibilidad del suelo.

$$\text{stiffness factor } R = \sqrt[4]{\frac{EI}{kB}} \text{ (in units of length)} \quad (\text{Ec. 2-1})$$

El factor T esta expresado en términos de "modulo de suelo", que no es constante para cualquier tipo de suelo y depende del ancho del pilote y la profundidad del área del suelo afectada por la carga.

$$\text{stiffness factor } T = \sqrt[3]{\frac{EI}{n_h}} \text{ (in units of length)} \quad (\text{Ec. 2-2})$$



Para suelos arcillosos normalmente consolidados y suelos granulares el "modulo de suelo K" se incrementa linealmente de acuerdo a la profundidad.

where soil modulus $K = n_h \times x / B'$ (Ec. 2-3)

Según los parámetros geotécnicos propuestos en este modelo, se considerara una arcilla normalmente consolidada, cuyo valor n_h (coeficiente de variación de modulo) oscila para unos autores entre: 350 y 700 KN/m³. (35 – 70 T/m³) y para otros un promedio de 0.14 Kg/cm² (4 – 8 T/ft³).

*Formulas y valores tomados de "Pile Foundations Under Lateral Loads", Capítulo N°6.

En este caso se usara un $n_h = 0.10$ Kg/cm².

Tipo de pilote	Factor R	Factor T
Corto	L<2R	L<2T
Largo	L>3.5R	L>4T

Según lo formulado:

Pilotes de 30 m. de Largo (3000 cm)				
Sección	f'c (Kg/cm ²)	factor "T"	factor "R"	Consideración
40x40	280	221.69	115.59	Largo
40x40	420	230.86	121.59	Largo
60x60	280	306.63	173.38	Largo
60x60	420	319.32	182.39	Largo

Inercia 40	Inercia 60	E 280	E 420	n_h
213333.3	1080000.0	250998.0	307408.5	0.1



Para el caso propuesto el tipo de pilote siempre será largo y esbelto; y se buscará un comportamiento dúctil gobernado por la capacidad de flexión del pilote.



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA - CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CAPÍTULO III

MECANISMOS DE FALLA DE UN PILOTE INDIVIDUAL



La resistencia última de un pilote vertical con una carga lateral aplicada y su máximo desplazamiento en la cabeza del pilote son relaciones muy complicadas que involucran la interacción entre un elemento estructural semi-rígido y el suelo (interacción suelo-pilote), cuyas deformaciones en parte recaen en el campo elástico y parte en el campo plástico.

3.1 Fallas Frágiles.

3.1.1 Capacidad Portante del Suelo.

Tomando el caso de un **pilote individual empotrado en la cabeza, corto y rígido**, la carga lateral aplicada a la misma inicialmente es tomada por la masa de suelo cercana a la superficie. Sometido a una baja carga lateral el suelo se comprime elásticamente pero el desplazamiento es suficiente para transferir algo de presión desde el pilote al suelo más profundo. A mayor magnitud de carga lateral el suelo cede plásticamente y así mismo transfiere sus cargas más profundamente, es así como el suelo falla progresivamente y se produce el traslado del pilote y la estructura soportada.

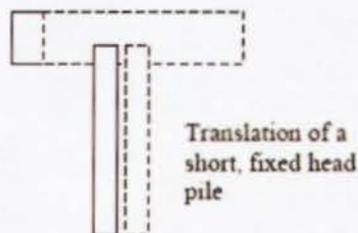


Figura #6: Falla del suelo; Pilote corto y rígido; Cabeza empotrada.



Un pilote corto y rígido de cabeza libre sometido a carga lateral tiende a rotar (pivotea en su base) y se empieza a desarrollar resistencia pasiva en la parte posterior de la punta del mismo y se suma a la ya actuante en la parte superior. Eventualmente este pilote rígido va a tender a fallar por rotación en el momento que se exceda la resistencia pasiva última del suelo en la punta y cabeza del pilote.

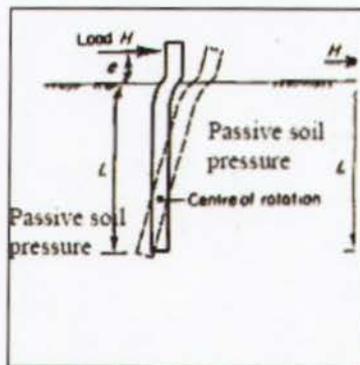


Figura #7: Falla del suelo; Pilote corto y rígido; Cabeza libre.

3.1.2 Fallas frágiles del pilote (estructura-material).

Otras fallas consideradas como frágiles en el pilote, son las producidas por:

a) *Falla por Carga axial excesiva en el pilote:*

El pilote falla por excesiva carga axial aplicada. Falla súbita y muy poco común en pilotes verticales, pero muy común en pilotes inclinados que resultan poco dúctiles, sometidos a cargas laterales que se descomponen en cargas axiales y cortantes muy elevados que hacen fallar al pilote por compresión o tracción.



b) *Falla por Anclaje:*

El pilote falla por excesivos desplazamientos e inestabilidad producto de un mal anclaje ya sea en la punta del pilote o en la cabeza del mismo.

Punta del pilote: Mal anclaje en el suelo.

Cabeza del pilote: Mal anclaje en el hormigón.

c) *Falla por Cortante en el pilote:*

El pilote falla por excesiva carga lateral aplicada, se generan momentos máximos y la sección no puede tomar más esfuerzos de corte. Es una falla súbita, que generalmente controla el diseño cuando el pilote se hince en un suelo que posee una consistencia media a rígida al fuste del pilote y la longitud del pilote es corta.

Es entonces muy importante un buen diseño sísmico que prevea más resistencia al corte que la demandada por un mecanismo de falla dúctil por flexión.

d) *Falla por inestabilidad del pilote.*

Se produce cuando la cabeza del pilote se desplaza excesivamente con respecto al eje de empotramiento de la punta del pilote (ver Figura 2) y la Carga axial aplicada es mayor a la carga crítica de Pandeo (Euler) que se analizará más adelante.

Alternativamente una falla por estabilidad también ocurre cuando el pilote forma un mecanismo de falla completo por flexión (m. dúctil) pero el cortante aplicado supera el cortante de la capacidad resistente haciendo que el pilote se desplace con un mecanismo inestable.



3.2 Fallas Dúctiles.

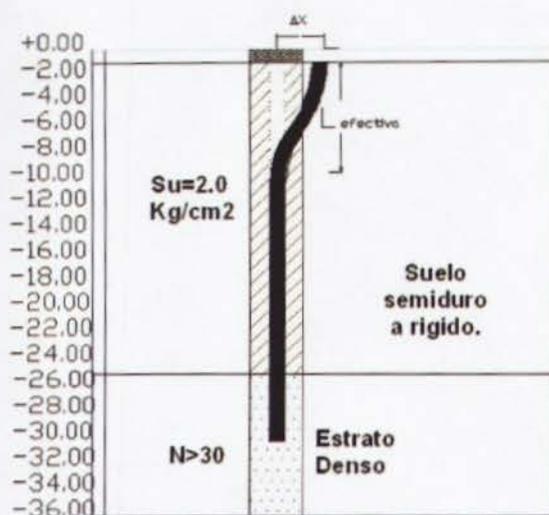
El mecanismo de falla se presenta cuando se previenen los mecanismos frágiles y se permite al pilote configurar rotulas plásticas sin que el cortante máximo de la demanda sísmica exceda el cortante resistente máximo de la capacidad por flexión del pilote. Este caso presenta dos subdivisiones, trabajando en suelos circundantes al fuste del pilote con resistencia media a rígida:

3.2.1 Pilotes de Cabeza Libre:

Este caso el **pilote largo de cabeza libre** presenta una longitud efectiva menor a la longitud real del pilote, desplazamientos laterales pequeños y carga lateral no lo suficiente grande para producir falla por cortante en el suelo o en el pilote.

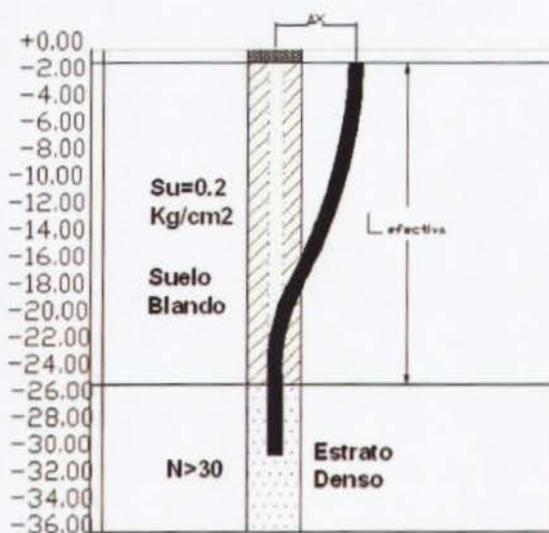
Además se podría decir que la resistencia pasiva de la parte inferior del pilote es infinita y la rotación del pilote no ocurrirá, ya que la parte inferior del pilote se mantendrá vertical mientras que la parte superior se deformara como el de una viga en cantiléver. Una condición desventajosa en los pilotes de cabeza libre es que por sí solos no pueden mantener estabilidad una vez formado una rotula plástica en su base.

La capacidad de un pilote de cabeza libre se obtiene cuando el acero entre en cedencia en el punto donde se genere el máximo momento flector. Como un pilote de cabeza libre se vuelve inestable a partir de la formación de una rotula plástica la "ductilidad" de este tipo de pilotes es limitada y la falla por inestabilidad debe ser controlada permitiendo la formación de rótulas.



Suelo tipo
Pandeo de acuerdo rigidez de suelo circundante.

Figura #8: Falla del pilote: Poca profundidad de empotramiento.



Suelo tipo
Pandeo de acuerdo rigidez de suelo circundante.

Figura #9: Falla del pilote; Gran profundidad de empotramiento.



3.2.2 Pilotes de Cabeza Empotrada:

La longitud efectiva puede presentarse mayor a la longitud real del pilote, presenta desplazamientos laterales considerables, con una carga lateral lo suficiente grande puede producir comportamiento inelástico del suelo e inestabilidad por condición de pandeo y efectos $p-\Delta$.

En el caso de un pilote **largo de cabeza empotrada**, la conexión entre el cuerpo rígido empotrador y el pilote (en la cabeza en sí) se generaran los mayores esfuerzos y momentos flectores pudiendo así fallar en este punto de una manera dúctil y con la formación de rotulas plásticas sin falla por estabilidad dado que la formación de rótulas en la vecindad de la cabeza no causa inestabilidad, mientras no se haya formado un mecanismo completo con rótulas en la zona de la punta.

Los pilotes con cabeza restringida son ideales para condiciones de esbeltez poco convencionales (pilotes largos) y poca rigidez lateral del suelo, ya que pueden desarrollar ductilidad sin pérdida de estabilidad ya que hacen parte de una estructura (cimentación pilote) de tipo hiperestática, a diferencia de los pilotes en cantiliver o de cabeza libre.

En conclusión un pilote largo y esbelto que va a ser diseñado por carga lateral debe satisfacer condiciones de estabilidad, resistencia última de la estructura en si del pilote, condiciones de serviciabilidad o de máximo desplazamiento lateral permitidos para la cabeza del pilote. Generalmente esta última condición es la que prima en el diseño.



4.1 Definición acerca de los efectos de esbeltez.

Se entiende por efectos de esbeltez la reducción de resistencia de un elemento sujeto a compresión axial o a flexo-compresión, debida a que la longitud en este caso la de un pilote es grande en comparación con las dimensiones de su sección transversal.

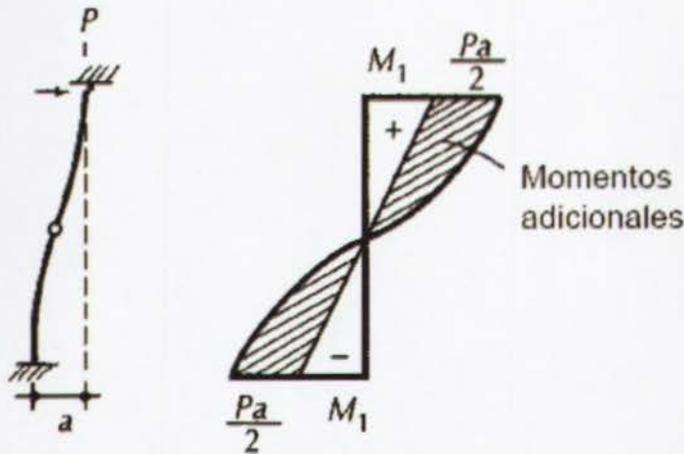


Figura #10: Desplazamiento lateral en la cabeza del pilote.

Ref.: Cuevas, "Aspectos fundamentales del concreto reforzado", Capítulo N° 13.

El pilote al estar sujeto a un movimiento diferencial de campo libre con respecto a su punta, aumenta la distancia del eje de acción de las cargas gravitacionales con respecto al eje del pilote y se producen momentos flexionantes adicionales de segundo orden que se suman a los ya producidos por el empotramiento.



Los momentos de segundo orden son momentos adicionales que producen sobre el pilote, como elemento estructural, una reducción de capacidad de carga axial de la sección, a esta reducción se conoce como efecto de esbeltez.

Si se **asemeja** el comportamiento estructural de un pilote individual hincado en suelo blando al de una **columna**, este efecto de esbeltez y por ende reducción de la capacidad de carga axial, se la puede representar de manera grafica tal como se presenta en la Fig. 11.

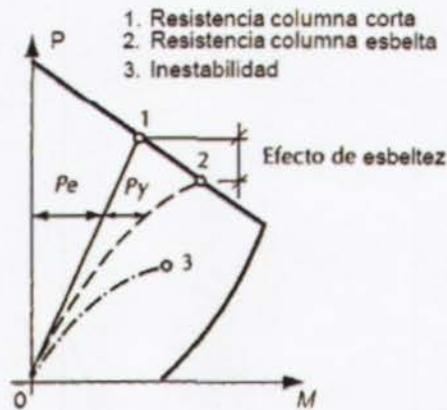


Figura #11: Efectos de esbeltez: Diagrama de interacción de una columna.

4.2 Longitud efectiva de pandeo y relación de esbeltez

La longitud efectiva de pandeo klu es igual a la longitud real de la columna multiplicada por un factor "k" que está en función de las rigideces presentes tanto en la cabeza como la punta del pilote.

Para los casos de cabeza libre en el pilote con movimiento lateral permitido "k" igual a 2; mientras que el caso de un pilote con cabeza empotrada "k" será igual a 1.



La esbeltez del pilote se determinara de forma cuantitativa con el parámetro llamado relación de esbeltez, que es cociente de la longitud efectiva de pandeo entre el radio de giro de la sección transversal del pilote.

Entonces:

Relación de esbeltez = kl_u/r ;	(Ec. 4-1)
--	-----------

"r" es igual a $(I/A)^{0.5}$;	(Ec. 4-2)
--------------------------------	-----------

Si la relación de esbeltez calculada es mayor a 22 (según ACI 318-08) se toman en cuenta los efectos de esbeltez en el pilote y la carga ultima vertical que gobierna es la denominada como "Carga critica de Euler"

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{(kl_u)^2} \quad (\text{Ec. 4-3})$$

Es entonces que la carga crítica de pandeo de Euler puede ser la mayor carga vertical que puede soportar un pilote vertical antes de colapsar por un desplazamiento lateral crítico sin perder estabilidad.



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA - CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CAPÍTULO V

ANÁLISIS SUELO-PILOTE

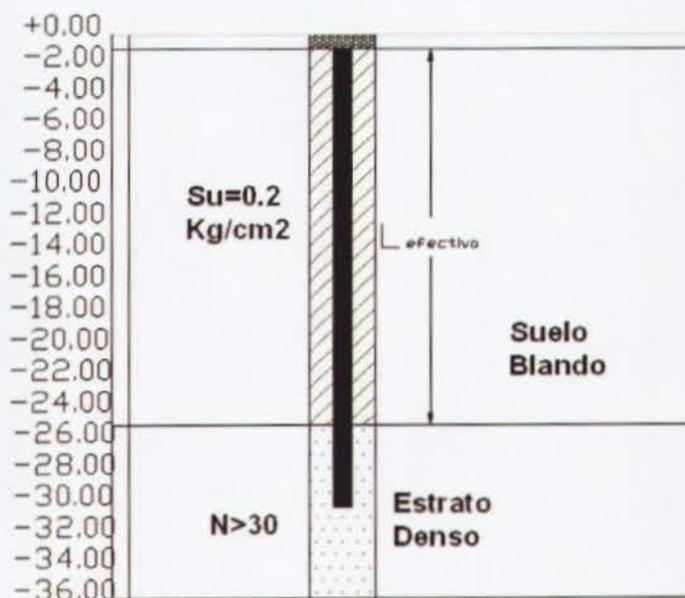


5.1 Modelos propuestos.

5.1.1 Modelo geotécnico propuesto.

El modelo geotécnico propuesto presenta un suelo blando de 25 m. de potencia, resistencia al esfuerzo cortante promedio de 0.2 Kg/cm² y un estrato denso de un número de golpes N_{spt} > 30 en su basamento.

Este suelo blando al momento de estar sometido a la acción dinámica de un sismo producirá la excitación del mismo generando desplazamientos diferenciales con respecto a su basamento. Este comportamiento se lo asemeja al de una estructura de un grado de libertad.



Suelo tipo:
Estrato Blando potente

Figura #11: Modelo geotécnico propuesto.



El suelo blando al comportarse como una estructura en movimiento se producen desplazamientos diferenciales con respecto al empotramiento de la punta del pilote, teniendo el pilote que acomodar estos desplazamientos a lo largo de su estructura.

Estos desplazamientos no son los únicos efectos externos que actúan sobre la estructura del pilote, también existen los esfuerzos cortantes de la superestructura que a su vez afectan a la cabeza del pilote generando principal interés en los criterios de máxima deflexión permisible o serviciabilidad.

5.1.2 Modelo estructural propuesto.

Se harán análisis a pilotes individuales cuadrados con diferentes parámetros en cuanto a sus dimensiones y propiedades estructurales:

- *Longitud efectiva:* 25 metros
- *Sección transversal:* 40 x 40 cm
60 x 60 cm
- *Resistencia del hormigón:* 280 y 420 Kg/cm².
- *Cuantía de acero entre:* 1 y 3%.
- *Pilotes de Cabeza:* Libre y Empotrada.

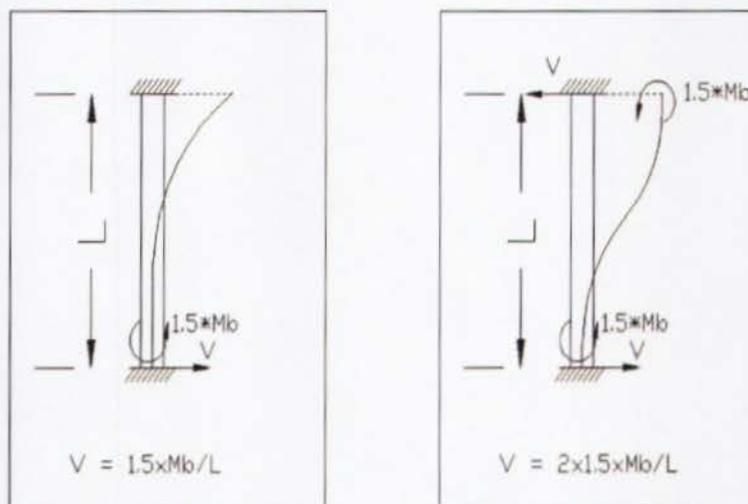


Figura #12: Cortante y Momentos actuantes.

Con una determinada Fuerza axial y Momento flector máximos permisibles para estar dentro de un comportamiento dúctil, se calcula también el Cortante efectivo considerando las condiciones de empotramiento y la sobre resistencia ganada por el acero con un factor de 1.50.

En el cálculo del cortante efectivo V_e (ver Fig. 12) se omite la rigidez y soporte provistas por el suelo a lo largo del fuste, por lo que se espera que el cortante actuante V_u a la formación del mecanismo M_p sea mayor al V_e calculado inicialmente.

Este comportamiento dúctil del pilote será a ductilidad baja cuando la deformación de la cabeza del pilote con relación a su longitud efectiva este en el orden del 1% y se lo considerara a ductilidad alta cuando se encuentre en el orden del 2% de su longitud efectiva.



5.2 Métodos de Análisis.

Los métodos para analizar la capacidad de carga lateral en los pilotes hincados, incluyen métodos tanto analíticos como experimentales con resultados producto de procedimientos que van desde lo sencillo a los más complejo.

Algunos de los objetivos que buscan los métodos de análisis de capacidad de carga lateral en los pilotes son:

- Determinar la profundidad mínima requerida para transferir la carga lateral aplicada al pilote hacia el suelo, cuando la carga lateral es la que controla el diseño; de otro modo la profundidad de empotramiento usualmente es controlada por las consideraciones de la carga axial.
- Determinar la deflexión lateral del pilote sometido a la carga lateral de diseño y compararlos con las deformaciones tolerables para las distintas estructuras a las que se esté cimentando.
- Determinar los esfuerzos cortantes y los momentos a los que esté sometido el pilote. En algunos casos solo se necesita el máximo cortante y máximo momento para el diseño; en otros es necesario un análisis más riguroso de toda la estructura de cimentación en sí, para un diseño más fino.



Teniendo en cuenta algunos de estos objetivos se propone analizar en este trabajo de grado, dos métodos básicamente: Evans y Duncan, que trabajara con una carga axial, momento y cortantes dados siendo este un análisis meramente estático y el análisis por medio del programa LPILE v. 6.0, basándose en una idealización de suelos blandos muy común en la ciudad de Guayaquil, sometidos a desplazamiento lateral producto del movimiento del suelo de cimentación sobre su basamento o estrato resistente y así mismo sometido a carga axial, cortante y momentos flectores.

5.2.1 Método de Evans y Duncan.

Método conveniente para expresar el comportamiento de la deflexión de un pilote bajo cargas laterales.

Expresa el comportamiento del pilote sometido a carga lateral y deflexiones en forma de ábacos y tablas. Ellos compilaron y ordenaron estas graficas de una serie de análisis hechos por computadora del método p-y. (Ver Anexo I; Valores de E_{50})

El método p-y (resistencia del suelo – deflexión del pilote) es conceptualmente similar al método de la viga elástica sobre suelo de cimentación elástico (representado por resortes) con la excepción que la rigidez del suelo representado por el parámetro "k" no es el constante, por lo tanto existe una relación no lineal entre la resistencia del suelo y su desplazamiento (igual a la deflexión del pilote). Este método no toma en cuenta la resistencia al esfuerzo cortante del suelo y su continuidad.



En el método de Evans y Duncan tenemos una serie de ventajas y desventajas que deben ser consideradas al momento de analizar resultados.

Ventajas:

- Análisis manual más rápido.
- La carga que da una determinada deflexión al pilote se la obtiene rápidamente.
- La carga lateral aplicada que da máximo momento al pilote se lo obtiene rápidamente.

Desventajas:

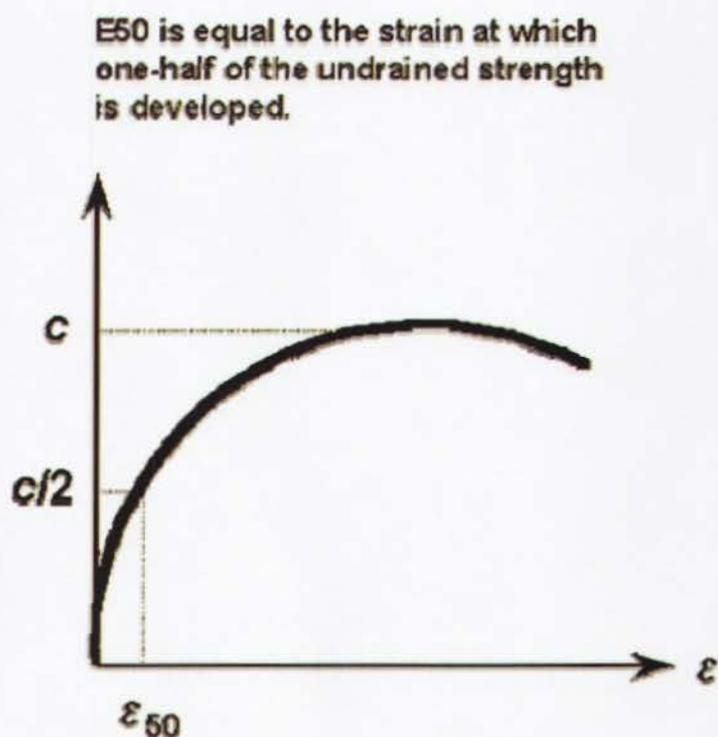
- El constantes. (no admite pilotes de sección variable)
- Parámetros del suelo constantes, un solo estrato.
- Para ser considerado empotrado en el fondo la longitud aproximada del pilote debe de ser mínimo de 35 veces el diámetro.
- No considera las deformaciones del suelo en campo libre, modela al suelo en reposo.

En la sección de anexos se adjuntaran los distintos tipos de tablas y ábacos para el desarrollo de este método, junto con sus formulas, parámetros y criterios de clasificación para el suelo fino que es el suelo tipo a desarrollar en este trabajo de grado (**Anexo I**).



5.2.2 Software LPILE V. 6.0

LPILE es un programa de uso especial basado en procedimientos racionales para analizar un pilote bajo carga lateral utilizando el método p-y. LPILE resuelve las ecuaciones diferenciales viga-columna utilizando transferencia no lineales de carga lateral de las curvas p-y. El programa calcula la deformación, momento flector, fuerza cortante y la respuesta del suelo a lo largo del pilote.



Default Values of E50: LPILE Plus 5.0 will use default values of E50 if the input value is left equal to zero.

The default values are the values shown below:

Consistency Value of c E50 Value

Soft 250 - 500 psf

12 - 24 kPa

Figura #13: Modelo constitutivo del suelo arcilloso blando LPILE v.6.0.



La transferencia de carga lateral no lineal desde la cimentación del suelo se modela utilizando curvas p-y generadas internamente con las recomendaciones publicadas para los distintos tipos de suelos (Ver figura # 13). Alternativamente, el usuario puede introducir manualmente cualquier otro modelo de ley constitutiva esfuerzo-deformación del suelo.

Cinco tipos de condiciones de contorno cabeza del pilote, se puede seleccionar, y las propiedades estructurales de la pila pueden variar en función de la profundidad. En este caso utilizaremos solo dos condiciones de empotramiento: la condición de cabeza empotrada del pilote individual y la de cabeza libre.

Desde el punto de vista estructural el LPILE V. 6.0 brinda las facilidades de introducir las características físicas y mecánicas del pilote. Esto quiere decir que se puede introducir la cantidad de acero estructural que llevara y la resistencia a la cedencia del mismo; la resistencia a la compresión del hormigón, deflexiones máximas tolerables y demás parámetros tanto del pilote como del suelo, que se tomaran en cuenta para entregar resultados coherentes producto de un análisis de interacción suelo-pilote.

Las ventajas que este método presenta en comparación con el de Evans y Duncan servirán para:

1. Comparación de resultados del análisis de Duncan para cortante de la superestructura con deformación de campo libre igual a 0.
2. Modelamiento de la deformación de campo libre respecto al basamento distinta de 0, valores típicos entre 10 y 20 cm.



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA - CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CAPÍTULO VI

RESULTADOS DEL ANÁLISIS.



6.1 Casos propuestos.

Una vez conocidas las distintas variables a tomar en consideración para el análisis de pilotes individuales hincados en suelos blandos potentes con movimiento diferencial de campo libre, se ha procedido a resolver de manera teórica los distintos casos propuestos en este trabajo de grado.

Los casos propuestos para el presente trabajo de grado suman un total de 8 casos con 2 literales respectivamente.

Los Literales con terminaciones en (.a) corresponden a pilotes de cabeza libre (CL) y los literales con terminaciones en (.b) corresponden a pilotes de cabeza empotrada (CE).

Cuadro 6.1.1

F'c = 280 Kg/cm ²							
Pilote Cuadrado: L'=25 m.							
Seccion 40x40 cm				Seccion 60x60 cm			
Cuantia ρ= 1%		Cuantia ρ= 3%		Cuantia ρ= 1%		Cuantia ρ= 3%	
Cabeza Libre	Cabeza Empotrada	Cabeza Libre	Cabeza Empotrada	Cabeza Libre	Cabeza Empotrada	Cabeza Libre	Cabeza Empotrada
Caso I		Caso II		Caso III		Caso IV	
I.a	I.b	II.a	II.b	III.a	III.b	IV.a	IV.b



Cuadro 6.1.2

F'c = 420 Kg/cm ²							
Pilote Cuadrado: L'=25 m.							
Seccion 40x40 cm				Seccion 60x60 cm			
Cuantia ρ= 1%		Cuantia ρ= 3%		Cuantia ρ= 1%		Cuantia ρ= 3%	
Cabeza Libre	Cabeza Empotrada	Cabeza Libre	Cabeza Empotrada	Cabeza Libre	Cabeza Empotrada	Cabeza Libre	Cabeza Empotrada
Caso V		Caso VI		Caso VII		Caso VIII	
V.a	V.b	VI.a	VI.b	VII.a	VII.b	VIII.a	VIII.b

6.2 Consideraciones especiales

Para los distintos análisis tanto en el software LPILE V. 6.0 y en las tablas y ábacos de Evans y Duncan se tomaron en cuenta algunos puntos, los cuales se destacan los siguientes:

- Para los análisis con y sin movimiento diferencial de campo libre la carga lateral aplicada y momentos producidos en la cabeza del pilote, según el Análisis del LPILE no varían significativamente (en los episodios de Sd=10 y 20 cm. respectivamente), por lo que se utiliza la misma carga lateral y axial (20% f'c) en la cabeza del pilote para los dos casos generales (Sd = 0; 10 -20 cm).

	<u>Sd = 0 cm</u>			<u>Sd = 10 cm</u>			<u>Sd = 20 cm</u>		
	*V	M	δ	V	M	δ	V	M	δ
<u>Caso I.a</u>	83	206	0.122	79	202	0.218	76	205	0.322
<u>Caso I.b</u>	165	280	0.160	161	279	0.255	158	278	0.357

*Unidades KN, KN-m, m; respectivamente.



En el **Anexo 3** se adjuntarán resultados del análisis en casos donde $S_d = 0$ cm, mientras que en el **Anexo 4** se adjuntarán resultados del análisis en el LPILE donde $S_d = (10 - 20)$ cm.

- El procedimiento de análisis para el pilote en el software LPILE v. 6.0 se basó principalmente en:
 - Aplicar Carga lateral hasta producir el Máximo momento flector resistente de la sección del pilote; aplicando un total de 4 cargas por Caso para la generación de curvas y graficas más finas para el análisis.
 - Aplicar carga axial constante en la cabeza del pilote equivalente al 20% de la resistencia f_c de diseño del mismo.
- Se estimó un desplazamiento lateral de la masa de suelo blando sobre un basamento mucho más denso en el orden de los **10 a 20 cm**.
- Las longitudes de empotramiento se tomaron tanto para pilotes con suelo circundante estático y suelo circundante desplazado.
- En base a las ventajas prestadas (debido al mayor ingreso de variables) en el software LPILE V.6 las fuerzas de corte que generaron un desplazamiento máximo admisible fueron tomadas también para el análisis Evans y Duncan, facilitando así la comparación en los distintos casos propuestos.
- Desplazamiento máximo admisible en condiciones estáticas está en el orden de los 0.06 m (6 cm) para que al momento de sumarse a los producidos por un análisis con movimiento diferencial de campo libre de 0.20 m (20 cm) mas, esté en el orden de los 26 cm, entrando así en el campo de los **desplazamientos diferenciales permisibles con el 1% del la longitud total efectiva del pilote**.



6.3 Tabla de resultados.

A) Relación entre la resistencia a carga axial y cortante, entre pilotes de cabeza empotrada y los pilotes de cabeza libre.

Ver Tabla 1.

Ver Anexo I.

Tabla 1.

Diseño de 280 Kg/cm ²		Movimiento diferencial de Campo Libre Sd = (0 ; 10 -20 cm).												Diseño de 420 Kg/cm ²			
Carga Axial, Cortante y Momento: Criterio *Serviciabilidad	Pilote Cuadrado: L ² =25 m.								Carga Axial, Cortante y Momento: Criterio *Serviciabilidad	Pilote Cuadrado: L ² =25 m.							
	Seccion 40x40 cm				Seccion 60x60 cm					Seccion 40x40 cm				Seccion 60x60 cm			
	Cuantia ρ= 1%		Cuantia ρ= 3%		Cuantia ρ= 1%		Cuantia ρ= 3%			Cuantia ρ= 1%		Cuantia ρ= 3%		Cuantia ρ= 1%		Cuantia ρ= 3%	
	Cabeza Libre	Cabeza Empotrad	Cabeza Libre	Cabeza Empotrad	Cabeza Libre	Cabeza Empotrad	Cabeza Libre	Cabeza Empotrad		Cabeza Libre	Cabeza Empotrad	Cabeza Libre	Cabeza Empotrad	Cabeza Libre	Cabeza Empotrad	Cabeza Libre	Cabeza Empotrad
V (KN)	68.0	130.0	80.0	165.0	150.0	285.0	160.0	345.0	V (KN)	68.0	150.0	80.0	175.0	160.0	325.0	170.0	360.0
M (KN-m)	148.0	250.0	180.0	360.0	420.0	800.0	500.0	1100.0	M (KN-m)	170.0	314.0	200.0	420.0	525.0	1000.0	590.0	1200.0
P(0 cm) (KN)	880.0	880.0	880.0	880.0	1980.0	1980.0	1980.0	1980.0	P(0 cm) (KN)	1312.4	1320.0	1312.4	1320.0	2970.0	2970.0	2970.0	2970.0
P (10-20 cm)	191.9	767.7	191.9	767.7	971.6	1980.0	971.6	1980.0	P (10-20 cm)	234.9	939.7	234.9	939.7	1189.3	2970.0	1189.3	2970.0

Reduccion del Cortante y Momento de pilote Cabeza Empotrada a pilote Cabeza Libre.

V (KN)	M(KN-m)														
48%	41%	52%	50%	47%	48%	54%	55%	55%	46%	54%	52%	51%	48%	53%	51%

Reduccion de la Carga Axial de pilote Cabeza Empotrada a pilote Cabeza Libre.

75%	75%	51%	51%	75%	75%	60%	60%
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Caso I		Caso II		Caso III		Caso IV	
I.a	I.b	II.a	II.b	III.a	III.b	IV.a	IV.b

Caso V		Caso VI		Caso VII		Caso VIII	
V.a	V.b	VI.a	VI.b	VII.a	VII.b	VIII.a	VIII.b

V (KN) Cortante maximo aplicado en la cabeza del pilote

M (KN-m) Momento flector maximo actuante en el pilote.

P (KN) Carga aplicada, correspondiente al 20% del f'c de diseño.

O Carga Critica de Pandeo de Euler.

*Δδ Criterio de Serviciabilidad

Corresponde al desplazamiento lateral = 0.06 m; a la cabeza del pilote.

Desplazamiento maximo lateral del 1% Longitud de empotramiento (Leff=26 m).

del pilote. (Tomando en cuanto el maximo desplazamiento de campo libre a analizar (Sd=0.20 m)

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{Kl^2}$$



B) Comparación de resultados producto del análisis entre “LPILE V. 6.0 y “Ábacos de Evans y Duncan”.

Ver Tabla 2.

Ver Anexo II.

Tabla 2.

Evans y Duncan: Criterio de Serviciabilidad LPILE $\delta S_D = 6$ cm										
	Seccion (cm2)	Cuantia (%)	f'c (Kg/cm2)	Ec (Kg/cm2)	V _{CL} (Tn)	V _{CE} (Tn)	y _{tCL} (cm)	y _{tCE} (cm)	M _{max} (T-cm)	M _t (T-cm)
Caso I	40 x 40	1	280	250998	6.93	13.25	4.12	3.6	1223.6	3146.5
Caso II	40 x 40	3	280	250998	8.16	16.82	5.6	4.4	1515	3612.6
Caso III	60 x 60	1	280	250998	6.93	15.3	3.64	3.8	1261.2	3640.5
Caso IV	60 x 60	3	280	250998	8.16	17.84	4.8	4.4	1560.2	4030.6
Caso V	40 x 40	1	420	307409	15.29	29.05	5.88	4.98	4011.7	9832.7
Caso VI	40 x 40	3	420	307409	16.31	35.17	6.54	6	4326.4	11405.9
Caso VII	60 x 60	1	420	307409	16.31	33.13	5.88	5.58	4480	12067.3
Caso VIII	60 x 60	3	420	307409	17.33	36.7	6.54	6	4827	12725.5

Evans y Duncan: Criterio de Serviciabilidad LPILE $\delta S_D = 6$ cm									
	V _{CL} (Tn)	V _{CE} (Tn)	y _{tCL} (cm)	y _{tCE} (cm)	M _{max} (KN-m)	M _t (KN-m)	Cabeza Libre	Cabeza empotrada	
Caso I	6.93	13.25	4.12	3.6	120.04	308.67	> Carga	> Carga	
Caso II	8.16	16.82	5.6	4.4	148.62	354.40	> Carga	> Carga	
Caso III	6.93	15.3	3.64	3.8	123.72	357.13	> Carga	> Carga	
Caso IV	8.16	17.84	4.8	4.4	153.06	395.40	> Carga	> Carga	
Caso V	15.29	29.05	5.88	4.98	393.55	964.59	> Carga	> Carga	
Caso VI	16.31	35.17	6.54	6	424.42	1118.92	< Carga	= Carga	
Caso VII	16.31	33.13	5.88	5.58	439.49	1183.80	> Carga	> Carga	
Caso VIII	17.33	36.7	6.54	6	473.53	1248.37	< Carga	= Carga	



C) Reducción de la Carga axial aplicada en el pilote producto de la esbeltez y la Carga Critica de Pandeo de Euler.

Ver Tabla 3.

Tabla 3.

Diseño de 280 Kg/cm2		Movimiento diferencial de Campo Libre Sd = 0 cm.												Diseño de 420 Kg/cm2			
Pilote sometido a Carga axial: Aplicada, Euler	Pilote Cuadrado: L'=25 m.-								Pilote sometido a Carga axial: Aplicada, Euler	Pilote Cuadrado: L'=25 m.-							
	Seccion 40x40 cm				Seccion 60x60 cm					Seccion 40x40 cm				Seccion 60x60 cm			
	Cuantia ρ= 1%		Cuantia ρ= 3%		Cuantia ρ= 1%		Cuantia ρ= 3%			Cuantia ρ= 1%		Cuantia ρ= 3%		Cuantia ρ= 1%		Cuantia ρ= 3%	
	Cabeza Libre	Cabeza Empotrad	Cabeza Libre	Cabeza Empotrad	Cabeza Libre	Cabeza Empotrad	Cabeza Libre	Cabeza Empotrad		Cabeza Libre	Cabeza Empotrad	Cabeza Libre	Cabeza Empotrad	Cabeza Libre	Cabeza Empotrad	Cabeza Libre	Cabeza Empotrad
	Pc (Tn)	132.2	437.2	132.2	367.4	341.6	1190.2	826.6		1584.6	Pc (Tn)	133.8	449.7	133.8	383.1	320.1	1011.7	1011.7	2276.4
Pc (KN)	1297.4	4288.8	1297.4	3604.2	3351.0	11676.3	8108.9	15544.9	Pc (KN)	1312.4	4411.2	1312.4	3758.2	3140.4	9925.1	9924.8	22331.5
Po (KN)	880.0	880.0	880.0	880.0	1980.0	1980.0	1980.0	1980.0	Po (KN)	1320.0	1320.0	1320.0	1320.0	2970.0	2970.0	2970.0	2970.0
Profundidad de empotramiento (m)								Profundidad de empotramiento (m)									
	10.0	11.0	10.0	12.0	14.0	15.0	9.0	13.0		11.0	12.0	11.0	13.0	16.0	18.0	9.0	12.0

Reduccion de la Carga Axial Po equivalente al 20% de f'c de diseño																	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.6%	-	0.6%	-	-	-	-	-

I40	0.002133 m4	kcl	2 E280	2512437.1 T/m2
I60	0.0108 m4	kce	1 E420	3075303.6 T/m2

I40	0.002133 m4	kcl	2 E280	2512437.1 T/m2
I60	0.0108 m4	kce	1 E420	3075303.6 T/m2

Caso I		Caso II		Caso III		Caso IV	
I.a	I.b	II.a	II.b	III.a	III.b	IV.a	IV.b

Caso V		Caso VI		Caso VII		Caso VIII	
V.a	V.b	VI.a	VI.b	VII.a	VII.b	VIII.a	VIII.b

- Pc (KN)** Carga Critica de pandeo de Euler
 - Po (KN)** Carga aplicada, correspondiente al 20% del f'c de diseño.
 - PDE** Profundidad de empotramiento en metros.
- Resultado del análisis en el LPILE v. 6.0 para todos los casos propuestos

$$Pc = \frac{\pi^2 EI}{Kl^2}$$

Movimiento diferencial de Campo Libre Sd : 10 - 20 cm.

Profundidad de empotramiento (m)						
26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0

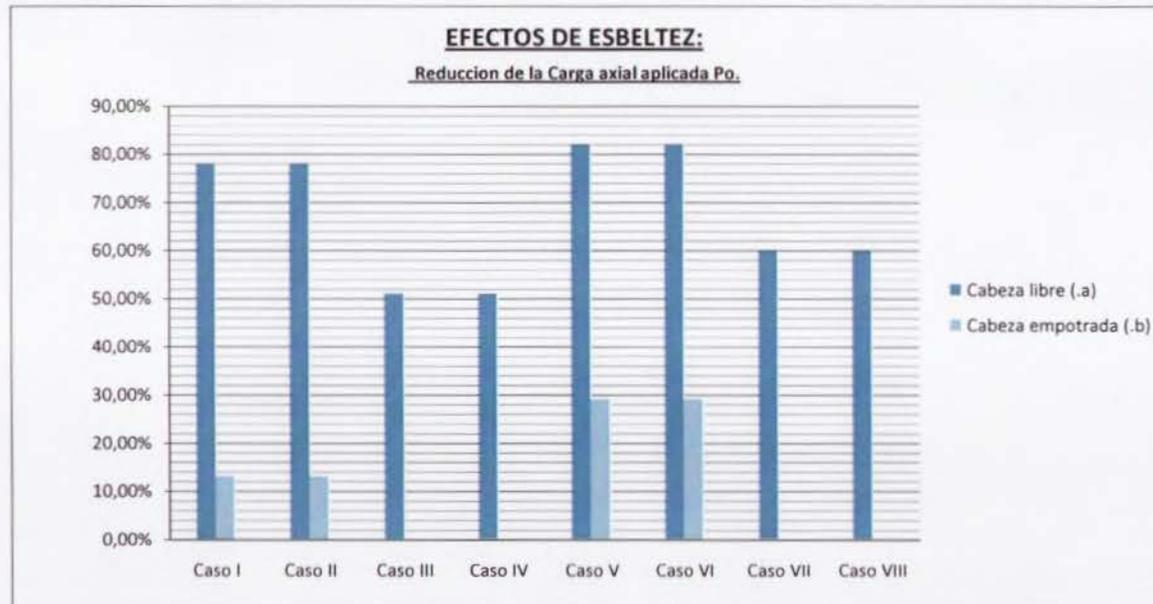
Profundidad de empotramiento (m)						
26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0

Diseño de 280 Kg/cm²

Diseño de 420 Kg/cm²

Pilote sometido: Carga Axial, Cortante y Momento	Pilote Cuadrado: L'=25 m.								Pilote sometido: Carga Axial, Cortante y Momento	Pilote Cuadrado: L'=25 m.							
	Seccion 40x40 cm				Seccion 60x60 cm					Seccion 40x40 cm				Seccion 60x60 cm			
	Cuantia ρ= 1%		Cuantia ρ= 3%		Cuantia ρ= 1%		Cuantia ρ= 3%			Cuantia ρ= 1%		Cuantia ρ= 3%		Cuantia ρ= 1%		Cuantia ρ= 3%	
	Cabeza Libre	Cabeza Empotrad	Cabeza Libre	Cabeza Empotrad	Cabeza Libre	Cabeza Empotrad	Cabeza Libre	Cabeza Empotrad		Cabeza Libre	Cabeza Empotrad	Cabeza Libre	Cabeza Empotrad	Cabeza Libre	Cabeza Empotrad	Cabeza Libre	Cabeza Empotrad
Pc (Tn)	19.6	78.3	19.6	78.3	99.0	396.2	99.0	396.2	Pc (Tn)	23.9	95.8	23.9	95.8	121.2	484.9	121.2	484.9
Pc (KN)	191.9	767.7	191.9	767.7	971.6	3886.3	971.6	3886.3	Pc (KN)	234.9	939.7	234.9	939.7	1189.3	4757.0	1189.3	4757.0
Po (KN)	880.0	880.0	880.0	880.0	1980.0	1980.0	1980.0	1980.0	Po (KN)	1320.0	1320.0	1320.0	1320.0	2970.0	2970.0	2970.0	2970.0

Reduccion de la Carga Axial Po equivalente al 20% de P'c de diseño															
78%	13%	78%	13%	51%	-	51%	-	82%	29%	82%	29%	60%	-	60%	-





UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA - CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CONCLUSIONES Y BIBLIOGRAFIA



Conclusiones

- La relación que existe, entre esfuerzos **admisibles**, entre las cargas laterales y momentos flectores resistentes de un pilote cabeza empotrada frente a un pilote de cabeza libre es que **"el pilote de cabeza empotrada resiste en esfuerzo cortante y momento flector de 1.7 a 2.2 veces más que un pilote de cabeza libre"**.
- La relación que existe, entre esfuerzos **admisibles**, entre la carga axial resistente de un pilote cabeza empotrada frente a un pilote de cabeza libre es que **"el pilote de cabeza empotrada resiste una carga axial de 2.04 a 4.00 veces más que un pilote de cabeza libre"** (Efectos de esbeltez).
- Con una predominante mayoría, los casos propuestos para el análisis en los ábacos de Evans y Duncan, entregan **resultados conservadores** en relación a los entregados mediante el análisis con el software LPILE V.6.0 (se puede deber a la mucha elasticidad o a la poca inelasticidad de la ley constitutiva esfuerzo-deformación usada en un método con respecto al otro). Ya que si se desea mediante el uso de los ábacos de Evans y Duncan obtener **deflexiones laterales** iguales a las del análisis con el LPILE v6.0, se necesitaría aplicar una mayor carga lateral en la cabeza del pilote, ya sea esta libre o empotrada. Es entonces necesario concluir que los resultados entregados mediante el análisis con los ábacos de Evans y Duncan entregan valores menores a los predichos por LPILE **producto de una menor aproximación al comportamiento sísmico** de los pilotes para cargas últimas.
- Al haber analizado los diferentes casos con un **modelo de suelo estático** (movimiento diferencial de campo libre $S_d = 0$ cm) las principales fuerzas predominantes que causan el mecanismo de falla dúctil, son la del **cortante lateral y los momentos flectores producidos**.



- Es importante diseñar el pilote con la capacidad de tomar la mayor cantidad de momento cerca de sus puntos de empotramiento para asegurar un **comportamiento dúctil** ante los desplazamientos de campo libre del suelo y **evitar una falla por estabilidad** principalmente en los pilotes de cabeza libre.
- Al haber analizado los diferentes casos con un **modelo de suelo con desplazamientos** (movimiento diferencial de campo libre $S_d = 10 - 20$ cm) la principal fuerza predominante que causa un mecanismo de falla frágil, es la **fuerza axial aplicada**. Es importante reconocer que los **efectos de esbeltez** y la carga crítica de pandeo de Euler puede gobernar en los pilotes muy esbeltos y con movimiento diferencial de campo libre **llegando a fallas por estabilidad en el mayor de los casos para:**
 - a) *Pilotes cabeza empotrada*: Al **14%** del f_c de diseño
 - b) *Pilotes de cabeza libre*: Al **4%** del f_c de diseño.
- En los diferentes casos analizados bajo el criterio de carga crítica de pandeo de Euler aplicado para **pilotes** hincados en suelo blando y punta empotrada en un basamento denso, se toma en cuenta: longitud efectiva del pilote, sus características mecánicas, geométricas y el desplazamiento diferencial de campo libre (ya sea de 10 o 20 cm.); lo que no se toma en consideración es la resistencia y empuje del suelo circundante al fuste del pilote.
- En el Anexo III se muestra un análisis de la condición más desfavorable (Caso I, Cabeza libre) y con movimiento diferencial de campo libre ($S_d = 10$ cm.), dando como resultado, a diferencia del caso estático en el que su magnitud era despreciable, un momento flector (actuante a la profundidad de 25 m. con respecto a la cabeza del pilote) de 90 KN-m; siendo este inferior a los 150 KN-m de capacidad resistente a flexión (dentro del rango de deformaciones admisibles) que posee el pilote. Por lo tanto el **1% de acero cubre la demanda a flexión en ese punto.**



Bibliografía.

- Donald Coduto (Foundation design: principles and practices. New Jersey, Prentice-Hall, 2001).
- TERZAGHI, K. and PECK. Soil Mechanics in engineering practice.
- JAYRAM RAMACHANDRAN, CBE Institute. "Analysis of pile foundations under Seismic Loading".
- AASHTO 4th Edition 2007 "LRFD Bridge Design Specifications".
- ASCE 7-10 Minimum Design Loads for buildings and other Structures
- LPILE V.6 por Engineering Software Inc. ENSOFT (Software de Análisis de pilotes).
- ACI 318-08 Capitulo 8, 10 y 11.
- Oscar González Cuevas 4ta Edición (Aspectos Fundamentales del Concreto Reforzado).



ANEXOS



ANEXO I

Evans y Duncan

Metodo conveniente para expresar el comportamiento de la deflexion de un pilote bajo cargas laterales

- ventajas:*
- * Analisis manual mas rapido
 - * La carga que da una determinada deflección al pilote se la obtiene rapidamente
 - * La carga que da un determinado maximo momento al pilote se lo obtiene rapidamente.

- desventajas:*
- * *EI* constante
 - * Parametros del suelo constantes. Un solo estrato
 - * Para ser considerado empotrado en el fondo la profundidad minima es de 35 veces el diametro

Formulas:

For plastic clay and sand:

$$\lambda = 1.00 \quad (16.11)$$

For brittle clay¹:

$$\lambda = (0.14)^n \quad (16.12)$$

For clay:

$$\sigma_p = 4.2 s_u \quad (16.13)$$

For sand:

$$\sigma_p = 2 C_{pb} \gamma B \tan^2 (45 + \phi'/2) \quad (16.14)$$

$$V_c = \lambda B^2 ER_f \left(\frac{\sigma_p}{ER_f} \right)^m (\epsilon_{50})^n \quad (16.8)$$

$$M_c = \lambda B^3 ER_f \left(\frac{\sigma_p}{ER_f} \right)^m (\epsilon_{50})^n \quad (16.9)$$

$$R_f = \frac{I}{\pi B^4/64} \quad (16.10)$$

= 1.00 for solid circular cross sections

= 1.70 for solid square cross sections

ϵ_{50} = axial strain at which 50 percent of the soil strength is mobilized (see Table 16.2)

m, n = exponents from Table 16.3

I = moment of inertia of foundation

= $\pi B^4/64$ for solid circular cross sections

= $B^4/12$ for square cross sections

Also see tabulated values in Chapter 12

s_u = undrained shear strength of soil from the ground surface to a depth of 8 pile diameters

ϕ' = effective friction angle of soil (deg) from ground surface to a depth of 8 pile diameters

C_{pb} = passive pressure factor = $\phi'/10$

γ = unit weight of soil from ground surface to a depth of 8 pile diameters. If the groundwater table is in this zone, use a weighted average of γ and γ_b , where $\gamma_b = \gamma - \gamma_w$ (the buoyant unit weight in the zone below the groundwater table).

Deformación axial al 50% ϵ_{50}

TABLE 16.2 TYPICAL ϵ_{50} VALUES
(Reese and Wang, 1997)

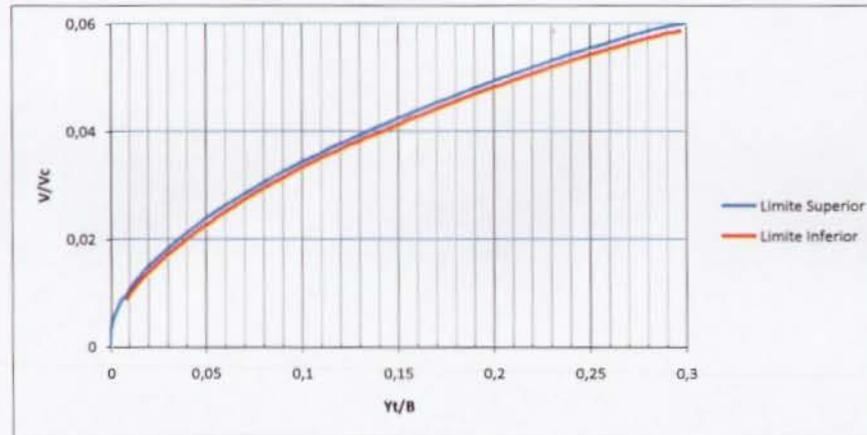
Soil Type	ϵ_{50}
Soft clay	0.020
Medium clay	0.010
Stiff clay	0.005
Medium dense sand with little or no mica	0.002

Exponentes m y n :

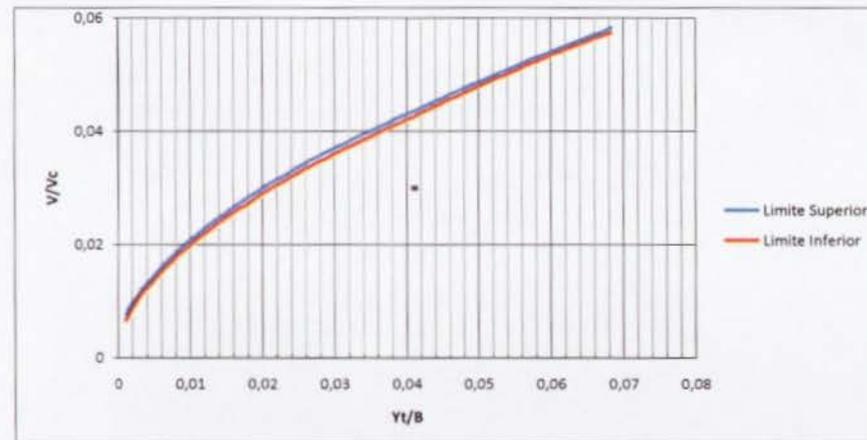
TABLE 16.3 VALUES OF EXPONENTS m
AND n (Evans and Duncan, 1982)

Soil Type	For V_r		For M_r	
	m	n	m	n
Clay	0.683	-0.22	0.46	-0.15
Sand	0.57	-0.22	0.40	-0.15

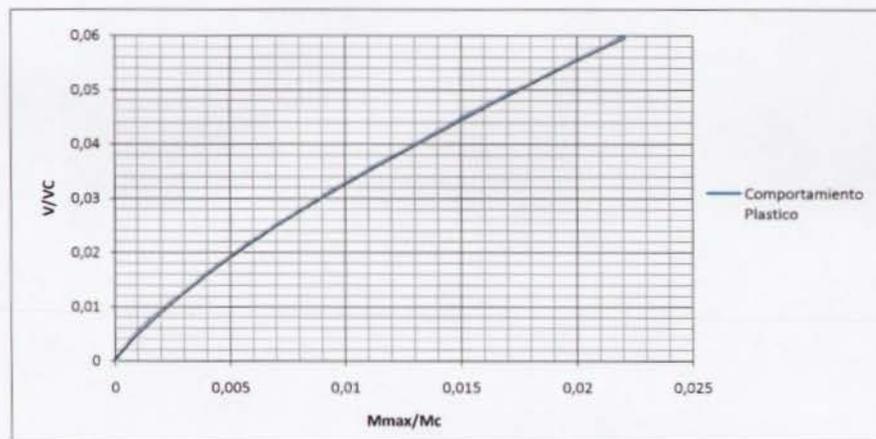
E = modulus of elasticity of foundation
 = 29,000,000 lb/in² (200,000 MPa) for steel
 = 57,000 $\sqrt{f'_c}$ lb/in² (4700 $\sqrt{f'_c}$ MPa) for concrete
 = 1,600,000 lb/in² (11,000 MPa) for Southern pine or Douglas fir

Cabeza Libre: Arcillas**Carga Lateral vs Deflección Lateral**

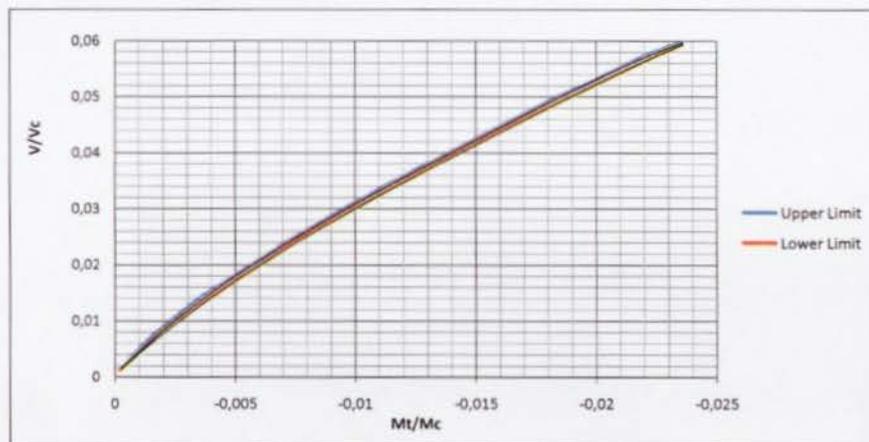
Carga Lateral vs Deflección Lateral			
x	y	promedio	
0.109	0.03613734	0.03505	Upper limit
0.109	0.03396867		Lower Limit
C.L		C.L. Yt/B	
Caso I	0.034	0.103	
Caso II	0.04	0.14	
Caso III	0.0318	0.091	
Caso IV	0.037	0.12	
Caso V	0.033	0.098	
Caso VI	0.035	0.109	
Caso VII	0.033	0.098	
Caso VIII	0.035	0.109	

Cabeza Fija: Arcillas**Carga Lateral vs Deflección Lateral**

Carga Lateral vs Deflección Lateral			
x	y	promedio	
0.05	0.04846125	0.04803	Upper limit
0.05	0.04759625		Lower Limit
C.E		C.E. Yt/B	
Caso I	0.065	0.09	
Caso II	0.082	0.11	
Caso III	0.07	0.095	
Caso IV	0.082	0.11	
Caso V	0.063	0.083	
Caso VI	0.076	0.1	
Caso VII	0.0675	0.093	
Caso VIII	0.075	0.1	

Cabeza Libre: Arcillas**Carga Lateral vs Maximo Momento**

Carga Lateral vs Maximo Momento			
x	y	promedio	
0.011	0.03501865	0.03502	Promedio
C.L		C.L. Mmax/Mc	
Caso I	0.034	0.0105	
Caso II	0.04	0.013	
Caso III	0.0318	0.0097	
Caso IV	0.037	0.012	
Caso V	0.033	0.0102	
Caso VI	0.035	0.011	
Caso VII	0.033	0.0102	
Caso VIII	0.035	0.011	

Cabeza Fija: Arcillas**Carga Lateral vs Maximo Momento**

Carga Lateral vs Maximo Momento			
x	y	promedio	
0.023	-0.37244904	-0.31911	Upper limit
0.023	-0.26576742		Lower Limit
C.E		C.E. Mt/Mc	
Caso I	0.065	-0.027	
Caso II	0.082	-0.031	
Caso III	0.07	-0.028	
Caso IV	0.082	-0.031	
Caso V	0.063	-0.025	
Caso VI	0.076	-0.029	
Caso VII	0.0675	-0.0275	
Caso VIII	0.075	-0.029	

METODO DE EVANS Y DUNCAN: ARCILLAS BLANDAS

Formulas base:

	B	60	σ_p	0.84		Vc	Mc
	E (F/c)	307408.52	ϵ_{50}	0.02	m	0.683	0.46
λ	1	R_1	1.7	Su	0.2 Kg/cm2	n	-0.22
							-0.15

Vc= 490927.0 Kg

Vc= 490927.0 Kg

$$V_c = \lambda B^2 ER_1 \left(\frac{\sigma_p}{ER_1} \right)^m (\epsilon_{50})^n$$

Mc= 438810215.3 Kg-cm

Mc= 438810215.3 Kg-cm

$$M_c = \lambda B^3 ER_1 \left(\frac{\sigma_p}{ER_1} \right)^m (\epsilon_{50})^n$$

CABEZA LIBRE

CABEZA EMPOTRADA

Resolucion:

Resolucion:

V=	17.33	Ton.
V/Vc	0.03530057	
Yt/B	0.109	
Mmax/Mc	0.011	

V=	36.70	Ton.
V/Vc	0.07475653	
Yt/B	0.1	
M/Mc	-0.029	

Entonces:

Entonces:

Yt = 6.54 cm

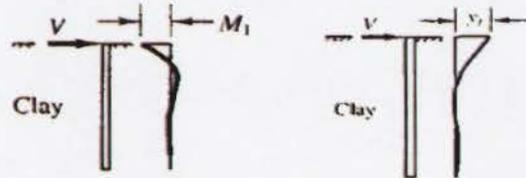
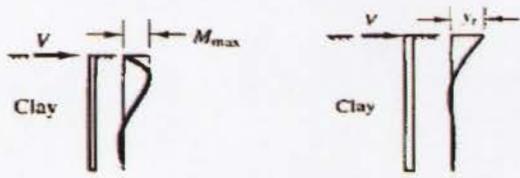
Yt = 6 cm

Entonces:

Entonces:

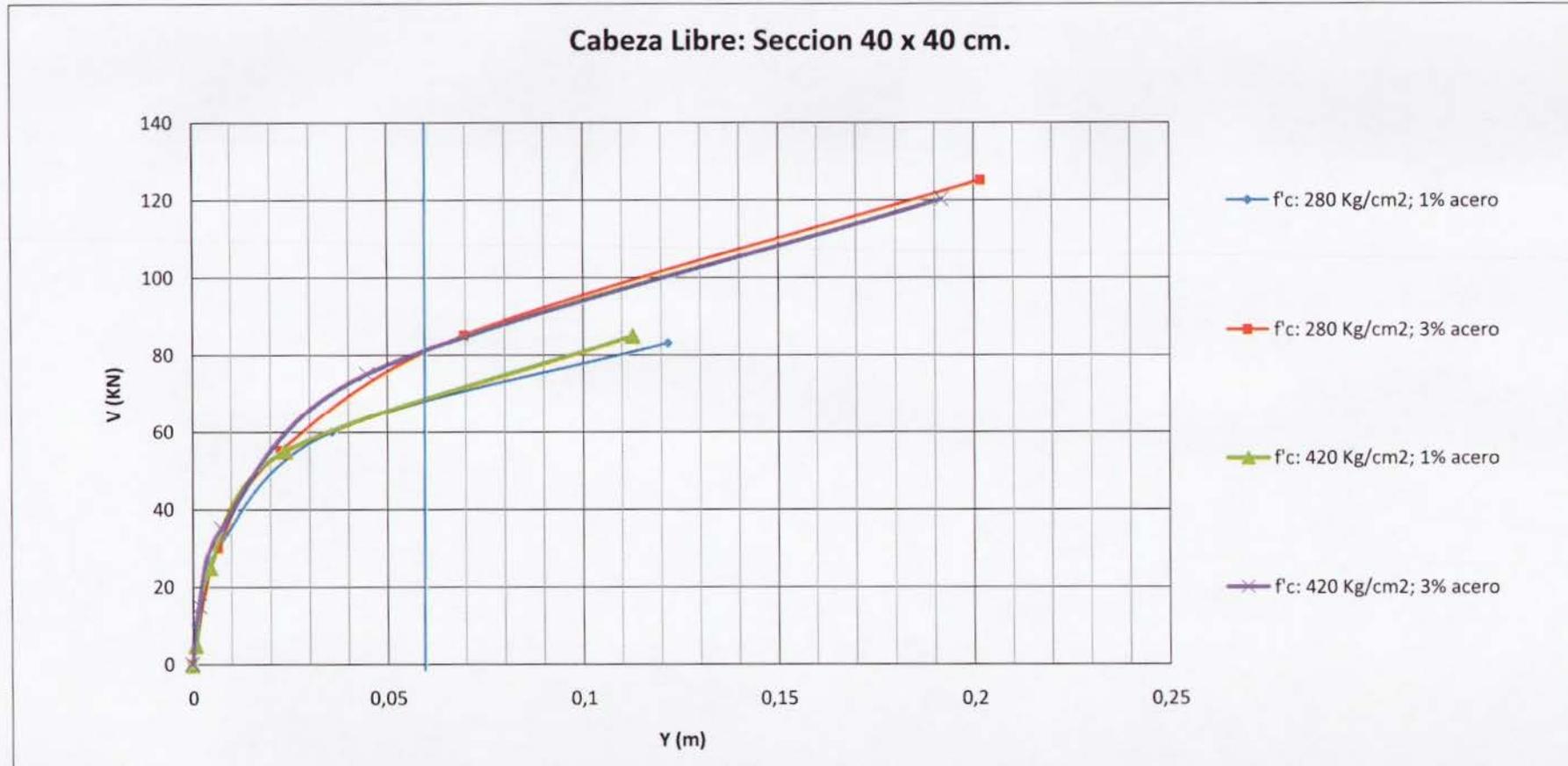
Mmax = 4826.9 T-cm

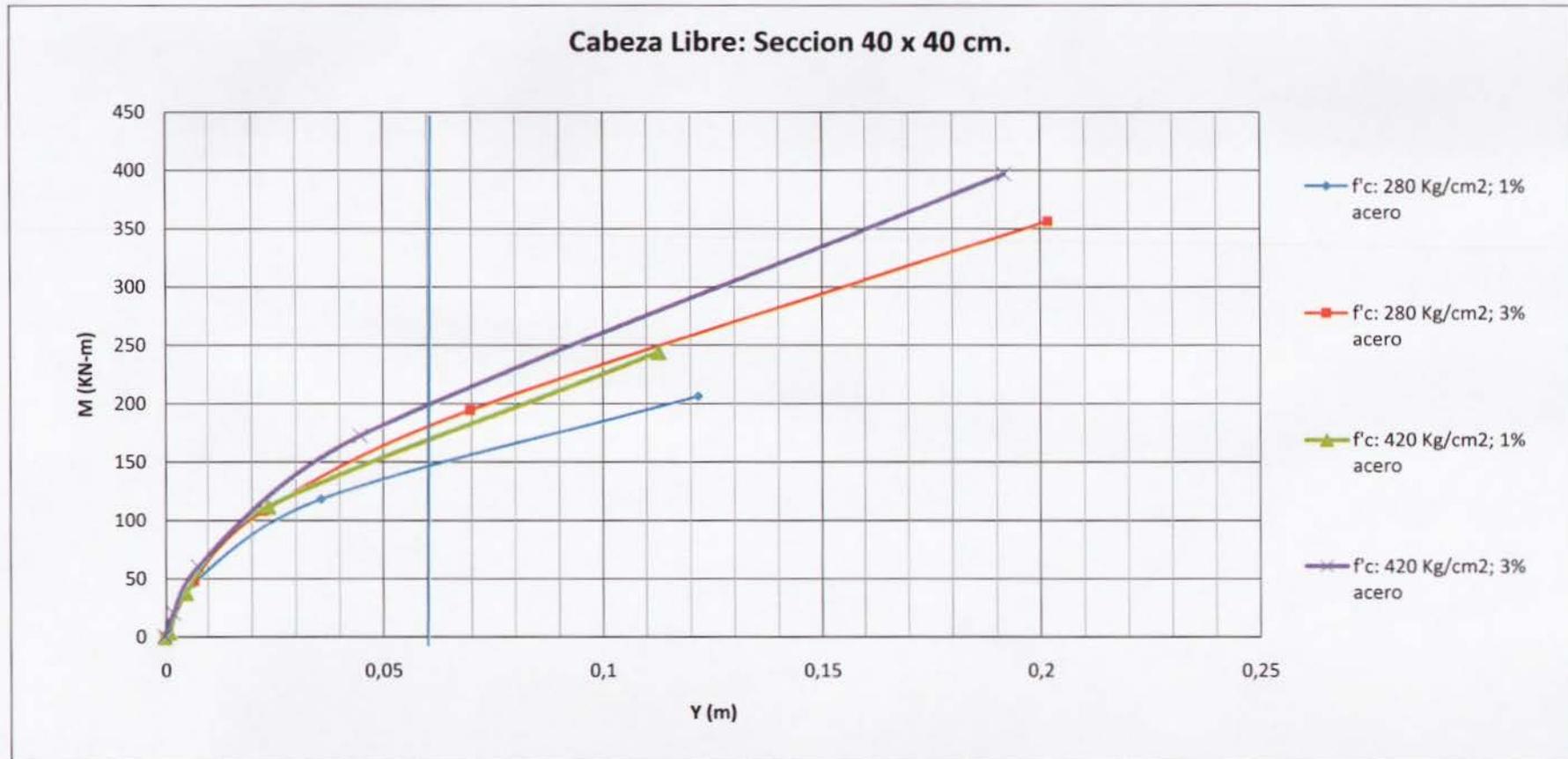
Mt = -12725.50 T-cm

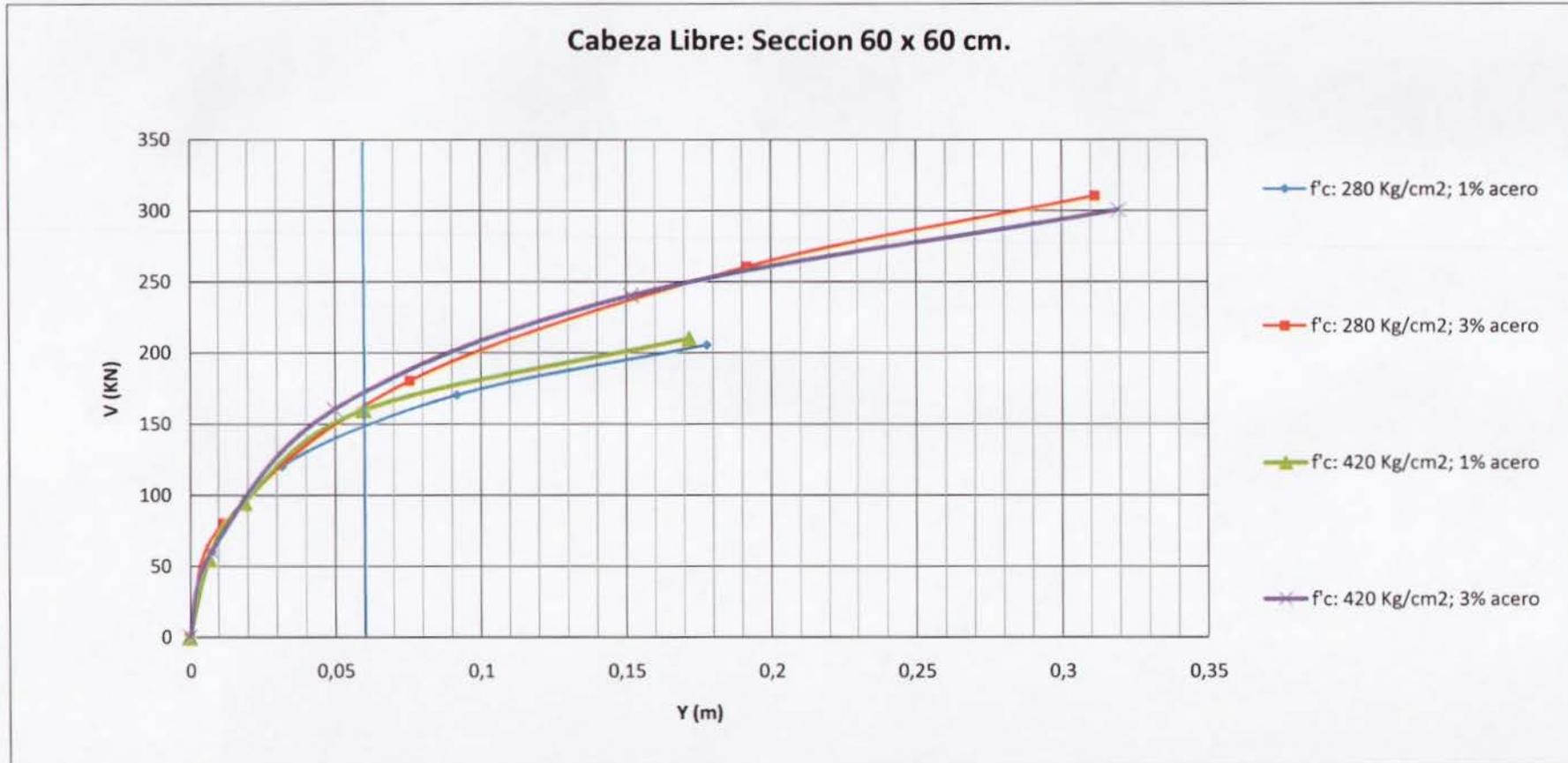


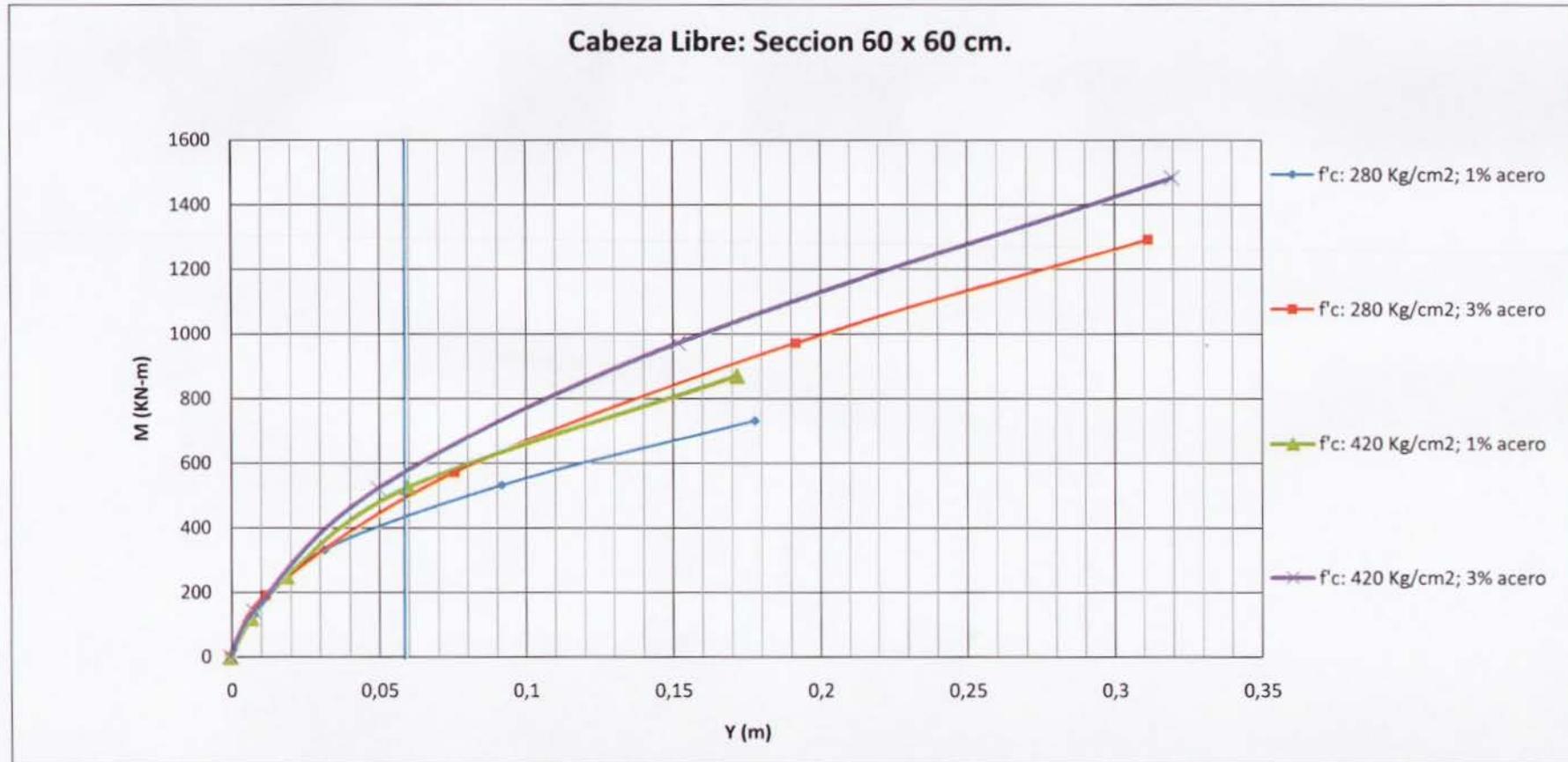


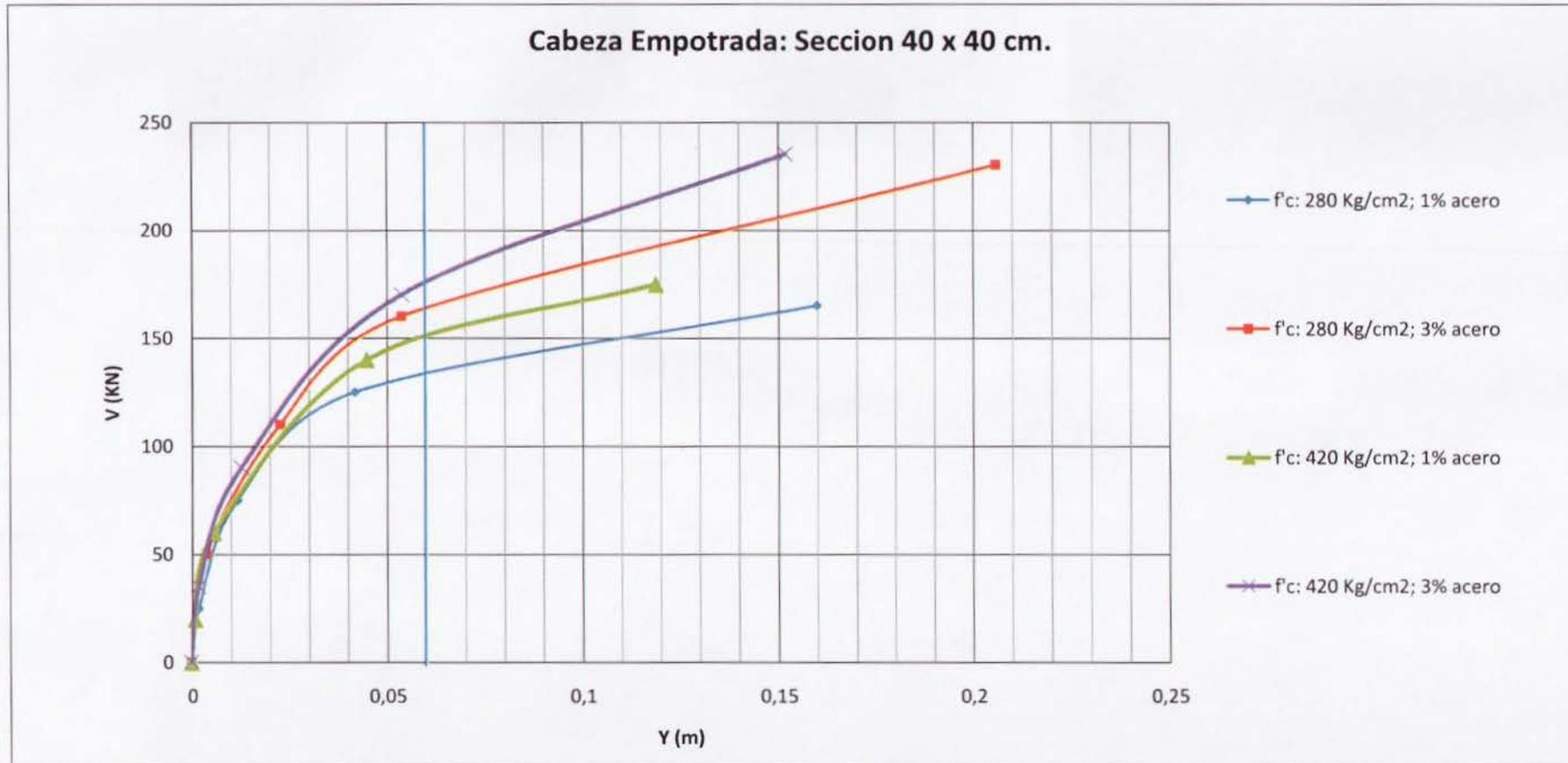
ANEXO II



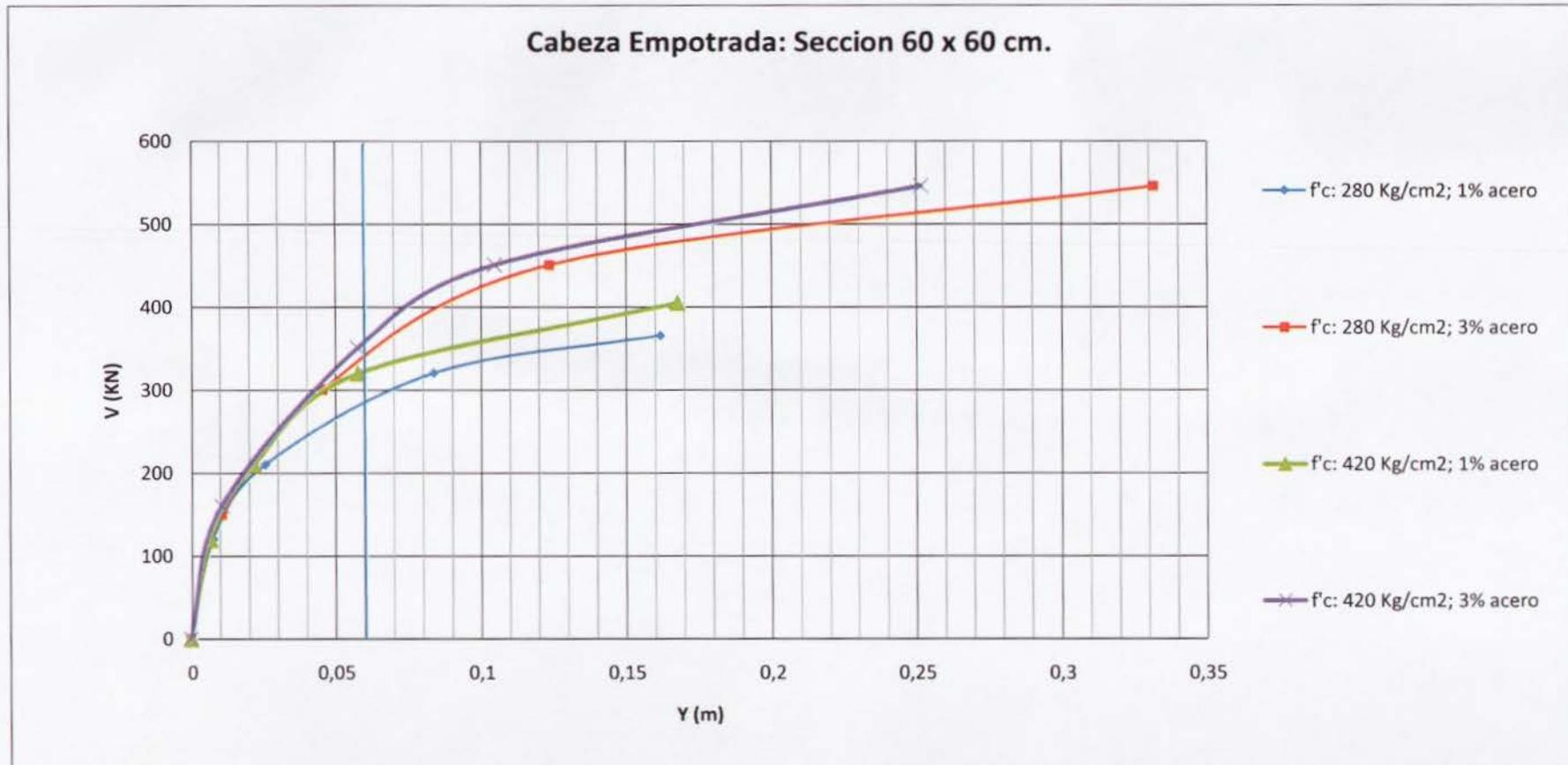


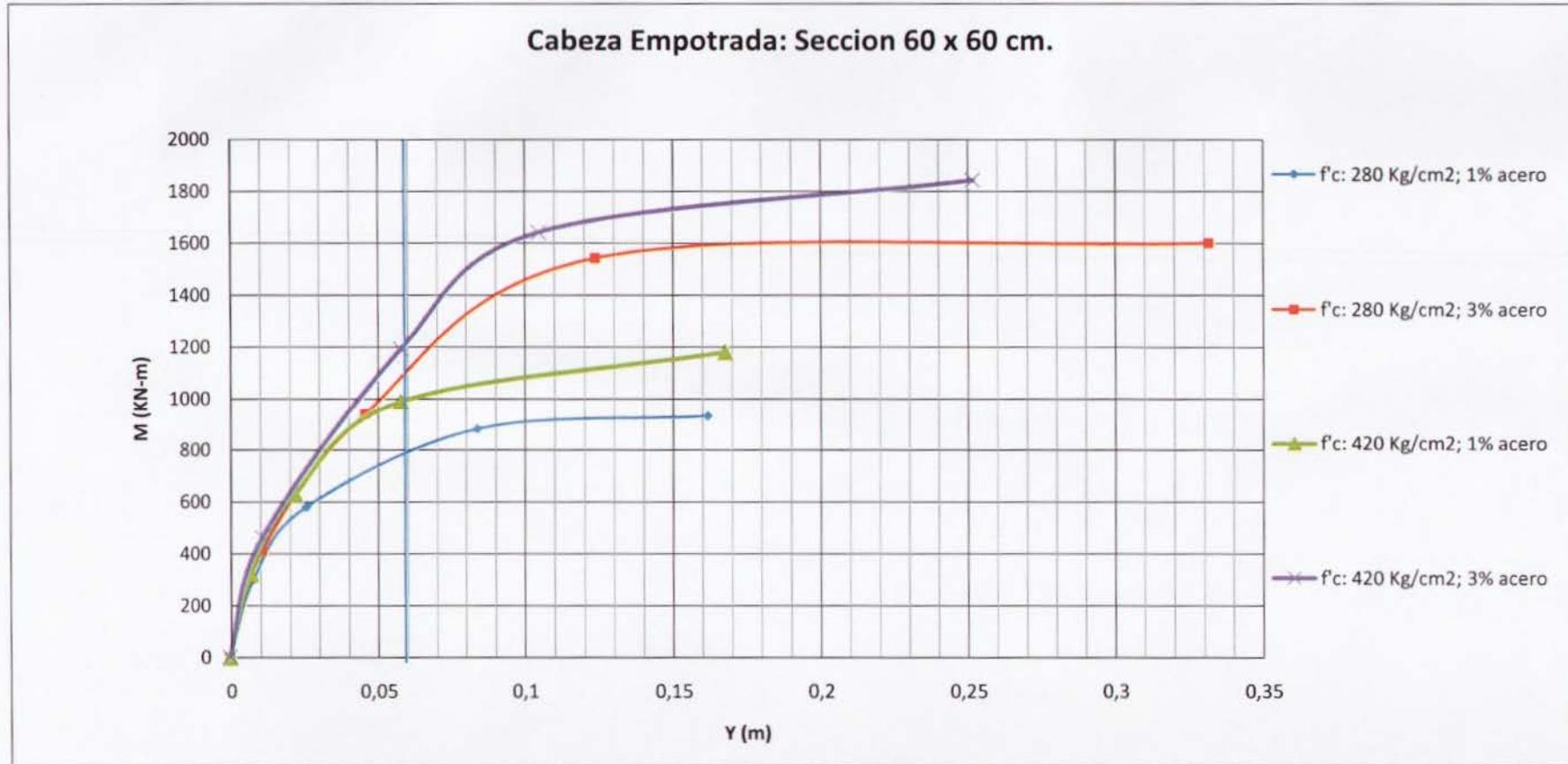






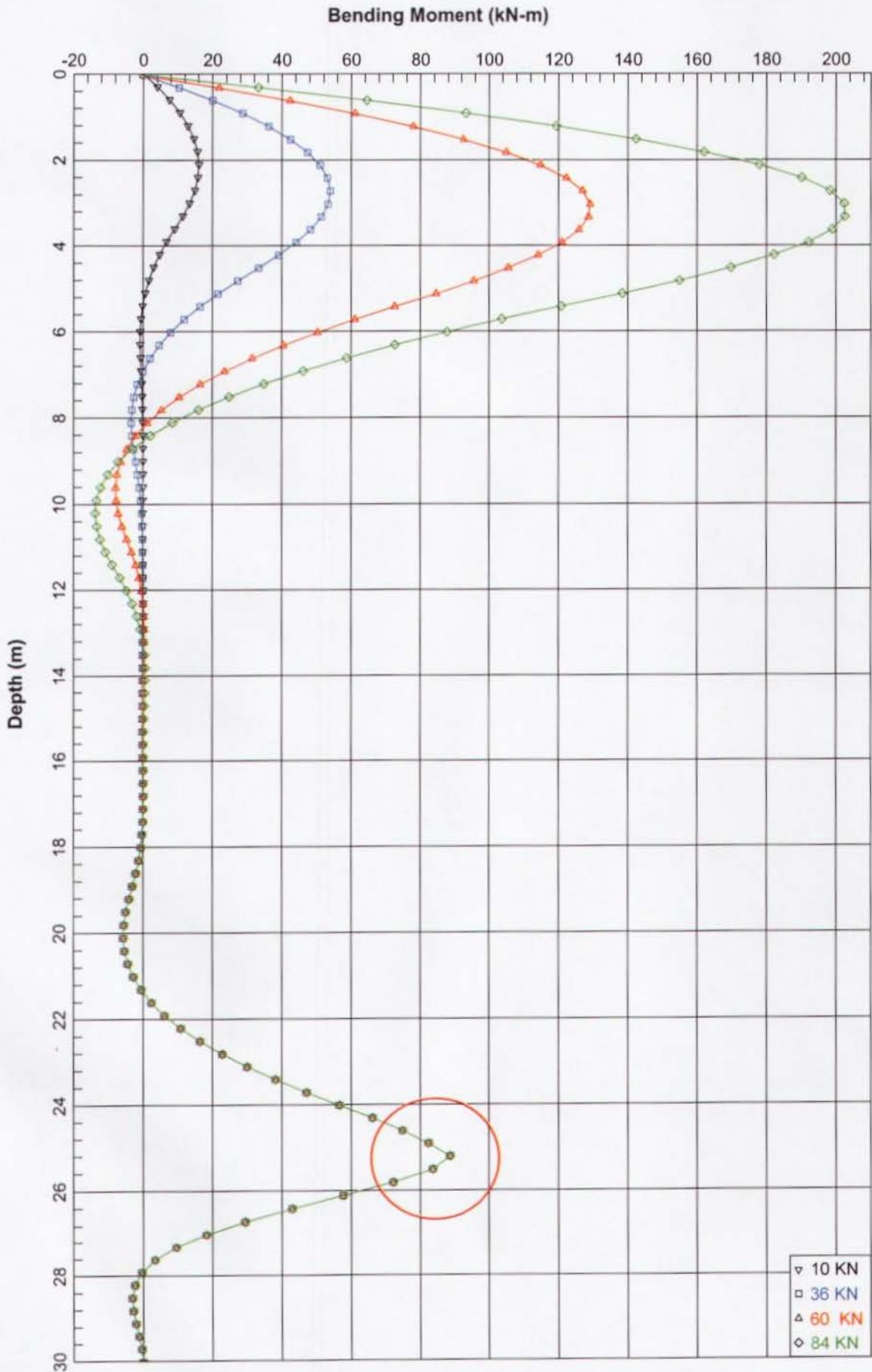


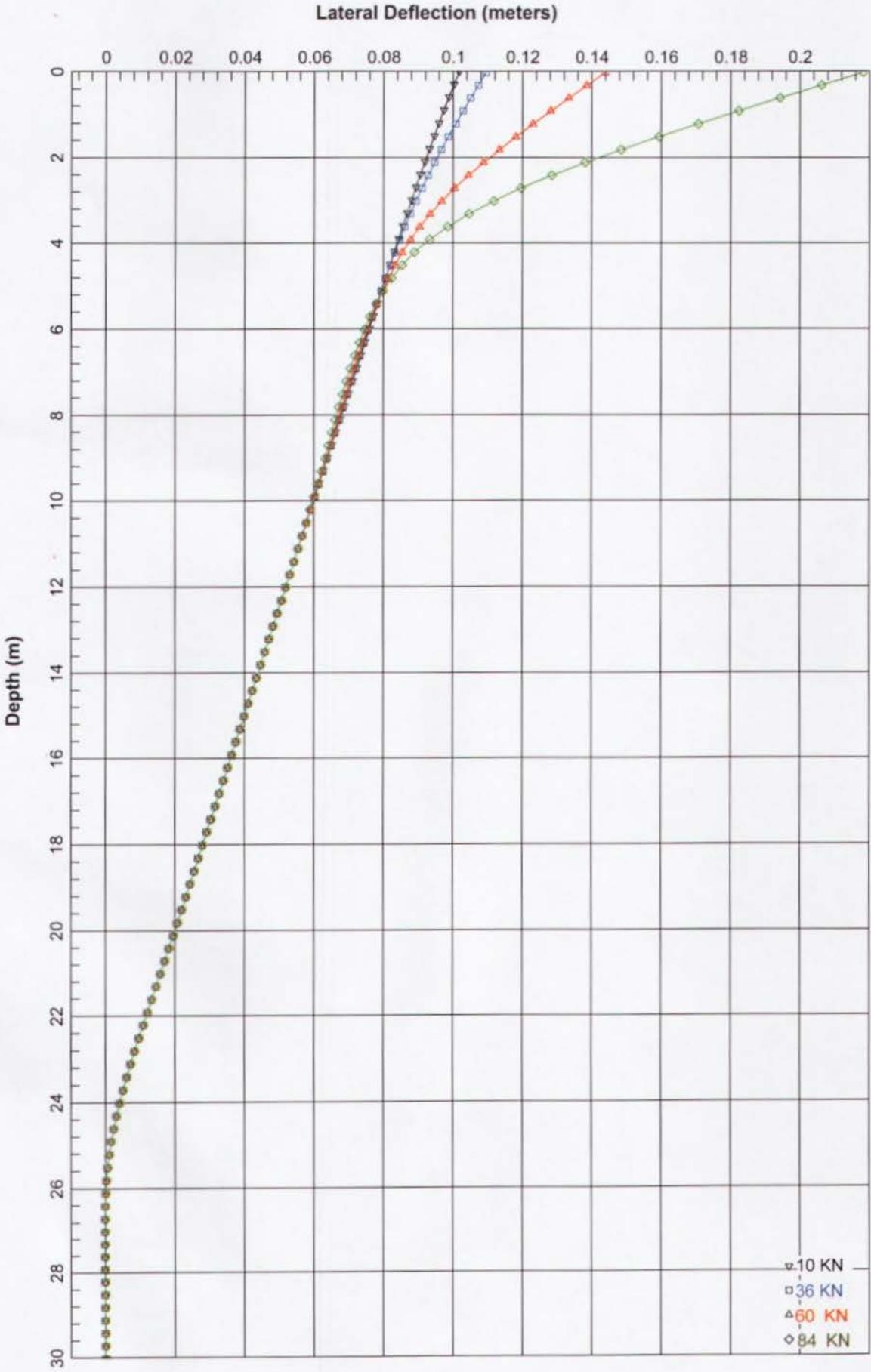


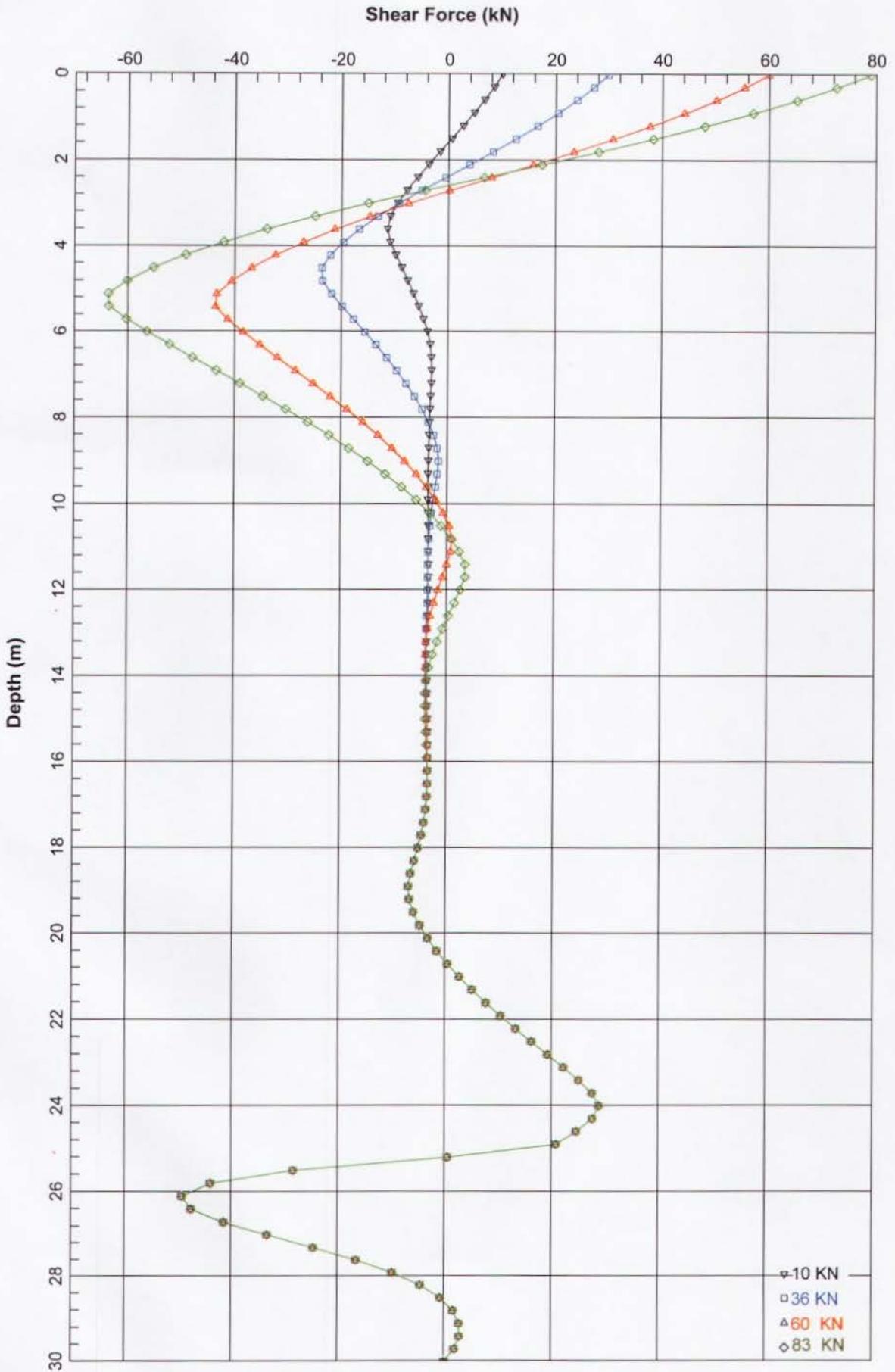




ANEXO III









ANEXO IV

