



**TRABAJO DE GRADO**

**EVALUACIÓN DE PRESIONES LATERALES SOBRE PILOTES EMPLEADOS PARA LA ESTABILIZACIÓN DE TALUDES**

**HECTOR ANDRES CIFUENTES MORENO**

**DIRECTOR DE TESIS:  
CARLOS EDUARDO RODRIGUEZ**

**FACULTAD DE INGENIERIA  
INGENIERIA CIVIL  
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
DICIEMBRE 2010**

## 1. INTRODUCCION

El deslizamiento del suelo es uno de los procesos geológicos más destructivos que afecta a la población y causa miles de muertes y daños en las propiedades.

Varnes (1978) define los deslizamientos de suelo, como el desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies, que pueden detectarse fácilmente o dentro de una zona relativamente delgada. Las rocas y los suelos fluyen con gran rapidez, llevándose todo a su paso, sin dar previo aviso ni tiempo para evacuar. Por tal hecho, entender la estabilidad de los taludes es de vital importancia para cualquier obra de ingeniería civil.

Existen varias formas de enfocar y resolver cada problema específico de deslizamientos. A continuación en la Tabla 1 se presentan algunas soluciones de estabilidad de taludes:

<b>METODO</b>	<b>VENTAJA</b>
<b>Remoción de materiales de la cabeza del talud</b>	Muy efectivo en la estabilización de deslizamientos rotacionales.
<b>Abatimiento de la pendiente</b>	Efectivo en suelos friccionantes.
<b>Recubrimiento de la superficie del talud.</b>	Ayuda a controlar la erosión
<b>Muros de contención convencionales</b>	Útiles para estabilizar masas relativamente
<b>Anclajes o pernos.</b>	Efectivos en roca
<b>Pilotes</b>	Efectivos en deslizamientos en los cuales existe suelo o roca debajo de la superficie de falla.

*Tabla 1 Métodos de estabilización de taludes.*

Un método muy utilizado para prevenir deslizamientos, es la estabilidad de taludes con pilotes.

Para la evaluación de estabilidad del talud, con pantalla de pilotes se han creado diferentes metodologías. A continuación en la Tabla 2, se presenta un resumen de algunos autores que han desarrollado diferentes teorías para la estabilización de taludes con pilotes:

<b>ESTABILIZACION DE TALUDES CON PILOTES</b>		
<b>AUTOR</b>	<b>AÑO</b>	<b>TEORIA</b>
BRINCH HANSEN	1961	Utiliza una ecuación general de capacidad de carga lateral, aplicable a suelos de comportamiento friccionante - cohesivo en condiciones no drenadas, y a pilotes libres como restringidos de rotar en cabeza.
BROMS	1964	Introduce simplificaciones en la distribución de esfuerzos a lo largo del pilote, además de considerar tanto pilotes libres como restringidos de rotar en cabeza, rígidos y flexibles.
DUNCAN Y CHANG	1970	El suelo se considera como un material bilineal o hiperbólico, y se modela mediante el método de elementos finitos.
BEGEMANN Y DE LEEUW	1972	El suelo se considera que se comporta como un material elástico con un modulo de elasticidad constante y con una relación de Poisson de 0.5.
POULOS	1973	El suelo se considera que se comporta como un material elasto - plástico ideal con un modulo de deformación y un esfuerzo de cedencia que se puede variar con la profundidad.
WANG Y YENG	1974	Método de diseño fundamentado en el efecto de arco en un suelo rígido- plástico, adoptando un modelo de talud infinito en condición de equilibrio limite.
ITO Y MATSUI	1975	Método que no se fundamenta en el efecto de arco y no toma en cuenta ni superficies de terreno inclinadas, ni la resistencia al corte en el plano de falla. Su modelo está terreno que se deforma plásticamente.
BEER Y CARPENTER	1977	En su discusión técnica sobre el método de Ito y Matsui, desarrollaron ecuaciones comparables sin despreciar algunas de las suposiciones hechas por estos últimos.
BRANDL	1977	Describe un caso en el que existe una cuña de suelo que se comprime contra la pantalla y la masa de suelo superior se encuentra en movimiento de fluencia lenta hacia el talud.
VIGGIANI	1981	Este método aplicable a los suelos cohesivos utiliza los conceptos desarrollados por Broms (1964) para pilotes bajo carga lateral.
NAVFAC	1986	Pila rígida. Se desprecian las deformaciones elásticas del pilote en el estado de rotura, suponiendo que gira como un solido rígido alrededor de un punto.
RODRIGUEZ	1995	Efectuar los análisis de estabilidad considerando la fila de pilotes como una dovola de varas verticales. Permite cuantificar el empuje sobre la pantalla de pilotes y a la vez se determina el factor de seguridad del talud estabilizado.

*Tabla 2. Teorías de estabilidad de taludes con pilotes.*

Son muchos los autores que han propuesto metodologías para resolver la estabilidad de taludes por medio de pilotes, sin embargo hay muchas variaciones entre estos modelos, son aproximados, y algunos contradictorios.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. OBJETIVO GENERAL

Dada la gran cantidad de métodos que han sido desarrollados, y la falta de validación de éstos en el medio Colombiano, se busca analizar la incidencia de diferentes métodos para determinar las presiones laterales en pilotes utilizados para estabilidad de taludes, sobre los diagramas de cortantes, momentos y el diseño.

### 1.1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Para cumplir este objetivo primordial se requiere:

- Realizar un estudio del estado del arte sobre modelos para el cálculo de presiones laterales sobre pilotes, utilizados para la estabilización de taludes.
- Hacer un análisis de sensibilidad de las presiones laterales, para cada uno de los modelos.
- Aplicar los modelos de evaluación de cargas a un caso real.
- Hacer el diseño estructural de pilotes para el caso modelado

## 2. MARCO TEORICO

Todo terreno es estable, a menos que sobre él actúen elementos que varíen su condición inicial de estabilidad. Varnes (1978), define los deslizamientos de suelo, como el desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies, que pueden detectarse fácilmente o dentro de una zona relativamente delgada.

Diferentes factores pueden afectar la estabilidad de un talud, tales como la topografía, la sismicidad, la meteorización y la más concurrente, la lluvia.

### 2.1. PRESIONES LATERALES

Para la corrección de deslizamientos activos o para prevenir superficies potenciales de rotura se puede utilizar la inclusión en los mismos de una serie de elementos puntuales estructurales de inercia determinada (elegida según la rigidez y contención que se necesite) que atravesando verticalmente o con un cierto ángulo la masa deslizante y la superficie de deslizamiento se empotran en el terreno firme subyacente, dándole estabilidad al terreno.

El fundamento del funcionamiento de estos pasadores estructurales se basa en la movilización progresiva de empujes sobre dichos elementos debido al movimiento de la masa deslizante, siempre que los pasadores se encuentren suficientemente empotrados dentro del estrato estable.

Los empujes laterales a los cuales está sometido un pilote dentro de una masa en deslizamiento (acciones laterales exteriores), se deben ver como un problema de interacción suelo-estructura, en donde las reacciones del terreno se distribuyen horizontalmente a lo largo del fuste del pilote.

### 2.2. ESTABILIZACIÓN DE DESLIZAMIENTOS CON PILOTES

El concepto general de estabilización con pilotes, se puede explicar mediante la figura 2.1. En esta Poulos y Davis (1980), dicen que la porción de pilote estabilizador de longitud  $L_1$  sobre la superficie de deslizamiento estará sujeta a una fuerza perturbadora  $P$  con una excentricidad "e" sobre dicha superficie.

La fuerza de empuje  $P$  es resistida por la porción inferior del pilote de longitud  $L_2$  y el valor máximo de la fuerza resistente  $H_u$ , viene dada por el menor de los siguientes cuatro valores:

- La resistencia lateral última de un pilote "corto" de longitud  $L_2$ , cargado con una excentricidad  $e$ , controlada por plastificación del suelo bajo la superficie de deslizamiento.
- La resistencia lateral última de un pilote "largo", cargado con una excentricidad  $e$ , controlada por la capacidad última a momento de la sección del pilote.
- La resistencia al esfuerzo cortante de la sección transversal del pilote.
- La carga última que puede generarse en la longitud  $L_1$  del pilote, en caso de ocurrir flujo del suelo alrededor del pilote.

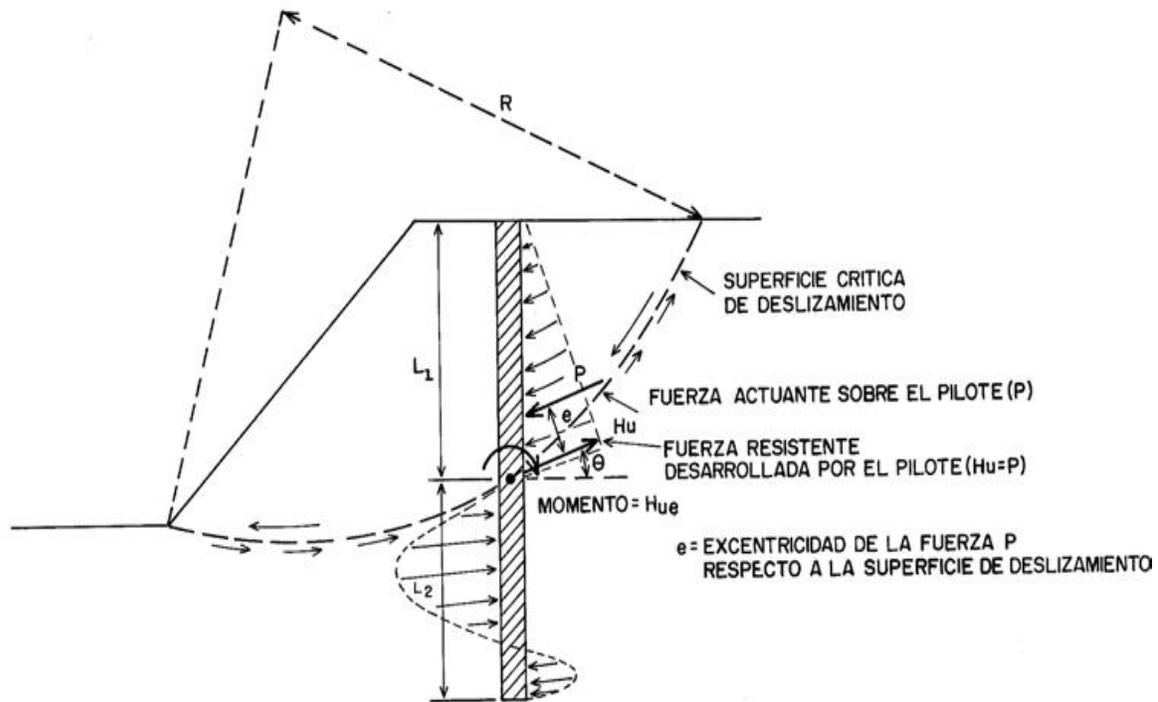


Figura 2.1 Efectos de un pilote en la estabilidad de un talud.

El uso de pilotes para la estabilización de taludes, no es una metodología nueva, existen varias referencias bibliográficas, en las cuales diferentes autores han propuesto formulaciones empíricas y experimentales para resolver el problema.

El utilizar muros de pilotes atravesando la masa en deslizamiento y empotrándose en terreno estable, ha sido un sistema muy utilizado para estabilizar movimientos de masas. Aun cuando la interacción del suelo y la estructura debe ser el eje fundamental de un óptimo diseño, se debe diferenciar el estudio estructural del geotécnico, siendo este último, el que determinará la capacidad portante lateral de los pilotes desde el punto de vista de la resistencia del suelo.

La inclusión de un elemento rígido del tipo pilote pasivo en un suelo con una superficie de falla definida, contrarresta de dos maneras la acción de una masa de suelo deslizante. En primer lugar, los pilotes trabajando a esfuerzos axiales, ejercen una fuerza estabilizadora tomando cargas por rozamiento negativo y en segundo lugar, ejerciendo resistencia

normal y lateral para que el suelo no fluya a través de ellos, ejerciendo una reacción lateral sobre el mismo que tiende a estabilizarlo.

Cuando se trata de evaluar pilotes sujetos a cargas estáticas laterales, hay que diferenciar entre dos grupos:

- Pilotes que se espera transmitirán cargas laterales al suelo.
- Pilotes que estarán sujetos a cargas laterales a lo largo de su fuste, debido a movimientos del suelo donde están incluidos.

En el primer grupo, la carga horizontal es la causa y los movimientos del suelo son la consecuencia. Los pilotes en esta condición se denominan en la literatura “pilotes activos”. En el segundo grupo, los movimientos del suelo son la causa y la carga horizontal a lo largo del fuste del pilote es la consecuencia. Estos se denominan “pilotes pasivos” y sería la condición que primaria en la utilización de ellos para estabilizar laderas con procesos de remoción en masa.

En los dos 2 casos, el problema es controlado por:

- La deformabilidad del pilote (E, I, L).
- La deformabilidad del suelo  $k_h$ , que es función del diámetro, del desplazamiento y de la profundidad del pilote
- La resistencia última del suelo. (De Beer; 1977).
- La rigidez del suelo.

Un pilote pasivo se puede definir como un elemento rígido que se introduce en el terreno, con el fin de aumentar sus características resistentes y disminuir sus deformaciones (Grau; 1987). Además, debe cumplir la condición de que  $\frac{H}{L_e} < 5$ , en donde H, es el espesor de la capa deformable y  $L_e$ , es la longitud elástica del pilote. Esta última, relaciona el módulo elástico del material ( $F_p$ ), el momento de inercia del pilote ( $I_p$ ) y el módulo de corte transversal del suelo (G) mediante la siguiente expresión:

$$L_e = F_p * \frac{I_p}{G}^{\frac{1}{2}}$$

Los pilotes pasivos, además de resistir fuerzas normales, tienden a ofrecer cierta resistencia lateral para que la masa fallada o en proceso de falla no fluya a través de ellos. Dicha fuerza, depende principalmente de los parámetros resistentes del suelo y de la relación que existe entre la separación entre el cuerpo y centro de los pilotes.

Otro tipo de muro, es el muro Berlín, el cual es un sostenimiento mixto compuesto por perfiles metálicos introducidos en una perforación y rellenos con concreto. De esta forma, se define el espaciamiento entre los perfiles y en el espacio entre ellos se coloca un

revestimiento que consiste en elementos prefabricados, concreto proyectado, o con concreto tradicional y uso de encofrado, (Figura 2.2).



Figura 2.2 Muro tipo Berlín

### 2.2.1. Configuración de los pilotes:

Los pilotes de concreto reforzado se colocan en hileras para formar un muro (Figura 2.3).

La configuración puede ser cualquiera de las siguientes:

- Pilas tangentes. Las pilas se encuentran la una exactamente a continuación de la otra en línea recta.
- Pilas secantes. Las pilas se traslapan la una con la otra en la configuración en planta aunque en la práctica son tangentes.
- Pilas en arreglo triangular. Las pilas se encuentran pegadas las unas a las otras siguiendo una línea aserrada.
- Pilas espaciadas. Las pilas se encuentran separadas y el muro se forma por efecto de arco entre ellas.

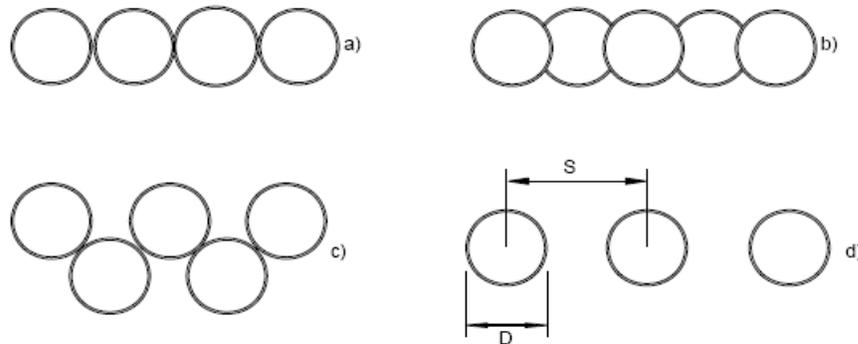


Figura 2.3 Configuraciones de pilotes

Todas estas configuraciones pueden utilizarse para estabilizar deslizamientos. Sin embargo, las más empleadas son las de configuración triangular y las espaciadas.

En cuanto a la separación entre pilotes, se han observado pilotes pre-excavados con diámetros entre 50 centímetros y un metro, espaciados entre 1.5 y 3.0 metros centro a centro, para estabiliza deslizamientos con superficie de falla hasta 6.0 metros de profundidad, dando bueno resultados.

La separación entre pilotes y en particular la relación  $D2/D1$  (siendo  $D2$  la separación entre las caras de los pilotes y  $D1$  la separación entre ejes de pilotes), es un parámetro

fundamental a la hora de evaluar el flujo de suelo entre dos pilotes contiguos, así lo hace notar Ito, etal. (1981), quienes lo utilizan en su planteamiento de fuerzas que actúan a lo largo del fuste de un pilote.

### 2.2.2. Longitud de empotramiento:

El diseño de filas de pilotes, supone que el pilote se comporta como un poste rígido empotrado en el suelo con una  $\frac{L}{D} < 10$ . Por lo tanto, la capacidad del pilote está determinada por la profundidad de empotramiento y la capacidad del suelo o roca en ese empotramiento.

## 3. MÉTODOS PROPUESTOS PARA EVALUAR LA CARGA LATERAL SOBRE PILOTES USADOS PARA LA ESTABILIDAD DE DESLIZAMIENTOS

A continuación se hace una breve descripción de algunos de los modelos que se han propuesto por diferentes autores, para evaluar la carga lateral sobre los pilotes, usados para la estabilidad de deslizamientos.

De los métodos expuestos en la tabla 2, se eligieron los siguientes:

Ito - Matsui, Brandl, Viggiani, Broms y Navfac, porque son los únicos que permiten realizar el análisis de sensibilidad que pretende este trabajo ya que tienen en cuenta variables como el diámetro y separación de los pilotes necesarios para la comparación de métodos.

### 3.1. MODELO DE ITO Y MATSUI (1975, 1981):

- Estudiando la extrusión o deformación plástica del terreno entre los pilotes, Ito y Matsui han elaborado una teoría bastante compleja, pero muy extendida, para evaluar las fuerzas laterales producidas por un talud en una fila de pilotes, cuyas conclusiones han sido puestas en duda para pasadores muy próximos y para suelos granulares.

Esta teoría asume las siguientes hipótesis:

- No se produce reducción de la resistencia al corte a lo largo de la superficie de deslizamiento, debido al fenómeno de "strain softening" causado por el movimiento de la masa de suelo deslizante.
- Por la razón anterior, sólo el suelo existente alrededor de los pilotes se puede asumir que se encuentra en estado de equilibrio plástico, satisfaciendo el criterio de rotura de Mohr-Coulomb.
- De esta forma, la carga lateral actuando en los pilotes puede ser estimada independientemente del estado de equilibrio del talud.
- Inherente a esta aproximación esta la suposición de que el suelo es capaz de sufrir deformaciones plásticas alrededor de los pilotes.

La teoría de la deformación plástica está basada en las siguientes hipótesis adicionales (de acuerdo a la Figura 3.1):

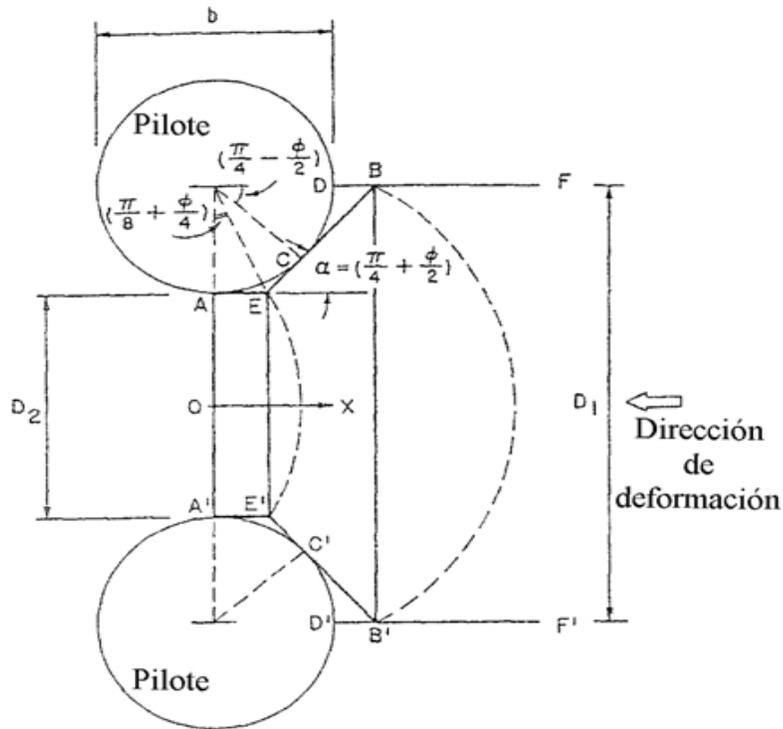


Figura 3.1 Teoría de Ito y Matsui (1975). Deformación plástica alrededor de pilotes.

- Cuando el suelo se deforma, se producen dos superficies locales de deslizamiento en el entorno del pilote, AEB y A'E'B', formando un ángulo de  $\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}$  con respecto al eje X (dirección del movimiento).
- El suelo está en estado de equilibrio plástico sólo dentro del aérea AEBB'E'A', donde el criterio de rotura Mohr-Coulomb tiene aplicación.
- El empuje activo de tierras actúa sobre la línea AA'.
- Las condiciones de deformación plana se mantienen con la profundidad.
- Los pilotes son rígidos.
- La fricción en las superficies AEB y A'E'B' no son consideradas en la distribución de tensión en la masa de suelo AEBB'E'A'.

De esta manera, suponiendo que alrededor de los pilotes se forma una zona plástica, los autores llegan a la siguiente ecuación (EC. 1) que da la presión sobre cada cota del pilote, teniendo como origen de profundidades la superficie del terreno; con las notaciones de la figura 3.1:

$$p_z = C * D1 * \frac{D1}{D2} \frac{(\tan(\phi) * N\phi^{\frac{1}{2}} + N\phi - 1)}{N\phi * \tan \phi} * \left( \exp \frac{D1 - D2}{D2} * N\phi * \tan \phi * \tan \left( \frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) - 2 * N\phi^{\frac{1}{2}} * \tan \phi - 1 \right) + \frac{2 * \tan \phi + 2 * N\phi^{\frac{1}{2}} + N\phi^{-\frac{1}{2}}}{N\phi^{\frac{1}{2}} * \tan \phi + N\phi - 1} * c * D1 * \frac{2 * \tan \phi + 2 * N\phi^{\frac{1}{2}} + N\phi^{-\frac{1}{2}}}{N\phi^{\frac{1}{2}} * \tan \phi + N\phi - 1} - 2 * D2 * N\phi^{-\frac{1}{2}} + \gamma * \frac{Z}{N\phi} * D1 * \frac{D1}{D2} \frac{(\tan(\phi) * N\phi^{\frac{1}{2}} + N\phi - 1)}{N\phi * \tan \phi} * \left( \exp \frac{D1 - D2}{D2} * N\phi * \tan \phi * \tan \left( \frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) - D2 \right)$$

(EC. 1).

Donde:

C= cohesión del suelo

 $\phi$ = Angulo de resistencia interna del suelo.

D1= Distancia entre ejes de pilotes.

D2= Distancia entre fustes de pilotes. Abertura de pilotes.

 $\gamma$  = Peso específico unitario del suelo.

Z= profundidad de la superficie de deslizamiento.

 $N\phi = (\tan(45 + \phi/2))^2$ 

### 3.2. MÉTODO DE BRANDL (1.977-1.993)

Si la obra de contención es capaz de resistir el empuje de la masa de deslizante, no se puede garantizar el comportamiento de la masa deslizante como un sólido rígido (totalmente estable), salvo en formaciones de suelo duro.

Brandl (1977) describe un caso (ver Figura 3.2), en el que existe una cuña de suelo que se comprime contra la pantalla y la masa de suelo superior se encuentra en movimiento de fluencia lenta hacia el talud.

Este mecanismo puede ser utilizado para calcular las cargas reales contra la pared de contención, como sugiere Brandl (1977, 1993). Este autor ha trabajado con pilotes y pozos de gran diámetro. Parte de medidas reales y propone el mecanismo de la Figura 3.1 para taludes en fluencia lenta.

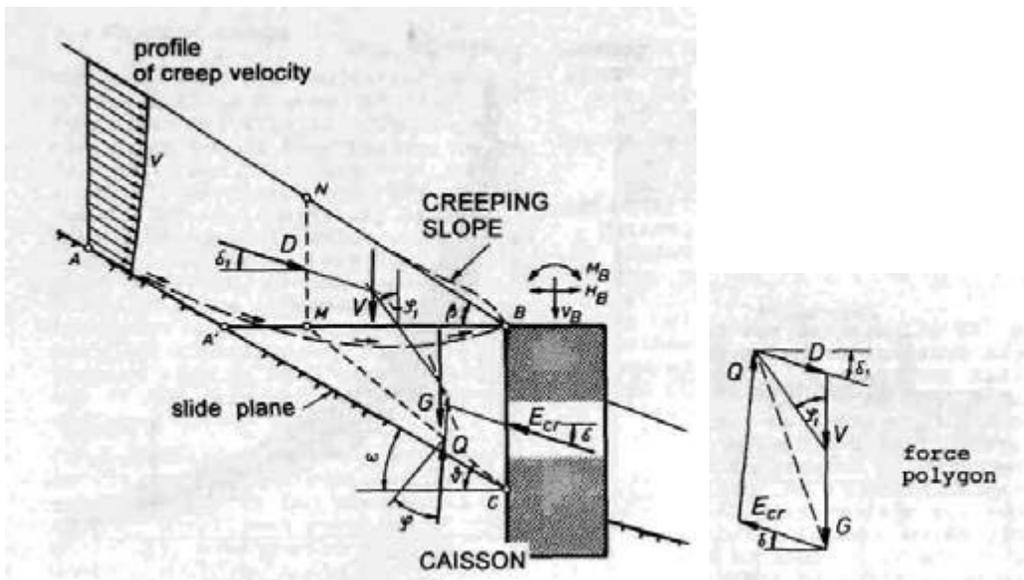


Figura 3.2- Hipótesis para la evaluación de la presión de estancamiento en pilotes de gran diámetro o cajones en deslizamientos de taludes.

El empuje sobre los pilotes corresponderá a una "presión de estancamiento" dada por la siguiente expresión (EC. 2) ideal, que ha demostrado ser muy fiable en la práctica:

$$E_{cr, h} = (1/2) * m(\varphi)(\cos \varphi)^2 * \gamma * h^2 \quad (\text{EC. 2})$$

Donde

$m(\varphi)$ : factor que depende de la flexibilidad de la estructura y se puede tomar de la Figura 3.3, para el correspondiente valor de  $(\varphi)$ .

H: altura de la masa deslizada.

$\gamma$  : Densidad aparente del suelo.



Figura 3.3. Valores del factor  $m(\varphi)$ .

Este autor realizó medidas reales a largo plazo, con el resultado de variaciones muy pequeñas. En consecuencia la presión máxima del deslizamiento puede considerarse constante. En ningún caso se midieron valores altos próximos al empuje pasivo.

Para el caso de una fila de pilotes y para considerar el efecto grupo el autor define un factor de reducción  $\alpha_L$  que se puede tomar de la Figura 3.4, y que se aplicaría de la siguiente forma (EC. 3):

$$Ecr, h (grupo) = \frac{1}{1+\alpha_L} * \sum_{i=1}^n Ecr, h \quad (EC. 3)$$

Siendo  $n$  el número de pasadores considerados.

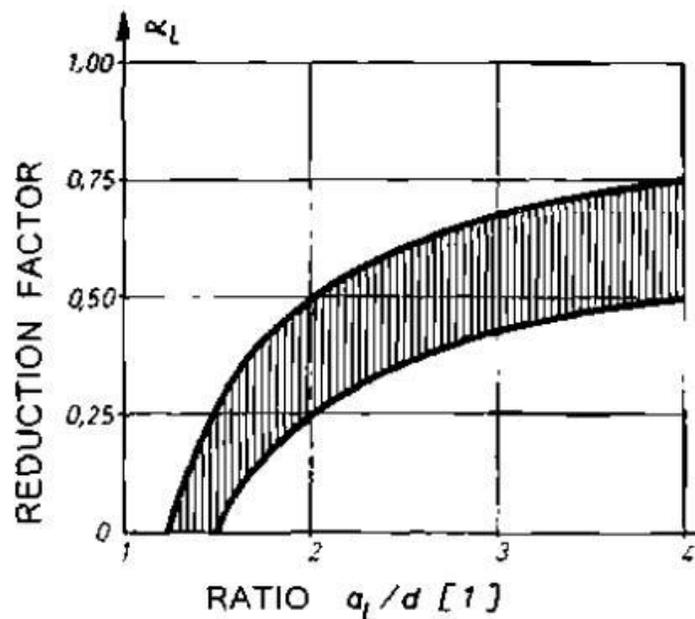


Figura 3.4. Factor reductor  $\alpha_L$ , por el efecto grupo de pasadores.

Siendo:

$\alpha_L$ = factor de reducción.

$a_L$ = Distancia entre ejes de pilotes.

$D$ = diámetro de los pilotes.

### 3.3. MODELO DE VIGGIANI (1.981):

Este método aplicable a los suelos cohesivos utiliza los conceptos desarrollados por Broms (1964) para pilotes bajo carga lateral.

Parte del esquema de cálculo, representado en la Figura 3.5.

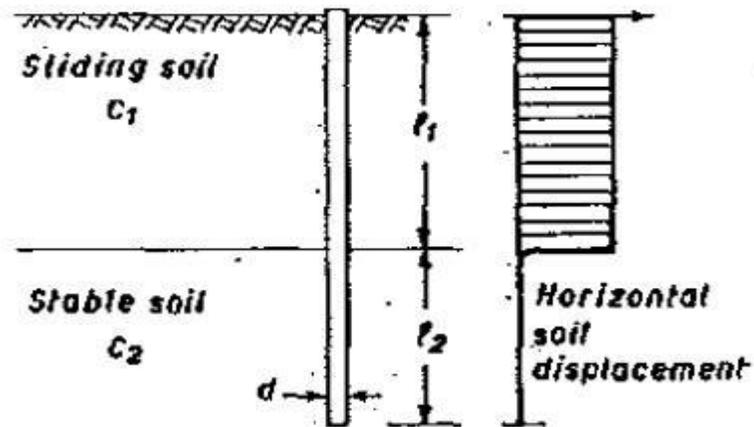


Figura 3.5. Teoría de Viggiani, esquema de cálculo (1981).

Este método supone dos niveles de suelo de espesores  $L_1$  y  $L_2$ , de arcillas saturadas en condiciones sin drenaje, con valores de la resistencia al corte  $C_1$  y  $C_2$ , respectivamente. El nivel de suelo 1 se encuentra deslizado sobre el nivel 2 estable. En aras de simplificar el modelo, considera horizontalmente tanto la superficie del terreno como la superficie de deslizamiento. La teoría supone que los movimientos relativos suelo-pilote son suficientes para plastificar el terreno, con un empuje unitario horizontal último dados por la (EC. 4):

$$P_y = K * C_u * d \quad (\text{EC. 4})$$

Donde:

$P_y$  = Empuje unitario horizontal último.

$C_u$  = Cohesión sin drenaje del terreno.

$d$  = Diámetro del pilote.

$K$  = Factor de capacidad de Carga.

En cuanto a los valores de este factor debe hacerse distinción entre:

- Pilotes "activos".- Cuando el pasador se desplaza en una masa de suelo estable.
- Pilotes "pasivos".- Cuando el pasador se encuentra sometido a una carga lateral debida al movimiento de una masa de suelo deslizante.

El coeficiente  $K$ , se ha demostrado que toma el valor de  $K_{sup}=2$  en la superficie del suelo (Reese, 1958), llegando a un determinado valor constante  $K$ , a partir de una profundidad superior a 3 diámetros ( $d$ ).

Broms, en 1964, adopta un modelo simplificado, con  $P_y = 0$  en una profundidad  $z$  menor o igual que  $1,5d$ .

$P_y = cte = K * c_u * d$  para una profundidad  $z > 1,5d$ .



L = Longitud del pilote.  
d = Diámetro del pilote.

El resto de los parámetros se definen en la Figura 3.5.

$\alpha$  = Coeficiente que varía entre 0,5 y 1.

Para arcilla blanda = 0.8 - 1.0.

Para arcilla dura = 0.4 - 0.5.

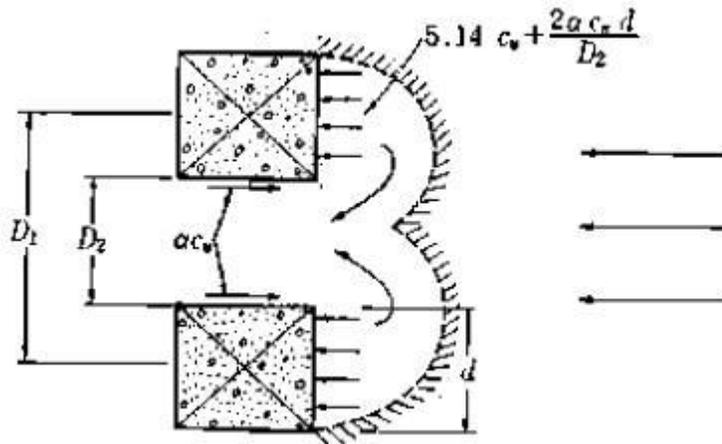


Figura 3.6 Teoría de Broms (1983). Resistencia lateral den un grupo de pilotes en arcilla.

El empuje total así obtenido representa la presión ejercida por unidad de pilote de la pantalla. Para obtener el empuje total por metro lineal (Pu) se multiplica el valor obtenido por el factor  $\frac{1}{D_1}$  siendo D1 la separación entre pilotes en la barrera.

### 3.5. MÉTODO NAVFAC (1986).

Este método, recogido en el Desing Manual (1986) de la U.S Navy, adopta la teoría de Brinch Hansen sobre la resistencia última de pilotes rígidos sometidos a fuerzas transversales.

El esquema de cálculo de la presión lateral se presenta en la Figura 3.7.

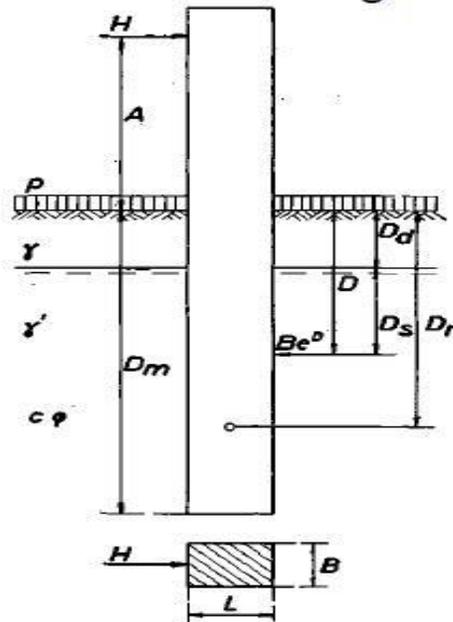


Figura 3.7. Esquema de cálculo.

Se realizan las siguientes hipótesis de cálculo:

- Pila rígida.
- Se desprecian las deformaciones elásticas del pilote en el estado de rotura, suponiendo que gira como un sólido rígido alrededor de un punto actuando a una profundidad  $D_r$ .
- Por encima del centro de rotación la presión pasiva de tierras actúa en el lado derecho y la presión activa en el lado izquierdo. Por debajo del centro de rotación ocurre al contrario.
- Para la resultante de la presión (presión pasiva-presión activa) por unidad de anchura (a una determinada profundidad  $D$ ) se utiliza la siguiente expresión (EC. 6):

$$e^d = q * k_q^d + c * k_c^d \quad (\text{EC. 6})$$

Los valores de  $k_q^c$  y  $k_q^d$  se obtienen de las figuras 3.8 y 3.9.

La correspondiente presión en la pila está dada por la ecuación (E.C 7)

$$P = B * e^d \quad (\text{E.C 7})$$

siendo  $B$  la anchura (diámetro) de la pila.

El valor de  $q$ , es la sobrecarga a la profundidad  $D$ , y se obtiene mediante la siguiente expresión (EC. 8):

$$q = p + \gamma * D_d + \gamma' * D_s \quad (\text{EC. 8})$$

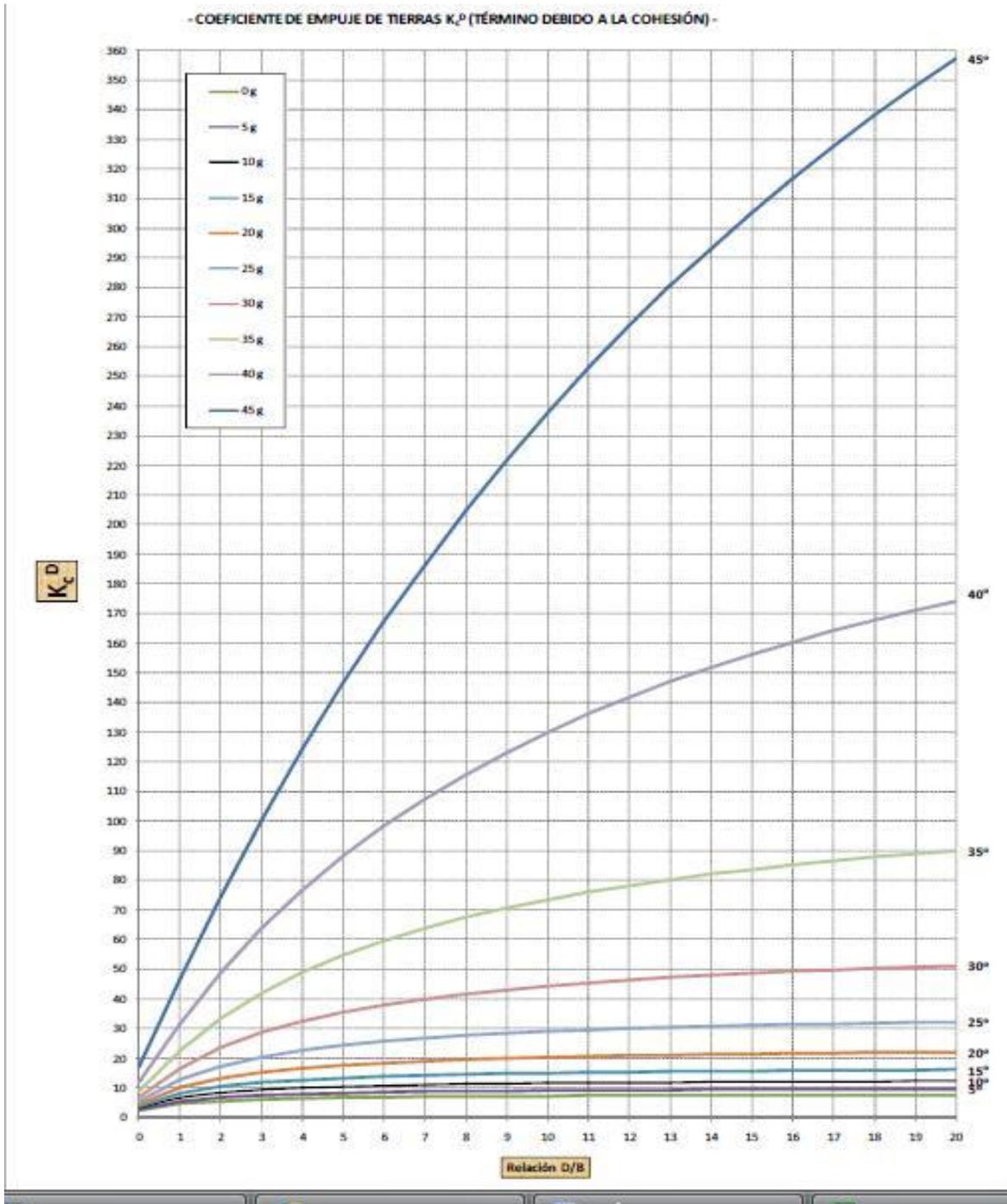


Figura 3.8. Coeficiente  $k_q^c$ .

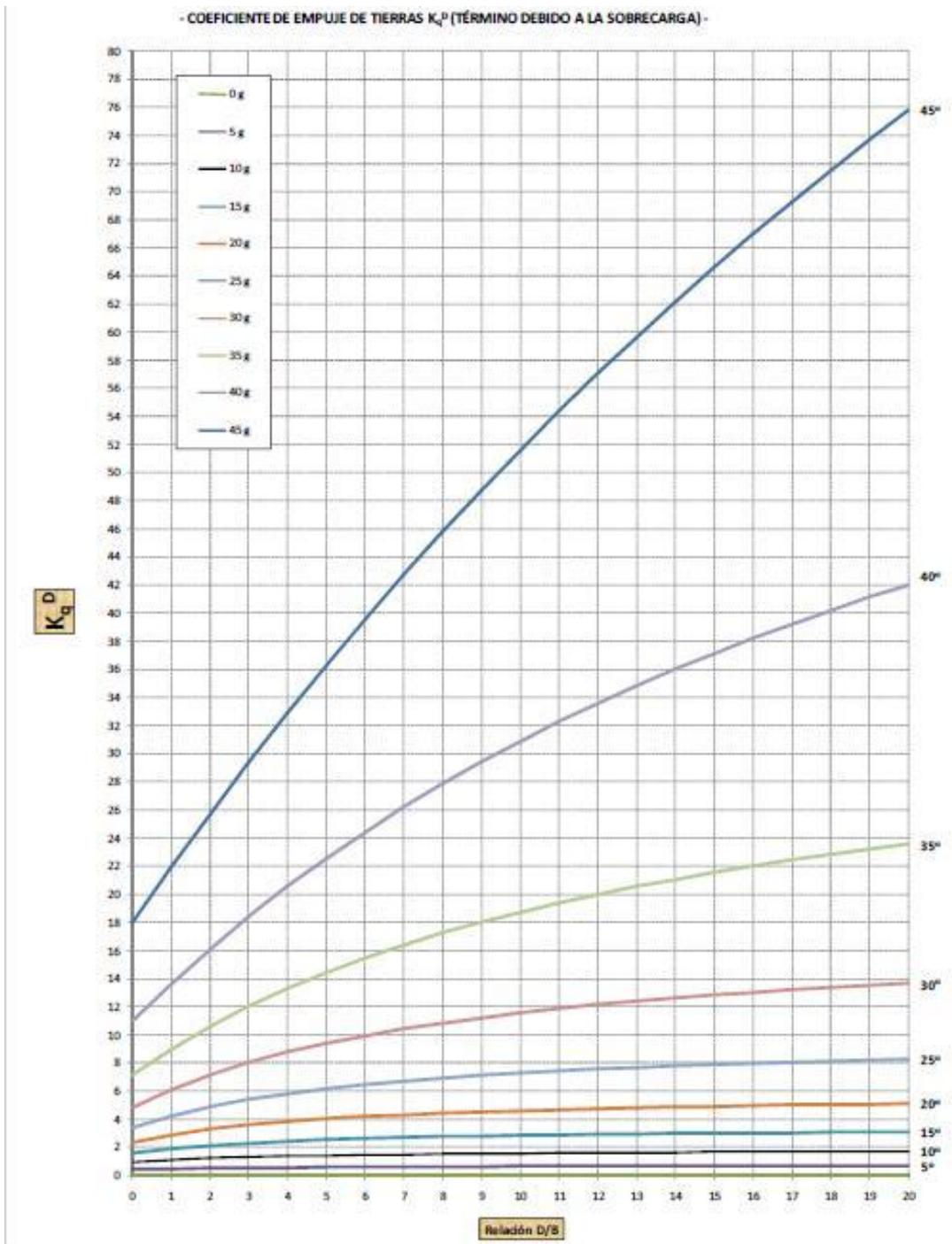


Figura 3.9. Coeficiente  $k_q^d$  .

Para obtener el empuje total  $T$  ( $kN/ml$ ) para una superficie de deslizamiento situada a una determinada profundidad  $z = D$ , se ha supuesto una ley triangular del empuje  $e^{\wedge}(D)$

(aunque la ley real es parabólica, la solución adoptada queda del lado de la seguridad). El empuje total obtenido se multiplica por el factor  $B/s$ , siendo B el diámetro del pilote y S la separación entre pilotes en una barrera.

A continuación, se realiza el análisis de sensibilidad que busca mostrar las presiones de tierras, los cortantes y los momentos que resistiría un grupo de pilotes con unas condiciones iniciales de terreno para cada uno de los métodos propuestos anteriormente, con el fin de compararlos.

## 4. METODOS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS:

### 4.1. ITO Y MATSUI:

Para el método de Ito y Matsui se utilizó Microsoft Excel, programando las fórmulas propuestas en el documento “*DESIGN METHOD FOR STABILIZING PILES AGAINST LANDSLIDE – ONE ROW OF PILES*” de Tomio Ito, Tamotsu Matsui y Won Pyo Hong, con una macro, analizando presiones, cortantes y momentos con respecto a la profundidad del deslizamiento variando el tipo de apoyo.

Al programar las fórmulas se hicieron los cálculos de presiones laterales de tierra  $P(z)$  (EC. 1) con respecto a la profundidad, igualmente los cortantes y momentos para cada condición propuesta (condición de cabeza libre, condición de cabeza sin rotar, condición de bisagra y condición de cabeza fija), realizando listas en Excel con respecto a la profundidad del deslizamiento. Ver ANEXO 1.

Finalmente se procedió a graficar la fuerza soportada por los pilotes, los cortantes y momentos con condiciones iniciales aleatorias mostradas en el análisis de sensibilidad.

### 4.2. BRANDL:

Para el método de Brandl se utilizó Microsoft Excel, programando la fórmula

$$ecrh = \gamma * h * m\phi * \cos \phi^2 * d * \frac{1}{1+\alpha L}$$

Donde:

$m(\phi)$ : Factor que depende de la flexibilidad de la estructura y se puede tomar de la Figura 3.3, para el correspondiente valor de  $(\phi)$ .

$h$ : Altura de la masa deslizada

$\gamma$ : Densidad aparente del suelo

$d$ : Diámetro del pilote

$\alpha L$ : Factor de reducción, que se obtiene de la figura 3.4.

con el fin de hallar las presiones en términos de la profundidad del suelo. Se tiene en cuenta que es una distribución lineal, donde la fórmula se aplica para  $h = 0$  y para  $h = 10$  m.

Para realizar los diagramas de momento y de cortante de los pilotes, se trabajaron como vigas de una luz, en las cuales se variaban las condiciones de los apoyos en el extremo en el cual la profundidad del pilote era igual a 0 ( $h=0$ ), donde este puede ser apoyo de tipo articulado móvil (condición de cabeza sin rotar), apoyo articulado (condición de bisagra) y empotramiento (condición de cabeza fija); cuando la profundidad del pilote era igual a 10 m, se trabajó empotrado.

Siguiendo con la metodología, se utilizó el software SAP 2000 para tener los diagramas de cortante y momento sobre el pilote. Conociendo la presión del pilote por medio de la metodología de BRANDL, se procede a cargar el modelo en SAP (Ver figura 4.1). Inmediatamente se quita el peso propio del pilote para que no tenga en cuenta el peso de este y se analiza el modelo.

A continuación se muestra el modelo cargado de la viga con apoyo articulado móvil y empotrado (ver figura 4.1) y sus diagramas de momento (ver figura 4.2) y de cortante (ver figura 4.3).



Figura 4.1. Modelo apoyo articulado móvil – empotrado cargado.

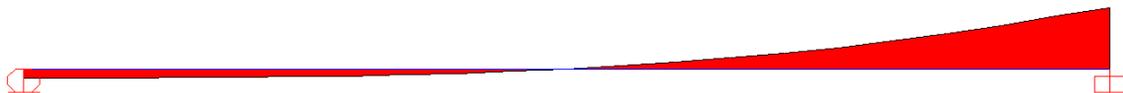


Figura 4.2. Diagrama de cortante modelo apoyo articulado móvil – empotrado



Figura 4.3. Diagrama de momento modelo apoyo articulado móvil – empotrado

Al obtener los resultados de los diferentes diagramas de momento y de cortante, para cada uno de los casos analizados, se procede a exportar todos los resultados a Excel y así mostrar todos los resultados de los diferentes tipos de variaciones del ángulo de fricción ( $\Phi$ ), del diámetro de los pilotes y de la separación de estos mismos necesarios para el análisis de sensibilidad expuestos en el capítulo 5.

#### 4.3. VIGGIANI

Para el método de Viggiani se utilizó Microsoft Excel, programando la fórmula propuesta por el autor (E.C 4)

$$P_y = K * C_u * d$$

Al aplicar esta fórmula,  $k$  toma el valor de 4 para todos los casos desde  $h=0$  m, hasta  $h = 10$  m, esto con el fin de analizar el caso más crítico.

Esta suposición indica que si se tiene un solo estrato con las mismas características, el diagrama de presiones será una línea recta que dependerá directamente de los valores de la cohesión del suelo y del diámetro de los pilotes.

Se procede a analizar las diferentes variaciones que este método permite:

- Variación del diámetro de los pilotes, modificando el tipo de apoyo (apoyo articulado móvil, articulado o empotrado en  $h = 0$ m), en la profundidad  $h = 10$  m, se analiza como si estuviera empotrado ya que esta profundidad está por debajo del plano de falla.

- Variación de la cohesión del suelo, modificando el tipo de apoyo (apoyo articulado móvil, articulado o empotrado en  $h = 0\text{m}$ ), en la profundidad  $h = 10\text{ m}$ , se analiza como si estuviera empotrado ya que esta profundidad está por debajo del plano de falla.

Obtenidos los diagramas de presión se procede a hallar los diagramas de momento y cortante.

Para realizar los diagramas de momento y de cortante de los pilotes, se trabajaron como vigas de una luz, en la cuales se variaban las condiciones de los apoyos en el extremo en el cual la profundidad del pilote era igual a 0 ( $h=0$ ), donde este puede ser apoyo de tipo articulado móvil, apoyo articulado y empotramiento; cuando la profundidad del pilote era igual a 10 m, se trabajó empotrando

Se utilizó el software SAP 2000 para obtener los diagramas de cortante y momento sobre el pilote. Conociendo la presión del pilote por medio de la metodología de VIGGIANI, se procede a cargar el modelo en SAP.

Obtenidos los datos de los diferentes diagramas de momento y de cortante, para cada uno de los casos analizados, se procede a exportar todos los resultados a Excel y así mostrar la incidencia de la variación de la cohesión y del diámetro de los pilotes para este método.

#### 4.4. BROMS

Para el método de BROMS se utilizó Microsoft Excel, programando la siguiente fórmula:

$$p = d * Cu * 5.14 + 2 * \alpha * \frac{D1}{D2}$$

Esta ecuación indica que si se tiene un solo estrato con las mismas características, el diagrama de presiones será una línea recta desde  $h = 0\text{ m}$ , hasta  $h = 10\text{ m}$  que dependerá directamente de los valores de la cohesión del suelo, del diámetro de los pilotes y de la separación de estos.

Para los valores de “ $\alpha$ ” se redujeron a la tabla 4.4.

$\alpha$	Cu
0.9	0-100
0.45	100-250

Tabla 4.4. Valores de  $\alpha$ .

Se procede a analizar las diferentes variaciones que este método permita:

- Variación del diámetro de los pilotes, modificando el tipo de apoyo (apoyo articulado móvil, articulado o empotrado en  $h = 0\text{m}$ ), en la profundidad  $h = 10\text{ m}$ , se analiza como si estuviera empotrado ya que esta profundidad está por debajo del plano de falla.
- Variación de la cohesión del suelo, modificando el tipo de apoyo (apoyo articulado móvil, articulado o empotrado en  $h = 0\text{m}$ ), en la profundidad  $h = 10\text{ m}$ , se analiza como si estuviera empotrado ya que esta profundidad está por debajo del plano de falla.
- Variación de la separación de los pilotes, modificando el tipo de apoyo (apoyo articulado móvil, articulado o empotrado en  $h = 0\text{m}$ ), en la profundidad  $h = 10\text{ m}$ , se analiza como si estuviera empotrado ya que esta profundidad está por debajo del plano de falla.

Obtenidos los diagramas de presión se procede a hallar los diagramas de momento y cortante de la misma forma que en el método de Viggiani, explicado anteriormente.

#### 4.5. NAVFAC

Para el método de NavFac se utilizó Microsoft Excel, programando la fórmula propuesta por el autor (E.C 7)

$$p = B * e^d$$

Donde

$p$  = presión en el pilote  
 $B$  = diámetro del pilote y

$$e^d = q * k_q^d + c * k_c^d$$

Se procede a analizar las diferentes variaciones que este método permita:

- Variación del diámetro de los pilotes, modificando el tipo de apoyo (apoyo articulado móvil, articulado o empotrado en  $h = 0\text{m}$ ), en la profundidad  $h = 10\text{ m}$ , se analiza como si estuviera empotrado ya que esta profundidad está por debajo del plano de falla.
- Variación de la cohesión del suelo, modificando el tipo de apoyo (apoyo articulado móvil, articulado o empotrado en  $h = 0\text{m}$ ), en la profundidad  $h = 10\text{ m}$ , se analiza como si estuviera empotrado ya que esta profundidad está por debajo del plano de falla.

- Variación del ángulo de resistencia interna del suelo ( $\phi$ ), modificando el tipo de apoyo (apoyo articulado móvil, articulado o empotrado en  $h = 0m$ ), en la profundidad  $h = 10 m$ , se analiza como si estuviera empotrado ya que esta profundidad está por debajo del plano de falla.

Obtenidos los diagramas de presión se procede a hallar los diagramas de momento y cortante de la misma forma que en el método de Viggiani, explicado anteriormente.

## 5. ANALISIS DE SENSIBILIDAD

A continuación se muestra un ejemplo completo de cada uno de los cinco métodos expuestos anteriormente.

Se analiza un caso puntual de terreno (según lo requiera el método) y características de los pilotes, hallando diagramas de presión, cortante y momento, con el fin de diferenciarlos y poder sacar conclusiones de cada uno de ellos.

Los resultados de las diferentes variaciones de terreno, tipos de apoyo y características de los pilotes para los cinco métodos, se pueden encontrar en el ANEXO 2.

### 5.1. METODO DE ITO Y MATSUI

A continuación se muestra la incidencia que generaría la variación del tipo de apoyo de pilotes rígidos para el método de Ito y Matsui.

El apoyo se varía cuando la profundidad  $h$  es igual a cero.

Los datos de entrada para la aplicación de este método fueron escogidos aleatoriamente y se exponen a continuación.

INFORMACIÓN DE ENTRADA			
c	50	[KN/m2]	Cohesión del Suelo
$\phi$	20	[°]	Ángulo de fricción interna del suelo
D1	2	[m]	Separación centro a centro de pilotes en una fila
D2	1	[m]	Separación libre entre pilotes (de borde a borde)
$\gamma$	20	[KN/m3]	Peso unitario del suelo
z	15.0	[m]	Profundidad de análisis desde la superficie del suelo
Lp	15	[m]	Longitud del pilote
Ep	2.00E+08	[KN/m2]	Módulo de elasticidad del pilote
Ip	0.049087	[m4]	Momento de Inercia de la sección transversal del pilote
Es	5.88E+03	[KN/m2]	Módulo de elasticidad del suelo
H'	10.0	[m]	Longitud de pilote sobre la superficie de falla
H	10.0	[m]	Distancia entre la superficie del suelo y la superficie del deslizamiento
z'	5.0	[m]	(z-H)

En la figura 5.1 se muestra la grafica de presión de tierras contra la profundidad que arroja el método.

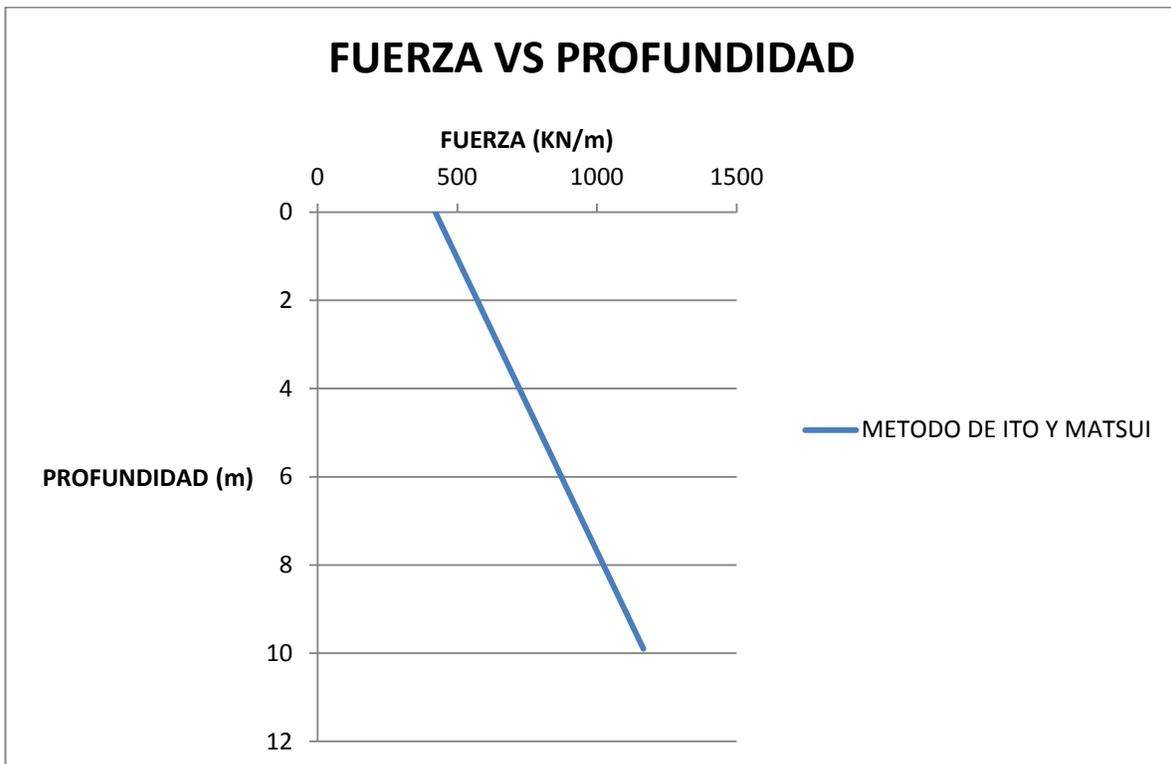


Figura 5.1. Diagrama de presión de tierras para el Método de Ito y Matsui.

A continuación se expone el análisis que tiene el cambio de apoyo en el cortante y momento presentados en las figuras 5.2 y 5.3 respectivamente.

La condición de cabeza libre hace referencia a no tener ninguna restricción en la cabeza del pilote (cuando la profundidad  $h=0$  metros).

La condición que permita el desplazamiento mas no la rotación se genera anclado la cabeza de los pilotes al terreno.

La condición que permita la rotación mas no el desplazamiento se genera uniendo la cabeza de los pilotes con una viga cabezal amarrando todo el grupo en su totalidad.

La condición de cabeza fija se logra combinando las dos opciones anteriores, amarrando los pilotes con una viga cabezal y anclándolos al terreno.

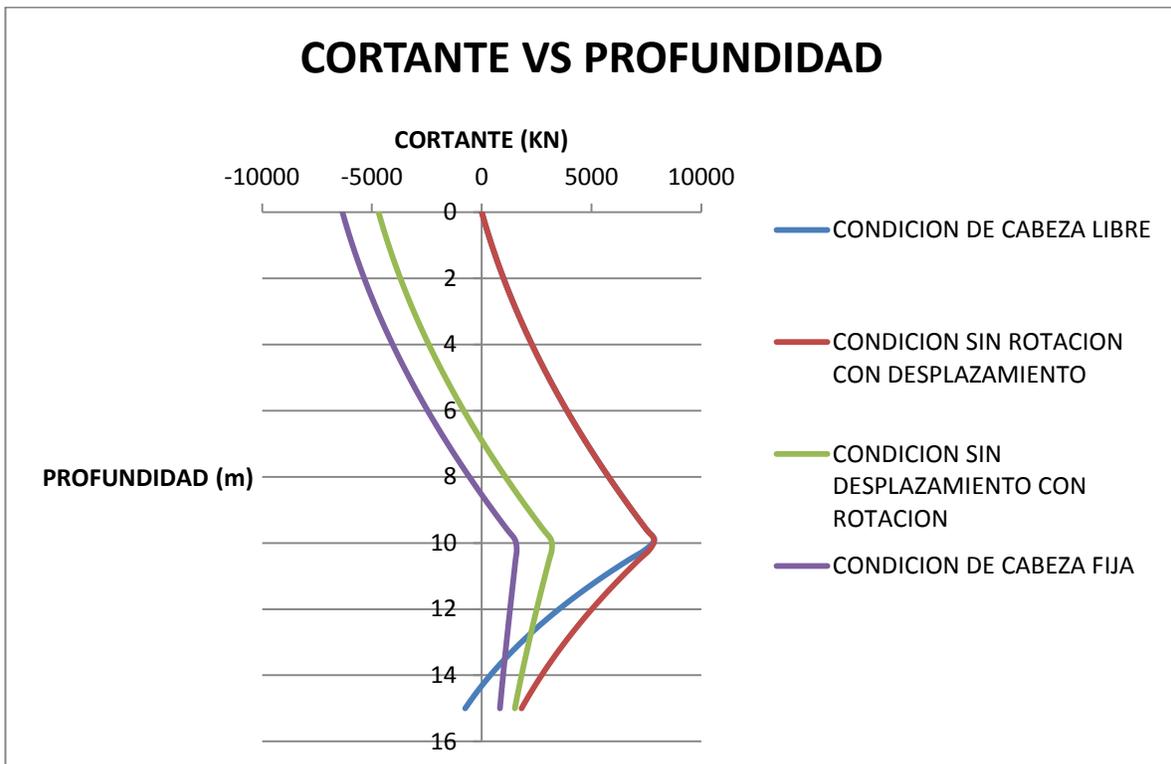


Figura 5.2. Incidencia de la variación del apoyo en  $h=0$  en el cortante. Método de Ito y Matsui.

Como se aprecia en la figura 5.2, al variar el tipo de apoyo los cortantes toman valores diferentes. Mientras que el apoyo de cabeza libre y la condición que permite el desplazamiento mas no la rotación de la cabeza del pilote, se aproximan mucho a cero, la condición que permite la rotación mas no el desplazamiento y la de cabeza fija toman valores grandes y negativos.

Los tres tipos de apoyo tienen un cambio de dirección en el cortante en la profundidad  $h = 10$  metros donde se encuentra el plano de falla.

La condición de cabeza fija inicia con un mayor cortante en  $h = 0$  metros, pero en  $h = 10$  metros soporta el menor de los cuatro tipos de apoyo.

Por otra parte las condiciones de "cabeza libre" y "sin rotación con desplazamiento", en la profundidad  $h = 10$  metros, experimentan el mayor cortante de los cuatro tipos de apoyo.

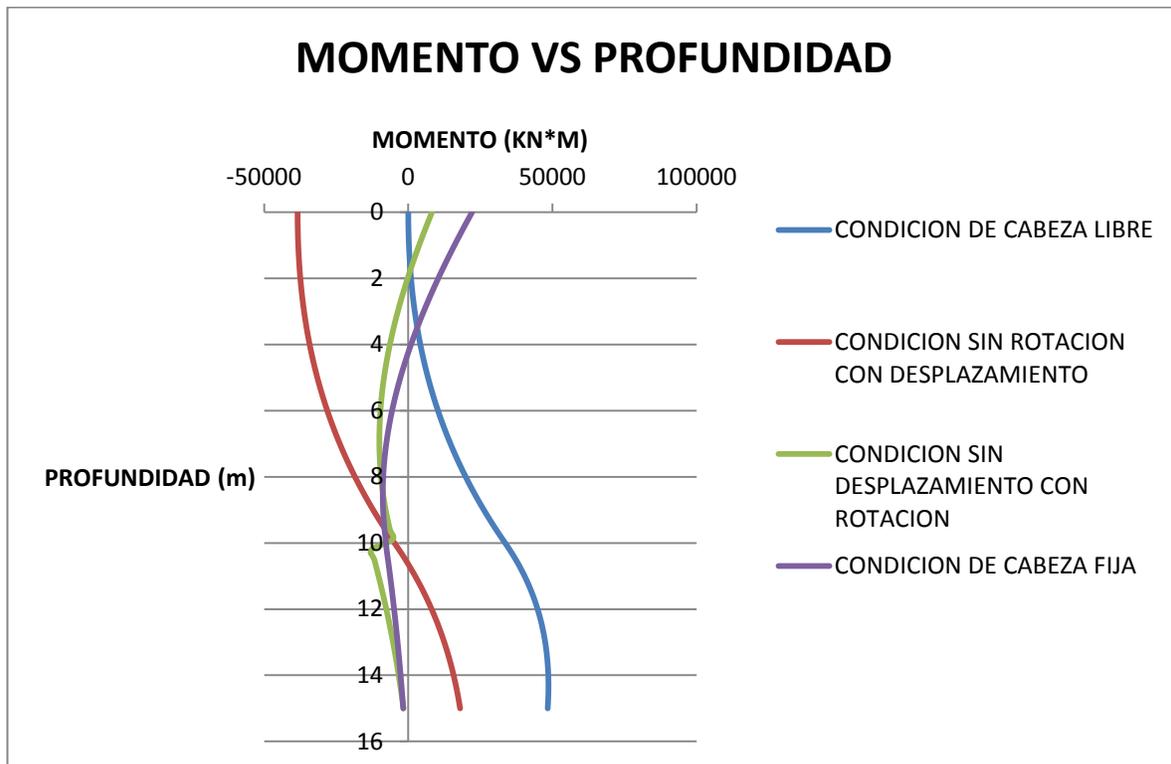


Figura 5.3. Incidencia de la variación del apoyo en  $h=0$  en el momento. Método de Ito y Matsui.

Como lo muestra la figura 5.3, los momentos para los diferentes tipos de apoyo, difieren mucho entre ellos, siendo la condición de cabeza libre la que experimenta un mayor momento en la profundidad  $h = 15$  metros.

Por otra parte, la condición que presenta menores momentos es la “condición sin desplazamiento con rotación”, la cual tiene un máximo en la profundidad  $h = 10$  metros.

Los resultados de todas las variaciones de terreno y de apoyo del método de Ito y Matsui, se encuentran en el ANEXO 2 inciso A.

## 5.2. MÉTODO DE BRANDL:

A continuación, se muestra la incidencia que generaría la variación del diámetro de pilotes rígidos en la presión lateral de tierras en el método de BRANDL.

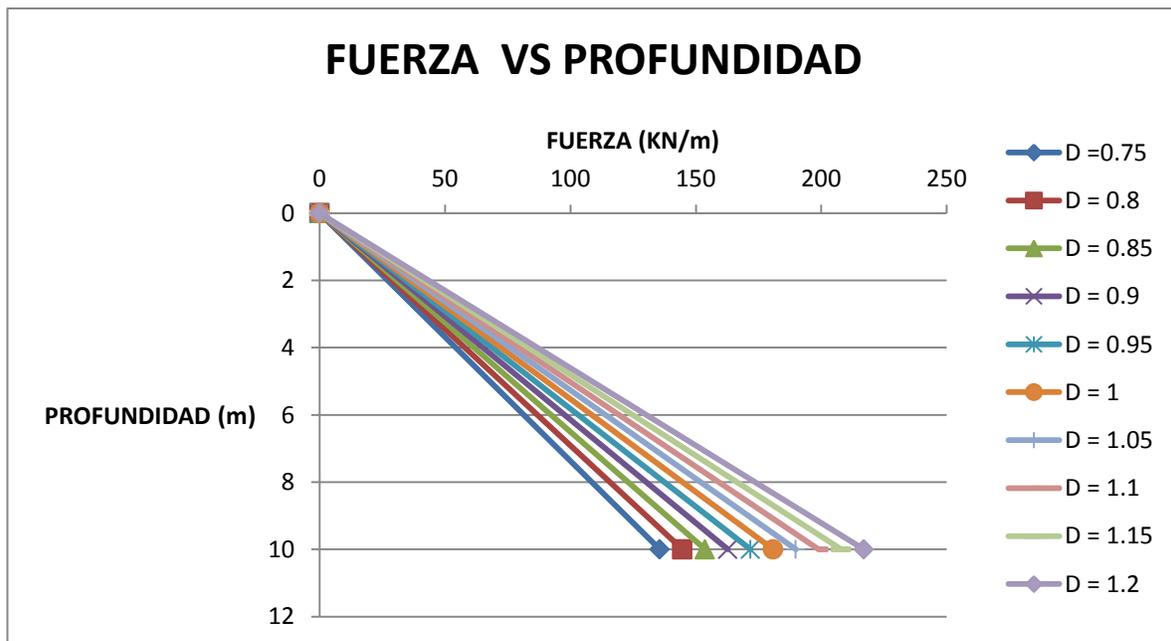
- Condiciones iniciales:

DIAMETRO (M)	VARIABLE
$\phi^\circ$	20
$\gamma$ (KN/M3)	20
H(M)	VARIABLE
SEPARACION (M2)	2*DIAMETRO

El diámetro se varía desde 0.75 m a 1.20 m con variaciones cada 0.05m.

La presión fue calculada en  $h = 0$  m y en  $h = 10$  m teniendo en cuenta  $q$  es una distribución lineal.

En la Figura 5.4 se muestra la incidencia que genera la variación del diámetro de los pilotes, en el diagrama de fuerza lateral sobre los pilotes.



Grafica 5.4. Incidencia de la variación del diámetro en la fuerza lateral. Método de Brandl.

En esta grafica se puede evidenciar que al aumentar el diámetro de los pilotes, estos recibirían una mayor fuerza.

En la Figura 5.5 se muestra la incidencia que genera la variación del diámetro de los pilotes, en el diagrama de cortante sobre pilotes.

Para este ejemplo puntual, en la profundidad  $h = 0$ , se analizo como un apoyo articulado móvil (se permite el desplazamiento mas no la rotación) y en  $h = 10$  m, como empotrado.

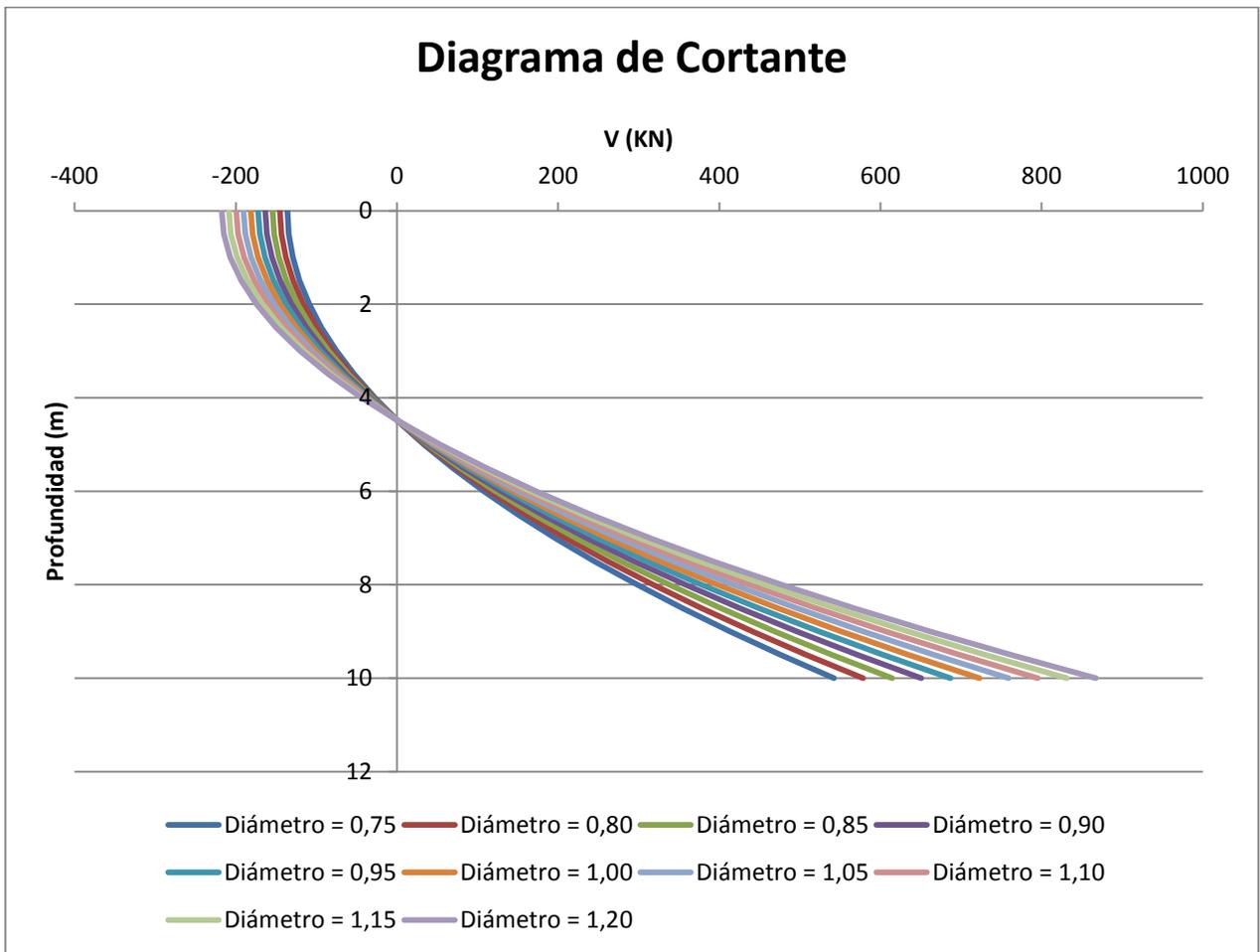


Figura 5.5. Incidencia de la variación del diámetro en el cortante. Método de Brandl.

Como era de esperarse, los pilotes con mayor diámetro experimentan un mayor cortante en la profundidad  $h = 10$  m.

En la Figura 5.6 se muestra la incidencia que genera la variación del diámetro de los pilotes, en el diagrama de momento sobre pilotes rígidos.

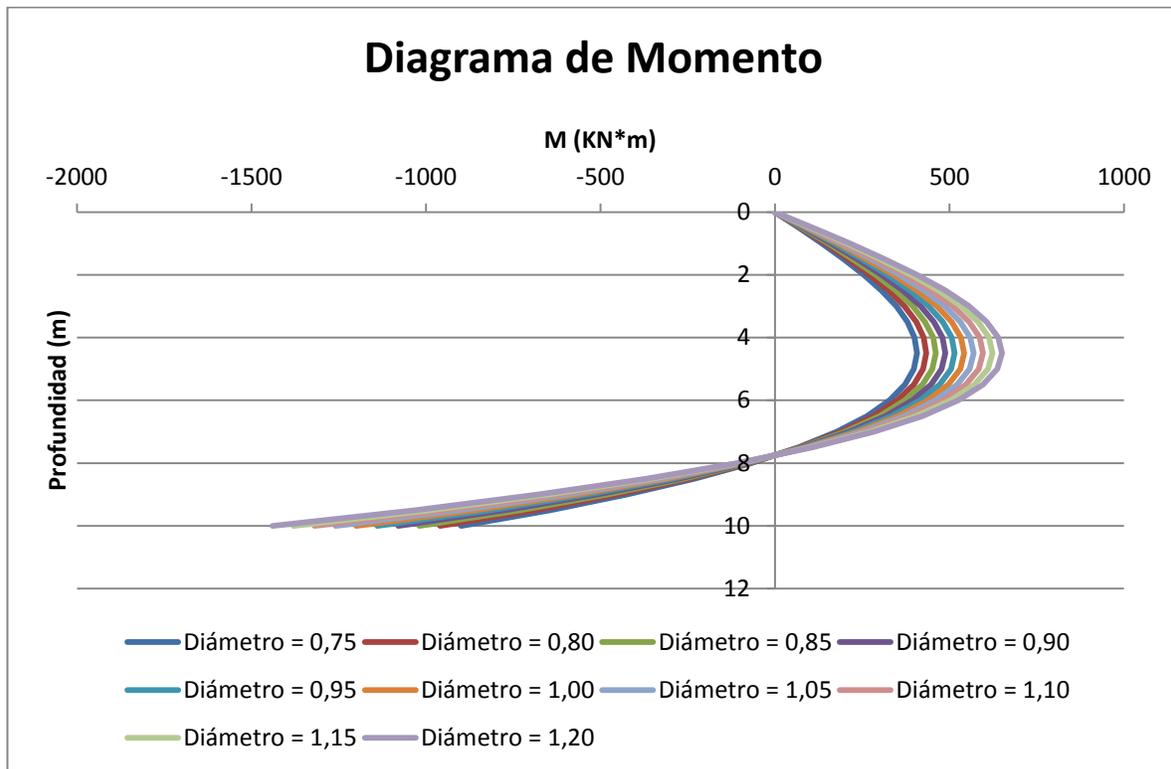


Figura 5.6. Incidencia de la variación del diámetro en el momento. Método de Brandl.

De igual manera, los pilotes rígidos con un mayor diámetro, experimentan un momento más grande.

Un pilote rígido de diámetro  $d = 1.2$  m, a la profundidad  $h = 10$  m, experimenta un momento de  $-1439$  kn\*m.

El análisis completo de todas las variaciones de este método, están expuestas en el ANEXO 2 inciso B.

### 5.3. METODO DE VIGGIANI

A continuación se muestra la incidencia que tiene la variación de la cohesión del suelo, en la presión de tierras, el cortante y el momento de los pilotes, para el método de Viggiani.

- Condiciones iniciales:

DIAMETRO (M)	1
Cu	VARIABLE
L1 (M)	10
SEPARACION	2

La cohesión se varía desde 50 kPa hasta 250 kPa con un  $\Delta C = 50$ .  
La presión da una línea recta con  $P_y$  constante desde  $h = 0$  m hasta  $h = 10$  m.

En la Figura 5.7 se muestra la incidencia que genera la variación de la cohesión del suelo, en el diagrama de fuerza lateral sobre los pilotes.

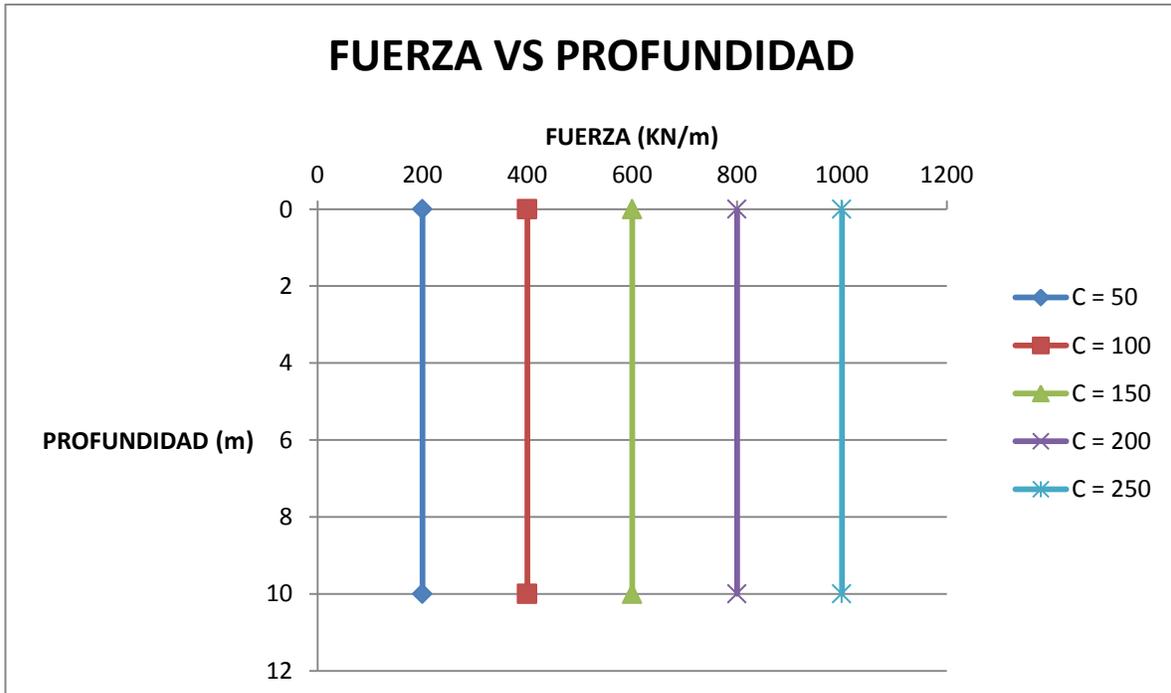


Figura 5.7. Incidencia de la cohesión en la fuerza lateral sobre pilotes. Método de Viggiani.

La Figura 5.7 muestra que entre mayor sea la cohesión del suelo, mayor será la fuerza que reciben los pilotes.

En la Figura 5.8 se muestra la incidencia que genera la variación de la cohesión del suelo, en el diagrama de cortante sobre pilotes.

Para este ejemplo puntual, en la profundidad  $h = 0$ , se analizó como un apoyo articulado móvil (se permite el desplazamiento mas no la rotación) y en  $h = 10$  m, como empotrado.

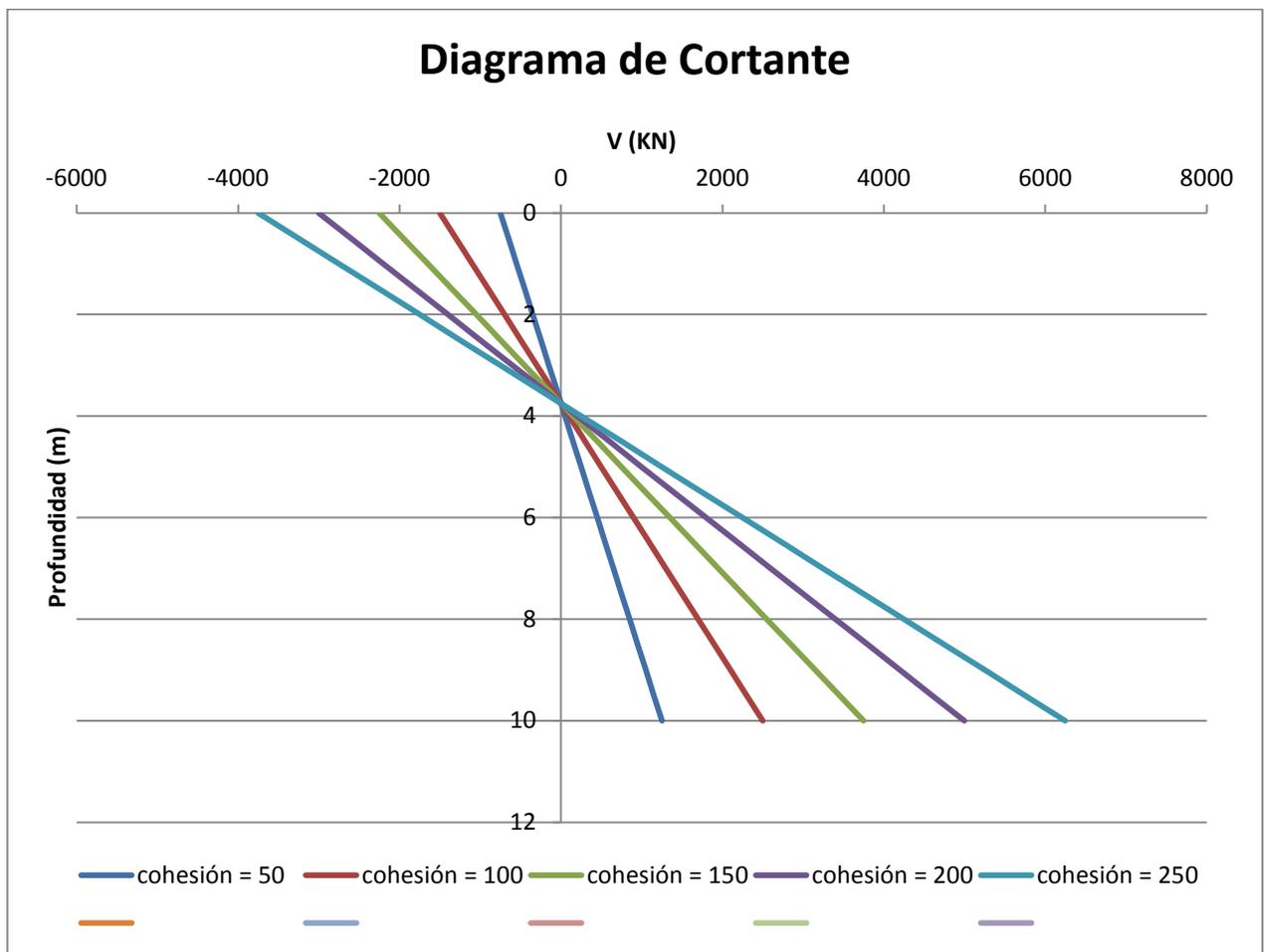


Figura 5.8. Incidencia de la cohesión en el cortante. Método de Viggiani.

El mayor cortante se evidencia en los suelos con una mayor cohesión.

En la Figura 5.9 se muestra la incidencia que genera la variación de la cohesión del suelo, en el diagrama de momento sobre los pilotes.

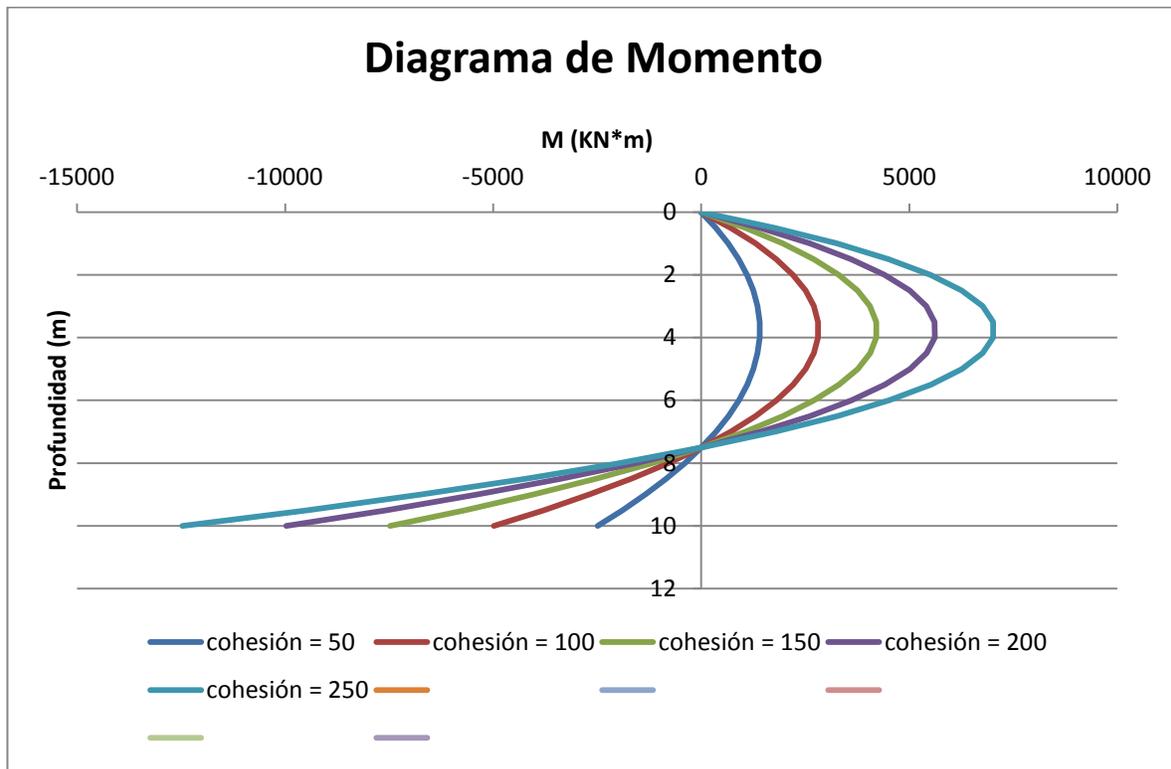


Figura 5.9. Incidencia de la cohesión en el momento. Método de Viggiani.

De igual manera, y como era de esperarse, a mayor cohesión del suelo, mayor es el momento que experimentan los pilotes. Esto indica, que a mayor cohesión del suelo, mayor será el refuerzo de acero del pilote necesario para estabilizar un talud.

El análisis completo de todas las variaciones de este método, están expuestas en el ANEXO 2 en el inciso C.

#### 5.4. METODO DE BROMS

A continuación, se muestra la incidencia en la presión de tierras, los cortantes y momentos, que generaría variar la separación de los pilotes.

- Condiciones iniciales:

DIAMETRO (M)	1
Cu	50
L1 (M)	10
SEPARACION (M)	VARIABLE

La separación se varía desde 1.5 m hasta 3 m con un  $\Delta S = 0.25$  m.

La presión da una línea recta con P constante desde  $h = 0$  m hasta  $h = 10$  m, siguiendo el método propuesto por el autor.

En la Figura 5.10 se muestra la incidencia que genera la variación de la separación de los pilotes, en el diagrama de fuerza lateral sobre los pilotes

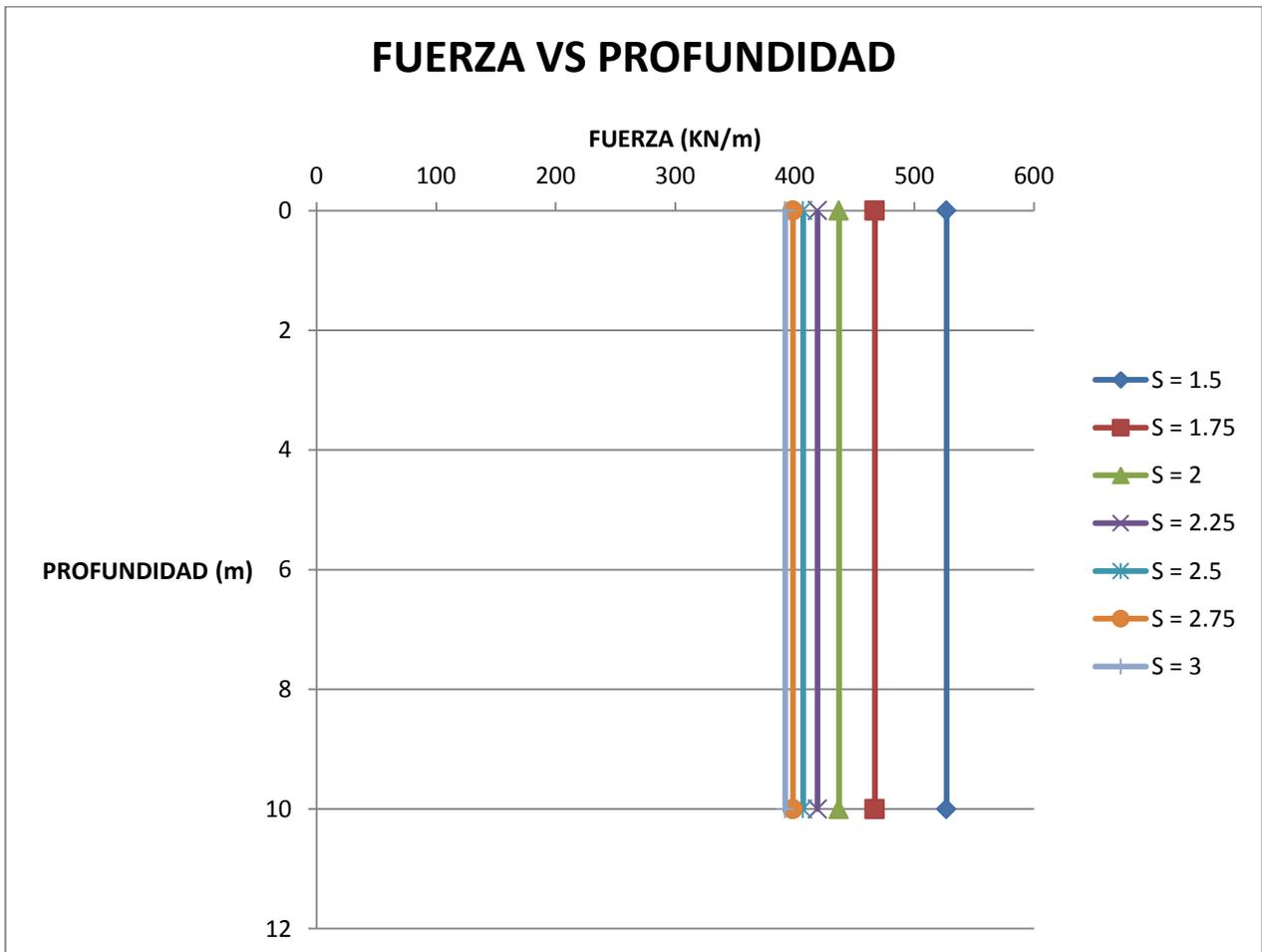


Figura 5.10. Incidencia de la separación de los pilotes en la fuerza lateral. Método de Broms.

Como se ve en la Figura 5.10, para el método de Broms, al aumentar la separación entre los pilotes, disminuye la presión que estos experimentarían.

En la Grafica Figura 5.11, se muestra la incidencia que genera el variar la separación de los pilotes, en el cortante de los mismos.



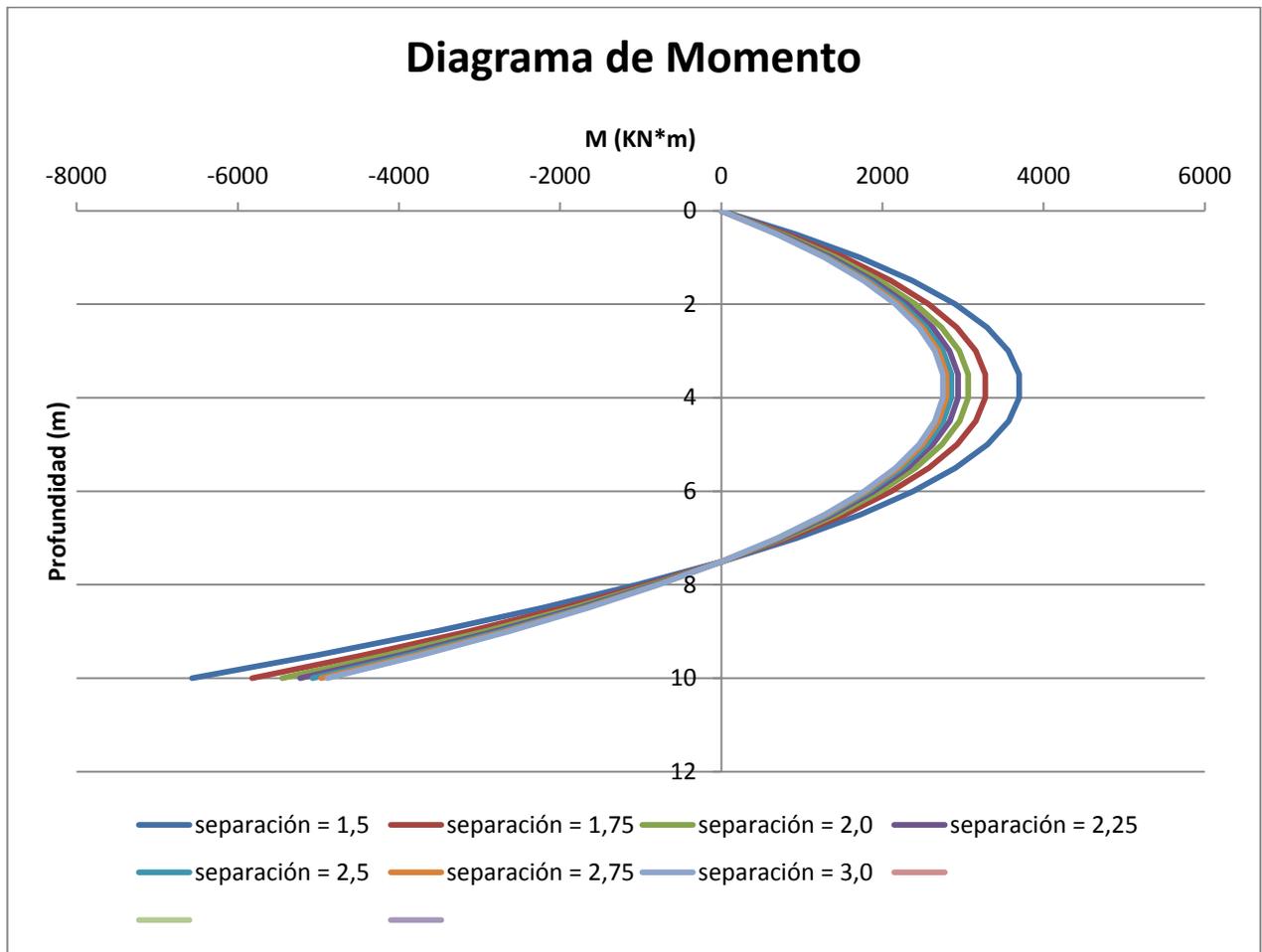


Figura 5.12. Incidencia de la separación de los pilotes en momento Método de Broms.

El método de Broms, sugiere que para que los pilotes experimenten un menor momento y cortante, estos mismos deben estar más separados. Sin embargo esta separación no debe ser demasiado amplia, ya que los pilotes dejarían de trabajar en grupo y comenzarían a trabajar individualmente.

El análisis completo de todas las variaciones de este método, están expuestas en el ANEXO 2 en el inciso D.

### 5.5. NAVFAC

A continuación, se muestra la incidencia que generaría la variación del diámetro de pilotes rígidos en la presión lateral de tierras en el método de NAVFAC.

- Condiciones iniciales:

B (DIAMETRO)	VARIABLE
C	50
$\phi^\circ$	20
D (PROFUNDIDAD)	10
SEPARACION (M2)	2*DIAMETRO

El diámetro se varía desde 0.75 m a 1.20 m con variaciones cada 0.05m. La presión fue calculada en  $h = 0$  m y en  $h = 10$  m teniendo en cuenta  $q$  es una distribución lineal.

En la Figura 5.13 se muestra la incidencia que genera la variación del diámetro de los pilotes, en el diagrama de fuerza lateral sobre los pilotes.

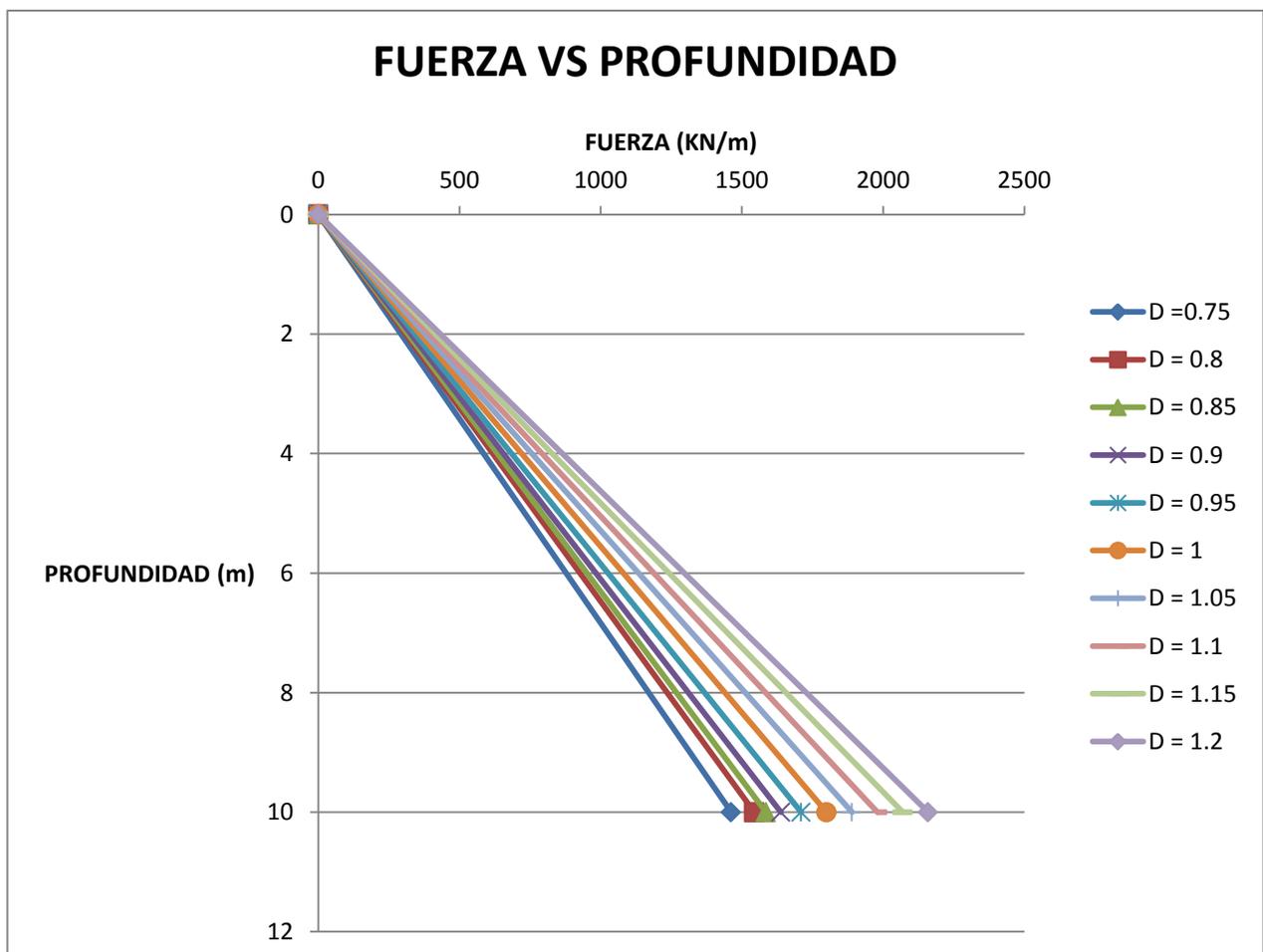


Figura 5.13. Incidencia de la variación del diámetro en la fuerza lateral. Método de NavFac.

Al igual que en el método de Brandl, se puede evidenciar en el método de NavFac, que al aumentar el diámetro de los pilotes, estos recibirían una mayor fuerza. En otras palabras, el diámetro es directamente proporcional a la fuerza que resisten los pilotes.

En la Figura 5.14 se muestra la incidencia que genera la variación del diámetro de los pilotes, en el diagrama de cortante sobre pilotes.

Para este ejemplo puntual, en la profundidad  $h = 0$ , se analizó como un apoyo articulado móvil (se permite el desplazamiento más la rotación) y en  $h = 10$  m, como empotrado.

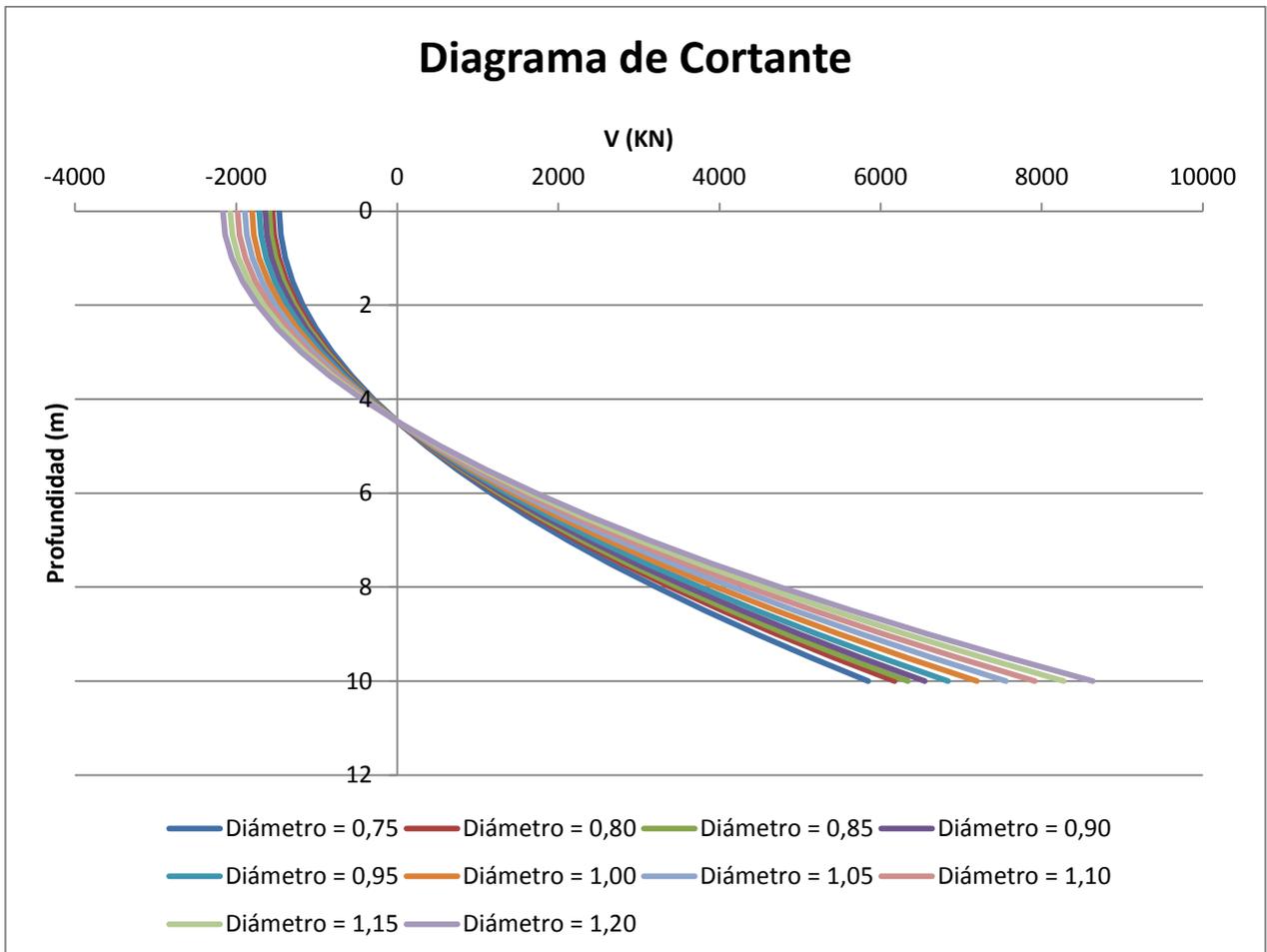


Figura 5.14. Incidencia de la variación del diámetro en el cortante. Método de Brandl.

De igual manera, los pilotes con mayor diámetro experimentan un mayor cortante en la profundidad  $h = 10$  m.

En la Figura 5.15 se muestra la incidencia que genera la variación del diámetro de los pilotes, en el diagrama de momento sobre pilotes rígidos.

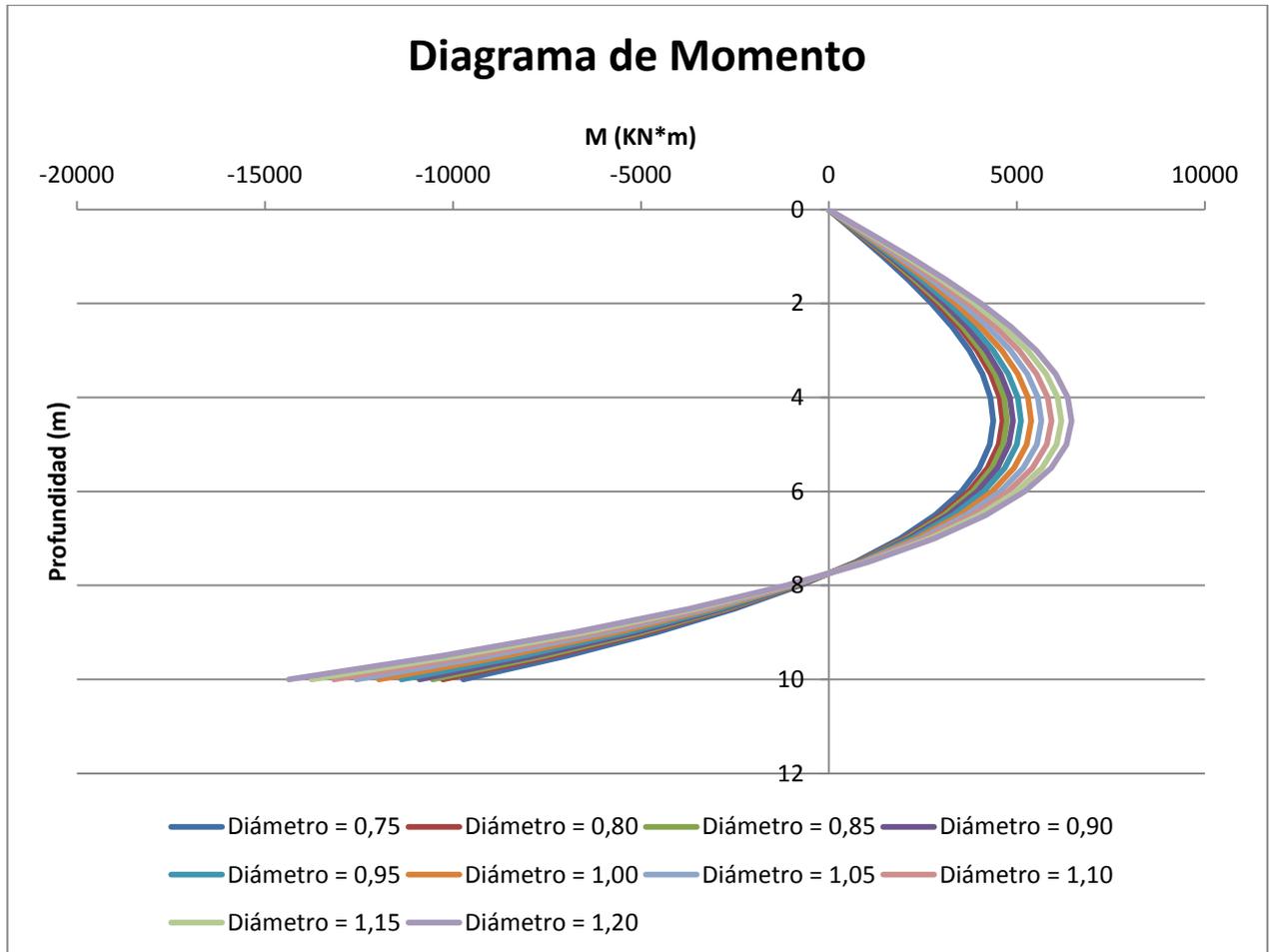


Figura 5.15 Incidencia de la variación del diámetro en el momento. Método de Brandl.

De igual manera, los pilotes rígidos con un mayor diámetro, experimentan un momento más grande.

Un pilote rígido de diámetro  $d = 1.2$  m, a la profundidad  $h = 10$  m, experimenta un momento de  $-14362$  kn\*m, que al compararlo con el método de Brandl es muy superior. Esto significa que los pilotes con mayor diámetro, seguramente necesitarían un mayor refuerzo de acero para mitigar estos momentos.

El análisis completo de todas las variaciones de este método, están expuestas en el ANEXO 2.

## 5.6. CONCLUSION ANALISIS DE SENSIBILIDAD:

Al analizar los cinco métodos de este estudio, se observan diferentes órdenes de magnitud en presiones, cortantes y momentos, dependiendo del método analizado.

Los métodos de Brandl, Viggiani y Broms tienen valores parecidos y más pequeños al compararlos con Ito-Matsui y Navfac.

Al examinar la fuerza que resistirían los métodos de Brandl, Viggiani y Broms, se observa que los valores oscilan entre 200 y 1000 KN/M. Mientras que los de Navfac oscilan entre 1000 y 2000 KN/M.

Por otra parte, el método que propone mayores presiones laterales de tierra es el de Ito-Matsui, donde los valores oscilan entre 1000 y 5500 KN/M.

En ese orden de ideas, es de esperar que pase lo mismo con los cortantes y los momentos que tendrían que resistir los pilotes dependiendo del método a utilizar.

Los métodos de Brandl, Viggiani y Broms, continúan teniendo un orden de magnitud menor en el cortante. Brandl oscila entre -200 y 600 KN, mientras que Viggiani y Broms aumentan su valor oscilando entre -4000 y 6000 KN.

En la grafica del cortante del método de Navfac, los valores aumentan entre -2000 y 8000 KN.

Al igual que en la presión lateral de tierras, para el cortante de Ito y Matsui se evidencian valores muy superiores a los demás métodos, estos están por el orden de -30000 y 20000 KN.

Como es de esperar, en los diagramas de momento ocurre lo mismo.

En las graficas de momento del método de Brandl se obtienen los valores más pequeños, con un orden de magnitud entre -1500 y 500 KN\*M. Viggiani por su parte, arroja valores de momento mínimos y máximos en un orden de magnitud de -12500 y 7000 KN\*M respectivamente.

Los momentos máximos y mínimos obtenidos de las graficas de Broms oscilan entre 4000 y -8000 KN\*M respectivamente.

En el método de Navfac aumentan los momentos máximos y mínimos considerablemente, oscilando entre 7000 y -15000 KN\*M.

Por último y como se ha venido demostrando en los diferentes casos, el método de mayores valores de momentos es el de Ito-Matsui, donde los valores son muy grandes y varían entre -30000 y 70000 KN\*M.

Al comparar el tipo de apoyo en la profundidad  $h=0$  metros, se llegó a las siguientes conclusiones:

Al analizar las graficas del ANEXO 2 Enciso A, para el método de Ito y Matsui, el apoyo de cabeza libre es quien experimenta los mayores cortantes y momentos

Por otra parte, el apoyo que arroja menores valores de cortante y de momento, es la condición que permite la rotación más no el desplazamiento. Para obtener esta restricción se deben amarrar la cabeza de los pilotes con una viga cabezal, que comprenda el grupo de pilotes en su totalidad.

Sin embargo, para los otros cuatro métodos (Brandl, Viggiani, Broms y Navfac), muestran que los cortantes y momentos más pequeños, se obtienen empotrando el pilote en la profundidad  $h=0$  metros (condición de cabeza fija). Esta restricción se logra anclando la cabeza de los pilotes al terreno y amarrando la misma con una viga cabezal.

Por otra parte, al restringir la rotación o el desplazamiento, el pilote resistirá el mismo cortante y el mismo momento sin importar que condición se elija.

Examinando los valores de cortante y momento de los diferentes métodos y al observar que difieren mucho entre ellos, es muy importante analizar que autor se elige a la hora de estabilizar un talud.

Si se elige un método con menores valores de cortante y momento como lo es el método de Brandl, se debe pensar en que tan confiable es el método ya que, para este método puntualmente, no se tiene en cuenta la cohesión del suelo, factor que influye mucho en la presión lateral de tierras y por ende en el cortante y en el momento.

El método de Ito y Matsui es el que mejor representa lo que físicamente ocurre en el problema. Este método determina presiones laterales de un suelo que se desplaza a través de los pilotes. Los otros métodos determinan la capacidad de carga lateral del suelo y algunos no tienen en cuenta todos los parámetros de este.

El método de Ito y Matsui es el que mejor representa lo que físicamente ocurre en el problema. Es el único que en realidad modela la resistencia del pilote al haber un deslizamiento de un talud, tiene en cuenta todos los factores del suelo y la presión de tierras bajo el plano de falla. Los otros 4 métodos determinan la capacidad de carga lateral del suelo y algunos no tienen en cuenta todos los parámetros de este.

Con el fin de poder hacer un análisis económico de los cinco métodos propuestos, se aplicaron los cálculos a un caso real, ubicado en la vía Bogotá – Villeta expuesto en el siguiente capítulo.

## **6. APLICACIÓN A UN CASO REAL:**

### **ESTUDIO Y DISEÑOS DE LA SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA A LA INESTABILIDAD UBICADA EN EL K76+200 (CHORIZO DE CARLOS), DE LA AUTOPISTA BOGOTÁ – VILLETA RUTA NACIONAL 50 TRAMO 8 EN EL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA**

#### **6.1. INTRODUCCION**

El estudio que se muestra a continuación fue realizado por Rodríguez (2010), como respuesta a la solicitud de la empresa Concesión Sabana de Occidente S.A, para hacer el estudio y diseños de la solución constructiva a la inestabilidad de la autopista Bogotá – Villeta de la ruta nacional 50 tramo 8 en el departamento de Cundinamarca.

#### **6.2. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA**

El sitio de interés se localiza a aproximadamente 4 Km. al norte del Municipio de Villeta, sobre la autopista Bogotá-Medellín (Abscisa PR69+450), aproximadamente a 100 m. de la margen derecha del Río Villeta.

El sitio a analizar, queda comprendido en el valle del Río Villeta, su altitud es de 735 a 800 m.s.n.m. El clima es cálido, con precipitación pluvial moderada a baja y de condición bimodal anual.

Las coordenadas geográficas aproximadas del tramo de estudio son:

- Latitud 4° 14' 11.14" Norte.
- Longitud 74° 42' 57.71" Este.

El Municipio de Villeta, hace parte del Departamento de Cundinamarca y está ubicado a 91 kilómetros de la ciudad de Bogotá. En la Figura 6.1, se presenta un detalle de la zona de estudio en su contexto nacional, regional y local.

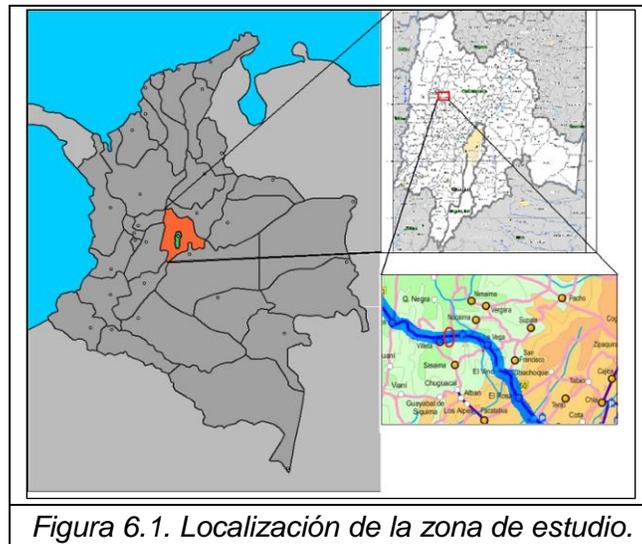


Figura 6.1. Localización de la zona de estudio.

### 6.3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En el área de estudio se presentan materiales coluviales lutíticos, los cuales se ven afectados con facilidad por procesos de meteorización y por la dinámica de los cauces de agua presentes en el sector.

Deslizamientos rotacionales y cárcavas se pueden apreciar en toda el área de estudio. En particular dos procesos importantes y cuyo condicionante es el agua se presentan al noreste, los cuales se describen a continuación.

El primero, es la generación de cárcavas en una quebrada que fue atravesada por la construcción de la vía, la cual aumento su caudal debido al aporte de agua de escorrentía superficial que recoge la vía. Este proceso deja taludes de hasta 6 metros de altura con pendientes casi verticales.

El otro proceso tiene que ver con un deslizamiento rotacional de gran magnitud, debido a la socavación en la pata del talud, por acción de la dinámica del río Villeta.

Las evidencias mostradas, hacen pensar que en el sitio conocido como El Chorizo de Carlos, se presenta un proceso de remoción en masa del tipo traslacional, aparentemente a lo largo de una superficie de falla generada entre un depósito de flujo antiguo y material residual de la Formación Trincheras, el cual se ve favorecido por la saturación y meteorización de los materiales.

## Procesos de remoción en masa

En el estudio presentado por Rodríguez (2010), se observa a la altura del PR 69+530 un deslizamiento rotacional, con corona a la altura de las viviendas, presenta escalonamiento, y grietas formando escarpes de hasta 50 cm. de apertura (Fotografía 1). Su causa principal es la socavación en la pata del talud por el Río Villeta, y se asocia como detonante el manejo de agua en la ladera, el cual genera saturación de los materiales, especialmente en temporadas invernales. Las estructuras de drenaje existentes se encuentran en mal estado, o son insuficientes para controlar la escorrentía superficial, permitiendo la infiltración en el suelo deforestado.



*Fotografía 1. Corona deslizamiento, PR 69+530.*

Entre el PR 60+400 y 69+500, se observan numerosos hundimientos y desplazamientos en la vía (Fotografías 2 y 3), asociados a un deslizamiento traslacional que afecta el terraplén de la vía.

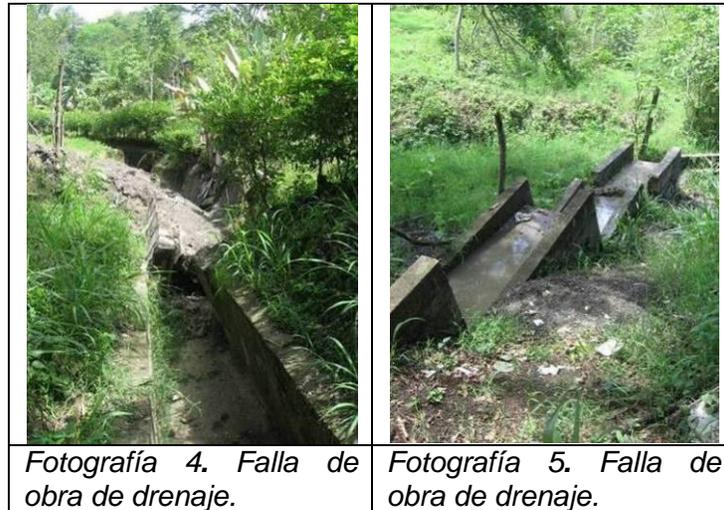


*Fotografía 2. Desplazamientos en la vía*



*Fotografía 3. Desplazamientos en la vía.*

Este deslizamiento es un movimiento desde la ladera superior involucrando los depósitos coluviales saturados por procesos de infiltración. Las estructuras de drenaje que controlan la escorrentía en el talud superior e inferior se ven afectadas, evidenciado por su basculamiento y ruptura (Fotografías 4 y 5).



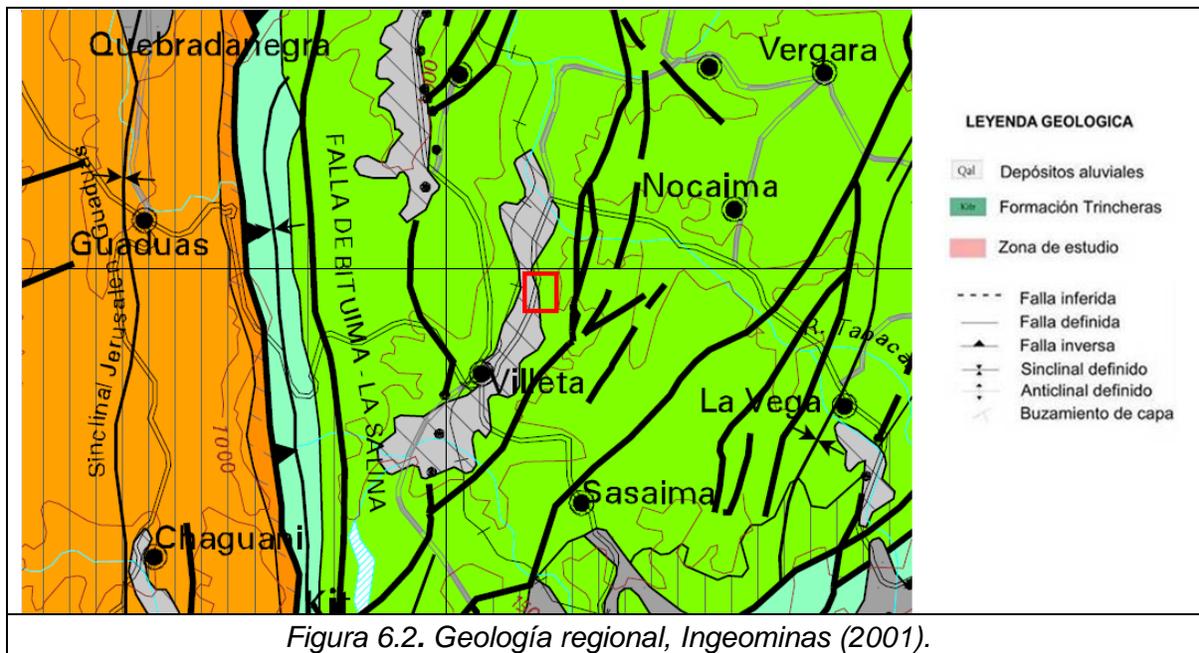
El empuje del terraplén se evidencia además, por la ruptura del muro de contención en el talud inferior (Fotografía 6). La principal causa asociada a este proceso es el manejo del drenaje, ya que no se controla el agua infiltrada en el talud superior, haciendo que ésta sature también el relleno de la vía.



Además de los dos procesos de gran magnitud antes descritos, se presentan varios deslizamientos y flujos de menor intensidad en el área de estudio.

#### 6.4. GEOLOGÍA REGIONAL

El área de estudio se encuentra en la zona fisiográficamente formada por la Cordillera Oriental del departamento de Cundinamarca (Figura 6.2). El principal uso del suelo es la agricultura, en una región caracterizada por un clima templado con una pluviosidad de 1,600 mm promedio anual con distribución bimodal.



## 6.5. GEOLOGÍA LOCAL

### UNIDADES DE ROCA Y SUELO

Según el estudio realizado por Rodríguez (2010), las unidades de roca aflorantes y los suelos incluyen los descritos a continuación.

#### Formación Trincheras *Kitr*:

Está compuesta por una intercalación de lodolitas carbonosas, en capas delgadas, con laminación interna delgada, altamente fisibles, de color gris oscuro a negro; y lodolitas arenosas en capas medias, de color amarillo y gris claro (Fotografías 7 y 8). En toda la zona tienen un rumbo N50E buzando 30° al Este.



#### Depósitos coluviales, *qcol*

Según Rodríguez (2010), están formados por depósitos conglomeráticos matriz soportados, en matriz limo arcillosa, de color gris oscuro, con baja plasticidad, y humedad media, conteniendo clastos mal seleccionados, de bloques redondeados de hasta 40 cm. de diámetro a gránulos angulares, de 2 a 5 cm. de diámetro, compuestos predominantemente por lutitas grises y areniscas cuarzosas y feldespáticas.

En el estudio de Rodríguez (2010), se hace alusión a clastos angulares de ladrillos, que generan confusión sobre el origen antrópico de este material, sin embargo, son clastos muy locales, y no tienen el mismo grado de redondeamiento del resto de clastos, parece material integrado posteriormente, en otro ciclo de depositación. Suprayacen tanto depósitos aluviales, como rocas de la Formación Trincheras y forman suelos residuales (Fotografía 9).



### Depósitos aluviales, *qal*

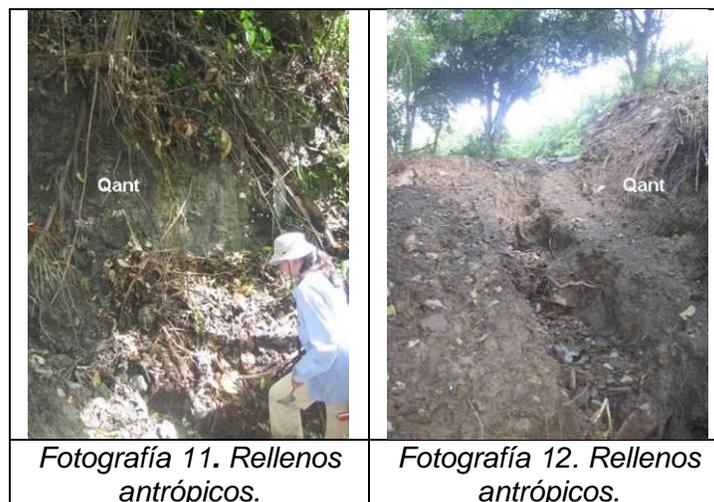
Según Rodríguez (2010), son depósitos conglomeráticos, matriz soportados, en una matriz limo arcillosa, de color gris oscuro, con plasticidad baja; soportando clastos subredondeados a redondeados, alargados, de bloques muy grandes de hasta 1 m. de diámetro a guijos; polimícticos, incluyendo areniscas, lutitas, minerales como cuarzo. Alcanza espesores hasta de 15 m. y se encuentra cubriendo el macizo rocoso en cercanías al río (Fotografía 10).



Fotografía 10. Depósitos sobre el río Villeta.

### Rellenos antrópicos, *qant*

Se muestran también rellenos conglomeráticos de color café claro. Fueron depositados para nivelar la topografía, de forma que la vía esté a una altura constante o con una pendiente muy baja. Se observan especialmente en los taludes formados a lado y lado de la vía (Fotografías 11 y 12).



Fotografía 11. Rellenos antrópicos.



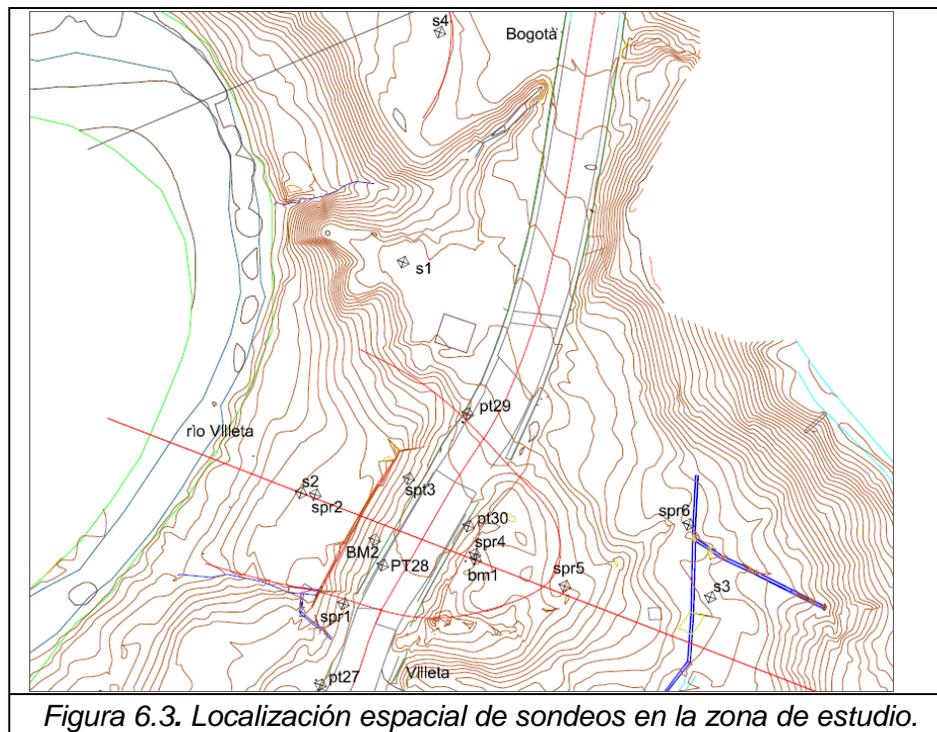
Fotografía 12. Rellenos antrópicos.

## 6.6. EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO

Los sondeos geotécnicos son un método de reconocimiento en profundidad que permiten identificar la naturaleza y estratigrafía del terreno, así, como obtener muestras a distintas profundidades para su posterior ensayo en el laboratorio. Un factor adicional de suma importancia en los sondeos geotécnicos es poder determinar la existencia o no de niveles freáticos o piezométricos.

Al momento de plantear el reconocimiento, Rodríguez (2010) tuvo en cuenta que en la zona ya se habían ejecutado varias perforaciones por parte de diferentes consultores, especialmente en la zona del relleno de la vía.

Así, para complementar la información antecedente y geológica se plantearon y ejecutaron 4 sondeos verticales de 20 metros de profundidad cada uno. La ubicación de los sondeos realizados en este estudio y en los estudios antecedentes, se presenta en la Figura 6.3.



Una vez definida la campaña de exploración del subsuelo, se llevaron a cabo los sondeos con equipo de roto percusión, y se extrajeron muestras con tubo Shelby y núcleos cuando hubo necesidad de utilizar rotación.

## 6.7. RESULTADOS DEL ESTUDIO

A continuación se muestra un resumen de los resultados de ensayos y análisis, obtenidos por Rodríguez (2010) en la zona estudiada.

### 6.7.1. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

La decisión del tipo de ensayo para cada muestra, se basó en la definición de los 5 tipos de materiales que predominan en la zona de estudio presentado por el Ingeniero Rodríguez (2010), teniendo en cuenta las visitas de campo y el registro de las columnas de perforación. En la Tabla 6.7.1 se presentan los 5 tipos de materiales señalados.

Material	Nombre
1	Relleno
2	Coluvial
3	Residual Trincheras
4	Aluvial
5	F. Trincheras

*Tabla 6.7.1. Materiales definidos en el estudio.*

En las Figuras 6.4 y 6.5, a partir de cortes topográficos que atraviesan el área de estudio, Rodríguez esquematizó las unidades presentes, para los dos sitios críticos de la zona.

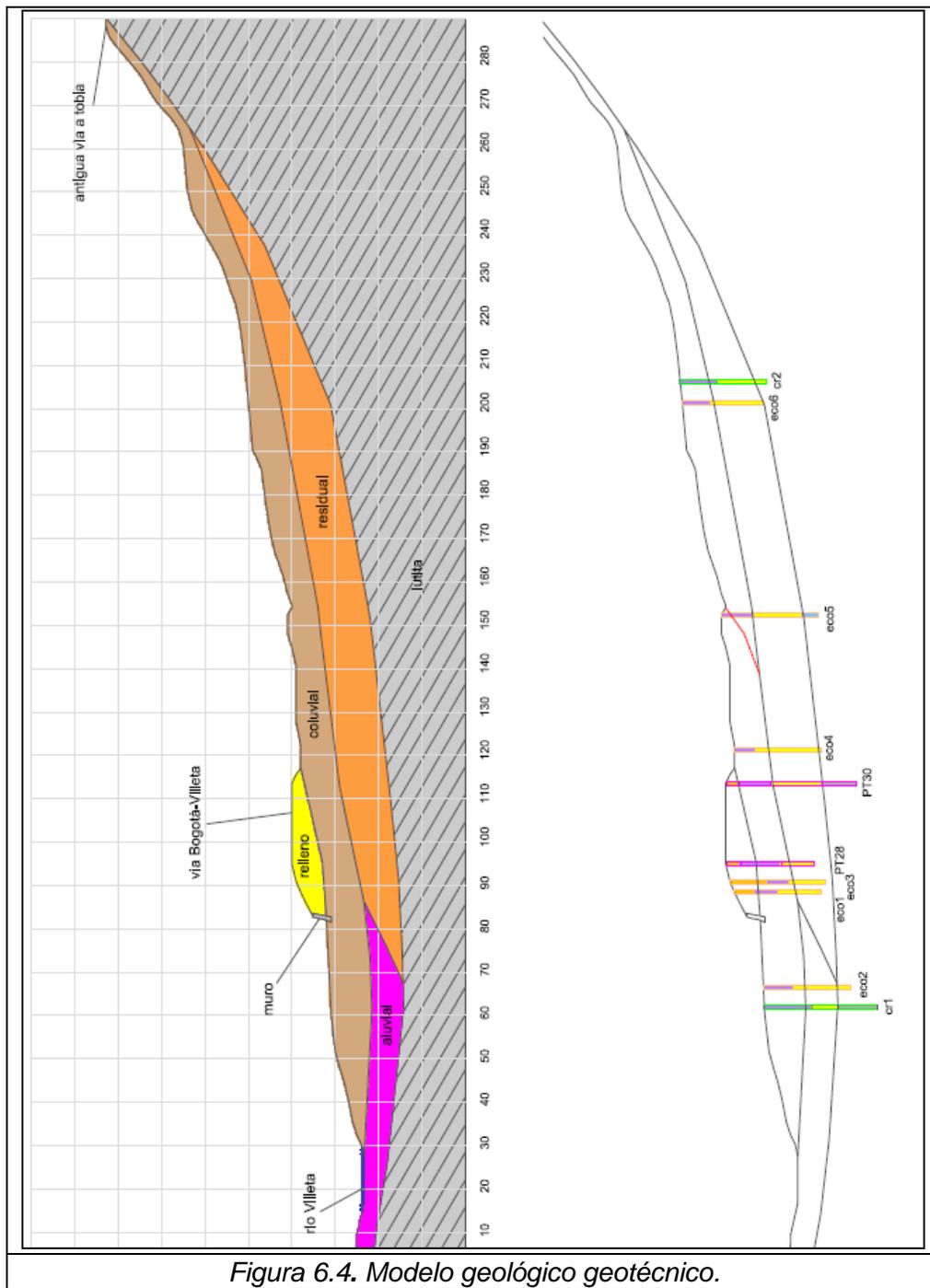
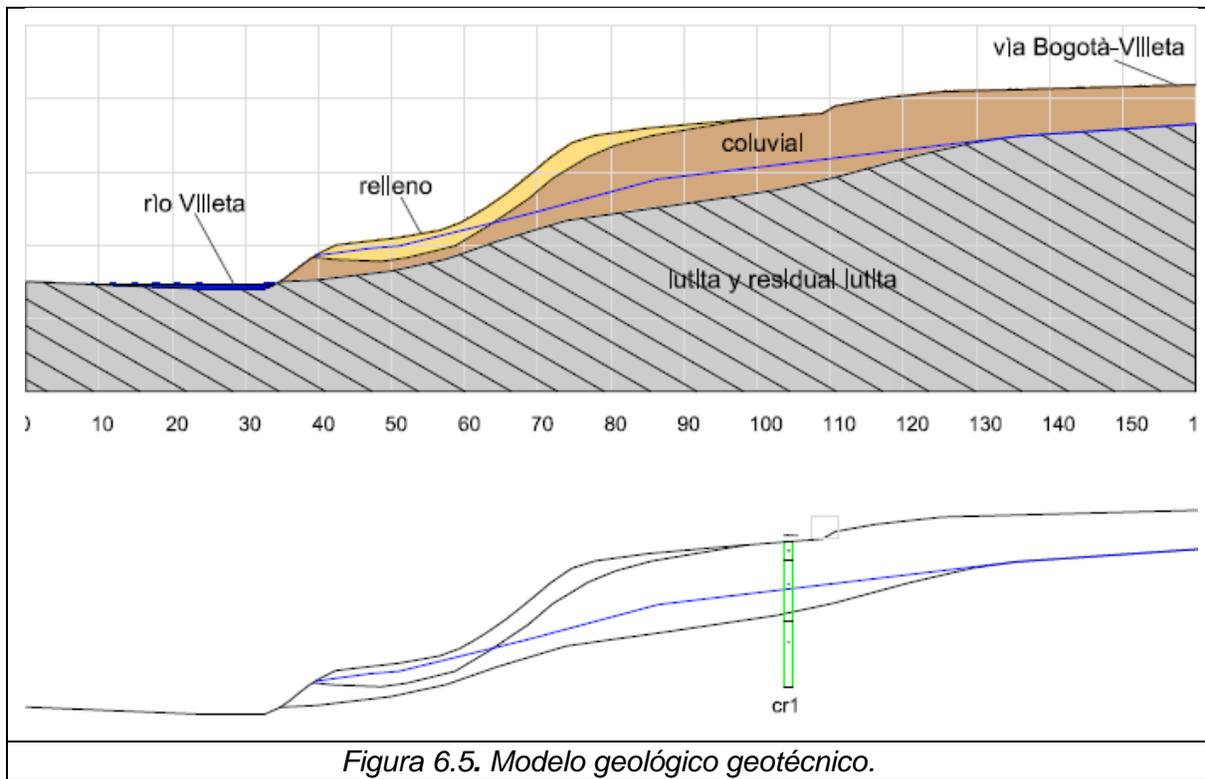


Figura 6.4. Modelo geológico geotécnico.



El último paso para definir plenamente el modelo geológico geotécnico, tiene que ver con la asignación de parámetros a las diferentes unidades presentes en el perfil típico de estudio. En la Tabla 6.1, se presentan los parámetros establecidos para los diferentes materiales.

Material	Peso unitario KN/m <sup>3</sup>	Cohesión KN/m <sup>2</sup>	$\phi$
relleno	20	4	24.5
coluvial	21.5	9.3	24.4
residual	20	46.7	30.4
aluvial	20	0	27.8
formación trincheras	20	46.7	30.4
material sup de falla	19	0	13
tierra armada	20	0	30
muro	24	300	45

Tabla 6.1. Parámetros de los materiales definidos en el perfil de estudio 1.

Teniendo en cuenta la tabla 6.1 y los parámetros que exigen los diferentes métodos de estabilización de taludes, se realiza la tabla 6.2, donde se resumen los datos necesarios para calcular la presión del suelo sobre los pilotes, con su respectivo cortante y momento en función de la profundidad.

Las profundidades y la elección de los estratos a estudiar presentados en la tabla 6.2, fueron definidas por Rodríguez (2010).

TIPO DE SUELO	PROFUNDIDAD (m)	$\phi$ (°)	C (KN/M2)	$\gamma$ (Kn/m3)
COLUVIAL	0-10	24.4	9.3	21.5
RESIDUAL	10-20.	30.4	46.7	20

Tabla 6.2. Resumen de las características cualitativas y cuantitativas necesarios para la aplicación de métodos para estabilizar taludes.

Siendo:

$\phi$  = ángulo de resistencia interna del suelo.

C = Cohesión del suelo.

$\gamma$  = Peso unitario del suelo.

Con base en las observaciones de campo, los análisis de estabilidad y revisión de antecedentes, en el en Municipio de Villeta, sobre la autopista Bogotá-Medellín (Abscisa PR69+450), finalmente Rodríguez (2010) llegó a la conclusión que se debían construir pilotes de longitud de 20 metros, diámetro 1.3 m y una separación entre ellos de 4 m con el despiece mostrado en la figura 6.6

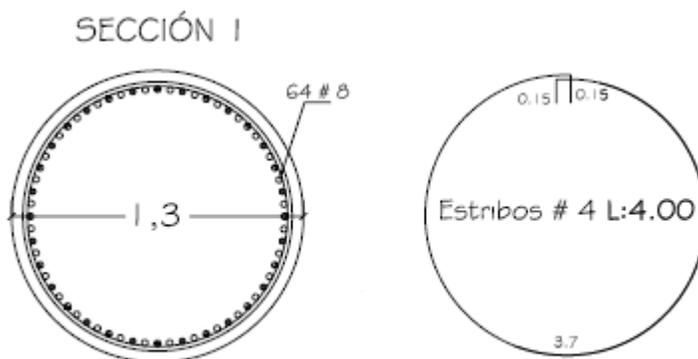


Figura 6.6. Refuerzo propuesto por Rodríguez (2010) para el problema de estabilización.

Donde se necesitaron 64 varillas # 8 y 223 estribos # 4, con separaciones de 13 y 6.5 cm en las zonas confinadas y no confinadas.

Se generó la restricción de cabeza fija en la cabeza de los pilotes, utilizando una viga cabezal con una sección de 1.3 m X 1.3 m y anclajes de 50 Toneladas y 50 metros de longitud. La separación de los anclajes es 4 metros, lo que sugiere un anclaje por pilote.

Teniendo en cuenta la inestabilidad del terreno presentado anteriormente, se aplicaron los 5 métodos expuestos en este estudio de trabajo, con las características resumidas en la Tabla 6.2, analizando por separado el estrato coluvial del residual, buscando una solución estructural económicamente viable que asegure la estabilidad del deslizamiento.

Adicionalmente se analizó para cada método los diferentes tipos de apoyo en el cabezal del pilote, es decir en donde la profundidad  $h$  es cero.

## 6.8. RESULTADOS DEL CASO REAL APLICADO A LOS METODOS EXPUESTOS

### 6.8.1. TERRENO RESIDUAL:

Características del terreno:

TIPO DE SUELO	PROFUNDIDAD	$\phi(^{\circ})$	C (KN/M2)	$\gamma$ (Kn/m3)
RESIDUAL	10	30.4	46.7	20

Datos de entrada para cada método:

#### METODO DE ITO Y MATSUI

ITO Y MATSUI		
INFORMACIÓN DE ENTRADA		
c	46.7	[KN/m <sup>2</sup> ]
$\phi$	30.4	[ <sup>o</sup> ]
D1	4	[m]
D2	2.7	[m]
$\gamma$	20	[KN/m <sup>3</sup> ]
z	20.0	[m]
Lp	20	[m]
Ep	2.00E+08	[KN/m <sup>2</sup> ]
Ip	0.140198	[m <sup>4</sup> ]
Es	5.88E+03	[KN/m <sup>2</sup> ]
H'	10.0	[m]
H	10.0	[m]
Z'	10.0	[m]

## METODO DE BRANDL

METODO DE BRANDL	
$M\phi$	1.89
$\phi$	30.4
$\phi_{Real}$	0.530580093
$\gamma$	20
H	10
$\cos(\phi)$	0.862513669
$(\cos(\phi))^2$	0.74392983
Ecr,h	<b>1406.027378</b>
$M\phi * (\cos(\phi))^2$	1.406027378
$\alpha L$ (grafica)	0.5
diametro	1.3
al (dist entre ejes)	4
al/diametro	3.076923077
$1/(1+\alpha L)$	0.666666667
n (# de pilotes)	10
Ecr,h (grupo)	<b>1218.557061</b>
Ecr,h (H=10)	<b>243.7114122</b>

## METODO DE VIGGIANI

METODO DE VIGGIANI	
Cu	46.7
L1	10
Diametro	1.3
Separacion	4
F	2.0125
$4 * Cu * d * F$	<b>488.7155</b>
k1	4
$K1 * C1 * d * L1$	2428.4
$k1 * c1 * d$	242.84

## METODO DE BROMS

METODO DE BROMS	
Cu	46.7
L1	22
Diametro	1.3
D1	4
D2	2.7
$\alpha$	<b>0.9</b>
$(5.14+2\alpha*D1/D2)*D*Cu$	<b>473.9427333</b>

## METODO DE NAVFAC

METODO DE NAVFAC	
$\gamma$	20
D (proundidad)	10
q	200
Kq (Grafica)	14
Kc (Grafica)	50
C	46.7
$e^d$	5135
B (diametro)	1.3
D/B	7.692307692
S (separacion)	4
$\phi^\circ$	30.4
PRESION EN LA PILA= $B*e^d$	<b>6675.5</b>

En la Figura 6.7 se muestra la diferencia de la presión de tierras que resistirían los pilotes entre los métodos analizados, al aplicarlo al caso real (Vía Bogotá – Villeta).

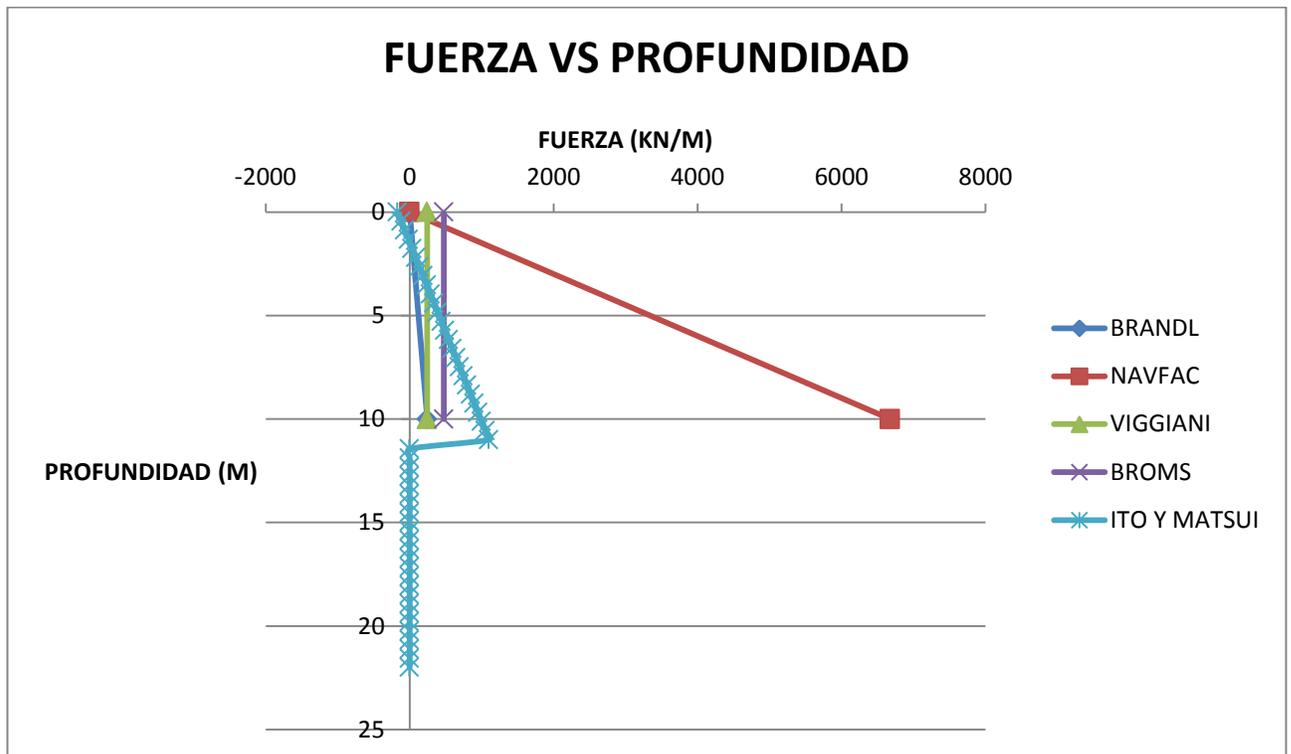


Figura 6.7. Fuerza vs Profundidad, aplicado al caso real (Residual). Comparación de métodos.

Como se evidencia en la Figura 6.7, el método de Navfac es muy superior en cuanto a órdenes de magnitud de fuerza, ya que en la profundidad  $h = 10$  m este pilote experimentaría una fuerza de 6675.5 KN/M.

Para comparar los cortantes de los diferentes métodos, es necesario establecer el tipo de apoyo que se utilizaría según se necesite en la profundidad  $h = 0$  m.

A continuación en la Figura 6.8 se comparan los cortantes de los 5 métodos, teniendo como condición en el cabezal ( $h = 0$  m.) que se **permita el desplazamiento, mas no la rotación del pilote.**

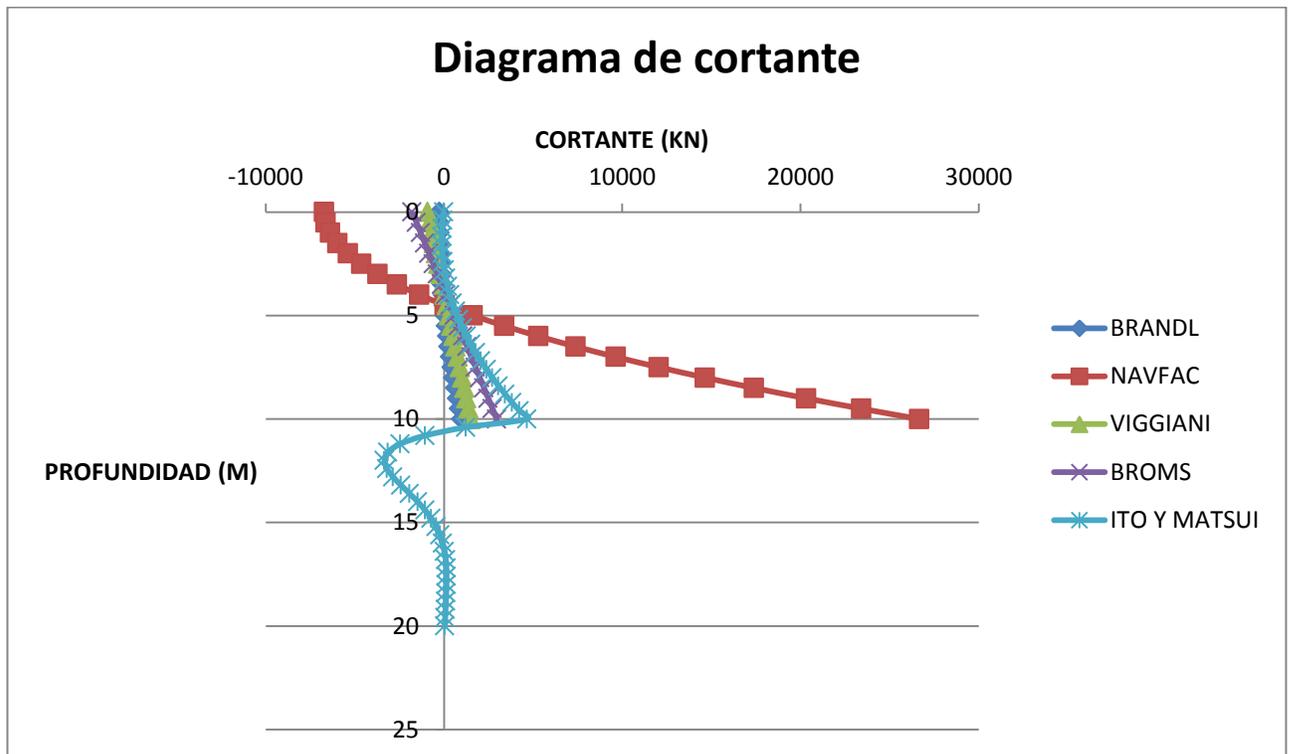


Figura 6.8. Diagrama de cortante, aplicado al caso real (Residual). Comparación de métodos.

Como se esperaba, el método de Navfac arroja los mayores valores de cortante tanto en la cabeza del pilote como en la profundidad  $h = 10$  m.

Manteniendo el mismo apoyo en  $h = 0$  m, se comparan los momentos de los 5 métodos a estudiar y se obtuvo lo siguiente (Ver Figura 6.9).

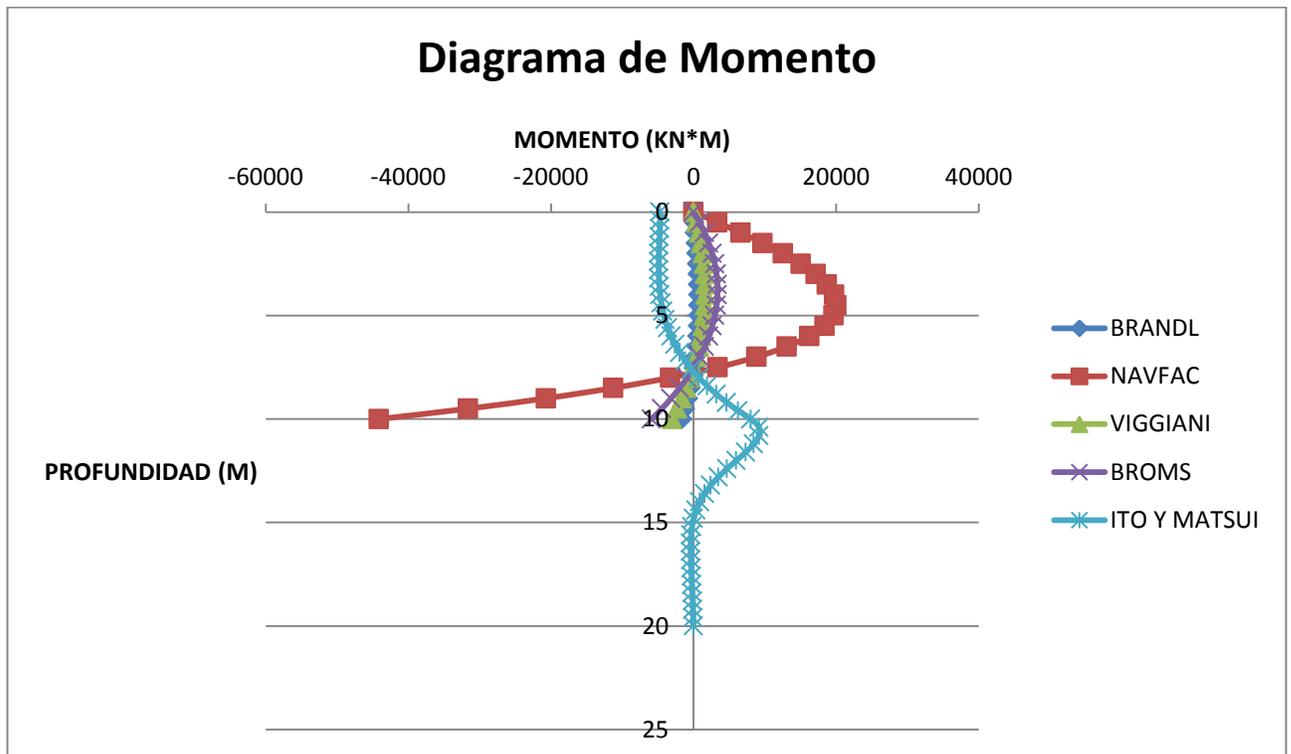


Figura 6.9. Diagrama de momento, aplicado al caso real (Residual). Comparación de métodos.

De igual forma, el método de Navfac muestra los mayores momentos tanto positivos como negativos para la condición que permite el desplazamiento, mas no la rotación del pilote en  $h = 0$  m.

A continuación en la grafica Figura 6.10 se comparan los cortantes de los 5 métodos, teniendo como condición en el cabezal ( $h = 0$  m.) que se **permite la rotación, mas no el desplazamiento del pilote.**

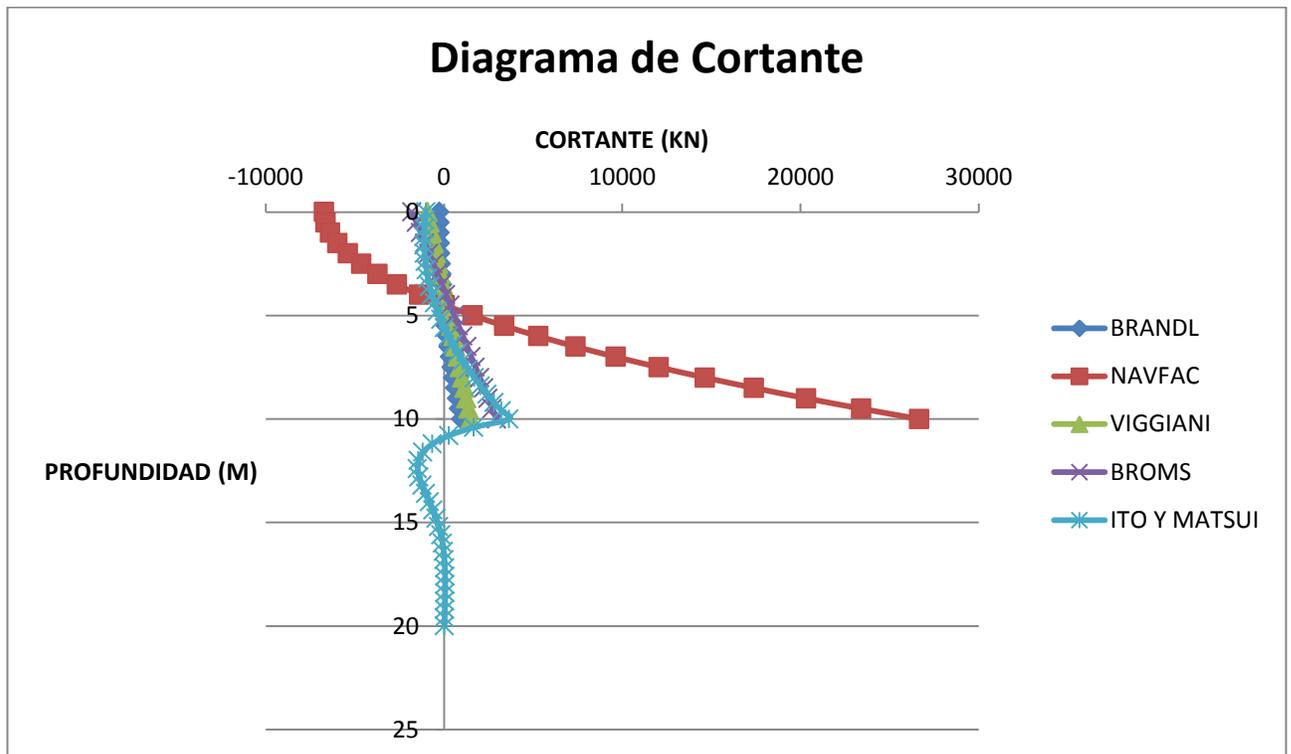


Figura 6.10. Diagrama de cortante, aplicado al caso real (Residual). Comparación de métodos.

Nuevamente el método de Navfac es el que muestra mayores valores de cortante en  $h = 10$  m. Por otra parte el método que evidencia menores valores de cortante es el método de Brandl, llegando a su máximo cortante en  $h = 10$  m con un valor de 973.479 KN.

Manteniendo el mismo apoyo en  $h = 0$  m, se comparan los momentos de los 5 métodos a estudiar y se obtuvo los siguientes valores (Ver Figura 6.11).

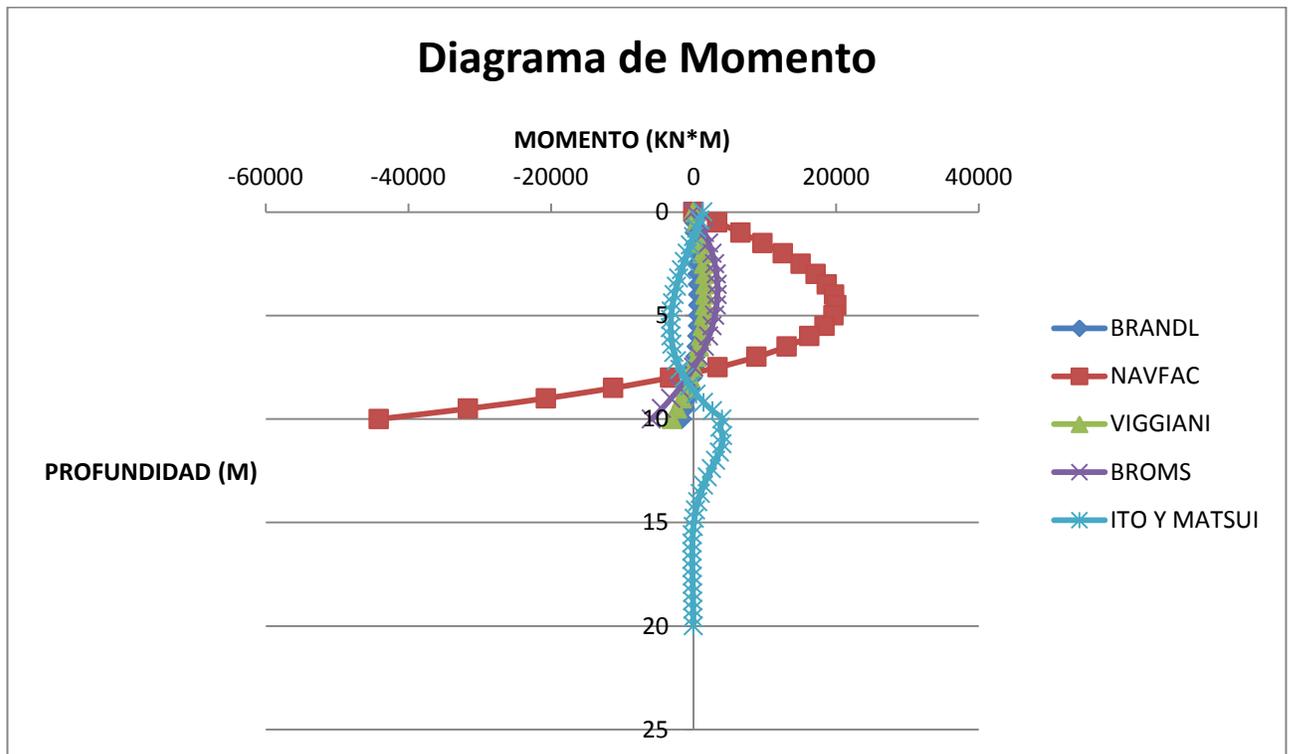


Figura 6.11. Diagrama de momento, aplicado al caso real (Residual). Comparación de métodos.

Nuevamente, el método de Navfac arroja los momentos mínimos y máximos más grandes de los 5 métodos. Esto sugeriría un mayor refuerzo y un mayor costo la fabricación de pilotes para este método.

A continuación en la Figura 6.12 se comparan los cortantes de los 5 métodos, teniendo como condición en el cabezal ( $h = 0$  m.) de **cabeza fija**, esto indica que el pilote esta empotrado, no tiene ningún desplazamiento ni rotación.

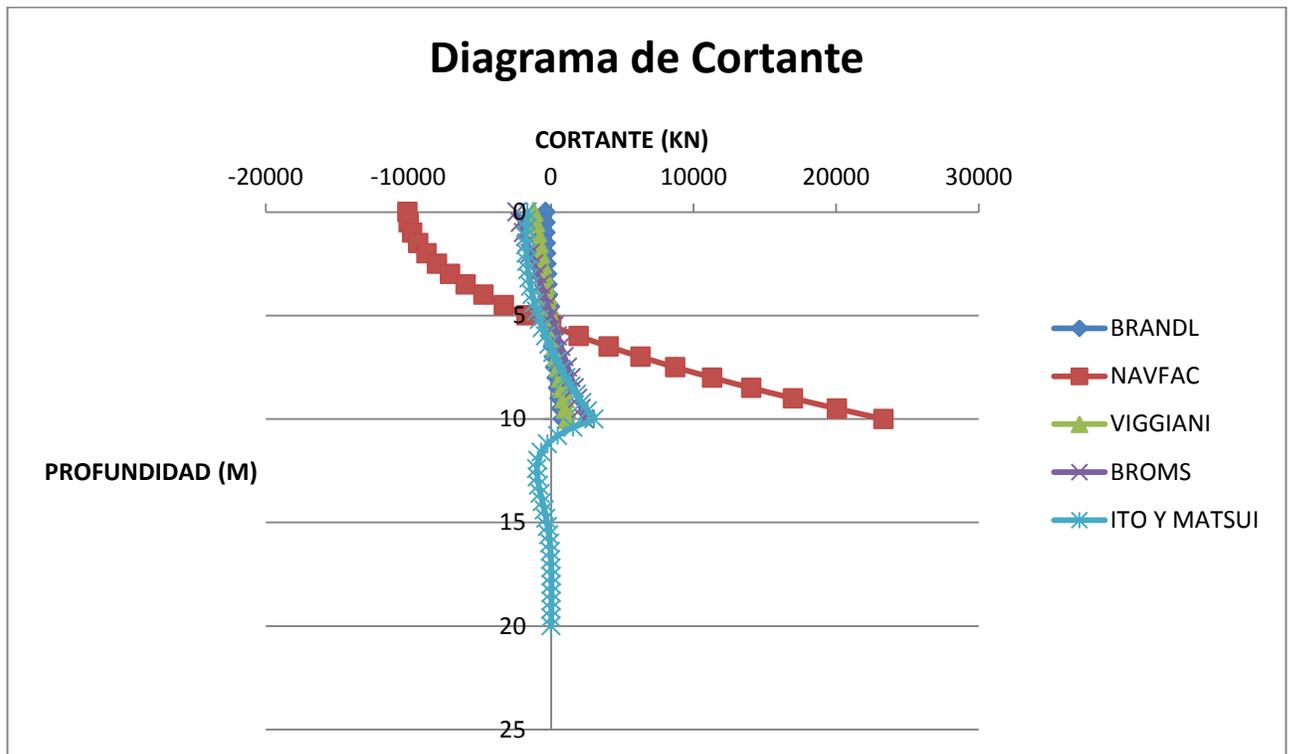


Figura 6.12. Diagrama de cortante, aplicado al caso real (Residual). Comparación de métodos.

Nuevamente el método de Navfac es el que muestra mayores valores de cortante en  $h = 10$  m. Por otra parte el método que evidencia menores valores de cortante es el método de Brandl, llegando a su máximo cortante en  $h = 10$  m con un valor de 851.657 KN.

Manteniendo el mismo apoyo en  $h = 0$  m, se comparan los momentos de los 5 métodos a estudiar y se obtuvo los siguientes valores (Ver Figura 6.13).

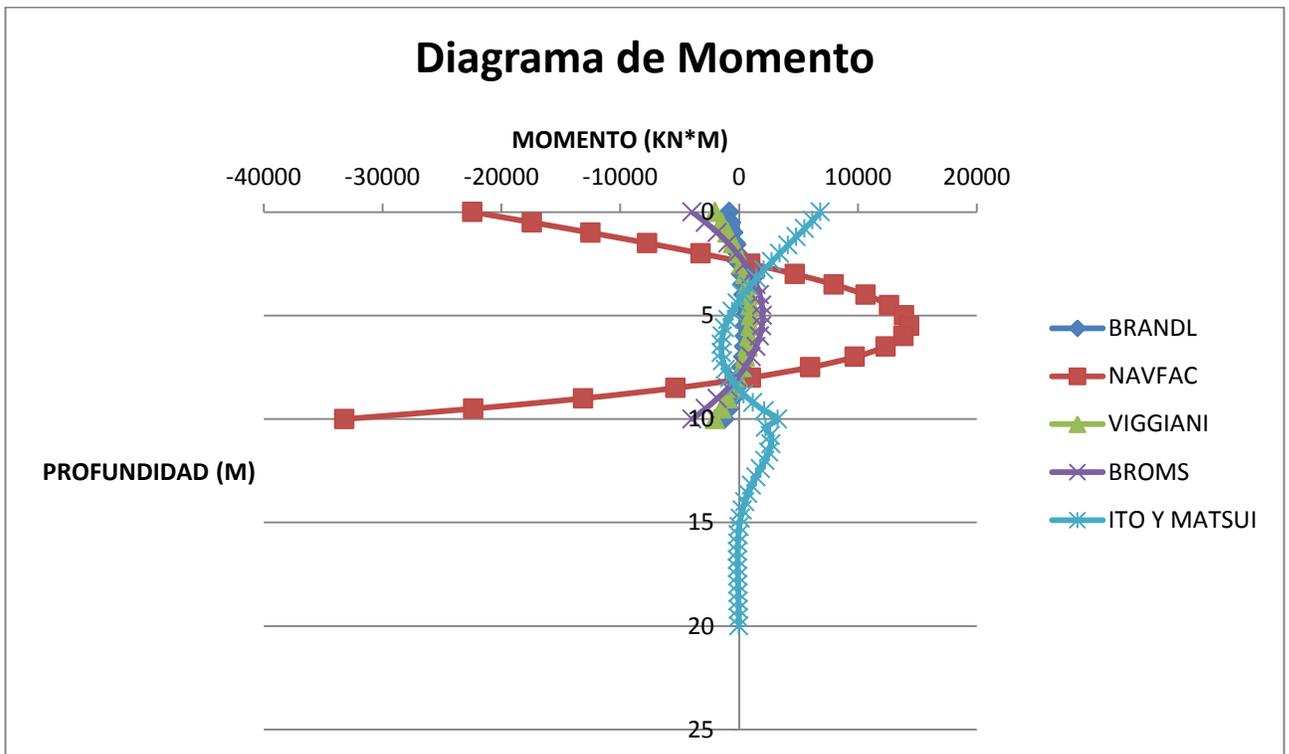


Figura 6.13. Diagrama de momento, aplicado al caso real (Residual). Comparación de métodos.

De igual manera, el método de Navfac arroja los momentos mínimos y máximos más grandes de los 5 métodos. Esto sugeriría un mayor refuerzo y un mayor costo la fabricación de pilotes para este método. Por otra parte el método de Ito y Matsui, muestra diagramas de cortante y de momento hasta la profundidad  $h = 20$  m, esto se debe a que el autor sugiere pilotes que pasen el plano de falla y se empotren 10 m debajo de este.

## 6.8.2. TERRENO COLUVIAL:

Características del terreno:

TIPO DE SUELO	PROFUNDIDAD	$\phi(^{\circ})$	C (KN/M2)	$\gamma$ (Kn/m3)
COLUVIAL	10	24.4	9.3	21.5

Datos de entrada para cada método:

## METODO DE ITO Y MATSUI

ITO Y MATSUI		
INFORMACIÓN DE ENTRADA		
c	9.3	[KN/m2]
$\phi$	24.4	[ $^{\circ}$ ]
D1	4	[m]
D2	2.7	[m]
$\gamma$	21.5	[KN/m <sup>3</sup> ]
z	20.0	[m]
Lp	20	[m]
Ep	2.00E+08	[KN/m <sup>2</sup> ]
Ip	0.000077	[m <sup>4</sup> ]
Es	5.88E+03	[KN/m <sup>2</sup> ]
H'	10.0	[m]
H	10.0	[m]
Z'	10.0	[m]

## METODO DE BRANDL

METODO DE BRANDL	
M $\phi$	1.5
$\phi$	24.4
$\phi$ Real	0.425860337
$\gamma$	21.5
H	10
COS( $\phi$ )	0.910683661
(COS( $\phi$ ))^2	0.82934473
Ecr,h	<b>1337.318377</b>
M $\phi$ *(COS( $\phi$ ))^2	1.244017095
$\alpha$ L (grafica)	0.5
diametro	1.3
al (dist entre ejes)	4
al/diametro	3.076923077
1/(1+ $\alpha$ L)	0.666666667
n (# de pilotes)	10
Ecr,h (grupo)	<b>1159.00926</b>
Ecr,h (H=10)	<b>231.8018521</b>

## METODO DE VIGGIANI

METODO DE VIGGIANI	
Cu	9.3
L1	10
Diametro	1.3
Separacion	4
F	2.0125
4*Cu*d*F	<b>97.3245</b>
k1	4
K1*C1*d*L1	483.6
k1*c1*d	<b>48.36</b>

## METODO DE BROMS

METODO DE BROMS	
Cu	9.3
L1	10
Diametro	1.3
D1	4
D2	2.7
$\alpha$	<b>0.9</b>
$(5.14+2\alpha*D1/D2)*D*Cu$	<b>94.3826</b>

## METODO DE NAVFAC

METODO DE NAVFAC	
$\gamma$	21.5
D (proundidad)	10
q	215
Kq (Grafica)	7
Kc (Grafica)	24
C	9.3
$e^d$	1728.2
B (diametro)	1.3
D/B	7.692307692
S (separacion)	4
$\phi^\circ$	24.4
PRESION EN LA PILA= $B*e^d$	<b>2246.66</b>

En la Figura 6.14 se muestra la diferencia de la presión de tierras que resistirían los pilotes entre los métodos analizados, al aplicarlo al caso real (Vía Bogotá – Villeta).

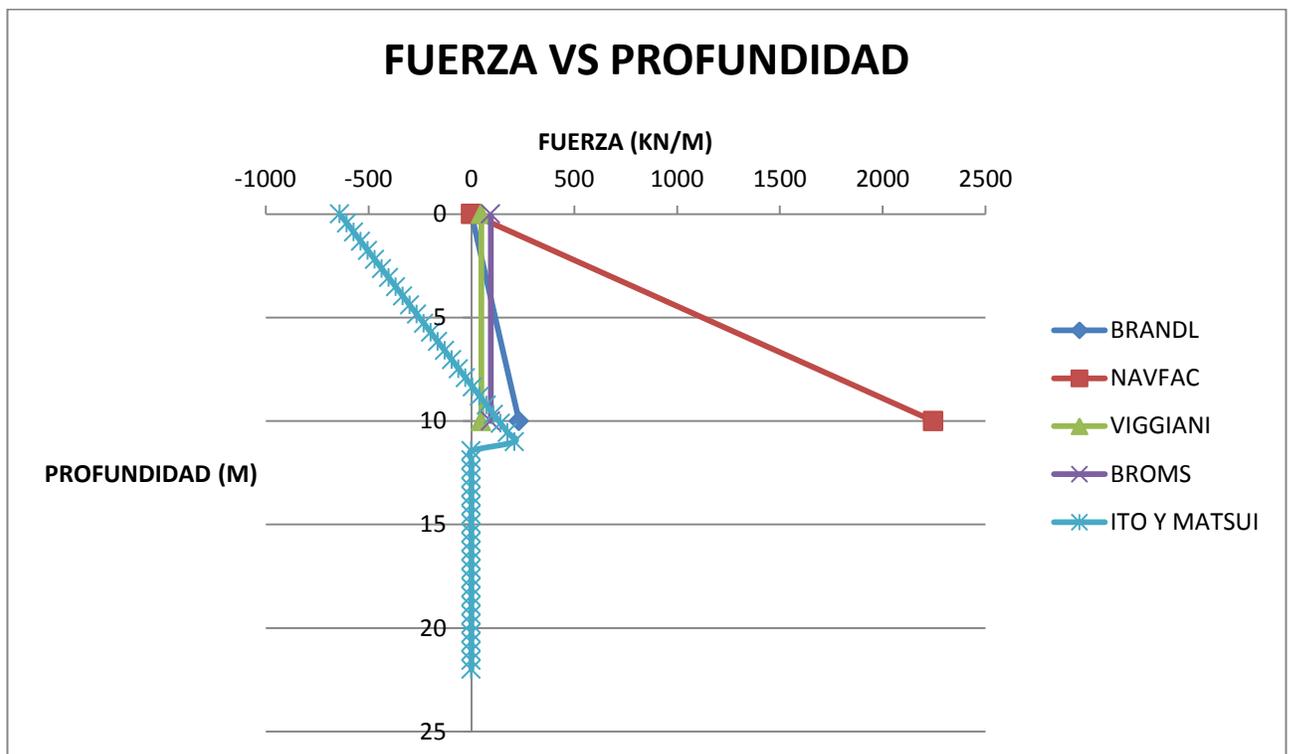


Figura 6.14. Fuerza vs Profundidad, aplicado al caso real (Coluvial). Comparación de métodos.

Como en el caso anterior (Terreno Residual), en la Figura 6.14, el método de Navfac es muy superior en cuanto a órdenes de magnitud de fuerza, ya que en la profundidad  $h = 10$  m este pilote experimentaría una fuerza de 2246KN/M

Para comparar los cortantes de los diferentes métodos, es necesario establecer el tipo de apoyo que se utilizaría según se necesite en la profundidad  $h = 0$  m.

A continuación en la grafica Figura 6.15 se comparan los cortantes de los 5 métodos, teniendo como condición en el cabezal ( $h = 0$  m.) que se **permite el desplazamiento, mas no la rotación del pilote.**

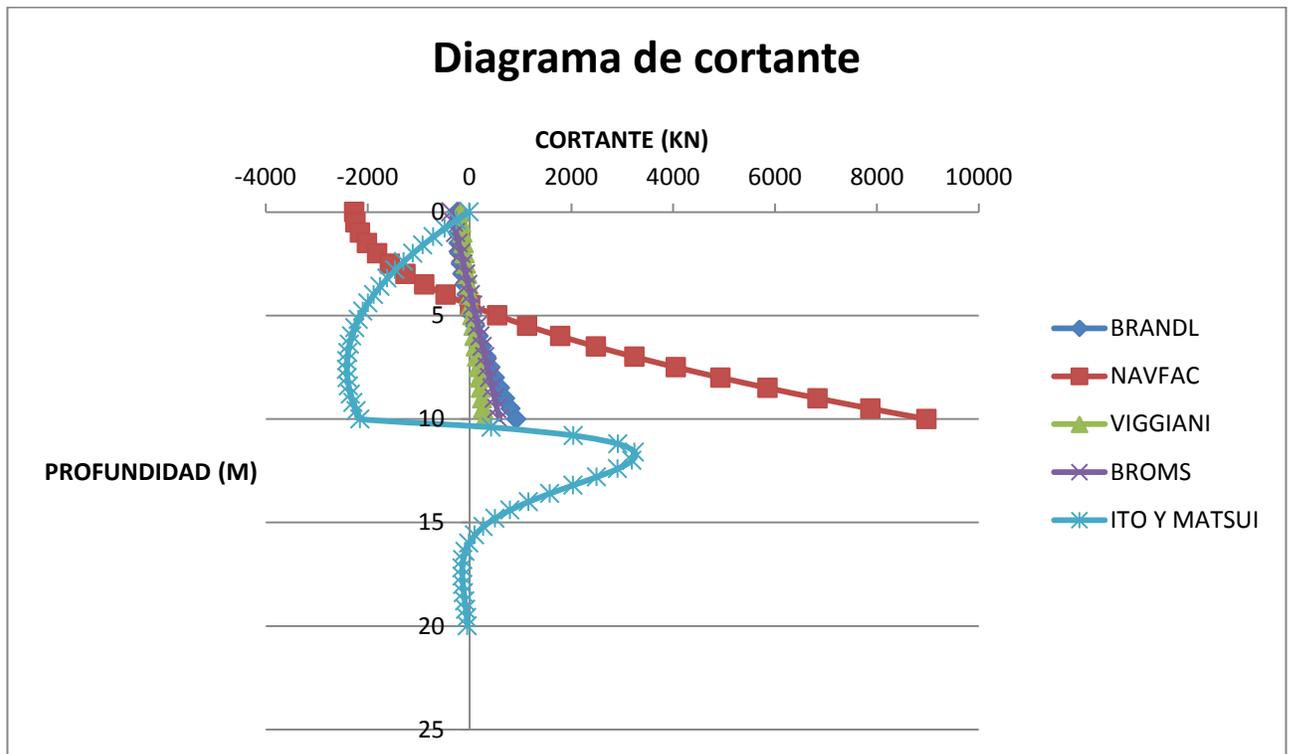


Figura 6.15. Diagrama de cortante, aplicado al caso real (Coluvial). Comparación de métodos.

Como se esperaba, el método de Navfac arroja los mayores valores de cortante tanto en la cabeza del pilote como en la profundidad  $h = 10$  m.

El método que arroja menores valores de cortante es el método de Viggiani, esto se debe a que el método exige datos de entrada muy básicos, no tiene en cuenta el ángulo de resistencia interna del terreno ni el peso unitario de este.

Manteniendo el mismo apoyo en  $h = 0$  m, se comparan los momentos de los 5 métodos a estudiar y se obtuvo lo siguiente (Ver Figura 6.16)

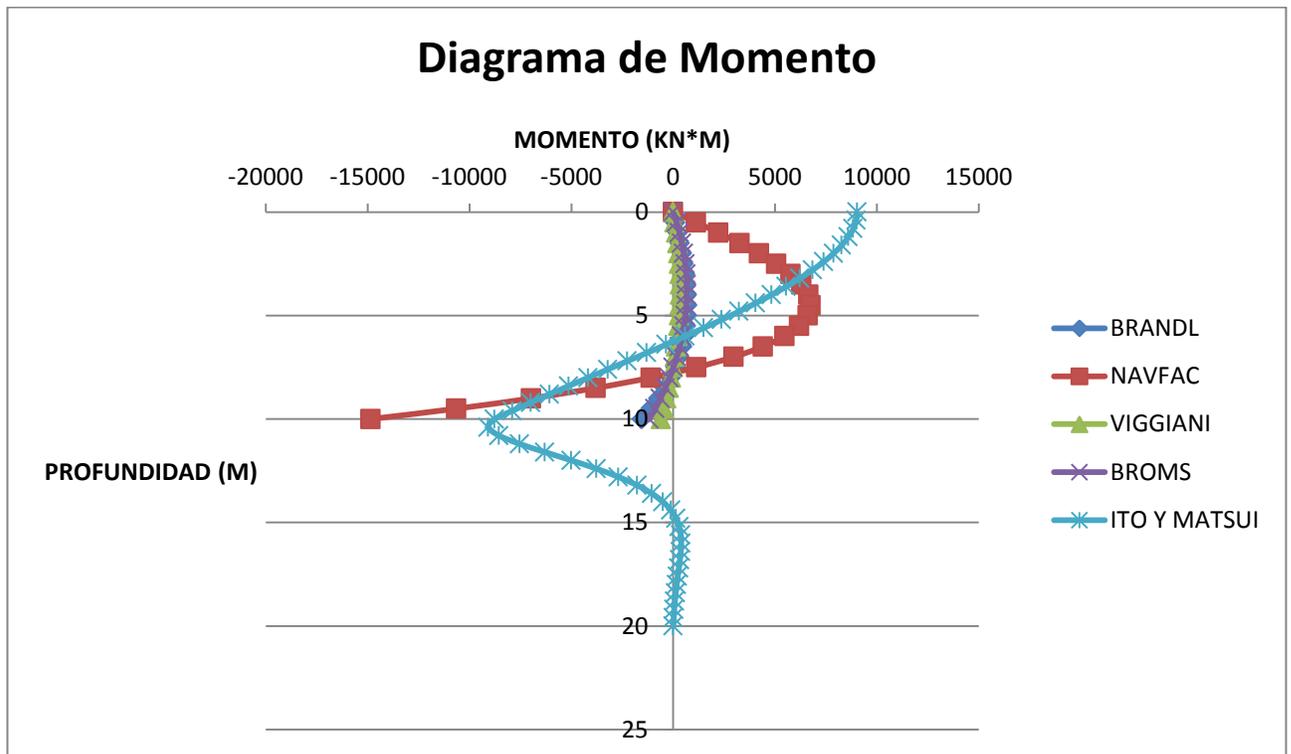


Figura 6.16. Diagrama de momento, aplicado al caso real (Coluvial). Comparación de métodos.

De igual forma, el método de Navfac muestra los mayores momentos negativos para la condición permite el desplazamiento, mas no la rotación del pilote en  $h = 0$  m.

El método de Ito y Matsui, aumenta los valores de momento positivo, esto significa que para esa cara del pilote, el refuerzo para este método es mayor.

A continuación en la Figura 6.17 se comparan los cortantes de los 5 métodos, teniendo como condición en el cabezal ( $h = 0$  m.) que se **permita la rotación, mas no el desplazamiento del pilote.**

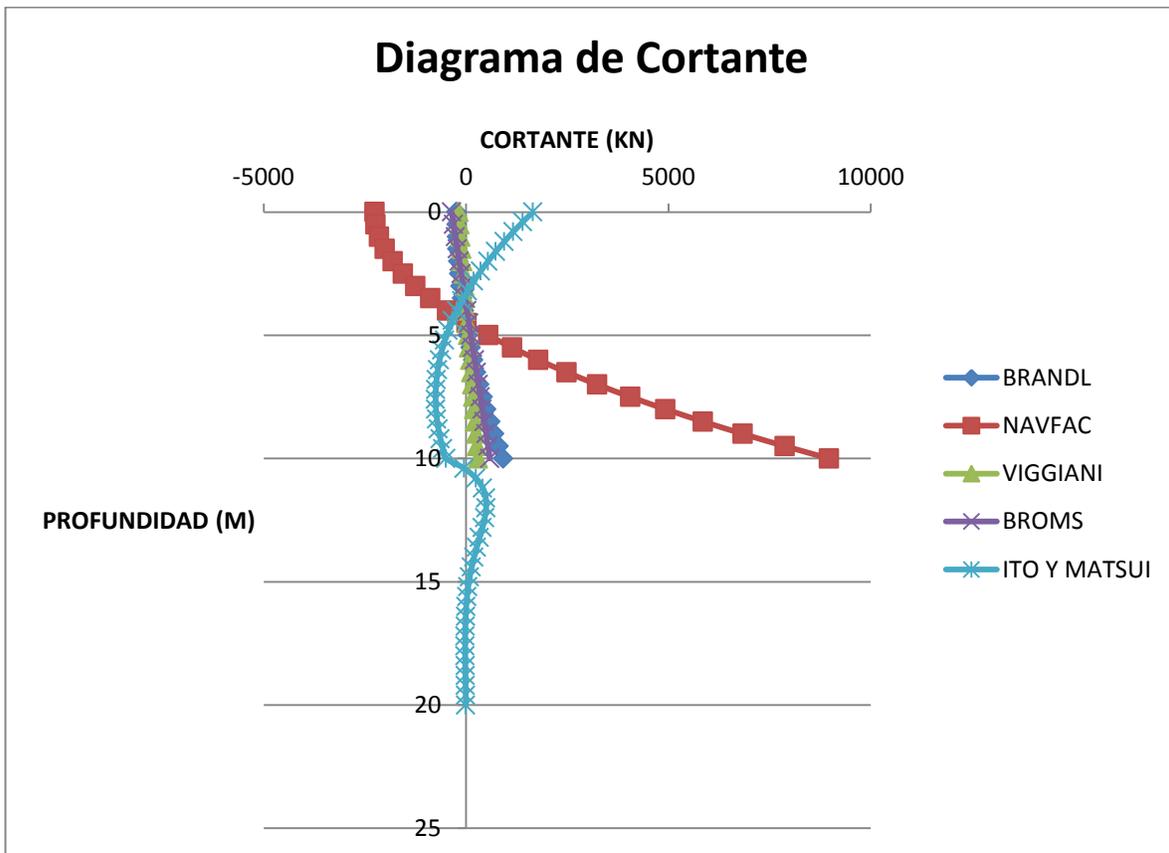


Figura 6.17. Diagrama de cortante, aplicado al caso real (Coluvial). Comparación de métodos.

Nuevamente el método de Navfac es el que muestra mayores valores de cortante en  $h = 10$  m. Por otra parte el método que evidencia menores valores de cortante es el método de Viggiani, llegando a su máximo cortante en  $h = 10$  m con un valor de 301.7 KN.

Manteniendo el mismo apoyo en  $h = 0$  m, se comparan los momentos de los 5 métodos a estudiar y se obtuvo los siguientes valores (Ver Figura 6.18).

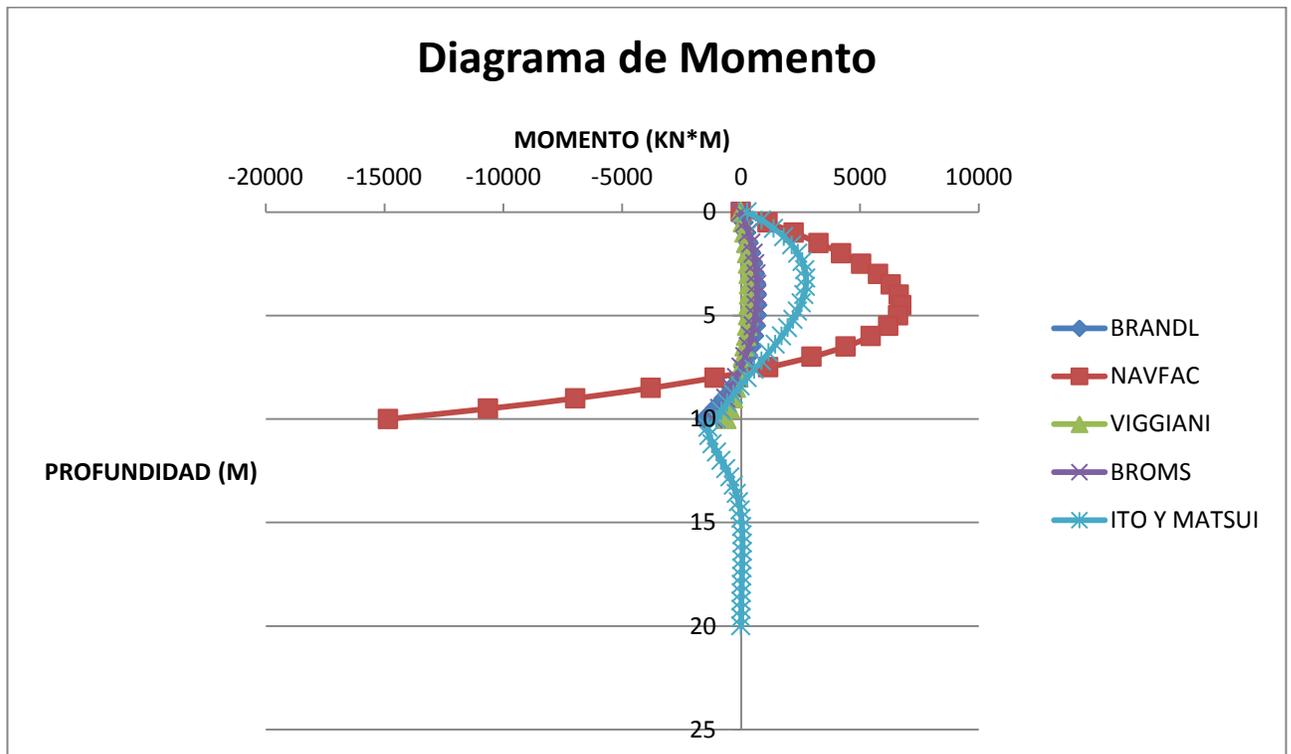


Figura 6.18. Diagrama de momento, aplicado al caso real (Coluvial). Comparación de métodos.

De igual forma, el método de Navfac arroja los momentos mínimos y máximos más grandes de los 5 métodos. Esto sugeriría un mayor refuerzo y un mayor costo la fabricación de pilotes para este método.

A continuación en la Figura 6.19 se comparan los cortantes de los 5 métodos, teniendo como condición en el cabezal ( $h = 0$  m.) de **cabeza fija**, esto indica que el pilote esta empotrado, no tiene ningún desplazamiento ni rotación.

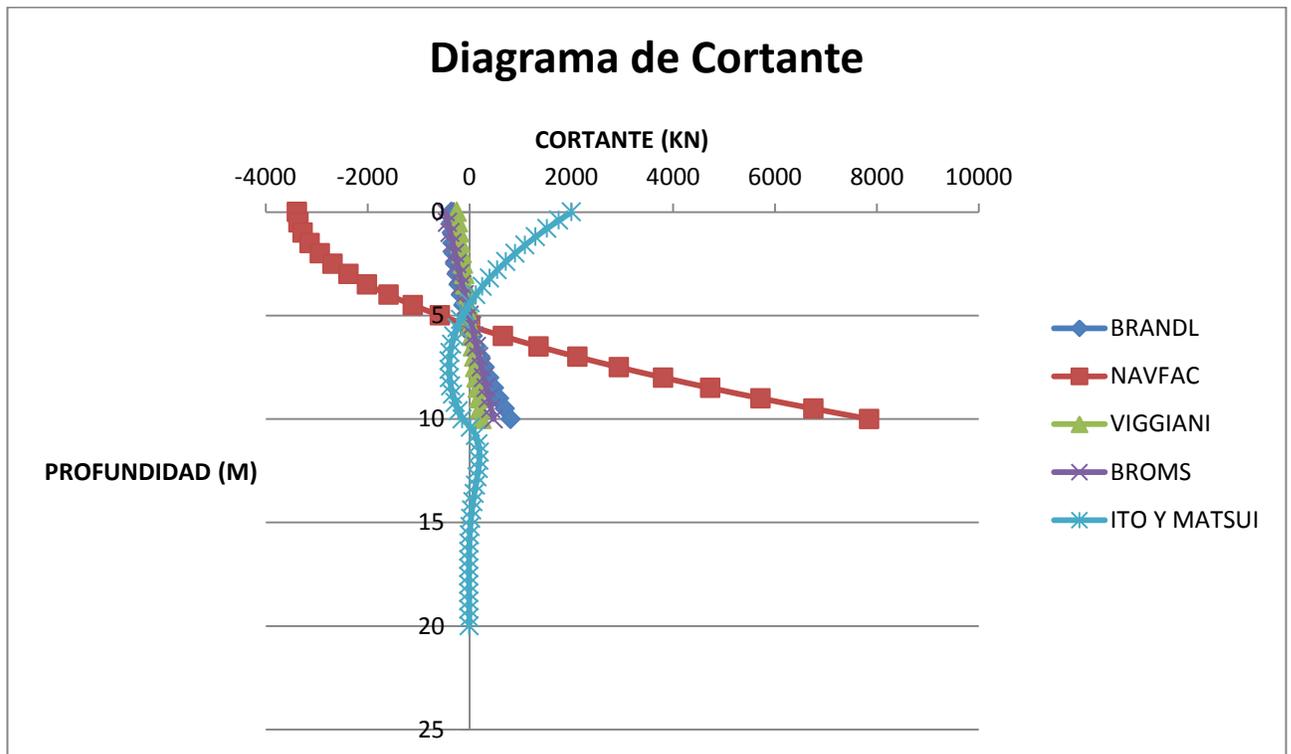


Figura 6.19. Diagrama de cortante, aplicado al caso real (Coluvial). Comparación de métodos.

Nuevamente el método de Navfac es el que muestra mayores valores de cortante en  $h = 10$  m. Por otra parte el método que evidencia menores valores de cortante es el método de Viggiani, llegando a su máximo cortante en  $h = 10$  m con un valor de 241.8 KN.

Manteniendo el mismo apoyo en  $h = 0$  m, se comparan los momentos de los 5 métodos a estudiar y se obtuvo los siguientes valores (Ver Figura 6.20).

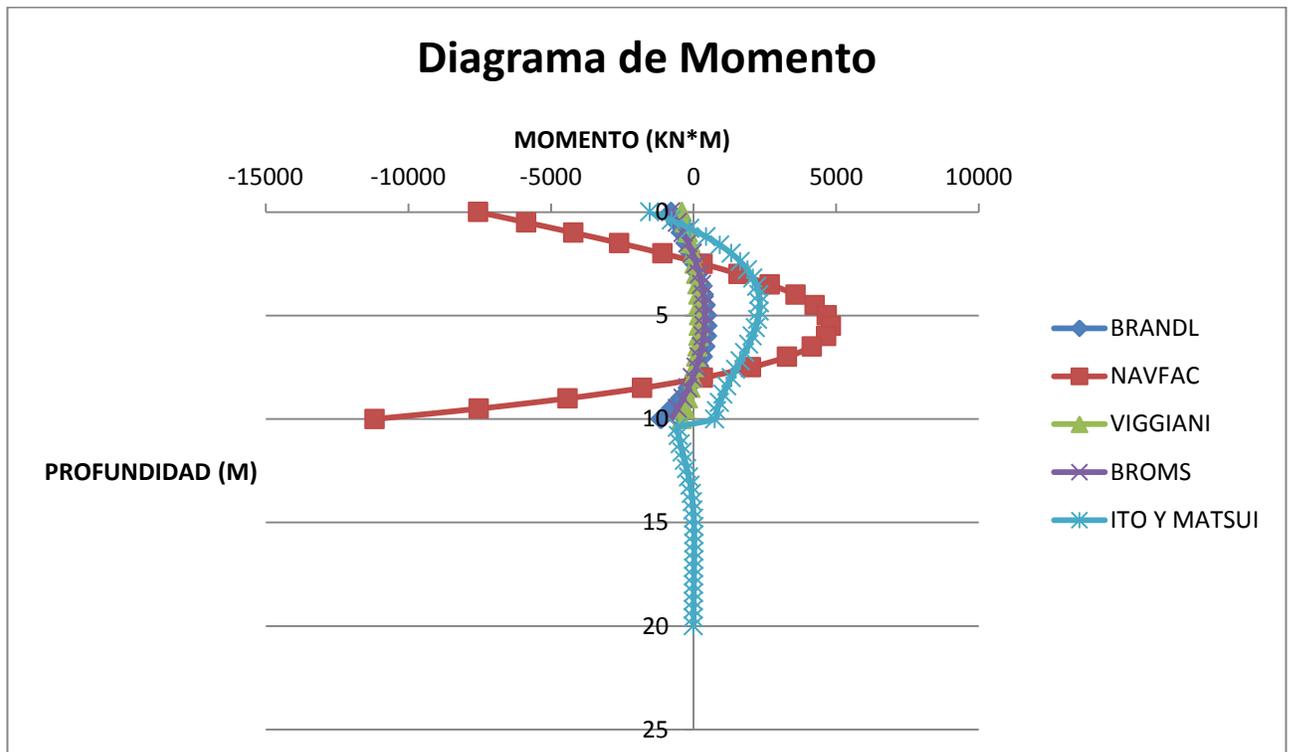


Figura 6.20. Diagrama de momento, aplicado al caso real (Coluvial). Comparación de métodos.

Navfac arroja los momentos mínimos y máximos más grandes de los 5 métodos. Esto sugeriría un mayor refuerzo y un mayor costo la fabricación de pilotes para este método.

Como se mostro anteriormente, los métodos analizados en este estudio para la estabilización de taludes con pilotes, difieren mucho entre ellos generando incertidumbre en cual utilizar y con qué tipo de apoyo.

Los dos factores más importantes a la hora de elegir uno de estos métodos sin ninguna duda son el costo de cada pilote y el más importante, la estabilidad y seguridad que en realidad brinde el método a utilizar.

Para poder llegar a una conclusión acertada, se presenta una comparación económica de cada método, aplicado al caso real (terreno COLUVIAL), con el fin de observar que tan viables son los métodos desde el punto de vista económico.

## 6.9. ANALISIS ECONOMICO

Teniendo en cuenta los diagramas de cortante y momento hallados en la aplicación al caso real para el terreno coluvial, se realizó el despiece de hierro de los pilotes, para cada método analizado con los diferentes tipos de apoyo, con el fin de cuantificar el valor de un pilote y poder compararlos.

Se realizó un diseño a flexión y a cortante para calcular la cantidad y el número de las varillas y flejes necesarios para cumplir con la estabilización del terreno. Estos diseños se realizaron teniendo en cuenta solo cargas laterales en los pilotes mas no las axiales. No se tiene en cuenta la flexo compresión.

Además se calcularon los costos de las restricciones de cabeza de los pilotes (anclajes y viga de amarre), teniendo como base las soluciones dadas por Rodríguez (2010) en el estudio realizado.

### 6.9.1. DISEÑO DE PILOTES

El diseño estructural de los pilotes se realizó como si fuera una viga simplemente apoyada para las diferentes condiciones analizadas.

El diseño estructural de los pilotes a flexión y a cortante fue basado en los diagramas de momento y cortante de los respectivos sistemas estáticos de cada uno de los pilotes que conforman la estructura. La obtención de los diseño, fue el resultado de aplicar una serie de ecuaciones, las cuales se programaron en Excel, para así hacer más práctico el diseño de cada uno de los pilotes.

Las ecuaciones usadas en el diseño a flexión fueron las siguientes:

$$K = \frac{8 * Mu}{\pi d^3}$$

Donde:

K = esfuerzo a flexión  
Mu = Momento último  
d = diámetro del pilote

$$m = \frac{Fy}{0.85 fc}$$

Donde:

Fy = Resistencia de fluencia del acero

$F'_c$  = Resistencia a compresión del concreto

$$\rho = \frac{1}{m} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2mk}{\phi f_y}} \right]$$

Donde

$\rho$  = cuantía de refuerzo

$$\rho_{\max} = 0.75 * \rho_b$$

Donde:

$\rho_{\max}$  = cuantía máxima

$\rho_b$  = cuantía balanceada

$$\rho_{\min} = \frac{0.8 \sqrt{f'_c}}{f_y} \geq \frac{14}{F_y}$$

Donde:

$\rho_{\min}$  = cuantía mínima

$$A_s = \rho \frac{\pi d^2}{4}$$

Donde:

$A_s$  = Área del acero de refuerzo

$d$  = diámetro del pilote

$$\phi M_n = \phi A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right)$$

Donde:

$M_n$  = momento resistente de la sección

Después de haber realizado el diseño a flexión, se comprueban los resultados obtenidos con la ecuación del Momento Último y si este es mayor al Momento Máximo del diagrama de momento.

Debido a que el pilote se está trabajando como una viga, su refuerzo transversal (flejes), se trabajo de acuerdo a los requisitos mínimos de la NSR – 10. Dentro de estos requisitos está, la separación en la zona de confinamiento y en la zona de NO confinamiento. La zona de confinamiento, es una zona en la cual los flejes irán menos espaciados, debido a que los cortantes son bastante considerables, mientras que la zona de no confinamiento, como su nombre lo indica, es una zona en la cual los flejes irán más espaciados.

Los requisitos de la NSR – 10, para el refuerzo a cortante son los siguientes:

- $S = d/4$
- 50 cm
- $s = \frac{A_v * f_y}{V_s * d}$

De acuerdo con estas 3 fórmulas se evalúa cual es el menor valor y se toma ese como la separación de la zona de confinamiento y para la zona de no confinamiento se toma el doble de la zona de confinamiento. Para determinar la longitud de la zona de confinamiento se utiliza la siguiente fórmula:

- $l = 2*d$

Las ecuaciones usadas para el diseño a flexión fueron las siguientes:

$$V_u = \frac{V}{\frac{\pi d^2}{4}}$$

Donde:

$V_u$  = Esfuerzo cortante de diseño

$$V_c = 0.85 * 0.53 * \sqrt{f'c}$$

Donde:

$V_c$  = Resistencia que proporciona el concreto

$F'c$  = Resistencia a compresión del concreto

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c$$

Donde:

$V_s$  = Resistencia que proporciona el acero

$$s = \frac{A_v * f_y}{V_s * d}$$

Donde:

s = separación de los estribos

d = diámetro del pilote

$A_v$  = Área del estribo

En dado caso, que el esfuerzo del acero ( $V_s$ ), diera un valor  $< 0$ , esto quiere decir que el concreto, es lo suficientemente dúctil para resistir el esfuerzo cortante.

A continuación se presenta un ejemplo de cómo se determinó el refuerzo longitudinal y la separación de los flejes del pilote para el método de Ito y Matsui, con la condición de cabeza libre, para el caso de la vía Villeta – Bogota del terreno Coluvial.

### Condición cabeza libre

#### Refuerzo a flexión

**M max (+) = 799.8 kN\*m**

Se toma el momento máximo positivo para el diseño a flexión.

$$k = \frac{8 * 799.8}{1000 * \pi * 1.25^3} = 1.043 \text{ MPa}$$

Se divide por 1000 para cambiar las unidades a MPa

$$m = \frac{420}{0.9 * 28} = 17.64$$

Luego de hallar m y K, se obtiene el valor de cuantía de la fórmula.

$$p = 0.0028$$

$$p_{\min} = 0.0033$$

Debido a que la  $p < p_{\min}$ , se trabaja con la cuantía mínima

$$A_s = 0.0033 * \frac{\pi * 125^2}{4} = 40.50 \text{ cm}^2$$

Se calcula el  $A_s$ , con la cuantía encontrada, luego se elige el diámetro de la varilla con la que se desea realizar el diseño, en este caso se eligió, varilla #8 cuyo diámetro es 5.01  $\text{cm}^2$  y finalmente se verifica cuantas varillas son necesarias para el refuerzo longitudinal.

$$\# \text{ varillas} = \frac{40.50 \text{ cm}^2}{5.01 \text{ cm}} = 9 \text{ varillas}$$

$$p_{\text{real}} = \frac{9 * 5.01 \text{ cm}^2}{\frac{\pi * 1.25^2 \text{ cm}^2}{4}} = 0.0036$$

**M max (-) = 17802 kN\*m**

Se toma el momento máximo negativo para el diseño a flexión.

$$k = \frac{8 * 17802}{1000 * \frac{\pi * 1.25^3}{4}} = 23.21 \text{ MPa}$$

Se divide por 1000 para cambiar las unidades a MPa.

$$m = \frac{420}{0.9 * 28} = 17.64$$

Luego de hallar  $m$  y  $K$ , se obtiene el valor de cuantía de la fórmula.

Al ser un momento tan grande, la cuantía calculada no se puede determinar, razón por la cual hay que diseñar con la cuantía máxima

$p_{\max} = 0.0214$

$$A_s = 0.0214 * \frac{\pi * 1.25^2}{4} = 270.1 \text{ cm}^2$$

Se calcula el  $A_s$ , con la cuantía encontrada, luego se elige el diámetro de la varilla con la que se desea realizar el diseño, en este caso se eligió, varilla #8 cuyo diámetro es 5.01  $\text{cm}^2$  y finalmente se verifica cuantas varillas son necesarias para el refuerzo longitudinal.

$$\# \text{ varillas} = \frac{270.1 \text{ cm}^2}{5.01 \text{ cm}} = 53 \text{ varillas}$$

$$p_{\text{real}} = \frac{53 * 5.01 \text{ cm}^2}{\frac{\pi * 1.25^3}{4} \text{ cm}^2} = 0.0212$$

### Refuerzo a cortante

$$V = 645.23 \text{ Ton}$$

$$V_u = \frac{645.23 * 1000}{\frac{\pi * 1.25^2}{4}} = 52.58 \text{ Kg/cm}^2$$

Con el valor del cortante, se determina el esfuerzo de corte. Este valor hay que dividirlo por 1000 para dejarlo en Kg.

$$V_c = 0.85 * 0.53 \sqrt{280} = 7.54 \text{ Kg/cm}^2$$

Se determina el valor de la resistencia que proporciona el concreto.

$$V_s = V_u - V_c$$

$$V_s = 52.58 - 7.54 = 48.29 \text{ Kg/cm}^2$$

Luego se verifica si la resistencia que proporciona el concreto es capaz de resistir el esfuerzo cortante.

Como  $V_s > 0$ , entonces la separación se determina de la fórmula:

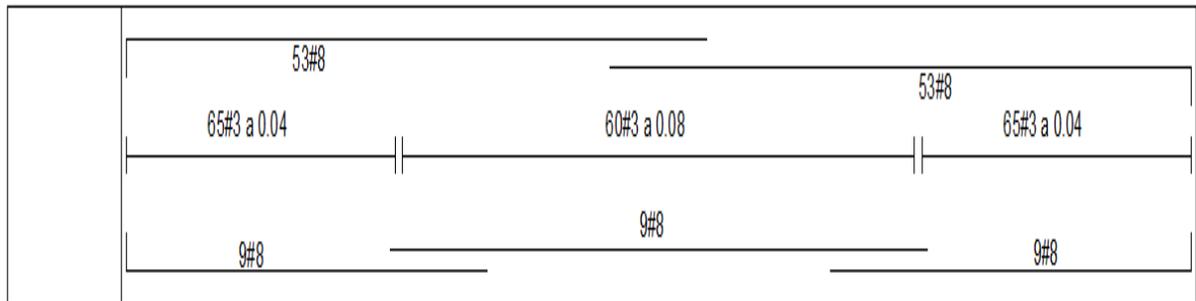
$$s = \frac{A_v * f_y}{V_s * d}$$

$$s = \frac{4 * 1.27 \text{ cm}^2 * 4200 \text{ Kg/cm}^2}{48.29 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} * 125 \text{ cm}} = 3.53 \text{ cm}$$

$$l = 2 * 125 \text{ cm} = 250 \text{ cm}$$

De acuerdo a los resultados arrojados se determinó que la separación de los flejes en la zona de confinamiento es 4 cm, cuya longitud es 2.50 m y la separación de los flejes en la zona de no confinamiento es 8 cm.

En este orden de ideas se presenta el despiece de este pilote específicamente de acuerdo a los resultados obtenidos del diseño de flexión y de cortante.



### Análisis de ejemplo:

De acuerdo a los resultados obtenidos para ITO MATSUI, se puede ver que las solicitaciones a flexión para momentos negativos son demasiado altas haciendo que el refuerzo longitudinal se realice con la cuantía máxima.

En cuanto al refuerzo por esfuerzos cortantes estos se comportan de forma inversa que una viga que trabaja a flexión; como se puede ver en los diagramas de cortantes, sus solicitaciones son mucho mayor hacia el centro del pilote, que hacía los apoyos. Razón por la cual los flejes irán menos espaciados hacia el centro (zona de confinamiento) y más espaciados hacía los apoyos (zona de no confinamiento)

A continuación en las tablas 6.1 y 6.2, se presentan los resultados de los diseños a flexión y a cortante, calculados de la misma forma como se mostro en el ejemplo anterior,

6.9.2. DISEÑO A FLEXIÓN									
CONDICION	MÉTODO	M positivo(Ton*m)	M negativo(Ton*m)	p (+)	p (-)	As (+) (cm2)	As (-) (cm2)	# varillas (+)	# varillas (-)
CABEZA LIBRE	ITO Y MATSUI	79.98	1780.2	0.0036	0.0212	45.9	270.3	8 # 8	53 # 8
SIN ROTACION, CON DESPLAZAMIENTO	ITO Y MATSUI	903.5	907.3	0.0212	0.0212	270.3	270.3	53 # 8	53 # 8
	BRANDL	69.68	153.23	0.0036	0.004	45.9	51	8 # 8	10 # 8
	NAVFAC	675.4	1485.22	0.016	0.0212	204	270.3	42 # 8	53 # 8
	VIGGIANI	34.05	59.94	0.0036	0.0036	45.9	45.9	9 # 8	9 # 8
	BROMS	66.42	116.98	0.0036	0.0036	45.9	45.9	9 # 8	9 # 8
SIN DESPLAZAMIENTO, CON ROTACION	ITO Y MATSUI	273.3	138.91	0.0056	0.0036	71.4	45.9	14 # 8	10# 8
	BRANDL	69.68	153.23	0.0036	0.004	45.9	51	9 # 8	10 # 8
	NAVFAC	675.4	1485.22	0.016	0.0212	204	270.3	38 # 8	53 # 8
	VIGGIANI	34.05	59.94	0.0036	0.0036	45.9	45.9	9 # 8	9 # 8
	BROMS	66.42	116.98	0.0036	0.0036	45.9	45.9	9 # 8	9 # 8
CABEZA FIJA	ITO Y MATSUI	232.5	152.5	0.0048	0.0036	61.2	45.9	12 # 8	10 # 8
	BRANDL	49.75	115.26	0.0036	0.004	45.9	51	9 # 8	10 # 8
	NAVFAC	482.23	1117.2	0.01	0.0212	127.5	270.3	23 # 8	53 # 8
	VIGGIANI	20.15	40.3	0.0036	0.0036	45.9	45.9	9 # 8	9 # 8
	BROMS	39.32	78.65	0.0036	0.0036	45.9	45.9	9 # 8	9 # 8

Tabla 6.1. Diseño a flexión de los 5 métodos, para el terreno Coluvial.

6.9.3. DISEÑO A CORTANTE							
CONDICION	MÉTODO	V (Ton)	Vu (kg/cm2)	Vc (kg/cm2)	Vs (kg/cm2)	Separación zona de confinamiento (cm)	Separación zona de NO confinamiento (cm)
<b>CABEZA LIBRE</b>	ITO Y MATSUI	645.23	46.7557971	7.538306839	39.21749026	4.730808462	9.46
<b>SIN ROTACION, CON DESPLAZAMIENTO</b>	ITO Y MATSUI	324.43	23.50942029	7.538306839	15.97111345	11.61662494	23.23
	BRANDL	92.59	6.71	7.54	-0.83	27.5	55
	NAVFAC	897.4	65.03	7.54	57.49	3.23	6.45
	VIGGIANI	30.17	2.19	7.54	-5.35	27.5	55
	BROMS	58.89	4.27	7.54	-3.27	27.5	55
<b>SIN DESPLAZAMIENTO, CON ROTACION</b>	ITO Y MATSUI	165.1	11.96	7.54	4.43	28.75	57.5
	BRANDL	92.59	6.71	7.54	-0.83	27.5	55
	NAVFAC	897.4	65.03	7.54	57.49	3.23	6.45
	VIGGIANI	30.17	2.19	7.54	-5.35	27.5	55
	BROMS	58.89	4.27	7.54	-3.27	27.5	55
<b>CABEZA FIJA</b>	ITO Y MATSUI	200.7	14.54	7.54	7.01	28.75	57.5
	BRANDL	81.03	5.87	7.54	-1.67	27.5	55
	NAVFAC	785.1	56.89	7.54	49.35	3.76	7.52
	VIGGIANI	24.18	1.75	7.54	-5.79	27.5	55
	BROMS	47.19	3.42	7.54	-4.12	27.5	55

Tabla 6.2. Diseño a cortante de los 5 métodos, para el terreno Coluvial.

Con base a los resultados de las tablas 6.1 y 6.2, se estudio el valor (peso colombiano) de un pilote para cada método analizado, variando el tipo de apoyo (cabeza libre, sin rotación con desplazamiento, sin desplazamiento con rotación y cabeza fija) cuando la profundidad es  $h = 0$  m.

Los valores unitarios del concreto (4000 PSI, grava común, 28 días) y del acero de refuerzo (60000 PSI) fueron investigados en Cemex y en Ferrasa respectivamente.

El metro cubico de concreto con una resistencia de 4000 PSI (utilizados por Rodríguez en la estabilización de la vía Villeta – Bogotá), de grava común a 28 días cuesta alrededor de \$250.309 pesos (Cemex, Colombia).

El kilo del acero suministrado por la empresa Ferrasa (Colombia), con una resistencia de 60.000 PSI cuesta alrededor de \$1.450 pesos.

El precio por metro lineal de la perforación y colocación de un anclaje de 50 Toneladas, se obtiene de la tabla 6.3 utilizada y suministrada por el Ingeniero Rodríguez en la solución del estudio en Villeta.

621.3.1	621.3.1	Perforación y Colocación de Anclajes de 40 Ton					ML
ECOM400	COMPRESOR 400 PCM ALTA PRESION	HORA	65,000	3.800	0	17,105	
EG-BOM	BOMBA DE INYECCION	HORA	20,000	3.800	0	5,263	
EG-HERR	HERRAMIENTA DE PERFORACION		15,500	3.800	0	4,079	
EMENOR	EQUIPO Y HERRAMIENTA MENOR	GL	2,500	2.500	0	1,000	
EPERHOR	EQUIPO DE PERFORACION	HORA	85,000	3.800	0	22,368	
MCEMEN	CEMENTO (EN OBRA)	Bl	17,500	1.000	0	17,500	
MG-CABLE	CABLE DE 1/2 PARA ANCLAJES	ML	9,500	4.000	0	38,000	
MG-TUB1	TUBO PVC 1"1 ANCLAJES	ML	1,600	1.000	0	1,600	
P000102	CUADRILLA 0 - 1 - 2	Jor	145,000	9.000	1	16,111	
<b>Costo Unitario Directo</b>						123,027	
621.3.2	621.3.2	Perforación y Colocación de Anclajes de 30 Ton					ML
ECOM400	COMPRESOR 400 PCM ALTA PRESION	HORA	65,000	3.800	0	17,105	
EG-BOM	BOMBA DE INYECCION	HORA	20,000	3.800	0	5,263	
EG-HERR	HERRAMIENTA DE PERFORACION		15,500	3.800	0	4,079	
EMENOR	EQUIPO Y HERRAMIENTA MENOR	GL	2,500	2.500	0	1,000	
EPERHOR	EQUIPO DE PERFORACION	HORA	85,000	3.800	0	22,368	
MCEMEN	CEMENTO (EN OBRA)	Bl	17,500	1.000	0	17,500	
MG-CABLE	CABLE DE 1/2 PARA ANCLAJES	ML	9,500	3.000	0	28,500	
MG-TUB1	TUBO PVC 1"1 ANCLAJES	ML	1,600	1.000	0	1,600	
P000102	CUADRILLA 0 - 1 - 2	Jor	145,000	9.000	1	16,111	
<b>Costo Unitario Directo</b>						113,527	
621.3.3	621.3.3	Perforación y Colocación de Anclajes de 50 Ton					ML
ECOM400	COMPRESOR 400 PCM ALTA PRESION	HORA	65,000	3.800	0	17,105	
EG-BOM	BOMBA DE INYECCION	HORA	20,000	3.800	0	5,263	
EG-HERR	HERRAMIENTA DE PERFORACION		15,500	3.800	0	4,079	
EMENOR	EQUIPO Y HERRAMIENTA MENOR	GL	2,500	2.500	0	1,000	
EPERHOR	EQUIPO DE PERFORACION	HORA	85,000	3.800	0	22,368	
MCEMEN	CEMENTO (EN OBRA)	Bl	17,500	1.000	0	17,500	
MG-CABLE	CABLE DE 1/2 PARA ANCLAJES	ML	9,500	5.000	0	47,500	
MG-TUB1	TUBO PVC 1"1 ANCLAJES	ML	1,600	1.000	0	1,600	
P000102	CUADRILLA 0 - 1 - 2	Jor	145,000	9.000	1	16,111	
<b>Costo Unitario Directo</b>						132,527	

Tabla 6.3. Perforación y colocación de anclajes.

Para los cinco métodos, se modularon los flejes de los pilotes con un recubrimiento de 5 centímetros, un traslape de 20 centímetros y un gancho de 7 centímetros como lo muestra la figura 6.21

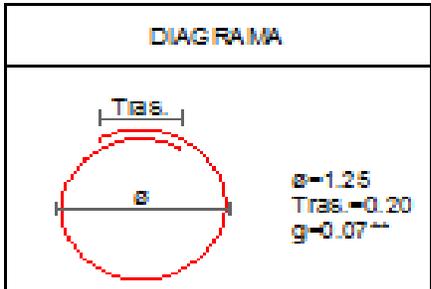


Figura 6.21. Detalle de flejes para los 5 métodos.

Teniendo en cuenta estos valores, se procede a analizar el costo de un pilote para cada método, dependiendo del tipo de apoyo que se utilice.

La condición de cabeza libre, donde el cabezal del pilote ( $h = 0$  m.) trabaja en cantiléver (sin restricciones), fue evaluada solo para el método de Ito y Matsui.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

CONDICION DE CABEZA LIBRE						
METODO	# VARILLAS (+)	# VARILLAS (-)	SEP ZONA DE CONFINAMIENTO (cm)	SEP ZONA DE NO CONFINAMIENTO (cm)	DIAMETRO DEL PILOTE (m)	LONGITUD DEL PILOTE (m)
ITO Y MATSUI	9 # 8	53 # 8	4.73	9.46	1.3	20

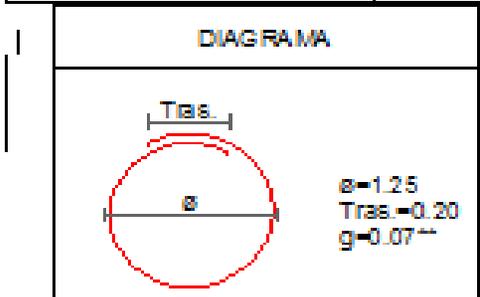
VOLUMEN DE CONCRETO DEL PILOTE					
METODO	RADIO (m)	$\pi$	AREA (m2)	LONGITUD (m)	VOLUMEN (m3)
ITO Y MATSUI	0.65	3.141592654	1.327322896	20	26.54645792

VALOR DEL CONCRETO PARA UN PILOTE				
METODO	ESPECIFICACION DE CONCRETO	VALOR M <sup>3</sup> (PESOS \$)	CANTIDAD DE CONCRETO (m <sup>3</sup> )	VALOR TOTAL (PESOS \$)
ITO Y MATSUI	4000 PSI	\$ 250,309.00	26.54645792	<b>\$ 6,644,817.34</b>

PESO DEL REFUERZO DEL PILOTE (VARILLAS)						
METODO	# VARILLAS (+)	LONGITUD (m)	PESO (Kg)	# VARILLAS (-)	LONGITUD (m)	PESO (Kg)
ITO MATSUI	27 # 8	7.85	842	106#8	11.2	4717

VALOR DEL REFUERZO PARA UN PILOTE (VARILLAS)				
METODO	ESPECIFICACION DE REFUERZO	VALOR Kg (PESOS \$)	PESO (Kg)	VALOR TOTAL (PESOS \$)
ITO Y MATSUI	60000 PSI	\$ 1,450.00	5559	<b>\$ 8,060,550.00</b>

SECCION DE FLEJES	RECUBRIMIENTO (m)
	0.05



PESO DEL REFUERZO DEL PILOTE (FLEJES)								
METODO	ZONA DE CONFINAMIENTO				ZONA DE NO CONFINAMIENTO			
	LONGITUD ZONA DE CONF. (m)	SEPARACION (m)	CANTIDAD DE FLEJES - # 4	PESO (Kg)	LONGITUD ZONA DE NO CONF. (m)	SEPARACION (m)	CANTIDAD DE FLEJES - # 4	PESO (Kg)
ITO MATSUI	10	0.05	211.3803609	899	10	0.094616169	105.6901805	445

VALOR DEL REFUERZO PARA UN PILOTE (FLEJES)				
METODO	ESPECIFICACION DE REFUERZO	VALOR Kg (PESOS \$)	PESO (Kg)	VALOR TOTAL (PESOS \$)
ITO Y MATSUI	60000 PSI	\$ 1,450.00	1344	\$ 1,948,800.00

CUADRO RESUMEN			
METODO	VALOR (\$) CONCRETO	VALOR (\$) REFUERZO	VALOR TOTAL PILOTE (\$)
ITO MATSUI	\$ 6,644,817.34	\$ 10,009,350.00	\$ 16,654,167.34

Un pilote para el método de Ito y Matsui, en la condición de cabeza libre, valdría alrededor de \$16'654.167 pesos. Este valor se debe a que es un pilote de 20 metros de longitud y necesita un refuerzo considerable para estabilizar el terreno.

A continuación se muestra la comparación económica de los 5 métodos, utilizando la condición que permite el desplazamiento mas no la rotación del pilote cuando la profundidad  $h = 0$  m. Para generar esta restricción se debe anclar la cabeza del pilote al terreno.

Para calcular el valor de este anclaje, se tomaron los datos del estudio realizado por Rodriguez (2010), quien da la solución de un anclaje por pilote con una longitud de 50 metros .El precio del ml de la perforación y colocación del anclaje se toma de la tabla 6.3

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

PERFORACION Y COLOCACION DE ANCLAJES DE 50 TON			
CANTIDAD DE ANCLAJES POR PILOTE	LONGITUD DE ANCLAJE (m)	PRECIO (\$)/ml	VALOR TOTAL ANCLAJE (\$)
1	50	\$132,527.00	\$6,626,350.00

CONDICION SIN ROTACION, CON DESPLAZAMIENTO						
METODO	# VARILLAS (+)	# VARILLAS (-)	SEP ZONA DE CONFINAMIENTO (cm)	SEP ZONA DE NO CONFINAMIENTO (cm)	DIAMETRO DEL PILOTE (m)	LONGITUD DEL PILOTE (m)
ITO Y MATSUI	53 # 8	53 # 8	11.62	23.23	1.3	20
BRANDL	9 # 8	10 # 8	27.5	55	1.3	23
NAVFAC	40 # 8	53 # 8	3.23	6.45	1.3	23
VIGGIANI	9 # 8	9 # 8	27.5	55	1.3	23
BROMS	9 # 8	9 # 8	27.5	55	1.3	23

VOLUMEN DE CONCRETO DEL PILOTE					
METODO	RADIO (m)	$\pi$	AREA (m <sup>2</sup> )	LONGITUD (m)	VOLUMEN (m <sup>3</sup> )
ITO Y MATSUI	0.65	3.141592654	1.327322896	20	26.54645792
BRANDL	0.65	3.141592654	1.327322896	23	30.52842661
NAVFAC	0.65	3.141592654	1.327322896	23	30.52842661
VIGGIANI	0.65	3.141592654	1.327322896	23	30.52842661
BROMS	0.65	3.141592654	1.327322896	23	30.52842661

VALOR DEL CONCRETO				
METODO	ESPECIFICACION DE CONCRETO	VALOR M <sup>3</sup> (PESOS \$)	CANTIDAD DE CONCRETO PARA UN PILOTE (m <sup>3</sup> )	VALOR TOTAL (PESOS \$)
ITO Y MATSUI	4000 PSI	\$ 250,309.00	26.54645792	\$ 6,644,817.34
BRANDL	4000 PSI	\$ 250,309.00	30.52842661	\$ 7,641,539.94
NAVFAC	4000 PSI	\$ 250,309.00	30.52842661	\$ 7,641,539.94
VIGGIANI	4000 PSI	\$ 250,309.00	30.52842661	\$ 7,641,539.94
BROMS	4000 PSI	\$ 250,309.00	30.52842661	\$ 7,641,539.94

PESO DEL REFUERZO DEL PILOTE (VARILLAS)						
METODO	# VARILLAS (+)	LONGITUD (m)	PESO (Kg)	# VARILLAS (-)	LONGITUD (m)	PESO (Kg)
ITO Y MATSUI	106#8	11.2	4717	159#8	15.7	4738
BRANDL	27#8	7.84	842	20#8	5.6	890
NAVFAC	120#8	7.84	3792	106#8	11.2	4272
VIGGIANI	27#8	7.84	842	18#8	11.2	800
BROMS	27#9	7.84	842	18#9	11.2	800

VALOR DEL REFUERZO PARA UN PILOTE (VARILLAS)				
METODO	ESPECIFICACION DE REFUERZO	VALOR Kg (PESOS \$)	PESO (Kg)	VALOR TOTAL (PESOS \$)
ITO Y MATSUI	60000 PSI	\$ 1,450.00	9455	\$ 13,709,750.00
BRANDL	60000 PSI	\$ 1,450.00	1732	\$ 2,511,400.00
NAVFAC	60000 PSI	\$ 1,450.00	8064	\$ 11,692,800.00
VIGGIANI	60000 PSI	\$ 1,450.00	1642	\$ 2,380,900.00
BROMS	60000 PSI	\$ 1,450.00	1642	\$ 2,380,900.00

PESO DEL REFUERZO DEL PILOTE (FLEJES)										
METODO	ZONA DE CONFINAMIENTO				ZONA DE NO CONFINAMIENTO					
	LONGITUD (m)	ZONA DE CONF. (m)	SEPARACION (m)	CANTIDAD DE FLEJES - # 4	PESO (Kg)	LONGITUD (m)	ZONA DE NO CONF. (m)	SEPARACION (m)	CANTIDAD DE FLEJES - # 4	PESO (Kg)
ITO MATSUI		10	0.12	86.08352301	365	10		0.232332499	43.0417615	182
BRANDL		9.2	0.28	33.45454545	144	13.8		0.55	25.09090909	84
NAVFAC		9.2	0.03	285.0821992	1214	13.8		0.064542788	213.8116494	712
VIGGIANI		9.2	0.28	33.45454545	144	13.8		0.55	25.09090909	84
BROMS		9.2	0.28	33.45454545	144	13.8		0.55	25.09090909	84

VALOR DEL REFUERZO PARA UN PILOTE (FLEJES)				
METODO	ESPECIFICACION DE REFUERZO	VALOR Kg (PESOS \$)	PESO (Kg)	VALOR TOTAL (PESOS \$)
ITO Y MATSUI	60000 PSI	\$ 1,450.00	547	\$ 793,150.00
BRANDL	60000 PSI	\$ 1,450.00	114	\$ 165,300.00
NAVFAC	60000 PSI	\$ 1,450.00	963	\$ 1,396,350.00
VIGGIANI	60000 PSI	\$ 1,450.00	114	\$ 165,300.00
BROMS	60000 PSI	\$ 1,450.00	114	\$ 165,300.00

CUADRO RESUMEN				
METODO	VALOR (\$) CONCRETO	VALOR (\$) REFUERZO	VALOR ANCLAJE (\$)	VALOR TOTAL PILOTE (\$)
ITO MATSUI	\$ 6,644,817.34	\$ 14,502,900.00	\$ 6,626,350.00	\$ 27,774,067.34
BRANDL	\$ 7,641,539.94	\$ 1,421,000.00	\$ 6,626,350.00	\$ 15,688,889.94
NAVFAC	\$ 7,641,539.94	\$ 7,242,750.00	\$ 6,626,350.00	\$ 21,510,639.94
VIGGIANI	\$ 7,641,539.94	\$ 1,355,750.00	\$ 6,626,350.00	\$ 15,623,639.94
BROMS	\$ 7,641,539.94	\$ 1,355,750.00	\$ 6,626,350.00	\$ 15,623,639.94

El concreto, para los métodos de Brandl, Navfac, Viggiani y Broms es exactamente el mismo, esto se debe a que las dimensiones del pilote son las mismas. Ito Matsui por su parte, disminuye el precio del concreto en un millón de pesos debido a que el pilote es 3 metros más corto

El valor del anclaje para los 5 métodos es el mismo.

En ese orden de ideas, el factor que más influye a la hora de construir los pilotes, en el precio de la construcción de los pilotes, es el refuerzo que este necesite.

Como se muestra en el cuadro resumen de la condición sin rotación con desplazamiento, los métodos de Ito y Matsui y Navfac son mucho más costosos en cuanto a material de construcción (refuerzo – concreto) que los demás métodos, esto se debe a los altos valores de cortante y momento obtenidos de la presión lateral de tierras que cada método sugiere.

Como se ha demostrado a lo largo de este estudio, los métodos de Brandl, Viggiani y Broms arrojaron siempre cortantes y momentos más pequeños comparados con NavFac e Ito – Matsui, situación que se evidencia aun más, con la cantidad de refuerzo y el precio de un pilote para cada método.

El precio de un pilote para los métodos de Brandl, Viggiani y Broms está alrededor de los \$15'600.000, valor muy pequeño en relación con Ito y Matsui.

A continuación se muestra la comparación económica de los 5 métodos, utilizando la condición que permite la rotación mas no el desplazamiento del pilote cuando la profundidad  $h = 0$  m.

Para generar esta restricción se debe construir una viga cabezal que amarre todo el grupo de pilotes. Para obtener el valor de la viga cabezal por pilote, se tomaron los datos del estudio realizado por Rodríguez (2010), quien sugiere una viga de sección de 1.3 m X 1.3 m, de longitud de 154 metros, flejes #4 cada 35 centímetros y 56 varillas # 8 a lo largo de toda la viga.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

VIGA CABEZAL							
CONCRETO							
LONGITUD (m)	ANCHO (m)	ALTO (m)	VOLUMEN (m3)	PRECIO (\$)/m3	VALOR TOTAL (\$)	CANTIDAD DE PILOTES	VALOR POR PILOTE (\$)
154	1.3	1.3	260.26	\$250,309.00	\$65,145,420.34	39	\$1,670,395.39

REFUERZO							
CANTIDAD	# DE VARILLA	LONGITUD	PESO (Kg)	PRECIO (\$)/Kg	VALOR TOTAL (\$)	CANTIDAD DE PILOTES	VALOR POR PILOTE (\$)
440	4	5	1632	\$1,450.00	\$2,366,400.00	39	\$60,676.92
56	8	153.4	75412	\$1,450.00	\$109,347,400.00	39	\$2,803,779.49
							<b>\$2,864,456.41</b>

VALOR TOTAL VIGA CABEZAL POR PILOTE (\$)
\$4,534,851.80

CONDICION SIN DESPLAZAMIENTO, CON ROTACION						
METODO	# VARILLAS (+)	# VARILLAS (-)	SEP ZONA DE CONFINAMIENTO (cm)	SEP ZONA DE NO CONFINAMIENTO (cm)	DIAMETRO DEL PILOTE (m)	LONGITUD DEL PILOTE (m)
ITO Y MATSUI	14 # 8	9 # 8	28.75	57.5	1.3	20
BRANDL	9 # 8	10 # 8	27.5	55	1.3	23
NAVFAC	40 # 8	53 # 8	3.23	6.45	1.3	23
VIGGIANI	9 # 8	9 # 8	27.5	55	1.3	23
BROMS	9 # 8	9 # 8	27.5	55	1.3	23

VOLUMEN DE CONCRETO DEL PILOTE					
METODO	RADIO (m)	$\pi$	AREA (m2)	LONGITUD (m)	VOLUMEN (m3)
ITO Y MATSUI	0.65	3.141592654	1.327322896	20	26.54645792
BRANDL	0.65	3.141592654	1.327322896	23	30.52842661
NAVFAC	0.65	3.141592654	1.327322896	23	30.52842661
VIGGIANI	0.65	3.141592654	1.327322896	23	30.52842661
BROMS	0.65	3.141592654	1.327322896	23	30.52842661

VALOR DEL CONCRETO				
METODO	ESPECIFICACION DE CONCRETO	VALOR M <sup>3</sup> (PESOS \$)	CANTIDAD DE CONCRETO PARA UN PILOTE (m <sup>3</sup> )	VALOR TOTAL (PESOS \$)
ITO Y MATSUI	4000 PSI	\$ 250,309.00	26.54645792	\$ 6,644,817.34
BRANDL	4000 PSI	\$ 250,309.00	30.52842661	\$ 7,641,539.94
NAVFAC	4000 PSI	\$ 250,309.00	30.52842661	\$ 7,641,539.94
VIGGIANI	4000 PSI	\$ 250,309.00	30.52842661	\$ 7,641,539.94
BROMS	4000 PSI	\$ 250,309.00	30.52842661	\$ 7,641,539.94

PESO DEL REFUERZO DEL PILOTE (VARILLAS)						
METODO	# VARILLAS (+)	LONGITUD (m)	PESO (Kg)	# VARILLAS (-)	LONGITUD (m)	PESO (Kg)
ITO Y MATSUI	42#8	11.2	1869	28#8	7.85	834
BRANDL	27#8	7.84	842	20#8	11.2	890
NAVFAC	120#8	7.84	3792	106#8	11.2	4272
VIGGIANI	27#8	7.84	842	18#8	11.2	800
BROMS	27#9	7.84	842	18#9	11.2	800

VALOR DEL REFUERZO PARA UN PILOTE (VARILLAS)				
METODO	ESPECIFICACION DE REFUERZO	VALOR Kg (PESOS \$)	PESO (Kg)	VALOR TOTAL (PESOS \$)
ITO Y MATSUI	60000 PSI	\$ 1,450.00	2703	\$ 3,919,350.00
BRANDL	60000 PSI	\$ 1,450.00	1732	\$ 2,511,400.00
NAVFAC	60000 PSI	\$ 1,450.00	8064	\$ 11,692,800.00
VIGGIANI	60000 PSI	\$ 1,450.00	1642	\$ 2,380,900.00
BROMS	60000 PSI	\$ 1,450.00	1642	\$ 2,380,900.00

PESO DEL REFUERZO DEL PILOTE (FLEJES)										
METODO	ZONA DE CONFINAMIENTO					ZONA DE NO CONFINAMIENTO				
	LONGITUD (m)	ZONA DE CONF. (m)	SEPARACION (m)	CANTIDAD DE FLEJES - # 3	PESO (Kg)	LONGITUD (m)	ZONA DE NO CONF. (m)	SEPARACION (m)	CANTIDAD DE FLEJES - # 3	PESO (Kg)
ITO MATSUI	10		0.29	34.7826087	148	10		0.575	17.39130435	76
BRANDL	9.2		0.28	33.45454545	144	13.8		0.55	25.09090909	84
NAVFAC	9.2		0.03	285.0821992	1214	13.8		0.064542788	213.8116494	712
VIGGIANI	9.2		0.28	33.45454545	144	13.8		0.55	25.09090909	84
BROMS	9.2		0.28	33.45454545	144	13.8		0.55	25.09090909	84

VALOR DEL REFUERZO PARA UN PILOTE (FLEJES)				
METODO	ESPECIFICACION DE REFUERZO	VALOR Kg (PESOS \$)	PESO (Kg)	VALOR TOTAL (PESOS \$)
ITO Y MATSUI	60000 PSI	\$ 1,450.00	224	\$ 324,800.00
BRANDL	60000 PSI	\$ 1,450.00	114	\$ 165,300.00
NAVFAC	60000 PSI	\$ 1,450.00	963	\$ 1,396,350.00
VIGGIANI	60000 PSI	\$ 1,450.00	114	\$ 165,300.00
BROMS	60000 PSI	\$ 1,450.00	114	\$ 165,300.00

CUADRO RESUMEN				
METODO	VALOR (\$) CONCRETO	VALOR (\$) REFUERZO	VALOR TOTAL (\$) VIGA CABEZAL	VALOR TOTAL PILOTE (\$)
ITO MATSUI	\$ 6,644,817.34	\$ 4,244,150.00	\$ 4,534,851.80	\$ 15,423,819.14
BRANDL	\$ 7,641,539.94	\$ 1,421,000.00	\$ 4,534,851.80	\$ 13,597,391.74
NAVFAC	\$ 7,641,539.94	\$ 7,242,750.00	\$ 4,534,851.80	\$ 19,419,141.74
VIGGIANI	\$ 7,641,539.94	\$ 1,355,750.00	\$ 4,534,851.80	\$ 13,532,141.74
BROMS	\$ 7,641,539.94	\$ 1,355,750.00	\$ 4,534,851.80	\$ 13,532,141.74

El método de Ito – Matsui rebaja su precio comparándolo con la condición que permite el desplazamiento más no la rotación. Paso de 27 millones de pesos a \$ 15'423,819, esto se debe a la disminución de cortantes y momentos arrojados en este método, y por ende los refuerzos disminuyen notoriamente

Los métodos de Brandl, Viggiani y Broms disminuyen el precio al compararlo con la condición anterior, esto se debe a que el precio de los anclajes son mayores que el precio de la viga cabezal por pilote, ya que el valor del concreto y del refuerzo del pilote se mantiene.

A continuación se muestra la comparación económica de los 5 métodos, utilizando la condición de cabeza fija, que no permite la rotación ni el desplazamiento del pilote cuando la profundidad  $h = 0$  m.

Para generar esta restricción se debe anclar la cabeza del pilote al terreno y construir una viga cabezal que amarre el grupo de pilotes.

Para calcular el valor de este anclaje, se tomaron los datos del estudio realizado por Rodríguez (2010), quien da la solución de un anclaje por pilote con una longitud de 50 metros. El precio del ml de la perforación y colocación del anclaje se toma de la tabla 6.3.

Para obtener el valor de la viga cabezal por pilote, se tomaron los datos del estudio realizado por Rodríguez (2010), quien sugiere una viga de sección de 1.3 m X 1.3 m, de longitud de 154 metros, flejes #4 cada 35 centímetros y 56 varillas # 8 a lo largo de toda la viga.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

VIGA CABEZAL							
CONCRETO							
LONGITUD (m)	ANCHO (m)	ALTO (m)	VOLUMEN (m3)	PRECIO (\$)/m3	VALOR TOTAL (\$)	CANTIDAD DE PILOTES	VALOR POR PILOTE (\$)
154	1.3	1.3	260.26	\$250,309.00	\$65,145,420.34	39	\$1,670,395.39

REFUERZO							
CANTIDAD	# DE VARILLA	LONGITUD	PESO (Kg)	PRECIO (\$)/Kg	VALOR TOTAL (\$)	CANTIDAD DE PILOTES	VALOR POR PILOTE (\$)
440	4	5	1632	\$1,450.00	\$2,366,400.00	39	\$60,676.92
56	8	153.4	75412	\$1,450.00	\$109,347,400.00	39	\$2,803,779.49
							<b>\$2,864,456.41</b>

<b>VALOR TOTAL VIGA CABEZAL POR PILOTE (\$)</b>
<b>\$4,534,851.80</b>

PERFORACION Y COLOCACION DE ANCLAJES DE 50 TON			
CANTIDAD DE ANCLAJES POR PILOTE	LONGITUD DE ANCLAJE (m)	PRECIO (\$)/ml	VALOR TOTAL ANCLAJE (\$)
1	50	\$132,527.00	\$6,626,350.00

CONDICION DE CABEZA FIJA						
METODO	# VARILLAS (+)	# VARILLAS (-)	SEP ZONA DE CONFINAMIENTO (cm)	SEP ZONA DE NO CONFINAMIENTO (cm)	DIAMETRO DEL PILOTE (m)	LONGITUD DEL PILOTE (m)
ITO Y MATSUI	12 # 8	9 # 8	28.75	57.5	1.3	20
BRANDL	9 # 8	10 # 8	27.5	55	1.3	23
NAVFAC	25 # 8	53 # 8	3.76	7.52	1.3	23
VIGGIANI	9 # 8	9 # 8	27.5	55	1.3	23
BROMS	9 # 8	9 # 8	27.5	55	1.3	23

VOLUMEN DE CONCRETO DEL PILOTE					
METODO	RADIO (m)	$\pi$	AREA (m <sup>2</sup> )	LONGITUD (m)	VOLUMEN (m <sup>3</sup> )
ITO Y MATSUI	0.65	3.141592654	1.327322896	20	26.54645792
BRANDL	0.65	3.141592654	1.327322896	23	30.52842661
NAVFAC	0.65	3.141592654	1.327322896	23	30.52842661
VIGGIANI	0.65	3.141592654	1.327322896	23	30.52842661
BROMS	0.65	3.141592654	1.327322896	23	30.52842661

VALOR DEL CONCRETO				
METODO	ESPECIFICACION DE CONCRETO	VALOR M <sup>3</sup> (PESOS \$)	CANTIDAD DE CONCRETO PARA UN PILOTE (m <sup>3</sup> )	VALOR TOTAL (PESOS \$)
ITO Y MATSUI	4000 PSI	\$ 250,309.00	26.54645792	\$ 6,644,817.34
BRANDL	4000 PSI	\$ 250,309.00	30.52842661	\$ 7,641,539.94
NAVFAC	4000 PSI	\$ 250,309.00	30.52842661	\$ 7,641,539.94
VIGGIANI	4000 PSI	\$ 250,309.00	30.52842661	\$ 7,641,539.94
BROMS	4000 PSI	\$ 250,309.00	30.52842661	\$ 7,641,539.94

PESO DEL REFUERZO DEL PILOTE (VARILLAS)						
METODO	# VARILLAS (+)	LONGITUD (m)	PESO (Kg)	# VARILLAS (-)	LONGITUD (m)	PESO (Kg)
ITO Y MATSUI	36#8	11.2	1602	18#8	7.85	536
BRANDL	27#8	7.84	842	20#8	11.2	890
NAVFAC	75#8	7.84	2336	50#8	11.2	224
VIGGIANI	27#8	7.84	842	18#8	11.2	800
BROMS	27#9	7.84	842	18#9	11.2	800

VALOR DEL REFUERZO PARA UN PILOTE (VARILLAS)				
METODO	ESPECIFICACION DE REFUERZO	VALOR Kg (PESOS \$)	PESO (Kg)	VALOR TOTAL (PESOS \$)
ITO Y MATSUI	60000 PSI	\$ 1,450.00	2138	\$ 3,100,100.00
BRANDL	60000 PSI	\$ 1,450.00	1732	\$ 2,511,400.00
NAVFAC	60000 PSI	\$ 1,450.00	2560	\$ 3,712,000.00
VIGGIANI	60000 PSI	\$ 1,450.00	1642	\$ 2,380,900.00
BROMS	60000 PSI	\$ 1,450.00	1642	\$ 2,380,900.00

PESO DEL REFUERZO DEL PILOTE (FLEJES)								
METODO	ZONA DE CONFINAMIENTO				ZONA DE NO CONFINAMIENTO			
	LONGITUD ZONA DE CONF. (m)	SEPARACION (m)	CANTIDAD DE FLEJES - # 3	PESO (Kg)	LONGITUD ZONA DE NO CONF. (m)	SEPARACION (m)	CANTIDAD DE FLEJES - # 3	PESO (Kg)
ITO MATSUI	10	0.29	34.7826087	148	10	0.575	17.39130435	76
BRANDL	9.2	0.28	33.45454545	144	13.8	0.55	25.09090909	84
NAVFAC	9.2	0.04	244.7294308	1044	13.8	0.075185072	183.5470731	610
VIGGIANI	9.2	0.28	33.45454545	144	13.8	0.55	25.09090909	84
BROMS	9.2	0.28	33.45454545	144	13.8	0.55	25.09090909	84

VALOR DEL REFUERZO PARA UN PILOTE (FLEJES)				
METODO	ESPECIFICACION DE REFUERZO	VALOR Kg (PESOS \$)	PESO (Kg)	VALOR TOTAL (PESOS \$)
ITO Y MATSUI	6000 PSI	\$ 1,450.00	224	\$ 324,800.00
BRANDL	6000 PSI	\$ 1,450.00	114	\$ 165,300.00
NAVFAC	6000 PSI	\$ 1,450.00	827	\$ 1,199,150.00
VIGGIANI	6000 PSI	\$ 1,450.00	114	\$ 165,300.00
BROMS	6000 PSI	\$ 1,450.00	114	\$ 165,300.00

CUADRO RESUMEN					
METODO	VALOR (\$) CONCRETO	VALOR (\$) REFUERZO	VALOR TOTAL (\$) VIGA CABEZAL	VALOR ANCLAJE (\$)	VALOR TOTAL PILOTE (\$)
ITO MATSUI	\$ 6,644,817.34	\$ 2,655,472.00	\$ 4,534,851.80	\$ 6,626,350.00	\$ 20,461,491.14
BRANDL	\$ 7,641,539.94	\$ 1,421,000.00	\$ 4,534,851.80	\$ 6,626,350.00	\$ 20,223,741.74
NAVFAC	\$ 7,641,539.94	\$ 3,055,150.00	\$ 4,534,851.80	\$ 6,626,350.00	\$ 21,857,891.74
VIGGIANI	\$ 7,641,539.94	\$ 1,355,750.00	\$ 4,534,851.80	\$ 6,626,350.00	\$ 20,158,491.74
BROMS	\$ 7,641,539.94	\$ 1,355,750.00	\$ 4,534,851.80	\$ 6,626,350.00	\$ 20,158,491.74

Para los métodos de Brandl, Viggiani y Broms, no sería una buena opción utilizar este tipo de apoyo ya que el tener que construir una viga cabezal y anclar los pilotes, aumenta el precio de la fabricación al compararlo con los demás tipos de apoyo.

Los métodos de NavFac e Ito-Matsui, siguen siendo los métodos más costosos, esto debido a sus valores elevados de cortantes y momentos.

## 6.10. ANALISIS Y RESULTADOS

Al haber analizado el estudio realizado por Rodríguez (2010) para la inestabilidad ubicada en el k76+200 (El Chorizo de Carlos), de la autopista Bogotá – Villeta, se quiere presentar un análisis aplicado a los diferentes métodos, mostrando la incidencia que generaría el variar la condición en los apoyos cuando la profundidad del pilote  $h = 0$  m, a una posible solución de estabilidad para esta zona (aplicado al cuadro 1).

- Los métodos de Brandl, Viggiani y Broms, son los métodos óptimos desde el punto de vista económico, sin embargo no son los métodos que representan lo que físicamente ocurre en el problema ya que determinan la capacidad de carga lateral del suelo más no las presiones que este genera al desplazarse a través de los pilotes.
- El método más costoso es el de NavFac, debido a los grandes valores de presiones laterales de tierra que sugiere el autor, llevando a cortantes y momentos que obligan a trabajar con cuantías máximas, obligando a reforzar el pilote al extremo.
- El método de Ito y Matsui, a diferencia de los demás métodos, depende radicalmente del tipo de apoyo que se utilice en la profundidad  $h=0$  metros. La condición de cabeza libre y la que permite la rotación mas no el desplazamiento son las más económicas.
- La condición de cabeza fija, es la condición donde se necesita menos refuerzo para el pilote ya que sus cortantes y momentos son menores. Sin embargo el costo para generar esta restricción (viga cabezal y anclajes), eleva el precio y no sería la opción más económica como se esperaba.
- La solución dada por Rodríguez, se asemeja a la que sugiere el método de Ito y Matsui en dos de las condiciones de apoyo (cabeza fija y cabeza libre), ya que la longitud del pilote es de 23 metros, el numero de varilla para refuerzo longitudinal es #8, el numero de varilla para los flejes es #4 y la cantidad de varillas y flejes es muy cercana.

## 7. CONCLUSIONES

- Como se mostró en este trabajo de grado, los esfuerzos en los pilotes están condicionados por varios parámetros: Empotramiento, condiciones en cabeza, diámetro, separación. Todas estas variables influyen de manera significativa sobre la presión lateral de tierras que un grupo de pilotes debe resistir para estabilizar un talud. El dimensionamiento de los pilotes se debe realizar de forma iterativa hasta encontrar la solución de óptima desde el punto de vista técnico, económico para una determinada seguridad deseable de la ladera.
- Los métodos de Brandl, Viggiani y Broms, arrojan valores de cortante y momento similares en orden de magnitud y más pequeños al comprarlos con Ito-Matsui y Navfac. Esto indica, que para estos tres métodos el diseño a flexión y a cortante de pilotes, es menor que el de Ito-Matsui y Navfac.
- Al verificar la incidencia que tiene la separación entre ejes de pilotes en la estabilización de taludes, en los métodos que lo requerían (Brandl, Broms e Ito-Matsui), se evidencio que al aumentar la separación de los pilotes, disminuía la presión lateral de tierras y por ende el cortante y el momento. Esta separación no puede ser mayor a 3 veces el diámetro de los pilotes, ya que dejarían de trabajar en grupo.
- Al observar la incidencia de la cohesión del suelo en las presiones laterales de tierras, para los métodos de Ito-Matsui, Viggiani, Broms y Navfac, se observa que la cohesión es directamente proporcional a los diagramas de cortante y momento. Esto nos indica que a mayor cohesión del suelo, mayor presión lateral de tierra soportan los pilotes.
- Al verificar las graficas del método de Navfac, que corresponden a la incidencia que tiene el ángulo de resistencia interna del suelo ( $\phi^\circ$ ) en la presión lateral de tierras, se evidencia que este ángulo es directamente proporcional a la fuerza lateral que resisten el pilotes en todo el fuste. Por otra parte, para el método de Brandl, los diagramas de fuerza, cortante y momento correspondientes a la incidencia del ángulo de resistencia interna del suelo ( $\phi^\circ$ ) no se comportan uniformemente. Para un ángulo de  $35^\circ$  se evidencia los mayores momentos y cortantes en todas las condiciones de apoyos, pero los menores momentos y cortantes no se obtienen con  $\phi = 5^\circ$ . Ocurre un salto en la grafica, donde el valor de  $20^\circ$  para el ángulo de resistencia interna del suelo, arroja los menores valores de fuerza que resistiría el pilote al estabilizar un talud, por ende los cortantes y momentos también serían menores en esta condición.

- Analizando el ANEXO 2, se ve que en todos los métodos expuestos, el diámetro de los pilotes influye en la fuerza que resiste cada pilote. Para todos los métodos el diámetro del pilote es directamente proporcional a esta fuerza y por ende a los cortantes y momentos.
- Al comparar en los métodos de Brandl, Viggiani, Broms y Navfac los tres tipos de apoyo (sin rotación con desplazamiento, sin desplazamiento con rotación y empotrado) en la cabeza del pilote cuando la profundidad  $h = 0$  m, se observa que para las primeras dos condiciones los momentos máximos positivos y negativos no cambian, mientras que para la condición de empotrado estos valores son mucho menores. Esto indicaría que empotrando los pilotes en  $h = 0$  m en estos cuatro métodos, se necesitarían menos varillas y flejes a lo largo del fuste del pilote para estabilizar un talud. Sin embargo, generar esta restricción de cabeza fija, no es la solución más óptima desde el punto de vista económico ya que al anclar los pilotes y amarrarlos generan unos sobre costos que superan las demás condiciones.
- Para los métodos de Brand, Viggiani y Broms, quienes sugieren cortantes y momentos pequeños y similares en todos los tipos de apoyo, la condición mas económica es la que permite la rotación mas no el desplazamiento, ya que el generar una restricción en la cabeza del pilote es el factor que más influye en el precio total del pilote, siendo más económico hacer una viga cabezal, que anclajes para cada pilote.
- Comparando los cuatro tipos de apoyo del pilote (cabeza fija, sin rotación con desplazamiento, sin desplazamiento con rotación y cabeza fija) en  $h = 0$  para el método de Ito-Matsui, se puede afirmar que la condición que permite el desplazamiento mas no la rotación, es la más crítica en cuanto a refuerzo de acero y costos. Esto se debe a que los momentos máximos y mínimos que se obtienen en esta condición, son exagerados al igual que los valores que arroja el diagrama de cortante. Por otra parte, la condición mas económica es la que permite la rotación mas no el desplazamiento ya que los momentos y cortantes no son muy exagerados y el precio de la viga cabezal no aumenta notoriamente el precio global por pilote.
- La metodología para evaluar los empujes laterales sobre pilotes  $P(z)$  (EC. 1), propuesta por los investigadores Ito y Matsui (Ito y Matsui; 1975, 1978), asume una distribución lineal. Esta fuerza en la superficie del suelo es diferente de cero (0), lo cual es justificable si se tiene en cuenta el material que está moviéndose por encima de la cabeza del pilote, sin embargo este valor de fuerza es excesivo comparado con los métodos de Brandl, Broms y Viggiani, si se tiene presente que su cuantificación depende únicamente del valor de cohesión y de las constantes  $D1$  y  $D2$ .

- En lo que respecta a la linealidad de la distribución de presiones laterales expuestas en la formulación de Ito y Matsui (Ito y Matsui; 1975, 1978), investigadores como Zhang, Silva y Grismada ( 2005) comprobaron que no es así, y que este valor debe ser cero (0) en el punto en donde la superficie de deslizamiento intercepta al pilote.
- Los métodos de Brandl, Viggiani, Broms y NavFac, no permiten el cálculo de presiones laterales de tierra por debajo del plano de falla.
- El método de Ito y Matsui es el que mejor representa lo que físicamente ocurre en el problema planteado. Es el único que en realidad modela la resistencia del pilote al haber un deslizamiento de un talud, tiene en cuenta todos los factores del suelo y tiene en cuenta la presión de tierras bajo el plano de falla. Los otros 4 métodos modelan lo que resistiría el suelo al incrustar un pilote, y algunos no tienen en cuenta factores de gran importancia como la cohesión del suelo o el ángulo de resistencia interna del suelo.
- De acuerdo a las conclusiones anteriores se puede finalizar diciendo que la estabilización con pilotes pasivos es un caso de interacción suelo-pilote difícil de analizar y no existe un método analítico o una solución única para diseño. Luego, en función del problema particular, es conveniente diseñar por diferentes métodos y tomar la decisión basándose en la experiencia y en las condiciones en donde será construída la obra diseñada.

## **8. RECOMENDACIONES**

- Al existir tantas discrepancias entre los diferentes métodos para la estabilización de taludes con pilotes, muchas de ellas empíricas, se dificulta la normalización de los procesos. Los métodos semiempíricos mostraron una gran incertidumbre en los diagramas de presiones, por lo tanto se recomienda resolver este problema usando métodos de deformación.

## 9. BIBLIOGRAFIA

### REFERENCIAS DE INTERNET

- Fernando Herrera Rodriguez. (2000) Geólogo - Master en Ingeniería Geológica, U.C.M, Analisis de Estabilidad de Taludes. [http://www.geotecnia2000.com/files/publicaciones/Analisis\\_de\\_Estabilidad\\_de\\_Taludes\\_Rocosos.pdf](http://www.geotecnia2000.com/files/publicaciones/Analisis_de_Estabilidad_de_Taludes_Rocosos.pdf)

### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Varnes D.J (1978).: Slope movement types and processes. In: Schuster R.L & Krizek R. J. Ed, Landslides, analysis and control.
- ITO, T., MATSUI, T., and HONG, W.P. (1981). "Design method of stabilizing piles against landslide one row of piles." Soils and Foundations, Vol. 21, No. 1, pp. 21-37.
- BRINCH, H. J., (1961) "The Ultimate Resistance of Rigid Piles Against Transversal Forces". The Danish Geotechnical Institute. Bulletin Nro 12. Copenhagen, pp 5-9.
- BROMS, B. B. (1964). "Lateral resistance of piles in cohesive soils." J.Soil Mech. Found. Div., 90(2), 27-64.
- POULOS, H. G. y DAVIS E. H. (1980). "Pile Foundation Analysis and Design". Ed Wiley. New York. Chapter 7 & 8, pp. 322-474.
- ANDRÉS FRANCISCO MARTÍNEZ VARGAS (2009) "Estabilización de taludes mediante pilotes, cartas de diseño". Máster en mecánica de suelos e ingeniería geotécnica.
- Viggiani.C. (1981):"Ultimate lateral load on piles used to stabilize landslides". 10th Int. Conf. ISMFE, Estocolmo, Vol. 3, pp. 555-560.
- NAVFAC (1986). "Foundation and Earth Structures, Design Manual 7.2". Department of the Navy, Alexandria, pp. 234-244.
- ZHANG, L.; SILVA, F. y GRISMALA, R. (2005). "Ultimate Lateral Resistance to Piles in Cohesionless Soils". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 131, Nro. 1, pp. 78-83.
- CARLOS RODRIGUEZ (2010). "Estudio y diseños de la solución constructiva a la inestabilidad ubicada en el K76+200 (Chorizo de Carlos), de la autopista Bogotá – Villeta ruta nacional 50 tramo 8 en el departamento de Cundinamarca.