



Universidad Industrial de Santander
Estudio de la Protección Contra la Erosión de la
Orilla del Río Magdalena en un Sector de Galán en
Barrancabermeja

**ESTUDIO DE LA PROTECCIÓN CONTRA LA EROSIÓN DE LA ORILLA DEL
RÍO MAGDALENA EN UN SECTOR DE GALÁN EN BARRANCABERMEJA**

**LUISA FERNANDA GARZÓN GUERRERO
YUMARA PEÑA ROMERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2014



Universidad Industrial de Santander
Estudio de la Protección Contra la Erosión de la
Orilla del Río Magdalena en un Sector de Galán en
Barrancabermeja

**ESTUDIO DE LA PROTECCIÓN CONTRA LA EROSIÓN DE LA ORILLA DEL
RÍO MAGDALENA EN UN SECTOR DE GALÁN EN BARRANCABERMEJA**

**LUISA FERNANDA GARZÓN GUERRERO
YUMARA PEÑA ROMERO**

**Trabajo de grado modalidad investigación para optar el título de
Ingeniero Civil**

**Director
WILFREDO DELTORO RODRIGUEZ
Ingeniero Civil, Msc**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2014



DEDICATORIA

Primero que todo quiero agradecer a Dios nuestro señor por guiarme y colocar en mi camino a todas aquellas personitas que de una u otra forma contribuyeron a mi crecimiento como persona.

A mi padre Luis Jacobo Garzón Ortiz y a mi madre Consuelo Guerrero Ariza, por estar siempre conmigo, por apoyarme en los momentos de alegría y tristeza, por sus consejos siempre a tiempo y en especial por su comprensión y amor incondicional.

A mi esposo Neyfer Adrian Mateus Pabón, por su motivación, comprensión y todas aquellas palabras de aliento que tuvo para mí en los momentos que más lo necesitaba.

A mi hijo Kevin Andrey Mateus Garzón, por ser la personita más especial y comprensiva que a su corta edad día tras día se convertía en mi motor para continuar adelante.

A mis hermanos Cesar Iván Garzón Guerrero y Ana María Garzón Guerrero por estar siempre apoyándome y pendientes de mí.

A mi compañera de proyecto Yumara Peña Romero, por su paciencia y colaboración.

Y a mis amigos con quienes compartí muchas experiencias inolvidables.

LUISA FERNANDA GARZÓN GUERRERO



DEDICATORIA

Es un privilegio poder expresar nuestra gratitud a Dios con nuestras propias palabras y acciones. Solo pensar en sus maravillas causa gozo en el corazón. Tener una actitud de agradecimiento fortalece la fe, nos hace crecer en nuestro caminar con el señor y trae muchas bendiciones a nuestras vidas.

Por este motivo dedico este proyecto primeramente a mi Dios padre, a mi familia, amigos y compañeros que siempre me estuvieron apoyando en cada etapa de mi vida.

Jehová es mi fortaleza y mi escudo; En él confió mi corazón, y fui ayudado, Por lo que se gozó mi corazón, Y con mi cántico le alabaré Salmos 28:7

YUMARA PEÑA ROMERO



AGRADECIMIENTOS

Este proyecto logró llegar a su culminación gracias a la participación y colaboración de personas y entidades, quienes estuvieron dispuestos a brindarnos su apoyo y acompañamiento durante las diferentes etapas de los mismos, entre ellos:

A Dios, quien hizo posible la culminación de uno de nuestros primeros éxitos.

A nuestro director MSc. Wilfredo DelToro Rodríguez por la confianza depositada en nosotras, por su apoyo y dirección en este proyecto.

Al Ingeniero Héctor Torres por su colaboración desinteresada y acompañamiento en la elaboración del proyecto.

A nuestra escuela de Ingeniería Civil y a la Universidad Industrial de Santander.

A nuestras familias por su amor, compañía y comprensión durante toda la experiencia de obtener con gratitud el título de Ingenieras Civiles.

CONTENIDO



INTRODUCCIÓN.....	16
1. OBJETIVOS.....	17
1.1. Objetivo General.....	17
1.2. Objetivos Específicos.....	17
2. MARCO TEORICO.....	18
2.1. Descripción Geológica.....	18
2.1.1. Geología Regional.....	18
2.2. Marco regional y cronoestratigrafía.....	18
2.2.1. Formación Mesa (TQpm).....	18
2.2.2. Depósitos Cuaternarios (Qd).....	19
2.2.3. Depósitos fluvio-lacustres (Qfl).....	19
2.2.4. Depósitos Aluviales (Qal).....	20
2.3. Geología Estructural.....	20
2.4. Geología Regional.....	21
3. INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	22
3.1. Perforaciones.....	23
4. HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA.....	24
4.1. Dinámica Fluvial.....	24
4.2. Hidráulica e Hidrología.....	25
4.3. Regímenes de niveles del río.....	26
4.4. Curvas de duración de niveles.....	27
5. SOCAVACIÓN GENERAL.....	29
5.1. Socavación de la banca.....	30
6. METODOLOGÍA.....	31
6.1. Corrección del N de campo.....	31
6.2. Corrección por energía.....	31
6.3. Corrección por confinamiento.....	31
6.4. Correlación entre N y la resistencia efectiva de los suelos.....	32
6.5. Resistencia Efectiva Aproximada con SPT.....	33
6.5.1. Procedimiento.....	33
6.6. Modelamiento en PLAXIS 2D, versión 2012.....	35
6.7. Resultados.....	39
6.8. Chequeo teórico de la profundidad de empotramiento.....	39
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	46
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Plano geológico general.....	21
Figura 2. Localización de sondeos.....	23
Figura 3. Imagen satelital año 2002.....	24
Figura 4. Foto aérea tomada en 2007.....	24
Figura 5. Imagen satelital año 2009.....	25
Figura 6. Serie histórica estación de Barrancabermeja.....	26
Figura 7. Serie histórica de niveles máximos diarios del 2010 al 2012.....	27
Figura 8. Curva de duración de niveles medios diarios estación de Barrancabermeja.....	28
Figura 9. Frecuencia de niveles medios diarios en la estación de Barrancabermeja.....	29
Figura 10. Resultado de socavación para un evento de 24, 48 y 72 horas, Perfil 14.	30
Figura 11. Valores de C_n de diferentes autores.....	32
Figura 12. . Ángulo de fricción real ϕ' y equivalente ϕ'_{eq}	33
Figura 13. Perfil de diseño.....	34
Figura 14. Perfil del suelo en condición actual.....	35
Figura 15. Modelo con la alternativa de solución.....	36
Figura 16. Modelo en condición Crítica.....	36
Figura 17. Diagrama de desplazamiento total obtenido en PLAXIS 2D versión 2012 para una condición crítica de socavación.....	37
Figura 18. Diagrama de deformación máxima obtenido en PLAXIS 2D versión 2012 para una condición crítica de socavación de la banca.....	37
Figura 19. Diagrama de fuerza cortante máxima y mínima obtenido en PLAXIS 2D versión 2012 para una condición crítica de socavación de la banca.	38



Figura 20. Diagrama de momento flexionante máxima y mínima obtenido en PLAXIS 2D versión 2012 para una condición crítica de socavación de la banca...38

Figura 21. Tablestaca hincada en suelo granular. (a) variación del diagrama de presión neta. (b) Variación del momento.....40



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Sondeos realizados.....	23
Tabla 2. Datos de localización de la estación limnimétrica Barrancabermeja.....	25
Tabla 3. Propiedades del perfil.....	39



RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE LA PROTECCIÓN CONTRA LA EROSIÓN DE LA ORILLA DEL RÍO MAGDALENA EN UN SECTOR DE GALÁN EN BARRANCABERMEJA*

AUTORES: LUISA FERNANDA GARZÓN GUERRERO
YUMARA PEÑA ROMERO**

PALABRAS CLAVES: Erosión, Sector Galán, PLAXIS 2012, Elementos Finitos, Morh-Coulomb, Diagrama de Deformaciones.

En el sector de Galán, municipio de Barrancabermeja se han venido presentando problemas de erosión en las márgenes del Río Magdalena, causados fundamentalmente por su baja altura que sobrepasa su nivel; entra a la planta y en su retirada produce erosión en el espaldón del muro, deteriorándolo y en algunos casos haciéndole perder su base y por tanto la falla por cimentación del muro de concreto. A causa de este fenómeno gran parte del muro de contención colapsó en una de las pasadas olas invernales que se presentaron en el país, ocasionando constantes inundaciones en la zona, dicho muro de protección tenía una longitud aproximada de 210 metros en el sector donde funciona la estación Termobarranca; el terreno se encuentra desprotegido en una longitud aproximada de 150 metros.

Por lo tanto, se plantea aquí una alternativa de solución a esta problemática, en un sector aledaño a la estación termoeléctrica, utilizando el software PLAXIS 2012, para análisis de una pared de tablestacas basado en el método de elementos finitos (técnica numérica para la solución de problemas esfuerzo-deformación), en el cual se seleccionó y aplico el modelo de Mohr-Coulomb, permitiendo observar el comportamiento del sistema de contención y el patrón de deformaciones a medida que aumenta la profundidad de empotramiento de la tablestaca.

Para la realización de este análisis se utilizó la información existente, seleccionándose el perfil del sub-suelo más crítico, siendo este la base para controlar y diseñar el sistema de protección planteado.

* Proyecto de Grado

** Facultad de ingenierías Físico- Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil.
Director: Ingeniero Msc. Wilfredo Del Toro Rodríguez



SUMMARY

TITLE: STUDY OF THE PROTECTION AGAINST THE EROSION OF THE SHORE OF THE RIVER SPONGE-CAKE IN A WOOPER'S SECTOR IN BARRANCABERMEJA*

AUTHORS: LUISA FERNANDA GARZÓN GUERRERO
YUMARA PEÑA ROMERO**

KEY WORDS: Erosion, Handsome Sector, PLAXIS 2012, Finite Elements, Mohr-Coulomb, Graph of Deformations.

In the area of Galán, municipality of Barrancabermeja have been presenting problems of erosion on the banks of the Rio Magdalena, caused primarily by its low height exceeding level; enters the plant and its removal causes erosion on the shoulder of the wall, deteriorating it and in some cases wasting their base and therefore the fault of the foundation concrete wall. Because of this phenomenon largely retaining wall collapsed in one of the last winter waves that occurred in the country, causing constant flooding in the area, said protective wall had a length of about 210 meters in the area where the work Termobarranca season, the land is unprotected in an approximate length of 150 meters.

Therefore, we proposed here an alternative solution ti this problem, in an area adjacent to the plant Termobarranca, 2012 using PLAXIS software for analysis of a sheet pile wall based on the finite element method (numerical technique for troubleshooting stress-strain), which was selected and applied the Mohr-Coulomb model, allowing to observe the behavior of the containment system and patter of deformation with increasing the embedment depth of the pile.

To carry out this analysis of existing information was used, resulting in the most critical soil profile, this being the basis for designing the control and protection system proposed.

* Draft Grade

** School of Physics and Mechanical Engineering, School of Civil Engineering.
Directed Engineer Msc. Wilfredo Del Toro Rodríguez



INTRODUCCIÓN

Barrancabermeja es un municipio ubicado en la margen Izquierda del Río Magdalena, donde los problemas de inundación debido al desbordamiento son iguales o más importantes que en los demás municipios del Magdalena medio, teniendo en cuenta que es un Municipio Petrolero importantísimo para el País.

Actualmente Barrancabermeja está sometida a constantes inundaciones en el sector de Termo Barranca debido a un Rompedero, producido en la creciente pasada, la cual acabo con una gran parte del dique que protegía esta zona.

Con el fin de dar solución al problema, inicialmente se realizó una estructura de pilotes de madera que permitió disminuir la velocidad del cauce del río que entra por ese punto. Estas estructuras permiten que la fuerza de la corriente del río que llegue hasta el dique de cierre no presente velocidades que afecten la estructura del mismo, además de generar depósitos de sedimentos con el transcurso del tiempo en la zona de ingreso del río, constituyéndose así, en una pantalla natural que evitará el deterioro de la estructura de protección.

El sector de estudio comprende una zona donde se requiere la protección de la orilla del rio en una longitud de 150 metros, aledaña a la protección actual de la Planta de Termobarranca, para la seguridad de equipos y construcciones de alto valor y que son necesarias para el funcionamiento de una importante empresa de Barrancabermeja.

Basado en la información existente tanto geológica, geomorfológica, geotécnica y del comportamiento hidráulico del rio Magdalena en la zona de estudio, se obtuvieron los parámetros necesarios de diseño, para estudiar una alternativa de solución a la problemática actual, con la información de campo disponible.

El análisis de la protección se realizó de forma analítica y se modeló con la ayuda del programa PLAXIS 2D, Versión 2012, el cual se basa en el método de elementos finitos; se hizo el análisis geotécnico, deformaciones y la estabilidad de las estructuras como solución a la problemática existente.



1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

- Estudiar y diseñar la protección Contra la erosión de la orilla del río Magdalena en un sector aguas abajo de Galán.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la información geológica y geomorfológica existente de la región de Barrancabermeja.
- Analizar la información existente sobre el comportamiento hidráulico en el río Magdalena en el sector de estudio.
- Identificar la estratigrafía de la zona y definición del perfil de diseño de la protección.
- Diseñar un sistema de contención para estabilizar la zona de riesgo generada por el río Magdalena.



2. MARCO TEÓRICO

2.1. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA

2.1.1. Geología Regional

La zona de estudio se localiza en la provincia tectónica del Valle del Magdalena medio, al occidente del Departamento de Santander, la cual ha sido interpretada como una región deprimida, moderadamente deformada, conformada por una fosa rellena de sedimentos terciarios y cuaternarios en superficie. Esta provincia se encuentra limitada al oriente por la Falla de Arrugas - La Salina y al occidente por la Falla Cimitarra, esta última en el departamento de Antioquia y Sur de Bolívar.

La planicie aluvial del río Magdalena se localiza sobre un pliegue sinclinal en el que se ponen en contacto terrenos de la Formación Real (tope de la estructura plegada) relleno con materiales inconsolidados en parte de composición volcánica, dispuestos en capas horizontales y no deformadas de la Formación Mesa y sobre la que se desplaza y encajona el río Magdalena.

2.2. MARCO REGIONAL Y CRONOESTRATIGRAFÍA

2.2.1. Formación Mesa (TQpm)

Según De Porta et al (1974), el nombre de Formación Mesa fue empleado por primera vez por Hettner (1892) para designar los estratos en posición horizontal que afloran al occidente del casco urbano de Honda.

Esta formación se le observa en su parte más ancha desde el río Opón al norte, hasta la parte idem del departamento del Tolima y en una franja más angosta que se prolonga hacia el norte siguiendo la margen derecha del Magdalena, al menos hasta los municipios de Barrancabermeja y Puerto Wilches; según el mencionado autor, la formación Mesa aumenta de espesor de sur a norte, siendo de 120 metros en Cambao (Tolima) de 350 metros en Honda y parece ser mayor en La Dorada y hasta de 250 metros de profundidad en Barrancabermeja (Flórez Olivares, 2006).

Se le caracteriza por su topografía plana o ligeramente ondulada. Al sur, a la altura del municipio de Salgar se le encuentra en posición horizontal constituyendo un relieve de colinas bajas, mientras que en el sur de Santander, en el municipio de Puerto Parra se le encuentra muy suavemente levantada hacia el oriente, disectada en colinas bajas y muy bajas.

Superficialmente consta principalmente de mantos de conglomerados



inconsolidados en matrices limosas y arcillosas con bajo grado de consolidación y muy alta susceptibilidad a la erosión, con algunas capas de tonalidades grises. Los conglomerados están compuestos de cantos de andesita, cuarcita, esquisto, cuarzo y chert. Debajo se puede ubicar algún manto arcillo limoso con manchas rojizas reflejo de condiciones de fluctuaciones del nivel freático.

La formación Mesa llamada también grupo Mesa, ha sido ubicada en el Gelasiano, que comienza hace 2,588 millones de años y termina hace 1,806 millones de años, al que la Comisión internacional de Estratigrafía considera Pleistocénico y que la Comisión Internacional para la investigación del Cuaternario lo ubica en esta edad/piso, para ser coherente con los cambios climáticos ocurridos (Wikipedia, 2011). Evidentemente se trata de terrenos no consolidados y a falta de dataciones al respecto, deberá aplicársele la edad indicada por estas instituciones y darle el concepto de terciarios a rocas que hayan alcanzado ya estado de consolidación como en el caso de la Formación Real.

2.2.2. Depósitos Cuaternarios (Qd).

Regionalmente las líneas de drenaje se encajonan pocos metros entre este territorio de colinas bajas a modos de valles estrechos y abiertos poseyendo fondos arcillosos y saturados a los que se les da la connotación de bajos, que generalmente sirven de cabeceras a ciénagas de importancia, en este caso a la San Silvestre.

2.2.3. Depósitos fluvio-lacustres (Qfl)

Se encuentran distribuidos en las zonas bajas del área sobre los drenajes y quebradas que irrigan el sector y alimentan la ciénaga de San Silvestre.

Estos depósitos presentan espesores superiores a los 5 metros y se componen de turbas y limos arcillosos, saturados y de baja capacidad de soporte y de acuerdo a los ensayos y exploraciones efectuadas ofrecen parámetros de resistencia inferiores a 1 kg/ cm².

En general predominan lodos de color oscuro con alto contenido de materia orgánica, arcillas grises y arenas finas como resultado de la depositación en ambientes de baja energía y por la disminución en el nivel del agua debido a desecación paulatina

2.2.4. Depósitos Aluviales (Qal)

Sobre la margen derecha del río Magdalena, se encuentran depósitos aluviales,

cubiertos por horizontes de turbas con espesores variables entre 0.40 metros hasta 3.00 metros. Estos depósitos aluviales lo conforman lentes arenosos y limosos que intercalan con niveles de arcillas y horizontes gravosos.

La capacidad de soporte de estos suelos es baja, especialmente para los horizontes de turbas como se ha verificado en los sondeos realizados en el área, con presencia de niveles freáticos a partir de los 0.50 metros de profundidad.

El sector corresponde a una unidad de morfología plana, de origen aluvial con aporte de sedimentos en avenidas y crecientes fuertes que desbordan las zonas bajas, caracterizada por presentar unidades de suelo de composición limosa arenosa, con presencia de turbas en la parte superior del perfil de espesor entre 1.0 y 3.00 metros para zonas de influencia del río Magdalena. Esta unidad es susceptible a ser inundada en periodos de intensas lluvias, al desbordarse el río Magdalena, los drenajes menores y las cañadas que drenan directamente al río.

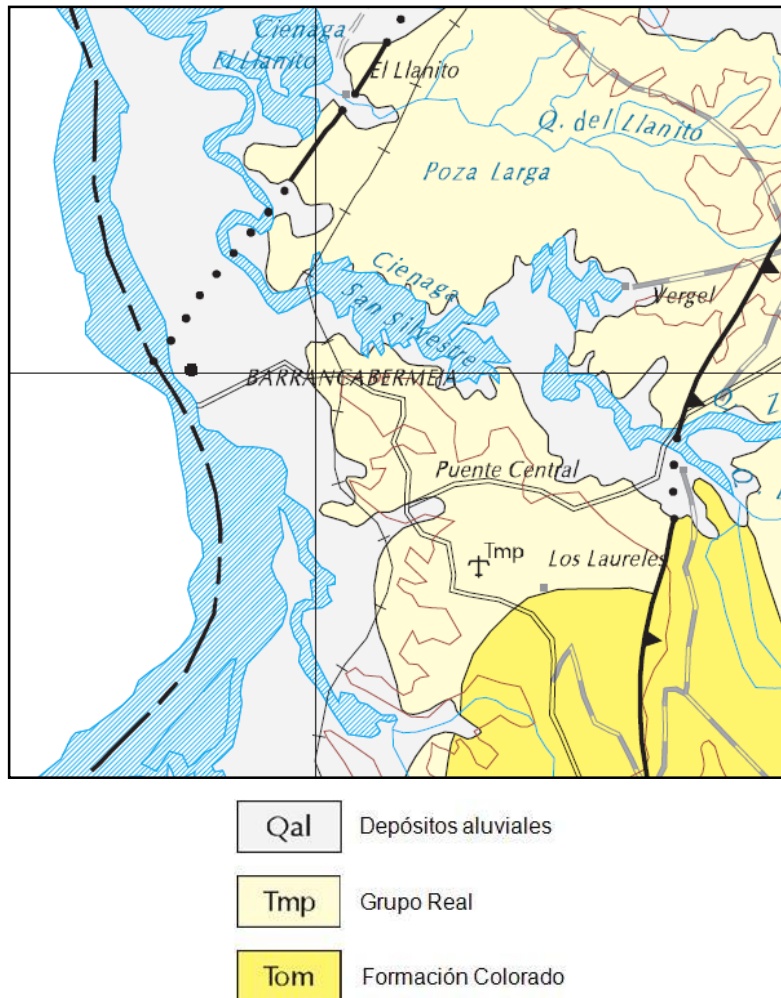
Esta unidad se caracteriza por ofrecer áreas planas de mediana extensión, caracterizada por presentar una morfología plana, conformando llanuras inundables, terrazas y vegas bajas.

2.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El valle del Magdalena corresponde a una profunda y amplia depresión tectónica entre las cordilleras Central (serranía de San Lucas) y Oriental, la cual tuvo sus comienzos en la orogenia de finales del Cretáceo con el levantamiento de la cordillera oriental pero solo alcanzó su configuración definitiva a finales del Mioceno en el que los esfuerzos tectónicos de tipo compresivo dieron lugar definitivamente a la aparición de esta fosa tectónica que comenzó a ser objeto de relleno aluvial hasta conformarse la actual planicie del río Magdalena, a lo largo de compartimiento hundido entre fallas de importancia regional de orientación aproximada N 20° E.

El estilo estructural es de plegamientos con fallamiento inverso, distinguiéndose un pliegue de tipo sinclinal entre las fallas de Cimitarra al occidente y la falla Arrugas – La Salina al oriente, afectando en su tope la Formación Real y conteniendo horizontalmente los sedimentos de la Formación Mesa (Triviño). La región de nuestro interés está localizada en la parte central de esta estructura rellena con sedimentos de la Formación Mesa, probablemente deformada por el accionar de dos fallas internas que siguen la dirección de la estructura, siendo la más próxima la de Casabe que pasa al occidente del área objeto del presente estudio.

Figura 1. *Plano geológico general*



Fuente: Ingeominas – Mapa Geológico de Santander

2.4. GEOMORFOLOGÍA REGIONAL.

Las formas del terreno son el resultado de la acción de fuerzas internas y externas, las cuales ejercen su influencia sobre la corteza terrestre. Las fuerzas internas están representadas por la estructura, en la que entran en juego la litología y la tectónica, en tanto que las fuerzas externas están representadas básicamente por el clima. La variable complementaria la constituye el tiempo.

Con base en este esquema general, los relieves o formas del terreno muestran tendencias, unos hacia las influencias estructurales, otros hacia las fuerzas externas donde el clima ha dejado su sello, dándose lugar al concepto de los llamados conjuntos morfo-estructurales, tratándose en este caso del valle del Magdalena en el marco del cual se puede diferenciar el llamado cinturón cenagoso



del Valle del Magdalena, localizado sobre ambas márgenes de la principal arteria fluvial del país, contexto donde dominan las geoformas de origen fluvial, altamente influenciadas por las condiciones climáticas y actuales e incluso paleoclimáticas, determinante del paisaje de colinas y formas masivas de las regiones húmedas Tropicales como Barrancabermeja.

Al interior de este conjunto morfo-estructural se pueden distinguir diferentes sectores de menor extensión a los que se les puede dar el nombre de sectores fisiográficos, a los que corresponderían la planicie aluvial del río Magdalena y el sector de colinas que se ubica por el costado derecho u oriental de este.

- a) **Planicie del río Magdalena.** Corresponde a margen derecha del río Magdalena, en la que se distinguen el dique aluvial donde se encuentran instalaciones como la de Termobarranca, al oriente del cual se localiza un plano de desborde hacia la cubeta aluvial que corresponde a denominados playones de Berlín.
- b) Sector de colinas. Corresponde a los terrenos ubicados al costado oriental del área urbana de Barrancabermeja. Se trata de colinas bajas de modelado redondeado y convexo, con algunas de cimas planas, separadas por bajos fondos colmatados o valles colmatados.

Dentro de este contexto se distinguen las colinas de cimas redondeadas y las colinas de cimas planas. Las colinas de cimas redondeadas donde se ubican los taludes fueron modeladas en terrenos inconsolidados de la Formación Mesa. Las colinas de cimas planas observables regionalmente corresponden a geoformas en proceso de modelamiento a partir de otro nivel de terraza, algo más bajo que el anterior.

En este tipo de geoformas se encuentran suelos inconsolidados hasta varios metros de profundidad en la que los materiales geológicos que los componen han sido sometidos a severos procesos de alteración química, con presencia de arcillas bajamente expansivas y predominio de la infiltración sobre el escurrimiento superficial.

3. INFORMACIÓN DISPONIBLE

Para el desarrollo del trabajo, se consultaron trabajos realizados con anterioridad en el área de estudio, como el realizado por el Consorcio Desarrollos Viales para el diseño del puente de Yondó, el realizado por CPI Proyectos de Ingeniería para el análisis de estabilidad de la margen derecha del río Magdalena, aguas abajo del estrecho de Galán y un estudio de estabilidad de los pozos ubicados en el estrecho de Galán por Secoin Ltda.

3.1. Perforaciones

Se dispone del resultado de tres sondeos de roto-percusión realizados según se indica en la figura 2, separados 50 metros entre sí. Los sondeos fueron llevados hasta la profundidad de 20 metros y fueron realizados por la empresa CPI Proyectos de Ingeniería en el año 2011.

Tabla 1. Sondeos realizados

Perforación No	Equipo	Profundidad
1	Roto- Percusión	20.0
2	Roto- Percusión	20.0
3	Roto- Percusión	20.0

Fuente: CPI Proyectos de Ingeniería

Figura 2. Localización de sondeos



Fuente: Google Earth

4. HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA

4.1. DINÁMICA FLUVIAL

El río Magdalena en el sector de Galán divide su cauce en dos brazos o canales con mayor concentración de su inercia sobre el ramal izquierdo, en tanto que sobre el ramal derecho se encuentra la planta de Termo Barranca.

Figura 3. *Imagen satelital año 2002.*



Fuente: Google Earth

Figura 4. *Foto aérea tomada en 2007.*



Fuente: Consorcio Desarrollos Viales
Figura 5. *Imagen satelital año 2009.*



Fuente: *Google Earth*

La dinámica fluvial del río Magdalena, de acuerdo con la serie de imágenes satelitales anteriores, tiende a concentrar su flujo sobre el ramal izquierdo de su cauce, con aumento de sedimentación sobre el sector sur de la isla divisoria del mismo. La serie muestra que en el año 2002 la punta sur de la isla está en proceso de formación, en tanto que en la del 2009 se aprecia perfectamente formada y consolidada. Esta situación parece indicar una tendencia del río a consolidar su cauce por el ramal izquierdo; sin embargo, por el ramal derecho se tiene la mayor profundidad del cauce hacia la margen derecha, en tanto que hacia la izquierda se observa un proceso de sedimentación.

La serie fotográfica insinúa además una estabilidad de la margen derecha del cauce del río sobre la que se encuentra la planta, indicado por el alineamiento que se mantiene en la orilla. A este efecto contribuye el hecho de que el estrecho de Galán constituye una limitante geológica, donde afloran suelos de la formación Mesa, que ha proporcionado estabilidad al estrecho, especialmente en la margen derecha del río. Esa estabilidad se insinúa hasta terrenos mucho más allá de la planta de Termo Barranca.

4.2. HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA

Los datos utilizados para este análisis fueron obtenidos de la estación localizada en el municipio de Barrancabermeja, información adquirida del IDEAM en los cuales se establecieron los niveles máximos mensuales presentados en el periodo comprendido entre 1971 al 2009 y que fueron utilizados para los análisis y diseño del puente de Yondó, por parte de la firma Hidrotec, y complementados con datos adicionales de los años 2010 a 2012.

Los datos de localización de la estación son los siguientes:

Tabla 2. Datos de localización de la estación limnimétrica Barrancabermeja

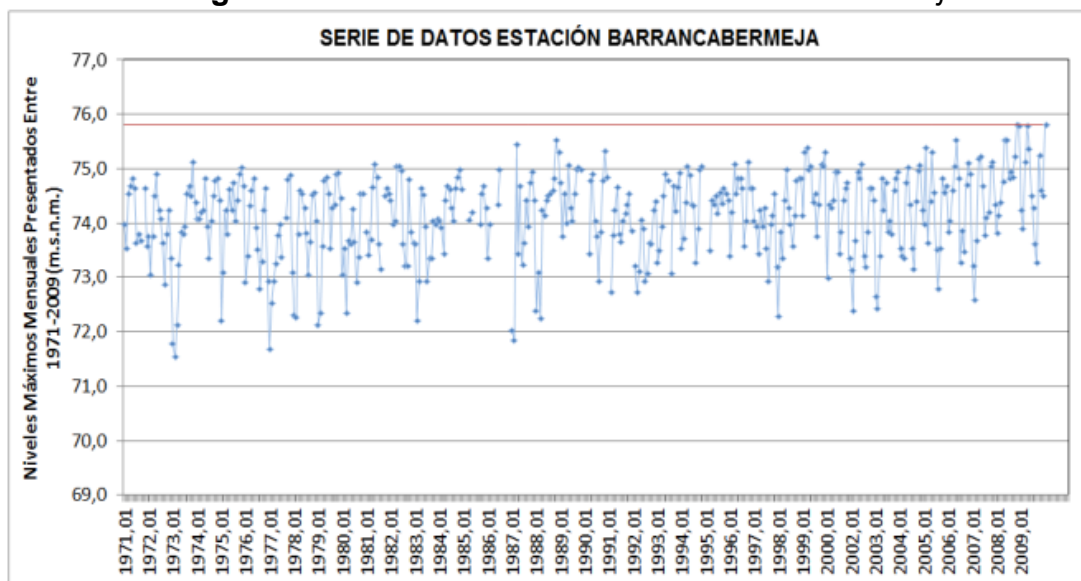
Municipio	Corriente	Código	Latitud	Longitud	Altitud	Tipo	Datos
Barrancabermeja	Río Magdalena	290370	-73,8794	7,063167	70,43 m.s.n.m.	LM	1971 - 2009

Fuente: IDEAM

Según los datos obtenidos se tiene la siguiente serie histórica con los niveles máximos mensuales encontrados en esta estación tal como se presenta en la siguiente gráfica:

4.3. RÉGIMEN DE NIVELES DEL RIO

Figura 6. Serie histórica estación de Barrancabermeja

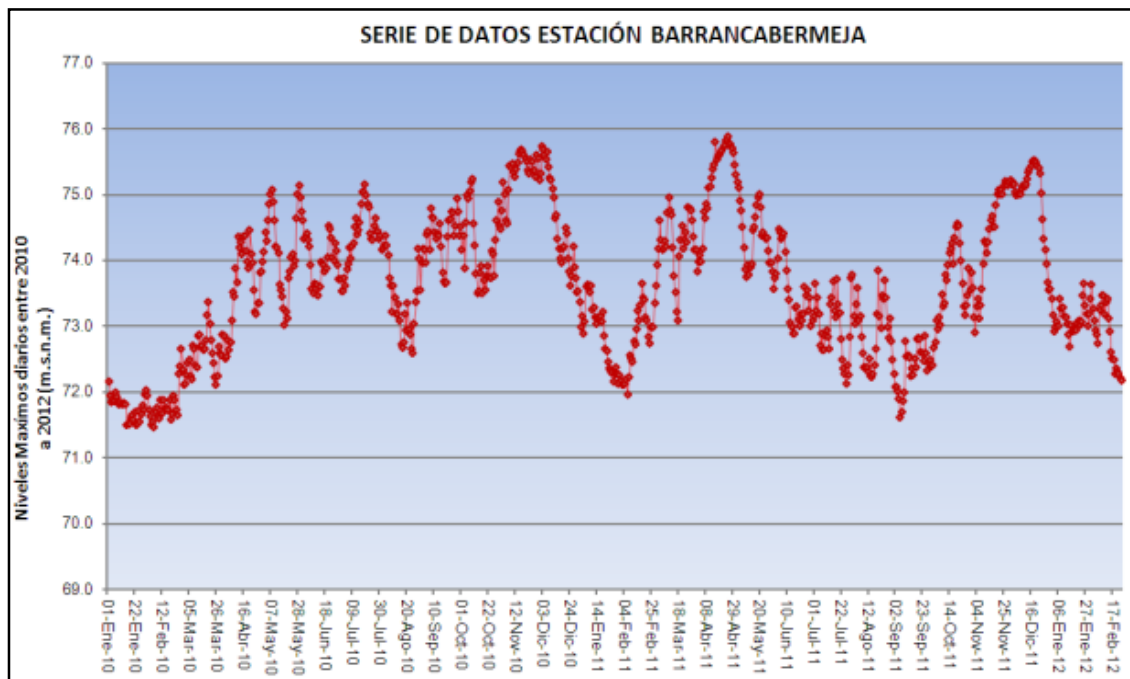


Fuente: IDEAM

Los períodos de aguas altas fueron los años de 2007, 2008, 2009 y los de aguas bajas 1973, 1977 y 1987. Las variaciones de nivel son del orden de 4.5 a 5.0 m. Ver figura 6.

En la figura No.7 se muestra la serie de datos de las lecturas de los niveles máximos diarios de la mira de la estación de Barrancabermeja, que corresponde al período de enero de 2010 a febrero de 2012, los cuales fueron adicionados a estudio.

Figura 7. *Seria histórica de niveles máximos diarios del 2010 al 2012*

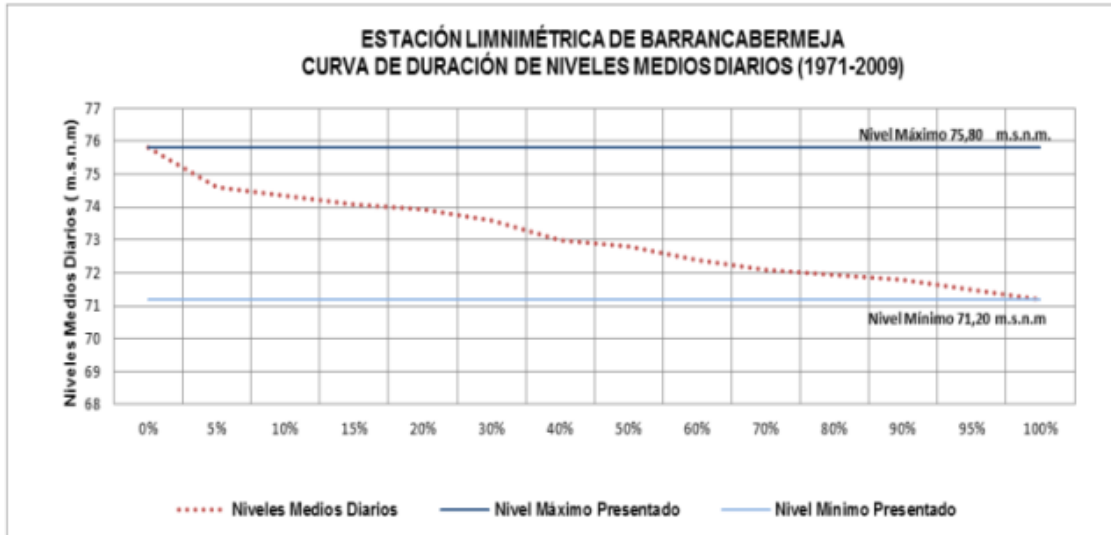


.Fuente: IDEAM

4.4. CURVAS DE DURACIÓN DE NIVELES

En la figura 8 se presenta la curva de duración de los niveles medios diarios medidos en el periodo comprendido entre 1971-2009 para los cuales se establecieron los niveles máximos y mínimos presentados en esta estación. Para la estación de Barrancabermeja el nivel de reducción del 95% es de 71.40 m.s.n.m., la cual corresponde al sector de Termobarranca con la debida reducción por pendiente.

Figura 8. Curva de duración de niveles medios diarios estación de Barrancabermeja



Fuente: IDEAM

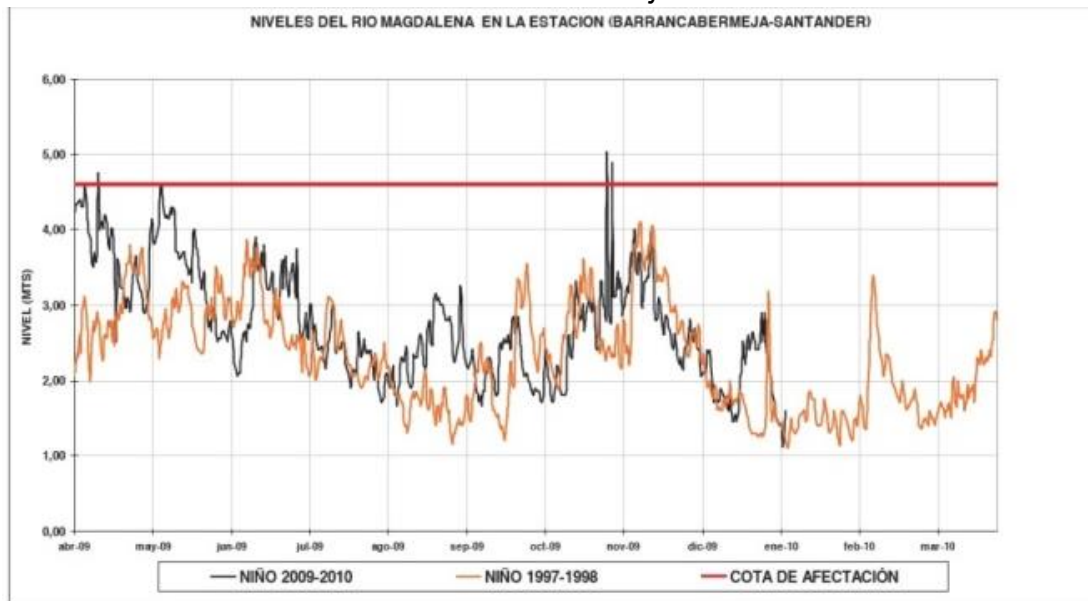
Los niveles referidos en la estación Barrancabermeja se establecieron a partir de la cota del cero de mira suministrado por el IDEAM y fueron tenidos en cuenta por la comisión topográfica.

En las gráficas siguientes se muestran las curvas de excedencia de niveles diarios y curvas de duración de niveles para el periodo 1997-1998 y 2009-2010 que se presentan en Barrancabermeja según un informe presentado acerca de las condiciones climáticas actuales en el Pacífico y el Atlántico Tropical, y su posible repercusión en el clima nacional presentado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural en el 2010 por el IDEAM.

A nivel anual los meses en que ocurren los menores niveles en el río son Enero, Febrero y Marzo; mientras que las épocas de niveles Máximos corresponden a los meses de Noviembre y Diciembre.

En los meses de Agosto y Septiembre los niveles tienden a bajar sin ser muy significativa esta reducción como puede observarse en la siguiente gráfica.

Figura 9. Frecuencia de niveles medios diarios en la estación de Barrancabermeja



Fuente: IDEAM

5. SOCAVACIÓN GENERAL

El análisis de socavación general en el sector fue realizado por la firma CPI Proyectos de Ingeniería, con base en el estudio de la dinámica fluvial del río en el sector por parte del Consorcio Desarrollos Viales, el cual fue realizado para la construcción del puente de Yondó. Para el cálculo se empleó la topografía y batimetría tomadas durante los meses de Febrero y Marzo de 2010, tomando como base la información relatada en el numeral anterior. Se consideró además la granulometría del material del lecho cuyo predominio, según las perforaciones ejecutadas, es de limos arenosos y arenas limosas finas a medias, desde el lecho hasta la profundidad investigada de 20 metros, con tamaños caracterizados por diámetro medio, D50 de 0.34 mm (0.00034 m), diámetro del 84%, D84 de 1.850 mm (0.0015 m), además de la siguiente información de niveles de agua:

Nivel de aguas máximas, N.A. max =75.80 msnm

Nivel del lecho promedio=65.77 msnm

Profundidad máxima del cauce =10.03 m

La socavación general obtenida fue de 0.89 metro.

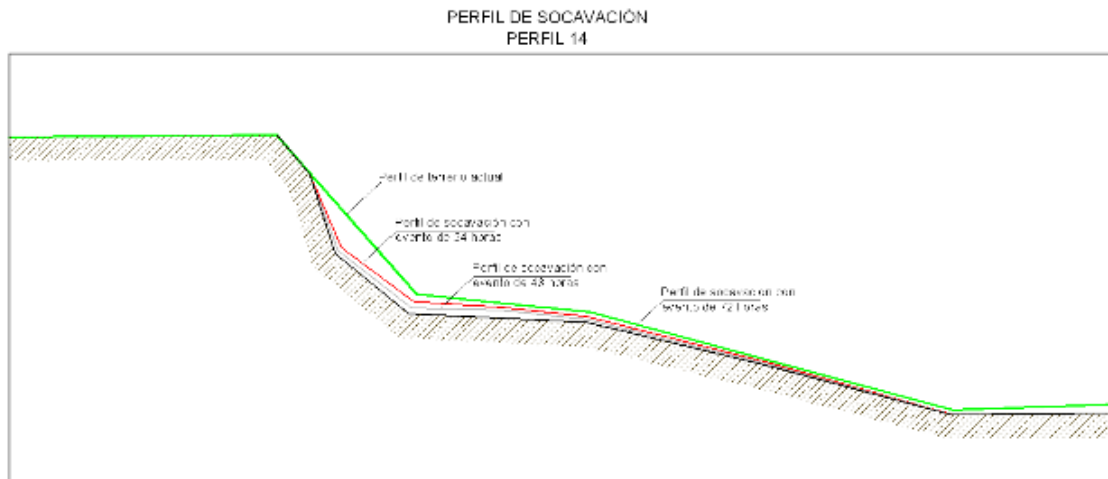
5.1. SOCAVACIÓN DE LA BANCA

Igualmente fue realizado en el mismo estudio, un análisis de estabilidad de la banca de la margen derecha del río, mediante la utilización del modelo de cálculo Bank Stability and Toe Erosion Model, Static Version 4.1 de USDA-ARS-NSL Watershed Physical Processes Research Unit, Oxford, USA.

El modelo BSM, analiza la falla al cortante relacionada con la inestabilidad general de la orilla y falla por erosión, en la cual calcula la fuerza tractiva de la corriente y la compara con la resistencia a la erosión del suelo para calcular la erosión en un determinado período de tiempo y después calcula la posibilidad de falla del talud que se forma.

El estudio concluye que el proceso general de erosión tiene una baja probabilidad de ser acelerado y es provocado por la erosionabilidad de los mantos limo arenosos, los cuales al ser socavados pueden generar inestabilidad del talud de la orilla. En la figura 10, se presenta un perfil de socavación con la duración del evento.

Figura 10. Resultado de socavación para un evento de 24, 48 y 72 horas, Perfil 14.



Fuente: CPI, Proyectos de Ingeniería

Para el análisis de la protección, se tomará una socavación crítica, de manera que se produzca socavación total contra ella, formando un talud vertical.

6. METODOLOGÍA

Basados en el análisis de la información disponible y mediante el empleo de los datos del ensayo de penetración estándar (SPT) obtenidos en los tres sondeos, se realiza la respectiva estimación de los parámetros efectivos de resistencia para los suelos granulares, utilizando el método del Ingeniero Álvaro González, presentado en las X Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana – SCI – SCG – 1999, quien presenta un método aproximado de evaluación de los parámetros efectivos de resistencia c' y ϕ' .

En este método empleado existen factores de corrección para la energía teórica, el valor de N de campo y corrección por confinamiento.

6.1. CORRECCIÓN DEL N DE CAMPO

El valor de N de campo debe corregirse de la siguiente forma (Bowles, 1988):

$$N_{corr} = N * Cn * \eta_1 \quad (\text{Ecuación 1})$$

En donde:

N_{corr} =Valor de N corregido

Cn =Factor de corrección por confinamiento

η_1 =Factor de corrección por energía

6.2. CORRECCIÓN POR ENERGÍA (η_1)

Se considera que el valor de N es inversamente proporcional a la energía efectiva aplicada al martillo y entonces, para obtener un valor de N_{e1} a una energía dada " e_1 ", sabiendo su valor N_{e2} a otra energía " e_2 " se aplica sencillamente la relación:

$$N_{e1} = N_{e2} * (e_2/e_1) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Dónde:

e_1 es la energía de referencia del 60% y e_2 es la energía utilizada en el ensayo, que para Colombia es del 45%.

6.3. CORRECCIÓN POR CONFINAMIENTO (Cn)

Este factor ha sido identificado desde hace tiempo (Gibbs y Holtz, 1957) y se hace por medio del factor Cn de forma tal que:

$$N_{corr} = N_1 = N * Cn \quad (\text{Ecuación 3})$$

Y se ha estandarizado a un esfuerzo vertical de referencia

$$\sigma_{vr}' = 1 \text{ Kg/cm}^2 \approx 1 \text{ atmosfera} = p_a$$

Como función del parámetro R_s , definido por:

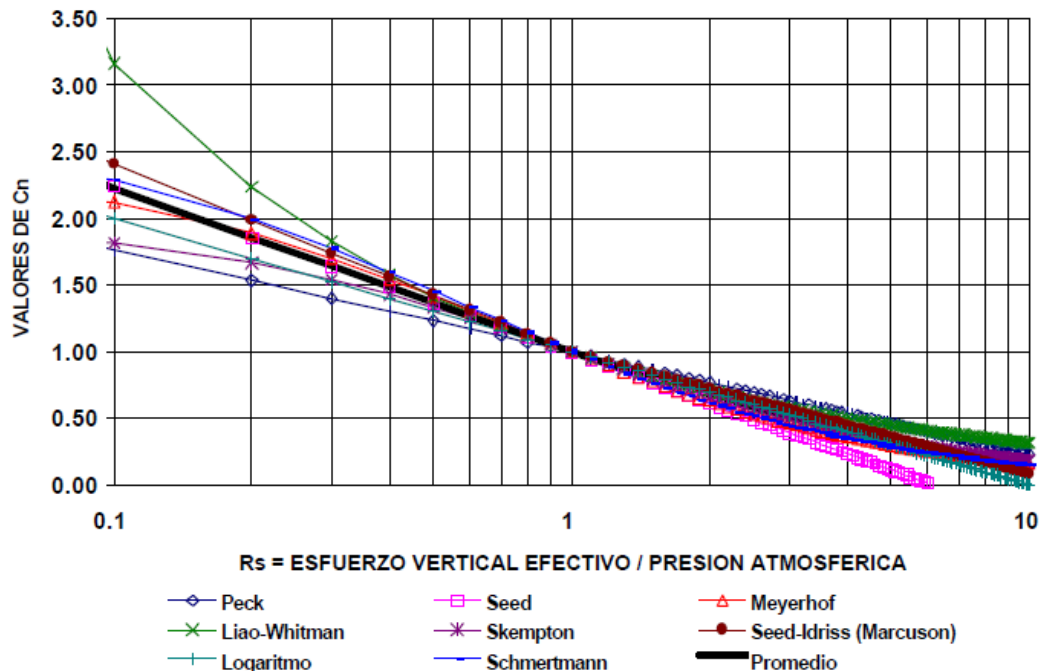
$$R_s = \sigma_{vr}' / p_a \quad (\text{Ecuación 4})$$

Existen numerosas propuestas, que para el caso en estudio se utilizó la de Skempton donde:

$$C_n = 2 / (1 + R_s) \quad (\text{Ecuación 5})$$

En general se recomienda que $C_n \leq 2$, por lo cual la formulación de Skempton es la única que cumple exactamente esta recomendación para $R_s = 0$.

Figura 11. Valores de C_n de diferentes autores



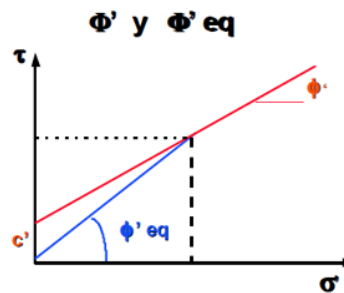
Fuente: X Jornadas Geotécnicas de la ingeniería Colombiana

6.4. CORRELACIÓN ENTRE N Y LA RESISTENCIA EFECTIVA DE LOS SUELOS

Dado que la mayor parte de estas correlaciones fueron obtenidas con materiales granulares, para los cuales usualmente $c' = 0$, lo que realmente se obtiene es la relación entre esfuerzos cortantes y esfuerzos normales efectivos, es decir (Figura 12):

$$\phi'_{SPT} = \phi'_{eq} = \tan^{-1}(\tau / \sigma') \quad (\text{Ecuación 6})$$

Figura 12. Ángulo de fricción real ϕ' y equivalente ϕ'_{eq}



Fuente: X Jornadas Geotécnicas de la ingeniería Colombiana

Estas relaciones, para su uso en Colombia, se deben transformar a una energía $e = 45\%$;

6.5. RESISTENCIA EFECTIVA APROXIMADA CON SPT

6.5.1. Procedimiento

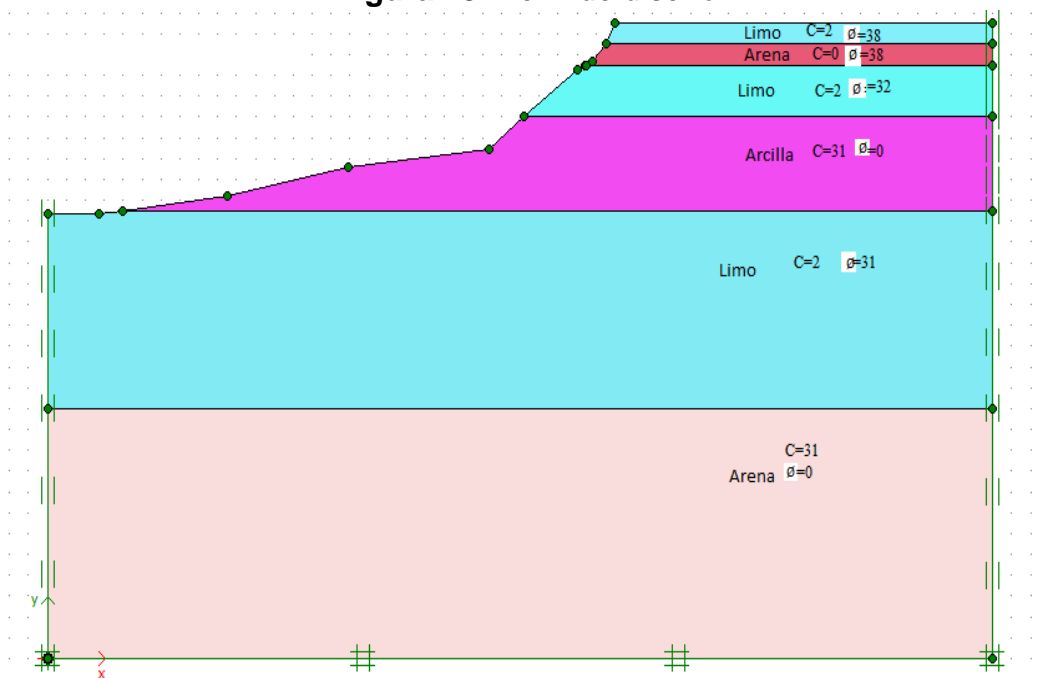
El procedimiento para obtener valores aproximados de valores efectivos de resistencia c' y ϕ' con SPT es el siguiente, teniendo en cuenta todo lo expuesto anteriormente:

- Obtener el valor de N (golpes/pie) en campo, con la profundidad respectiva e identificar al tipo desuelo en el cual se hizo el ensayo.
- Colocar al ensayo la profundidad media entre las dos lecturas de golpes que se usen.
- Obtener o estimar el valor del peso unitario total de la muestra, preferentemente en el sitio. Esta se puede obtener de la muestra de la cuchara perdida, pero corrigiendo el área por la compresión que sufre la muestra al entrar al muestreador.
- Obtener lo más fiablemente posible la posición del nivel piezométrico
- Calcular el valor de los esfuerzos totales (σ), la presión de poros (U_w) y los esfuerzos efectivos ($\sigma' = \sigma - U_w$) para toda la columna de ensayo. Hay que tener en cuenta que el material puede estar saturado y la presión de poros puede ser negativa hasta la altura de capilaridad.
- El valor de N_{45} para Colombia se corrige por confinamiento con la formulación de C_n , teniendo en cuenta que $C_n \leq 2$.

- g) Se obtiene el valor de ϕ'_{eq} con la fórmula de Kishida; $\phi'_{eq} = 15 + (12.5 * N1_{45})^{0.5}$
- h) Se calcula el valor de $\tau = \sigma' * \tan(\phi'_{eq})$
- i) Se agrupan los valores de τ y σ' por tipos de materiales
- j) Se hace la regresión τ vs σ' para cada tipo de material y se obtienen c' y $\tan(\phi')$. Si en la regresión resulta $c' < 0$, se obliga a la regresión a pasar por cero.
- k) Se puede obtener el ϕ'_{min} de cada material haciendo $\phi'_{min} = \phi'_{eq_{min}}$
- l) Se colocan los resultados en un diagrama $c' - \tan(\phi')$ y si son materiales del mismo origen geológico, los puntos normalmente se alinean en forma aproximada.

Con los datos obtenidos en el proceso de estimación de parámetros efectivos se obtuvo el perfil de diseño de la zona en estudio (ver figura 13).

Figura 13. Perfil de diseño

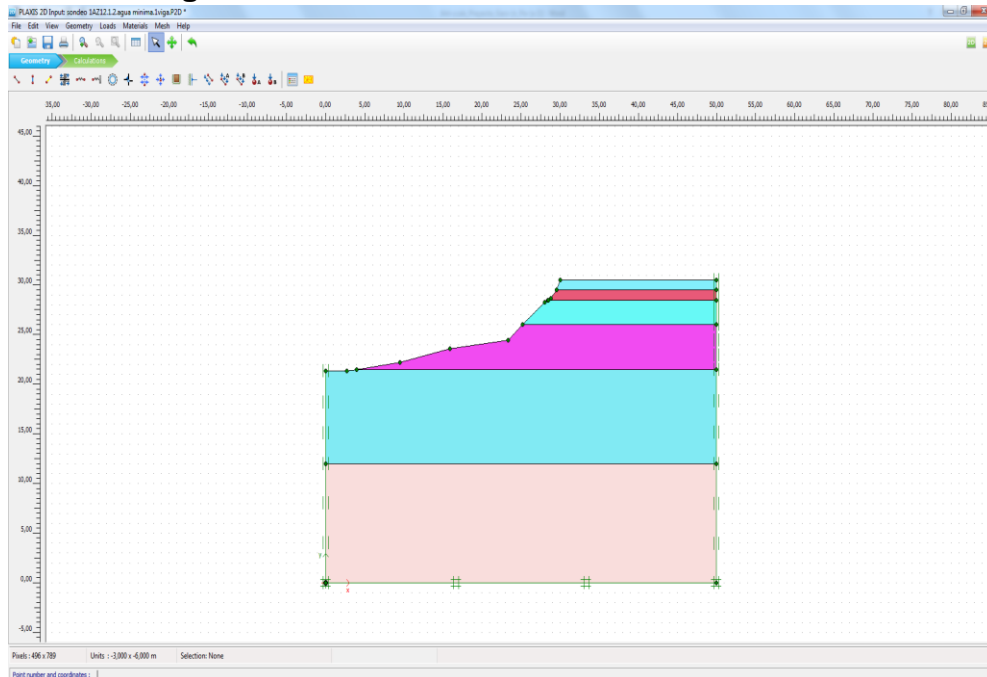


Fuente: Propia

6.6. MODELAMIENTO EN PLAXIS 2D, VERSIÓN 2012

Al obtener el perfil del suelo se inicia el modelo en el software con los mismos parámetros ya referenciados, dando como resultado el perfil del suelo en su condición actual como se observa en la figura 14.

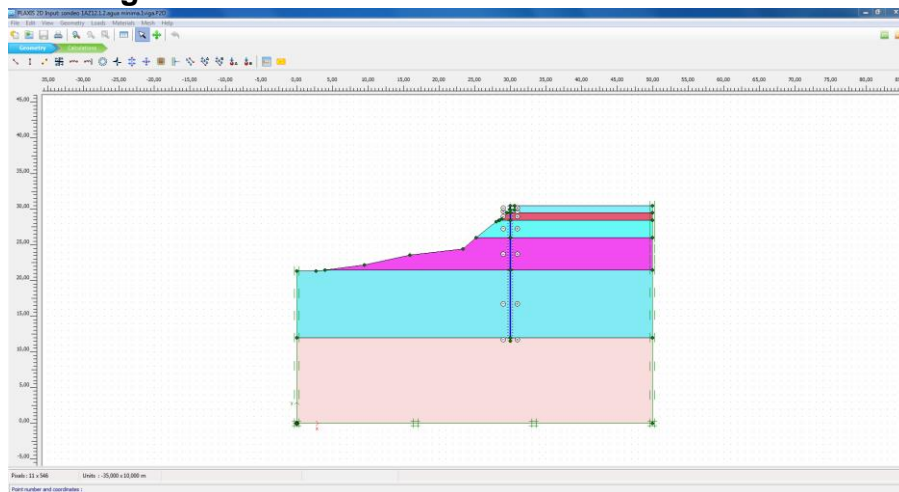
Figura 14. Perfil del suelo en condición actual



Fuente: Propia

Luego de tener dicha estratigrafía del suelo se creó en el programa de análisis la representación gráfica de la alternativa de solución a la problemática actual del sector, la cual consiste en un muro de contención en tablestaca metálica. Para ello se utilizaron las propiedades de los perfiles AZ del catálogo general 2010 de Tablestacas de Acero de la empresa ArcelorMittal Commercial RPS, conocida anteriormente como ProfilARBED.

Figura 15. Modelo con la alternativa de solución

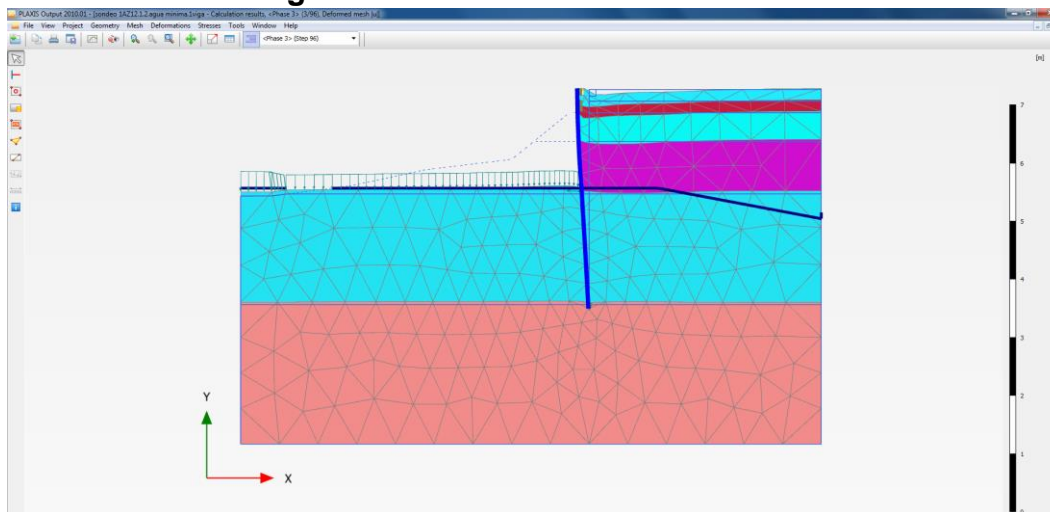


Fuente: Propia

En el proceso de análisis se realizaron diferentes fases en donde se generan las condiciones lo más cercano a la realidad, para así llegar al resultado esperado, el cual consiste en el menor desplazamiento de la tablestaca tanto en la parte superior del talud como en el empotramiento.

Se analizaron resultados de varios perfiles de tablestacas a diferentes profundidades de empotramiento bajo el nivel del suelo socavado más crítico y diferentes niveles de agua, siendo el nivel mínimo el más crítico como se puede apreciar en la figura 16.

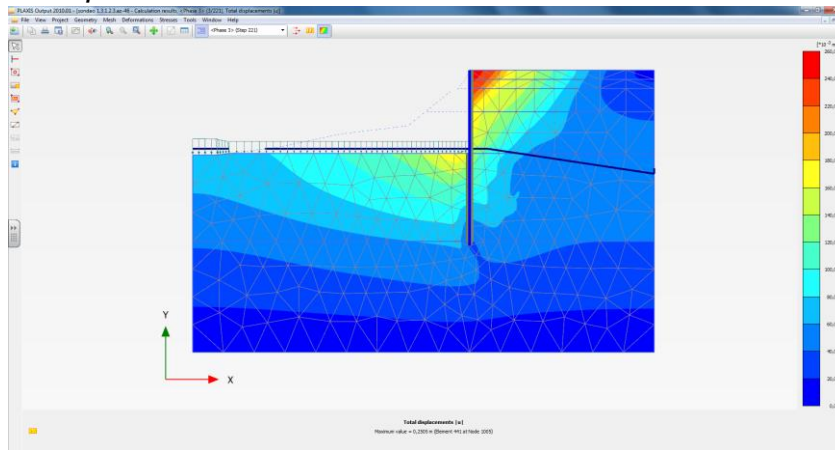
Figura 16. Modelo en condición Crítica



Fuente: Propia

Luego de analizar la situación planteada se obtuvo el siguiente diagrama de desplazamientos (ver figura 17) para la condición crítica de socavación de la banca, donde se observa que obtuvo un desplazamiento máximo de 25,05 centímetros.

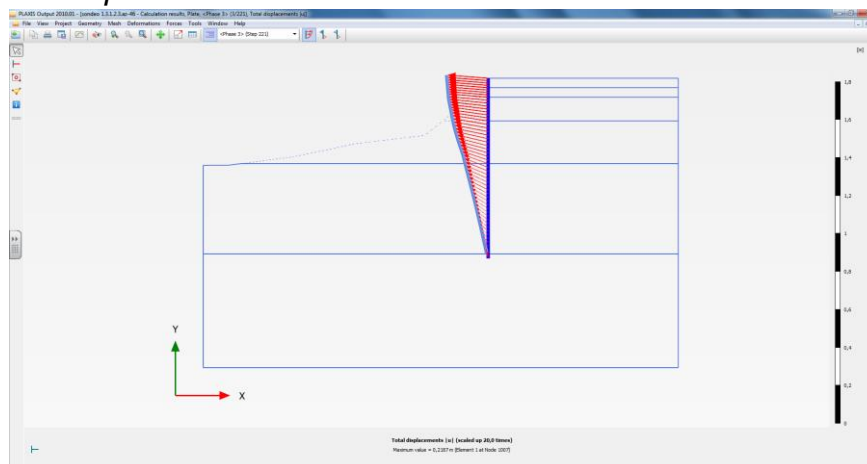
Figura 17. Diagrama de desplazamiento total obtenido en PLAXIS 2D versión 2012 para una condición crítica de socavación de la banca.



Fuente: Propia

En la figura 18 se observa el diagrama de deformaciones al cual se encuentra sometida la tablestaca metálica en su longitud.

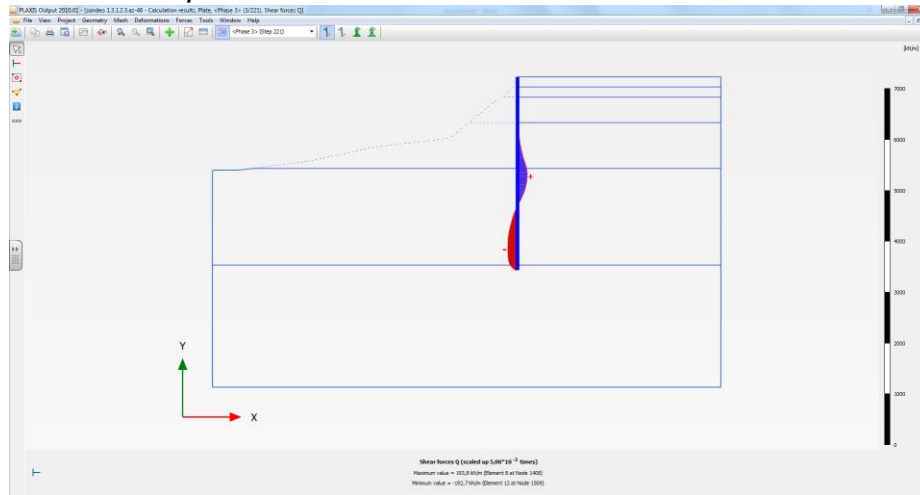
Figura 18. Diagrama de deformación máxima obtenido en PLAXIS 2D versión 2012 para una condición crítica de socavación de la banca.



Fuente: Propia

Las fuerzas a las que se encuentra sometida la tablestaca, genera el diagrama de presiones netas en la misma (ver figura 19).

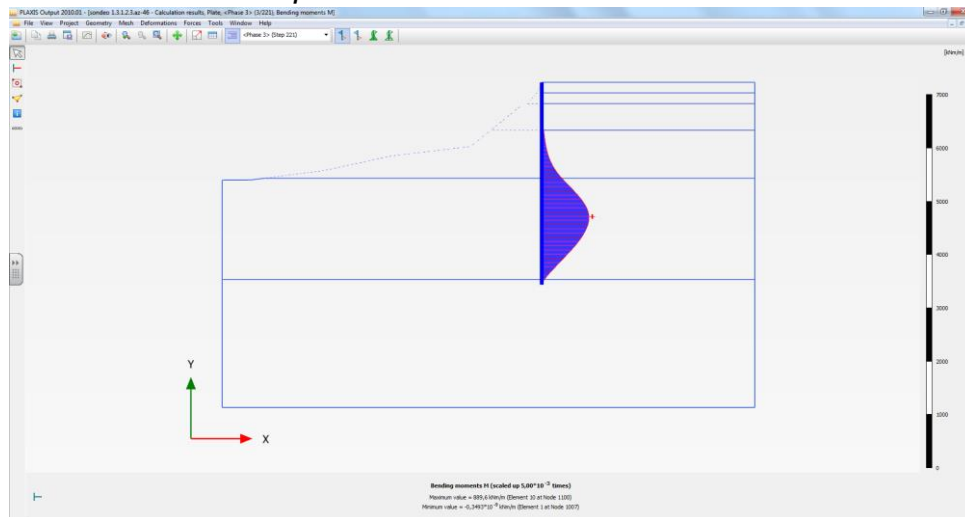
Figura 19. Diagrama de fuerza cortante máxima y mínima obtenido en PLAXIS 2D versión 2012 para una condición crítica de socavación de la banca.



Fuente: Propia

En el diagrama de momento flexionante máximo (figura 20), se observa que la tablestaca está sometida a un momento de 889,6 $KN - m/m$

Figura 20. Diagrama de momento flexionante máxima y mínima obtenido en PLAXIS 2D versión 2012 para una condición crítica de socavación de la banca.



Fuente: Propia

6.7. Resultados

De acuerdo con los diferentes resultados de deformaciones que se producen en la parte superior y el extremo inferior del empotramiento, se adoptó la tablestaca AZ 46 de 19.0 metros de longitud como la más adecuada en términos de funcionamiento y economía.

Con un desplazamiento en el extremo superior de 25,05 centímetros, en el extremo inferior de 3,8 centímetros y un momento máximo de $889,6 \text{ KN} - \text{m}/\text{m}$, trabajando en la condición más crítica que es la de voladizo de 9.0 metros con nivel de agua mínimo en el río.

Las propiedades del perfil utilizado son las que se muestran en la figura 21.

Tabla 3. Propiedades del perfil



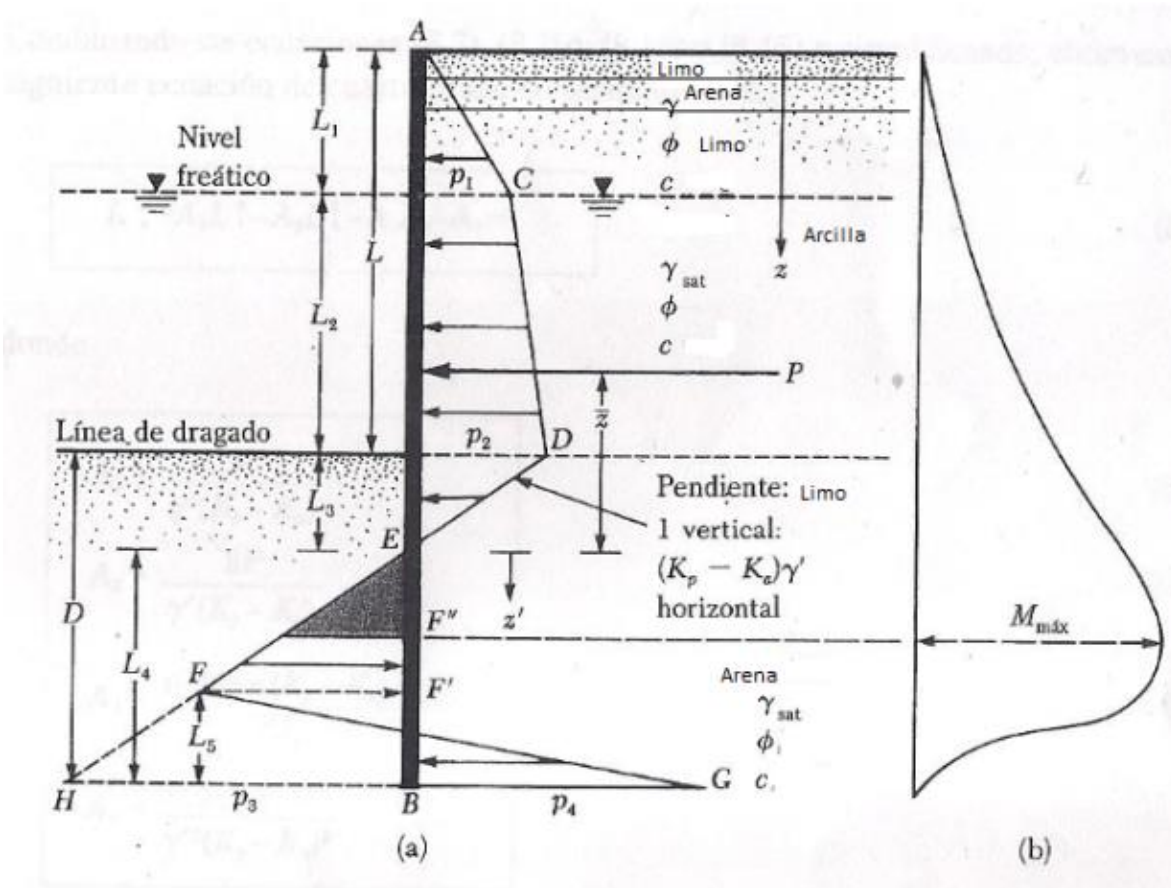
Sección	Anchura	Altura	Espesor		Área de sección	Masa	Momento de inercia	Módulo resistente elástico	Momento estático	Módulo resistente plástico	
	b	h	t	s	cm ² /m	kg/m perfil individual	kg/m ² de pantalla	cm ⁴ /m	cm ³ /m	cm ³ /m	
AZ 46	580	481	18,0	14,0	291	132,6	229	110450	4595	2650	5295

Fuente: Propia

6.8. Chequeo teórico de la profundidad de empotramiento

El método de cálculo utilizado es el propuesto en el libro de Principios de Ingeniería de Cimentaciones de Braja M. Das, para Tablestacas hincadas en suelos granulares.

Figura 21. Tablestaca hincada en suelo granular. (a) variación del diagrama de presión neta. (b) Variación del momento



Fuente: Braja. M. Das

De acuerdo con el procedimiento planteado por el autor se realiza el siguiente paso a paso para obtener el diagrama de presiones para una tablestaca en suelo granular:

a) Calcular los Coeficientes K_a y K_p .

- Para el estrato de limo

$$\gamma_{unsat} = 17,0 \frac{KN}{m^3} ; \gamma_{sat} = 18,0 \frac{KN}{m^3}$$

$$\phi = 38^\circ; C = 2; l = 1m$$

$$k_{a1} = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right)$$

$$k_{a1} = \tan^2 \left(45 - \frac{38}{2} \right) = 0,24$$

$$k_{p1} = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right)$$

$$k_{p1} = \tan^2 \left(45 + \frac{38}{2} \right) = 4,20$$

- Para el estrato de arena

$$\gamma_{unsat} = 17,2 \frac{KN}{m^3} ; \quad \gamma_{sat} = 18,5 \frac{KN}{m^3}$$

$$\phi = 38^\circ; \quad C = 0; \quad l = 1m$$

$$k_{a2} = 0,24 \quad k_{p2} = 4,20$$

- Para el estrato de limo

$$\gamma_{unsat} = 17,0 \frac{KN}{m^3} ; \quad \gamma_{sat} = 18,0 \frac{KN}{m^3}$$

$$\phi = 32^\circ; \quad C = 2; \quad l = 2.5m$$

$$k_{a3} = 0,31 \quad k_{p3} = 3,25$$

- Para el estrato de Arcilla

$$\gamma_{unsat} = 17,4 \frac{KN}{m^3} ; \quad \gamma_{sat} = 18,4 \frac{KN}{m^3}$$

$$\phi = 0^\circ; \quad C = 31; \quad l = 4.5m$$

$$k_{a4} = 0.33 \quad k_{p4} = 1$$

- Para el estrato de Limo

$$\gamma_{unsat} = 17,0 \frac{KN}{m^3} ; \quad \gamma_{sat} = 18,0 \frac{KN}{m^3}$$

$$\phi = 31^\circ; \quad C = 2; \quad l = 9.5m$$

$$k_{a5} = 0,32 \quad k_{p5} = 3,12$$

- Para el estrato de Arena

$$\gamma_{unsat} = 17,2 \frac{KN}{m^3} ; \quad \gamma_{sat} = 18,5 \frac{KN}{m^3}$$

$$\phi = 31^\circ; \quad C = 0; \quad l = 12m$$



$$k_{a6} = 0,32 \quad k_{p6} = 3,12$$

b) Calculo de p_1 y p_2

- $p_1 = 1,7 * 1 * 0,24 + 1,72 * 1 * 0,24 + 1,7 * 2,5 * 0,31$

$$p_1 = 21,4 \frac{KN}{m}$$

- $p_2 = (\gamma l_1 + \gamma' l_2) k_a$

$$\gamma' = \gamma_{sat} + \gamma_w$$

$$p_2 = 21,4 + (18,4 - 10) * 4,5 * 0,33$$

$$p_2 = 33,87 \frac{KN}{m}$$

c) Calculo de L_3

$$(z - L) = L_3 = \frac{p_2}{\gamma'(K_p + K_a)}$$

$$L_3 = \frac{33,87}{(18 - 10)(3,12 - 0,32)}$$

$$L_3 = 1,51 \text{ m}$$

d) Calculo de P

$$P = \frac{1}{2} p_1 L_1 + p_1 L_2 + \frac{1}{2} (p_2 - p_1) L_2 + \frac{1}{2} p_2 L_3$$

$$P = 27,78 + (96,3) * (28,06) + (25,57)$$

$$P = 177,71 \frac{KN}{m}$$

- Calculo de \bar{z} (tomando momentos respecto a E)

$$\downarrow + \sum m_E = 0$$

$$27,78 * 9,25 + 96,03 * 4,89 + 85,185 * 4,14 +$$

$$78,14 * 1,76 + 177,17 * \bar{Z} = 0$$

$$\bar{z} = \frac{\sum m_E}{p} = \frac{1216,744}{177,71} = 6,85 \text{ m}$$

e) Calculo de p_5

$$p_5 = (\gamma l_1 + \gamma' l_2) k_p + \gamma' l_3 (k_p - k_a)$$

$$p_5 = [(17 * 1 * 4,2 + 17,2 * 1 * 4,2 + 17 * 2,5 * 3,25) + 8,4 * 4,5 * 1] + [8 * 1,51 * (3,12 - 0,32)]$$

$$p_5 = 568,83 \frac{KN}{m^2}$$

f) Calculo de A_1 ; A_2 ; A_3 y A_4

- $A_1 = \frac{p_5}{\gamma'(k_p - k_a)}$

$$A_1 = \frac{568,80}{(18 - 10)(3,12 - 0,32)} = 25,39 \text{ m}^2$$

- $A_2 = \frac{8P}{\gamma'(k_p - k_a)}$

$$A_2 = \frac{8(177,7)}{(18 - 10)(3,12 - 0,32)} = 63,47 \text{ m}^2$$

- $A_3 = \frac{6P[2 * \bar{z} * \gamma'(k_p - k_a) + p_5]}{\gamma'^2(k_p - k_a)^2}$

$$= \frac{6 * 177,7 * [2 * 6,85 * 8 * (3,12 - 0,32) + 568,83]}{8^2(3,12 - 0,32)^2}$$

$$A_3 = 1860,85 \text{ m}^2$$

- $A_4 = \frac{p(6 * \bar{z} * p_5 + 4P)}{\gamma'^2(k_p - k_a)^2}$

$$A_4 = \frac{177,71 * (6 * 6,85 * 568,83 + 4 * 177,71)}{8^2(3,12 - 0,32)^2}$$

$$A_4 = 5652,3 \text{ m}^2$$

g) Determinar l_4

$$l_4^4 + A_1 l_4^3 - A_2 l_4^2 - A_3 l_4 - A_4 = 0$$

$$l_4^4 + 25,39 l_4^3 - 63,47 l_4^2 - 1860,85 l_4 - 5652,3 = 0$$

$$l_4 = 9,4 \text{ m}$$

h) Calculo de p_4

$$p_4 = p_5 + \gamma' l_4 (k_p - k_a)$$

$$p_4 = 568,83 + (18 - 10) * 9,4 * (3,12 - 0,32)$$

$$p_4 = 779,36 \frac{KN}{m^2}$$

i) Calculo de p_3

$$p_3 = l_4 (k_p - k_a) \gamma'$$

$$p_3 = 9,4 * (3,12 - 0,32) (18 - 10)$$

$$p_3 = 210,56 \frac{KN}{m^2}$$

j) Obtener L_5

$$\frac{p_3 L_4 - 2P}{p_3 + p_4}$$

$$L_5 = \frac{210,56 * 9,4 - 2 * 177,71}{210,56_3 + 779,36} = 1,64 \text{ m}$$

k) Profundidad Teórica ($D_{teorico}$)

$$D_{teorico} = L_3 + L_4 = 1,51 + 9,4$$

$$D_{teorico} = 10,91 \text{ m}$$

l) Determinar el punto de fuerza cortante nula

$$z' = \sqrt{\frac{2P}{\gamma(k_p - k_a)}}$$

$$z' = \sqrt{\frac{2 * 177,71}{8(3,12 - 0,32)}} = 6,85 \text{ m}$$

m) Calculo del momento flexionante máximo

$$M_{max} = P * (\bar{z} + z') - \left[\frac{1}{2} \gamma' z'^2 (k_p - k_a) \right] \left(\frac{1}{3} \right) z'$$

$$M_{max} = 177,71 * (6,85 + 6,85) - \left[\frac{1}{2} * (8,5 + 8,4) * 6,85^2 * (3,12 - 0,32) \right] \left(\frac{1}{3} \right) * 6,85$$

$$M_{max} = 1442,09 \frac{KN - m}{m}$$

n) Calculo del módulo de sección mínimo

$$s = \frac{M_{max}}{\sigma_{adm}} = \frac{1442,09}{450 * 10^3}$$

$$s = 3204,6 \text{ cm}^3 / \text{cm}$$

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de la experiencia con el programa, con el análisis de los resultados y su comparación con el análisis teórico, se puede concluir que:

- Con la ayuda del programa Plaxis 2D, es posible observar cómo se deforma la tablestaca en toda su longitud. La deformación máxima obtenida en el extremo superior de la tablestaca parece excesiva, pero puede ser controlada mediante la colocación de una viga de coronación o un anclaje.
- El valor del empotramiento obtenido mediante el programa, se aproxima al obtenido teóricamente, en un porcentaje inferior al 10%, lo que indica que es posible modelar este tipo de problemas y obtener resultados aceptables. Sin embargo, los valores del momento máximo flexionante difieren en algo más del 50%, probablemente debido a las idealizaciones en que se basan los métodos teóricos.
- Este software ayuda a entender de una mejor forma el comportamiento de este tipo de estructuras, pero debe ser manejado con cuidado en lo que tiene que ver con los datos de entrada y las condiciones de frontera.
- Se recomienda continuar con proyectos similares, ya que los relacionados con presiones laterales de tierra son problemas mejor entendidos con el programa, por la observación que permite de los esfuerzos y las deformaciones en el entorno.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Catálogo de Aceros. Disponible en http://sheetpiling.arcelormittal.com/uploads/files/AMCRPS_Gen_Cat_2010_ES.pdf [Citado 29 de Noviembre de 2013]
- Software PLAXIS 2D Versión 2012. Disponible: <http://www.plaxis.nl/plaxis2d> [Citado 25 de Noviembre de 2013].
- Estudio y diseño del puente de Yondó. Consorcio Desarrollos Viales (2001).
- Estabilidad de la margen derecha del río Magdalena en el sector de Galán. CPI Proyecto de Ingeniería (2012).
- DAS, BRAJA. Principios de Ingeniería de Cimentaciones. Thompson Learning (2004).