

ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS DEL PROCESO DE SUBSIDENCIAS
EN EL TRAMO III DEL METRO DE BOGOTÁ PRIORIZANDO LA ESTACIÓN
UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA ENTRE LA CALLE 45 Y LA CALLE 42
EN EL SECTOR DE CHAPINERO

CRISTIAN ANDRES VALENCIA QUEJADA
JORGE URREGO CARDENAS



UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2016

ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS DEL PROCESO DE SUBSIDENCIAS
EN EL TRAMO III DEL METRO DE BOGOTÁ PRIORIZANDO LA ESTACIÓN
UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA ENTRE LA CALLE 45 Y LA CALLE 42
EN EL SECTOR DE CHAPINERO

CRISTIAN ANDRES VALENCIA QUEJADA
JORGE URREGO CARDENAS

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Asesor disciplinar
INGENIERO EDISON GARZÓN
Asesor metodológico
LICENCIADA LAURA MILENA CALA CRISTANCHO

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2016

Contenido

I. GENERALIDADES	5
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
1.2 JUSTIFICACIÓN	7
1.3. OBJETIVOS.....	8
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	9
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
1.4. ANTECEDENTES	9
II. MARCO DE REFERENCIA	11
2.1 MARCO CONCEPTUAL	11
2.1.1. Subsistencia	11
2.1.2. Subsistencia por construcción de obras subterráneas	12
2.1.3. Métodos de medida de subsidencias	13
2.1.3.1. Método de las diferencias finitas	13
2.1.3.2. Método de las ecuaciones integrales	13
2.1.3.3. Método de los elementos finitos.....	14
2.2. Túnel	19
2.3 Procedimientos constructivos	20
2.3.1. Tuneladora EPB	20
2.3.2. Cut&cover	22
2.3.4. Medios convencionales	24
2.3.5. Método Belga	24
2.3.6. Método alemán	24
2.3.7. Nuevo método Austriaco	24
2.4. MARCO LEGAL	25
2.5. MARCO GEOGRÁFICO.....	37
2.5.1 Geología Regional.....	39
2.5.2 Corte geológico del proyecto	40
III. DISEÑO METODOLÓGICO	43
3.1. LINEA Y SUB LINEA DE INVESTIGACIÓN	43
3.2. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	43
3.3. TIPO DE INVESTIGACIÓN	43
3.4. FASES DE INVESTIGACIÓN	43

3.4.1. FASE 1. Caracterización geotécnica del sector	43
3.4.2. FASE 2. Modelación geotécnica de la zona.....	44
IV. RESULTADOS.....	45
4.1 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SECTOR	45
4.1.1 Caracterización del suelo.....	45
4.1.2 Ensayos.....	47
4.1.2.1. Compresión inconfiada en arcillas.....	47
4.1.2.2. Compresión inconfiada de arena fina con arcillas	49
4.1.2.3. Compresión inconfiada de arcilla limosa con grava.....	50
4.1.2.4. Compresión inconfiada rocas	51
4.1.2.5. Ensayo de corte directo para arcillas.....	53
4.2. MODELACIÓN GEOTÉCNICA DE LA ZONA	56
4.2.1 Dimensiones de la sección del túnel	59
ESCENARIO 1. Modelación del proyecto sin excavación subterránea.	61
ESCENARIO 2. Modelación del proyecto con excavación	69
V. CONCLUSIONES.....	78
VI. BIBLIOGRAFIA	82
VII. TABLA DE ANEXOS	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 .Tensiones sobre un cubo elemental	16
Figura 2. Cuerpo tridimensional	18
Figura 3. Descompresión del terreno. Subsistencia por obras subterráneas	19
Figura 4. Partes de una Tuneladora EPB.....	21
Figura 5. Ejemplo de cut&cover. Túnel Gerrards Cross, en Inglaterra	23
Figura 6.Sectorización de la futura estación “Estación la gran Colombia” PLMB.	38
Figura 7. Mapa geológico de Bogotá	40
Figura 8. Perfil longitudinal de la zona de estudio.....	42
Figura 9.Gráfica esfuerzo deformación para arcillas.	47
Figura 10. Gráfica esfuerzo deformación para arenas.....	49
Figura 11. Gráfica esfuerzo deformación para arcilla con grava.	50
Figura 12. Gráfica esfuerzo deformación para rocas.....	51
Figura 13. Tabla de resistencia a la compresión para rocas.	52
Figura 14. Ensayo 1 corte directo para arcillas.	53
Figura 15. Ensayo 2 corte directo para arcillas.	54
Figura 16. Ensayo 3 corte directo para arcillas.	54
Figura 17. Gráfica consolidado total de los 3 ensayos.....	55
Figura 18. Modelación del Proyecto sin excavación subterránea.	58
Figura 19. Modelación del proyecto con excavación subterránea	58
Figura 20. Sección túnel Metro de Bogotá	59
Figura 21. Modelo actual sin excavación subterránea.	61
Figura 22.Esfuerzo principal Sigma 1 “ σ_1 ” sin túnel	62
Figura 23. Orientación del esfuerzo principal sigma 1 “ σ_1 ” sin excavación.	63
Figura 24. Esfuerzo principal Sigma 3 “ σ_3 ” sin túnel	64
Figura 25. Esfuerzo principal Sigma 3 “ σ_3 ” sin excavación	65
Figura 26. Strength Factor sin excavación	66
Figura 27. Desplazamiento vertical sin túnel.....	68
Figura 28. Desplazamiento vertical con su deformación	69
Figura 29. Modelación del proyecto con excavación	70
Figura 30. Esfuerzo principal Sigma 1 “ σ_1 ” con excavación	71
Figura 31. Orientación del esfuerzo principal sigma 1 “ σ_1 ” con excavación	72
Figura 32. Esfuerzo principal Sigma 3 “ σ_3 ” con excavación	73
Figura 33. Strength Factor con excavación.....	74
Figura 34. Desplazamiento horizontal con excavación	75
Figura 35. Desplazamiento vertical con la excavación y su deformación	75

I. GENERALIDADES

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con el paso del tiempo se ha ido observando como ciudades de todo el mundo sufren por el hundimiento de extensiones de terreno, afectando las obras civiles de las capitales (edificios, vías, acueductos, alcantarillados) esta anomalía en el suelo se conoce como subsidencia causada por el hundimiento del terreno debido a las excavaciones subterráneas, los cambios volumétricos de la fase gaseosa contenidos en la masa de suelo también contribuyen a la deformación y pueden llegar a ser considerables, en la construcción de obras subterráneas, en los descensos de los niveles freáticos, en la consolidación de los suelos debido a las grandes cargas, entre otros.

La subsidencia en una zona se puede presentar por diversas causas antrópicas o naturales, en cualquiera de los casos este fenómeno pueda que no deje víctimas mortales, pero si puede afectar las estructuras que residen en la zona de impacto y por ende los daños materiales pueden llegar a ser cuantiosos.

Bogotá ha apostado por un proyecto de transporte masivo iniciando esta obra con la primera línea del metro de Bogotá. Sin embargo, es importante tener en cuenta que gran parte de la ciudad se encuentra sobre suelos arcillosos proclives al hundimiento, esto sumado a la construcción de los túneles para la primera línea del metro y a la consolidación de los suelos debido a las grandes cargas que hay en la superficie del terreno, provocara la aparición de subsidencias en la superficie del suelo.

Por lo tanto, para la construcción del proyecto se deberá tener como principal enfoque el posible hundimiento progresivo del suelo, ya que los suelos de la ciudad son de origen lacustre, se caracterizan por ser suelos muy blandos y no tienen las mejores características de resistencia, en su gran mayoría ubicados desde la calle 26 hacia el norte.

Por lo anterior se plantea la siguiente pregunta de investigación ¿Cuáles son las posibles deformaciones causadas por las excavaciones subterráneas por medio del análisis de elementos finitos en el tramo III del metro de Bogotá

priorizando la estación Universidad La Gran Colombia entre la calle 45 y la calle 42 en el sector de Chapinero?

1.2 JUSTIFICACIÓN

La subsidencia del terreno es un riesgo natural que afecta a amplias zonas del territorio causando importantes daños económicos y una gran alarma social. La subsidencia del terreno puede deberse a numerosas causas como la disolución de materiales profundos, la construcción de obras subterráneas o de galerías mineras, la erosión del terreno en profundidad, el flujo lateral del suelo, la compactación de los materiales que constituyen el terreo o la actividad tectónica¹.

En la sabana de Bogotá, desde hace un par de décadas, comenzó a evidenciarse este fenómeno con el hundimiento de algunos sectores, lo que atribuye tanto a las características geológicas del terreno como a la intervención humana.

En primer lugar, el suelo de Bogotá está constituido geológicamente por depósitos de arcilla formados por la desecación de un antiguo lago, con estratos intermedios y discontinuos de arenas y suelos orgánicos. El espesor de los depósitos aumenta gradualmente desde las zonas próximas a los cerros orientales, en donde tienen pocos metros de profundidad, hasta el sector occidental de la sabana, con sedimentos de hasta 600m².

Gracias a estudios de entidades como Ingeo-Minas, el Acueducto de Bogotá, la Secretaría Distrital de Ambiente, el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (FOPAE), así como de algunas universidades y firmas de

¹TOMÁS JOVER, Roberto, et al. Subsidencia del terreno. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 2009 Vol. 17, no.3, p 295.

²UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Suelos arcillosos de Bogotá, proclives al hundimiento. Disponible en internet:<<http://www.agenciadenoticias.unal.edu.co/ndetalle/article/suelos-arcillosos-de-bogota-proclives-al-hundimiento.html>> [citado en 7 de septiembre de 2015]

consultorías privadas, hoy se conocen las características hidrogeológicas y geotécnicas de estos suelos, lo cual es fundamental para plantear posibles modelos de subsidencia. Las mediciones confirman si hay subsidencia en Bogotá. En un periodo de evaluación de unos ocho años, en algunos sectores se detectaron tasas de un centímetro por año, mientras que en otros, de hasta 7,5cm³.³ Los mayores valores se registraron en la Zona Industrial, en donde existen varios pozos de extracción de agua, tales estudios permiten concluir que dadas las características mecánicas de los suelos de la capital, existe una estrecha correlación entre los descensos de presión del agua subterránea y el hundimiento del terreno.

La subsidencia es un fenómeno que causa varios problemas en las infraestructuras y más en una ciudad tan grande como Bogotá, así que mediante este proyecto se quiere dar a conocer la importancia de este fenómeno en la ingeniería civil, analizando la subsidencia que se pueda presentar antes y después de la construcción de la estación Universidad La Gran Colombia del Metro de Bogotá (primera línea), teniendo en cuenta los estudios de suelos ya realizados.

1.3. OBJETIVOS

³ Ibíd., Disponible en internet:<<http://www.agenciadenoticias.unal.edu.co/ndetalle/article/suelos-arcillosos-de-bogota-proclives-al-hundimiento.html>> [citado en 7 de septiembre de 2015]

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar por medio de elementos finitos el proceso de subsidencia por excavaciones subterráneas en la estación Universidad La Gran Colombia en el tramo III del metro de Bogotá, entre la calle 45 y la calle 42 en el sector de Chapinero.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar geotécnicamente el sector de estudio, con base en información secundaria.
2. Modelar en el software “Phase 2.0” la zona de estudio con los datos obtenidos de los apiques realizados en este sitio.
3. Analizar los resultados obtenidos a partir del modelo obtenido

1.4. ANTECEDENTES

Se tienen como ejemplo varios casos en el mundo como son las causadas por la excavación de túneles de la línea IV del metro de Caracas, debido a la configuración urbana de esta ciudad carente de espacio para construir vías superficiales. Esta situación conllevó a la construcción subterránea de la línea IV, pasando por debajo de avenidas principales las cuales poseen edificaciones importantes que son afectadas por los cambios de estado de deformación y esfuerzo del terreno debido a la excavación esta área se encuentra conformada por suelos muy heterogéneos, principalmente suelos provenientes de meteorización de rocas y rellenos que son muy susceptibles a los cambios tensionales originado por la excavación⁴.

Por otra parte, México en el valle de Querétaro, la sobreexplotación de un sistema acuífero de una cuenca sedimentaria que contiene rellenos granulares con potencial de ser consolidados, tiene como consecuencia la generación de hundimientos graduales del suelo, más conocido como subsidencia por extracción de agua subterránea⁵.

Otro caso estudiado es el del Metro Urbano de Sevilla de los años 60/70, que para esta época no existían experiencias en la construcción de túneles, esto se evidencia en los problemas que se dieron en la construcción del Tramo III del metro de Sevilla y lo que conllevó a que se plantearan serias incógnitas relacionadas con la estabilidad de la excavación, las deformaciones del terreno y los movimientos inducidos en la superficie, así como el movimiento estructural del revestimiento, la magnitud y evolución, con el tiempo, de las presiones sobre el mismo⁶.

⁴ESPINOZA CHAVARRÍA, Donald Agustín. Análisis de subsidencia producida por la excavación de túneles de la línea 4 del metro de Caracas, aplicando el método de los elementos finitos. Trabajo de grado Ingeniero civil. Caracas D.C.: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería, Noviembre de 2005. p 3, 103, 126

⁵PACHECO MARTÍNEZ, Jesús. Modelo de subsidencia del valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales. Trabajo de posgrado Doctor en ciencias de la tierra (exploración). Querétaro (México): Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de ingeniería. Departamento de Centro de geociencias, Agosto de 2007. P 1,2

⁶JUSTO ALPAÑES, José Luis. Infraestructura construida del metro de Sevilla. En: Pasado y Futuro del metro en Sevilla. 1ª ed. Impreso en España: Editorial Universidad de Sevilla-Secretariado de Publicaciones, 1994. P 33.

II. MARCO DE REFERENCIA

2.1 MARCO CONCEPTUAL

2.1.1. Subsistencia

La subsidencia del terreno es un movimiento descendente y diferencial del suelo, debido a su compactación gradual y a la reducción de la presión del

agua en los poros, en tasas variables entre algunos milímetros como a metros por año, causando daños en edificios vías de comunicación, puentes e infraestructura en general, pérdida de vidas y daños ambientales tales como la disminución del agua subterránea y el deterioro de su calidad.

“La subsidencia del terreno es un fenómeno asociado a diversas causas, de tipo natural como el colapso de cavernas o influenciadas por el hombre como el derrumbe de túneles mineros, excavaciones para obras subterráneas o la exploración intensiva de acuíferos”⁷.

2.1.2. Subsidencia por construcción de obras subterráneas

La excavación subterránea introduce una alteración en el estado inicial del terreno, lo cual lleva consigo la generación de movimientos en zonas relativamente próximas a fin de restablecer el equilibrio tensional del suelo. Ello se ha comprobado en diversas ocasiones, con motivo de la construcción de túneles metropolitanos de ferrocarril, midiendo los movimientos superficiales originados por la excavación. En estos casos se han medido asentos que van desde pocos milímetros hasta 20 cm. Estas deformaciones, que se producen en superficie, originadas por alteraciones en el equilibrio interno del terreno y no por sobrecargas directamente aplicadas en ella, constituyen el fenómeno conocido por el nombre se subsidencia. Estos desplazamientos, que “simplificadamente” tienen un carácter radial hacia el centro del túnel (considerados bidimensionalmente), pueden afectar a los edificios próximos, si sus magnitudes son suficientes para que, al experimentarlos las cimentaciones, se originen deformaciones peligrosas en las estructuras⁸.

⁷ HERRERA PÉREZ Iván Leonardo. Análisis de la susceptibilidad a la subsidencia en el estado de San Luis Potosí. Trabajo de posgrado Maestría en Ciencias Ambientales. San Luis Potosí (México): Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Ciencias Químicas, Ingeniería y Medicina. Programas multidisciplinarios de posgrado en ciencias ambientales, Agosto de 2012. P. 1,2

⁸ UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA. Movimientos inducidos por túneles [en línea]. La Universidad [citado el 24 de septiembre de 2015]. Disponible en internet: <URL:<http://www.etcg.upc.edu/asg/TiMR/descargas/11Movimientos.pdf>>

2.1.3. Métodos de medida de subsidencias

Los esfuerzos de los ingenieros por detallar el comportamiento del suelo de una manera más precisa, han traído consigo un grado de dificultad y complejidad en los modelos matemáticos que normalmente se usan y, por lo tanto, un gran nivel de complejidad en la resolución de éstos. Para poder lidiar con este problema se han desarrollado herramientas informáticas, las cuales se han apoyado en diferentes modelos matemáticos desarrollados. De los cuales los más utilizados en la solución de problemas geotécnicos son: el método de las diferencias finitas, método de las ecuaciones integrales y el método de los elementos finitos, el cual es el método clave empleado para los análisis de esta investigación.

2.1.3.1. Método de las diferencias finitas

Las diferencias finitas es un método basado en la aproximación como diferencias de la ecuación diferencial a resolver. Puesto que una derivada es un cociente de diferencias pasando al límite para un incremento de coordenada espacial o temporal, resulta que el método es muy natural. El método de diferencias finitas se ha aplicado mucho a la ecuación de conservación de agua (flujo) incluyendo también una variante que se conoce como diferencias finitas integradas o volúmenes finitos⁹

2.1.3.2. Método de las ecuaciones integrales

Cuando se conoce una solución elemental de un problema en particular es posible, mediante integración de esta solución elemental, conocer la solución de un problema más complejo del mismo tipo. Esta integración, superposición o suma de efectos exige que el problema sea lineal, esto es, que exista una proporcionalidad lineal entre la causa y el efecto. Esto es elemental, cuando se conocen las tensiones originadas en un semi espacio lineal, provocado por una carga aislada, y pasar a conocer las tensiones provocadas por dos o varias cargas aisladas o también las provocadas por varias cargas distribuidas sobre

⁹UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA GRADO EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN. Tema 9 métodos numéricos en geotecnia [en línea]. Cataluña: La Universidad [citado 30 de septiembre, 2015]. Disponible en internet<[URL:http://ocw.camins.upc.edu/materials/guia/250240/2014/tema_09_metodos_numericos_m.pdf;jsessionid=789B77018A2D81850005EEDC7AA6AC30](http://ocw.camins.upc.edu/materials/guia/250240/2014/tema_09_metodos_numericos_m.pdf;jsessionid=789B77018A2D81850005EEDC7AA6AC30)>

superficies, mediante una integración en tal superficie del efecto provocado por la carga de cada elemento diferencial del área¹⁰.

2.1.3.3. Método de los elementos finitos

El método de los elementos finitos ha llegado a ser una herramienta poderosa para la solución numérica en un amplio rango de problemas de ingeniería. En este método de análisis, una región compleja que define un continuo se discretiza en formas geométricas simples denominadas elementos finitos. Mediante un proceso de ensamblaje, de las ecuaciones locales de cada elemento, cuando se consideran debidamente las cargas y restricciones particulares, da a un conjunto de ecuaciones globales de toda la región compleja en el estudio. La solución de esas ecuaciones permitirá obtener un conocimiento aproximado del comportamiento del continuo en este estudio.

Las ideas básicas de los elementos finitos se originaron gracias a los avances en el análisis estructural de las aeronaves. En 1941, Hreikoff presentó una solución de problemas de la elasticidad usando el método de trabajo marco. Posteriormente, Courant, en 1943, utilizó interpolación polinomial por partes sobre subregiones triangulares para modelar problemas de torsión. Tuner y otros investigadores obtuvieron matrices de rigidez para armaduras, vigas y otros elementos y presentaron sus hallazgos en 1956. Clough fue el primero en acuñar y emplear el término elementos finitos en 1960¹¹.

Durante la década de 1960, se utilizó este método para la obtención de soluciones aproximadas de análisis de esfuerzos. A principio de la década de 1970 se aplicó el método de los elementos finitos para la resolución de problemas no lineales desarrollándose estudios de convergencia y luego con el desarrollo de los computadores con gran capacidad de procesamiento se ha avanzado en el uso del método de los elementos finitos en otras áreas afines pertenecientes al campo de la geo mecánica.

¹⁰ ESPINOSA CHAVARRÍA Donald Agustín, *et al.* Op. Cit., P. 41

¹¹ AHUMADA, Carlos. Análisis y Modelación de una Plataforma Marina. Especialista en estructuras. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de ingeniería, 2013.P 8.

El Método de los Elementos Finitos (MEF) es un método de aproximación de problemas continuos, de tal forma que:

- El continuo se divide en un número finito de partes “elementos”, cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados “nodos”. Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes.
- La solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos. El sistema completo se forma por ensamble de los elementos.
- Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos.
- El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir de cada comportamiento del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas funciones de interpolación a funciones de forma.

El MEF, por tanto, se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, esta transformación se denomina discretización del modelo. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo del cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos¹².

Requerimientos para una solución

Cualquier solución teórica de un problema estático de valor límite debe satisfacer los siguientes tres requerimientos: Equilibrio, Compatibilidad y Condiciones de Frontera.

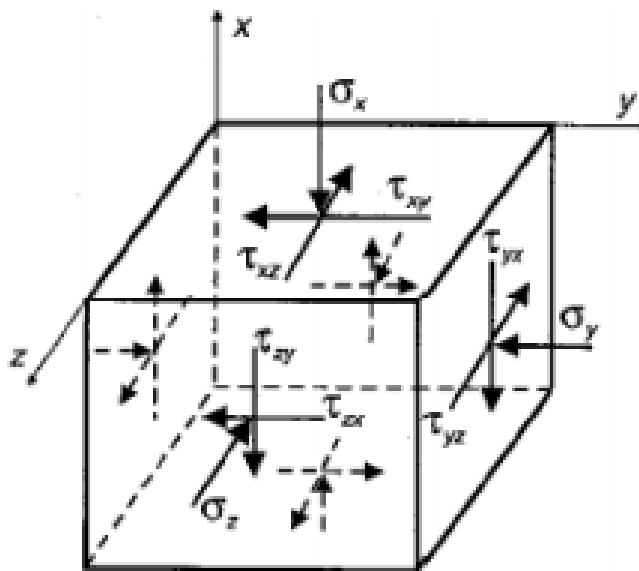
Equilibrio

¹²FRÍAS VALERO, Eduardo. Tesis Doctoral Ingeniería Eléctrica. Cataluña (España): Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Noviembre de 2004.p.111

El concepto de tensión cuantifica como las fuerzas se transmiten dentro de un continuo. La magnitud y dirección de una tensión, así como la manera en que varía espacialmente, indica cómo se transmiten las fuerzas. Sin embargo estas tensiones no pueden variar de cualquier manera, sino que deben obedecer determinadas reglas. La tensión consiste en un tensor de 6 componentes, con reglas que controlan la manera en que cada uno de estos componentes varía dentro del continuo¹³.

En la figura 1 se muestra la descripción de las componentes de tensión en un cubo elemental.

Figura 1 .Tensiones sobre un cubo elemental



¹³ CIGANA, Juan Pablo. Modelación numérica de estructuras de contención portuarias: aplicación al muro de gravedad del puerto de buenos aires. Tesis de grado Ingeniería Civil. Buenos Aires D.F.: Universidad de Buenos Aires Argentina. Facultad de Ingeniería civil. Departamento de estabilidad y construcciones, 2012.p 2.

Fuente: CIGANA, Juan Pablo. Modelación numérica de estructuras de contención portuarias: aplicación al muro de gravedad del puerto de buenos aires. Tesis de grado Ingeniería Civil. Buenos Aires D.F.: Universidad de Buenos Aires Argentina. Facultad de Ingeniería civil. Departamento de estabilidad y construcciones, 2012.p 2.

Sin considerar los efectos de la inercia, las tensiones en una masa de suelo deben satisfacer las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \gamma &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0\end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que:

- El peso propio y actúa en la dirección x
- Las tensiones de compresión se consideran positivas
- Las ecuaciones de equilibrio están en términos de tensiones totales
- Las tensiones deben satisfacer las condiciones de borde

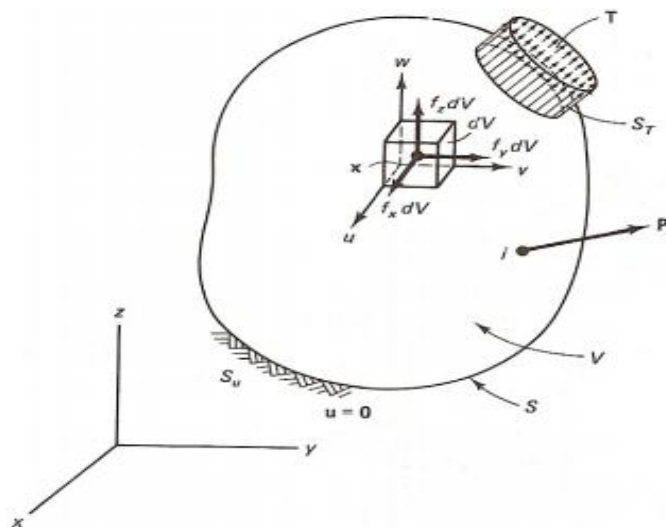
Compatibilidad

La compatibilidad requiere la continuidad del campo de los desplazamientos. Ningun espacio, ni superposicion, deben ocurrir en el dominio del problema durante el proceso de deformacion. La compatibilidad es expresada matematicamente como la definicion de los esfuerzos en términos de las diferenciales de desplazamientos, los cuales describen un movimiento continuo.

Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera son restricciones que deben cumplirse para las fuerzas y los desplazamientos tratados en el problema. Haciendo referencia a las figura 2, se observa que existen condiciones de desplazamiento en la frontera y condiciones de carga en la superficie. Si (u) se especifica sobre parte de la frontera denotada por (S_u), tenemos que ($u=0$) sobre (S_u)¹⁴.

Figura 2. Cuerpo tridimensional



Fuente: GUERRERO BOBADILLA, Héctor. Localización y cuantificación de daño estructural aplicado a elementos finitos. Tesis Maestría y Doctorado Maestro en Ingeniería civil. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ingeniería, Agosto de 2007. P 7.

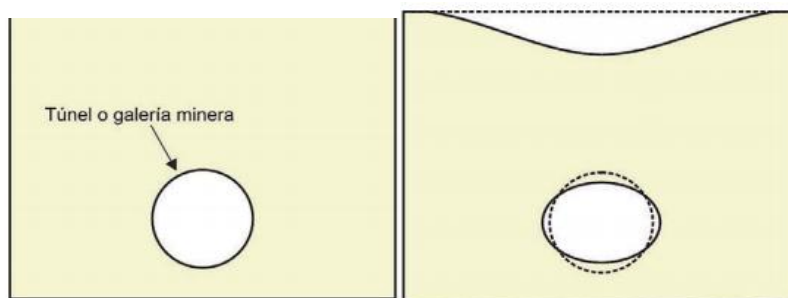
¹⁴ ESPINOSA CHAVARRÍA Donald Agustín, *et al.* Op. Cit., P 47.

2.2. Túnel

El túnel es una obra subterránea lineal que une dos puntos para dar paso y transportar personas y materiales, aunque normalmente sirve para abrir paso al tráfico vehicular.

Al comenzar la excavación de un túnel, el terreno se encuentra en un estado de equilibrio. Como consecuencia del avance de la excavación, este estado de equilibrio se ve alterado y se produce una descompresión del terreno. Por este motivo, será necesario adoptar métodos constructivos que permitan evitar y limitar al máximo los efectos de dicha descompresión en la zona de la excavación. Esta descompresión del terreno va acompañada de un efecto de dilatación y de una pérdida irremediable de sus características geomecánicas, de tal forma, que en un terreno descomprimido, la estabilidad del conjunto sólo puede ser asegurada mediante la ejecución de un sostenimiento del terreno adecuado a su comportamiento tensodeformacional¹⁵.(véase la figura 1).

Figura 3. Descompresión del terreno. Subsistencia por obras subterráneas



Fuente. TOMÁS JOVER, Roberto, et al. Subsistencia del terreno. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 2009 Vol. 17, no.3, p 296.

¹⁵ REY SABÍN, Alberto; PARDO FERNÁNDEZ, Gabriel y HURTADO AGRA, Raúl. Túneles y Obras Subterráneas. Madrid: Sika S.A.U, 2010. p. 14.

2.3 Procedimientos constructivos

La construcción del PLMB es total mente subterránea debido a esto se deberá tener en cuenta, las características topográficas, geológicas, geotécnicas e hidrológicas del suelo, para su posterior realización y que así garantice la seguridad de este gran proyecto y con ello evitar en lo posible fenómenos de subsidencia, asentamientos en la superficie y deformaciones en los túneles. Para obra del PLMB se tiene en cuenta estos tres métodos constructivos.

- Tuneladora EPB
- Cut&Cover
- Medios convencionales

2.3.1. Tuneladora EPB

Las [tuneladoras EPB](#) (en inglés, EarthPressure Balance), son escudos de presión de tierras que se utilizan normalmente en la excavación de terrenos cohesivos. Pertenecen al grupo de tuneladoras que denominamos escudos, (véase figura 2) que se diferencian de los topos por la carcasa metálica exterior que sostiene provisionalmente el frente de avance hasta que se coloca el sostenimiento definitivo. Los escudos EPB han sido utilizados con éxito en la construcción de túneles, aunque también pueden emplearse con la técnica de hincas de tubos. Como ventajas se encuentran sus elevados rendimientos, trabajando incluso bajo el [nivel freático](#), su versatilidad y respeto medioambiental, aunque requieren de una elevada inversión económica¹⁶

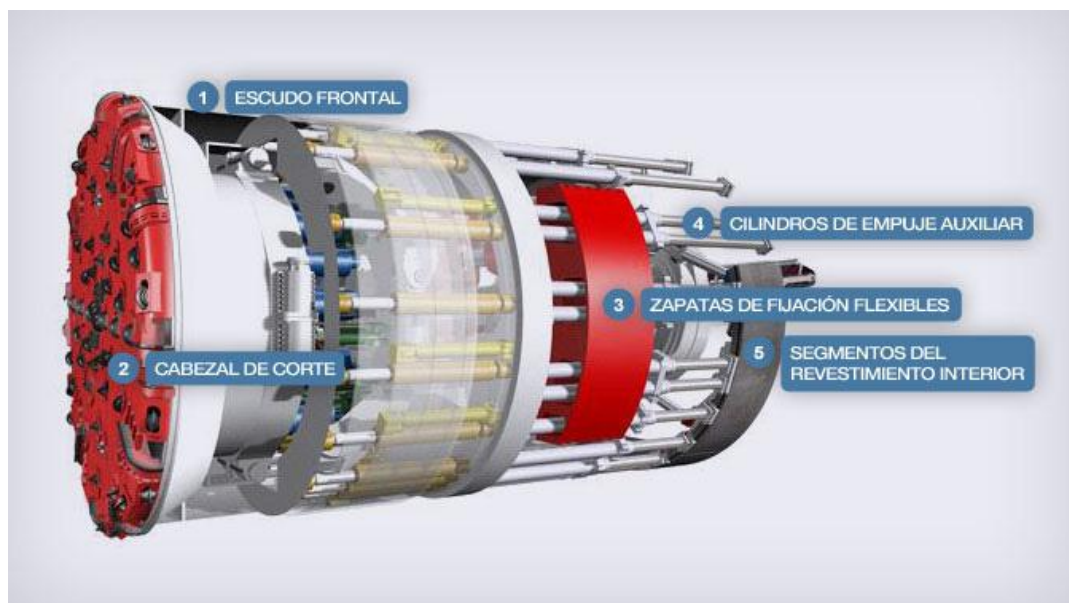
El sostenimiento del frente de excavación se realiza con la propia tierra excavada, que se aloja en una cámara de extracción para mantener la presión sobre el frente y minimizar asentamientos en superficie. Esta función se puede

¹⁶YEPES PIQUERAS, Víctor. Métodos y equipos de excavaciones en túneles. En: Universidad Politécnica de Valencia blogs@upv.es [en línea]. 23- junio, 2015. [Citado 8-octubre, 2015]. Disponible en: <http://victoryepes.blogs.upv.es/2013/11/09/tuneladoras-epb-escudos-de-presion-de-tierras/>

reforzar añadiendo espumas al material extraído, lo cual amplía la aplicabilidad de la máquina, al aumentar la plasticidad de los terrenos.

El material se extrae mediante un [tornillo de Arquímedes](#), que en función de su velocidad de extracción y bajo el control de la fuerza de avance proporcionada por los cilindros de propulsión, permite controlar la presión de balance de las tierras. El material excavado se deposita en una cinta transportadora a través de un tornillo sinfín. El transporte del material al exterior se realiza mediante vehículos sobre raíles o camiones.

Figura 4. Partes de una Tuneladora EPB



Fuente. YEPES PIQUERAS, Víctor. Tuneladora de doble escudo. En: Universidad Politécnica de Valencia blogs@upv.es [en línea]. 23- junio, 2015. [Citado 8-octubre, 2015]. Disponible en: <http://victoryepes.blogs.upv.es/tag/tuneladora/>

2.3.2. Cut&cover

La técnica de falso túnel ([cut and cover](#), que significaría “cortar y cubrir” en español) es un procedimiento de construcción donde se excava desde la superficie la totalidad o parte del hueco que ocupará el túnel. Se construye el túnel dentro del espacio a cielo abierto y se cubre una vez terminado. Requiere un sistema de sostenimiento fuerte para soportar las cargas del material que cubre el túnel. (Véase figura 3)

Este tipo de construcción resulta apropiado cuando existe un escaso recubrimiento de terreno sobre el túnel y al mismo tiempo existe riesgo de que la construcción de una trinchera convencional pueda provocar desprendimientos. En otras ocasiones, la construcción de falsos túneles se justifica simplemente en la necesidad minimizar el impacto ambiental, especialmente cuando el trazado pasa cerca de zonas urbanas¹⁷.

Existen dos formas de realizar este procedimiento constructivo:

- **Método ‘bottom up’:** se excava a cielo abierto la totalidad del hueco ocupado por el túnel y se construye en el interior. El túnel puede ser de hormigón in situ, hormigón pretensado, arcos pretensados, arcos con acero corrugado y también con ladrillo, que se solía usar al principio.
- **Método ‘top down’:** se utiliza mucho en zonas urbanas para evitar afecciones. Se construyen primero las paredes o hastiales del túnel mediante muros pantalla o pilotes. Posteriormente se ejecuta la losa superior que se apoya en las paredes. Cuando está terminada puede urbanizarse la superficie mientras, por debajo, continúan los trabajos. Es la fase en que se extrae la tierra con maquinaria convencional. Una vez

¹⁷ YEPES PIQUERAS, Víctor. Métodos y equipos de excavaciones en túneles. En: Universidad Politécnica de Valencia blogs@upv.es [en línea]. 23- junio, 2015. [Citado 8-octubre, 2015]. Disponible en: <http://procedimientosconstruccion.blogs.upv.es/2013/08/30/metodo-cut-and-cover-de-construccion-de-tuneles/>

llegado a la cota de excavación se puede ejecutar la contrabóveda o losa del túnel¹⁸.

Figura 5. Ejemplo de cut&cover. Túnel Gerrards Cross, en Inglaterra



Fuente. YEPES PIQUERAS, Víctor. Tuneladora de doble escudo. En: Universidad Politécnica de Valencia [blogs@upv.es](http://blogs.upv.es) [en línea]. 30- agosto, 2015. [Citado 8-octubre, 2015]. Disponible en: <http://procedimientosconstruccion.blogs.upv.es/2013/08/30/metodo-cut-and-cover-de-construccion-de-tuneles>

¹⁸ EXTREMIANA VÁZQUEZ. Ignacio. Gestión de riesgos en proyectos de túneles. Trabajo fin de estudios Master interuniversitario en dirección de proyectos. (España): Universidad de la Rioja. Dpto. de ingeniería mecánica, Septiembre de 2011. P. 4,5

2.3.4. Medios convencionales

Los medios convencionales, son métodos clásicos de construcción de túneles los cuales en su totalidad son procesos manuales de los cuales encontramos el método Belga, método Alemán y el nuevo método Austriaco.

2.3.5. Método Belga

[Método belga](#) (también llamado Método clásico de Madrid o método de galería de clave) es un método para la construcción de [túneles](#). Se basa en los principios que permitieron la construcción, en 1828, del túnel del Charleroi en el canal que enlaza Bruselas y Charleroi. Se caracteriza por la progresiva [excavación](#) de los elementos que componen el túnel, de tal forma que se van retirando los elementos más estables del túnel evitando el hundimiento o la falta de estabilidad del frente

2.3.6. Método alemán

El Método Alemán de construcción de túneles se emplea cuando el terreno es muy malo o bien las luces del propio túnel son grandes, por encima de 8 m. Se utiliza mucho en estaciones subterráneas donde los andenes y la plataforma suman un ancho muy importante para utilizar métodos de excavación convencionales. En estos casos, es peligroso descalzar parte de la bóveda para ejecutar los hastiales, tal y como propone el Método Clásico o Belga.

2.3.7. Nuevo método Austriaco

En estos métodos, el sostenimiento provisional no se consigue como en los métodos clásicos con cuadros rígidos, sobredimensionados para soportar la presión del terreno una vez se ha producido su deformación, sino incorporando un medio de sostenimiento provisional más flexible, que se adapte al terreno y trabaje desde el momento en que se efectúa la excavación. De este modo, se pretende que las condiciones resistentes del macizo sufran la menor alteración posible, controlando (con medidores de convergencia, extensómetros, etc.) las deformaciones del terreno que se producen por descompresión al excavar y minimizando su magnitud por medio de un gunitado del terreno excavado y de otras técnicas complementarias. Con ello se pretende que el terreno colabore

como elemento resistente con el recubrimiento definitivo del túnel que en consecuencia resulta de bastante menos espesor que el que se obtendría con un método tradicional¹⁹

2.4. MARCO LEGAL

DECRETO	ARTICULO	CONTENIDO
DECRETO 425 DE 2014 “Por medio del cual se adiciona el Decreto Distrital 577 de 2013, con el fin de anunciar la implementación del Ramal Técnico de Conexión al trazado del Proyecto de la Primera Línea del Metro de Bogotá	Artículo 1º	Adicionar el artículo 1º del Decreto Distrital 577 de 2013, con el objeto de anunciar la implementación del Ramal Técnico de Conexión al trazado del Proyecto de la Primera Línea Del Metro de Bogotá D.C., en el marco del Sistema Integrado de Transporte (SITP) de Bogotá, D.C., contenido en el Mapa Anexo No. 1 del presente acto administrativo.
	Artículo 2	Adicionar el artículo 2º del Decreto Distrital 577 de 2013, con el objeto de precisar que el conjunto de componentes y acciones requeridas para la construcción, implementación, mantenimiento y operación de la

¹⁹YEPES PIQUERAS, Víctor. Métodos y equipos de excavaciones en túneles. En: Universidad Politécnica de Valencia [blogs@upv.es](http://blogs.upv.es) [en línea]. 23- junio, 2015. [Citado 8-octubre, 2015]. Disponible en: <http://procedimientosconstruccion.blogs.upv.es/category/excavaciones-y-voladuras/metodos-y-equipos-de-excavacion-en-tuneles/>

D.C., en el marco del Sistema Integrado de Transporte (SITP) de Bogotá, D.C., y se dictan otras disposiciones”		Primera Línea del Metro de Bogotá, comprenden desde el predio denominado Bosa 37 hasta la Calle 127. Las áreas adyacentes para la aplicación de los instrumentos de ordenamiento, gestión y financiación del suelo para el desarrollo de actuaciones urbanísticas integrales e intersectoriales del Ramal Técnico de Conexión anunciado en el presente decreto son definidas en el artículo 3º.
	Artículo 3º	El trazado del Ramal Técnico del proyecto Primera Línea del Metro de Bogotá – PMLB-, se encuentra definido en el Mapa Anexo No. 1 - del presente Decreto. PARÁGRAFO: Los aspectos cartográficos relativos al proyecto Primera Línea del Metro de Bogotá – PMLB-, se realizarán mediante coordenadas cartesianas-Bogotá, referidas al sistema Magna–Sirgas, de conformidad a los parámetros adoptados por la Infraestructura de Datos Espaciales para el Distrito Capital (IDECA).
	Artículo 4º	El Ramal Técnico de Conexión será implementado, previa identificación de sus Áreas de Oportunidad y de Intervención determinadas por las entidades competentes y será desarrollado a través de actuaciones públicas dirigidas a adoptar los

	instrumentos de planeación, de gestión y de financiación previstos en las normas nacionales y distritales, el aseguramiento de la coordinación intersectorial e interinstitucional de las entidades distritales y nacionales para la programación y ejecución de las distintas intervenciones públicas, y la promoción de asociaciones o alianzas público privadas, en un marco de distribución equitativa de cargas y beneficios definido en la Ley 388 de 1997, con miras al diseño, formulación técnica, jurídica y financiera e implementación de las obras públicas y privadas que sean necesarias.
Artículo 5º	El Ramal Técnico de Conexión del Proyecto Primera Línea del Metro de Bogotá –PLMB- se enmarca en el literal c) y e) del artículo 58 de la Ley 388 de 1997, que señalan “...c) <i>Ejecución de programas y proyectos de renovación urbana y provisión de espacios públicos urbanos</i> y e) <i>Ejecución de programas y proyectos de infraestructura vial y de sistemas de transporte masivo</i> ”.
Artículo 6º	Para efectos de dar cumplimiento al numeral 3 del artículo 3 del Decreto Nacional 2729 de 2012, los avalúos de referencia se contratarán y elaborarán dentro de los términos y plazos establecidos en dicha norma.

	Artículo 7º	La Secretaría Distrital de Planeación (SDP), efectuará las modificaciones a que haya lugar en la cartografía oficial de las zonas a intervenir y sus áreas de influencia, según lo dispuesto en el presente Decreto.
--	--------------------	--

Decreto	Artículo	Contenido
DECRETO 577 DE 2013 “Por medio del cual se modifica el Decreto 398 de 2009, para precisar y adoptar el trazado general del proyecto de la Primera Línea del Metro de Bogotá - PLMB- en el marco del Sistema Integrado de Transporte – SITP de Bogotá, D.C., y se dictan otras disposiciones.”	ARTÍCULO 1º	Modificar el artículo 1º del Decreto 398 de 2009, con el objeto de precisar y adoptar el trazado general del Proyecto Primera Línea del Metro de Bogotá – PLMB, contenido en el Mapa Anexo No.1 - Primera Línea Metro-. Para efectos de dar cumplimiento a lo establecido en el parágrafo 1º del artículo 61 de la Ley 388 de 1997, el artículo 1 del Decreto Nacional 2729 de 2012, el artículo 65 del Código de Procedimiento Administrativo y de lo Contencioso Administrativo y el artículo 1º del Acuerdo Distrital 171 de 2005, y con el fin de que la ciudadanía tenga acceso a la información sobre los avalúos de referencia de los predios, se deberá comunicar el presente decreto mediante publicación oficial en el Registro Distrital, en el Catálogo de la Actividad Pública Inmobiliaria Distrital –CAPID y en la

		Gaceta de Urbanismo y Construcción.
	Artículo 2º	El Proyecto Primera Línea del Metro de Bogotá –PLMB-, se considera como el conjunto de componentes y acciones requeridas para la construcción, implementación, mantenimiento y operación de la Primera Línea del Metro de Bogotá, desde el Portal Américas hasta la Calle 127, el cual incorpora los resultados de los estudios de pre-factibilidad, perfil, factibilidad, diseño y de Ingeniería Básica Avanzada - IBA, y la aplicación de los instrumentos de ordenamiento, gestión y financiación del suelo para el desarrollo de actuaciones urbanísticas integrales e intersectoriales en sus áreas adyacentes definidas en el artículo 3º.
	ARTÍCULO 3º	El trazado general del proyecto Primera Línea del Metro de Bogotá –PMLB-, se encuentra definido en el

		Mapa Anexo No.1 -Primera Línea Metro- del presente Decreto. PARÁGRAFO: Los aspectos cartográficos relativos al proyecto Primera Línea del Metro de Bogotá – PMLB-, se realizará mediante coordenadas cartesianas-Bogotá, referidas al sistema Magna–Sirgas, de conformidad a los parámetros adoptados por la Infraestructura de Datos Espaciales para el Distrito Capital (IDECA).
	ARTÍCULO 4º	El proyecto urbano integral al que hace referencia el artículo 2 del presente decreto, será implementado, previa identificación de sus Áreas de Oportunidad y de Intervención determinadas por las entidades competentes, a la luz de lo definido en el artículo 176 del Decreto Distrital 364 de 2013, y será desarrollado a través de actuaciones públicas dirigidas a adoptar los instrumentos de planeación, de gestión y de financiación previstos en las normas nacionales y distritales, el aseguramiento de la coordinación intersectorial e interinstitucional de las entidades distritales y nacionales para la programación y ejecución de las

		distintas intervenciones públicas, y la promoción de asociaciones o alianzas público privadas, en un marco de distribución equitativa de cargas y beneficios definido en la Ley 388 de 1997, con miras al diseño, formulación técnica, jurídica y financiera e implementación de las obras públicas y privadas que sean necesarias.
	ARTÍCULO 5º	El Proyecto Primera Línea del Metro de Bogotá –PMLB- contempla los siguientes alcances específicos: 1. Intervenir el contexto urbano de modo integral, bajo los principios del Desarrollo Orientado al Transporte Sustentable DOTS, propiciando la mezcla de usos y la densificación, facilitando al peatón la accesibilidad universal por medio de la solución adecuada de espacio público, entendido este como parte del soporte ambiental. 2. Concretar las condiciones e intervenciones ambientales, técnicas, jurídicas, sociales, económico – financieras, urbanísticas y de diseño que permitan, bajo un enfoque integral, mejorar las cualidades ambientales,

		cualitativas, sociales y físicas del entorno en relación con la ejecución y construcción del Proyecto Urbano Integral de la Primera Línea del Metro de Bogotá. 3. Mejorar las condiciones de transporte y movilidad tanto de las personas que habitan en las áreas de intervención directa del proyecto como de aquellas que utilizan el Sistema Integrado de Transporte Público – SITP. 4. Articular e integrar el Proyecto Primera Línea del Metro con los demás modos de transporte que operan en Distrito bajo el esquema funcional del SITP para la ciudad de Bogotá, donde prevalezca la conectividad, la continuidad y la intermodalidad, en el marco del Plan Maestro de Movilidad, decreto distrital 319 de 2006, del Decreto 309 de 2009, “Por el cual se adopta el Sistema Integrado de Transporte para Bogotá, D.C. y se dictan otras disposiciones” y del Programa de Movilidad Humana establecido en el Acuerdo 489 de 2012, cuya prioridad es el peatón. 5. Incentivar y fortalecer el desarrollo de usos, su mezcla y las actividades
--	--	---

		alrededor de la infraestructura de la Primera Línea del Metro de Bogotá, con espacios públicos activos de modo que se garantice el desarrollo urbano y generen impactos positivos en la calidad de vida de los ciudadanos, en el marco de la coordinación intersectorial e interinstitucional, que facilite la concreción del Proyecto Urbano Integral PUI de la Primera Línea del Metro, en el marco del Uso estratégico suelo público definido en el artículo 255 del Decreto 364 de 2013. 6. Articular la construcción e implementación de la Primera Línea del Metro de Bogotá con los sistemas de Servicios Públicos Domiciliarios y con las redes TIC que faciliten la operación, integración y control del Sistema Integrado de Transporte Público - SITP. 7. Desarrollar intervenciones integrales de recuperación, generación y aprovechamiento del espacio público, localización del mobiliario urbano y de iluminación necesaria para brindar condiciones de seguridad, de conformidad con lo establecido en los decretos distritales No. 215 de 2005, “Por el cual se adopta el Plan Maestro de Espacio Público para Bogotá y se
--	--	---

		dictan otras disposiciones” y No. 456 de 2013, “Por el cual se reglamentan la administración, el mantenimiento y el aprovechamiento económico del espacio público construido y sus usos temporales en Bogotá, Distrito Capital” 8. Facilitar a los habitantes de la ciudad y de la región el acceso a la dotación de Equipamientos y en general a la oferta de bienes y servicios. 9. Concretar las condiciones y actuaciones técnicas y administrativas que permitan solventar las necesidades de la gestión predial en las áreas de intervención del proyecto, en conjunto con la acción inmobiliaria privada, a través de las iniciativas público – privadas. 10. Implementar la Primera Línea Metro acudiendo a los programas de reasentamiento integral de la población que se verá afectada por el proceso de adquisición predial, conforme al Acuerdo 10 de 2000, reglamentado por los Decretos Distritales 296 de 2003 y 329 de 2006, y resolución IDU 5965 de 2006, lo cual implica un trabajo desde la fase inicial de la formulación de proyecto, para
--	--	---

		incorporar el resultado de la participación ciudadana en la fase final del proyecto; la información y el monitoreo durante la fase de obra; la mitigación de los impactos de la misma, la fase de empoderamiento para garantizar el buen uso y sostenibilidad integral del proyecto como inversión pública. Lo anterior tiene como propósito, potenciar los diversos componentes del proyecto. 11. Implementar los mecanismos de participación ciudadana y atención a la ciudadanía de acuerdo con los mecanismos, procedimientos y protocolos, en el marco del desarrollo urbano sostenible, con el propósito que éste se aborde desde un enfoque armónico; garantizando su ejecución más allá de su dimensión físico-espacial, con empoderamiento de la dimensión socio-cultural. 12. Prestar el servicio de Transporte Público Masivo de Pasajeros a través de la Primera Línea del Metro de Bogotá, empleando los parámetros y especificaciones operativas de diseño definitivo.
	ARTÍCULO 6°	El Proyecto Primera Línea del Metro de Bogotá –PLMB- cuyo trazado

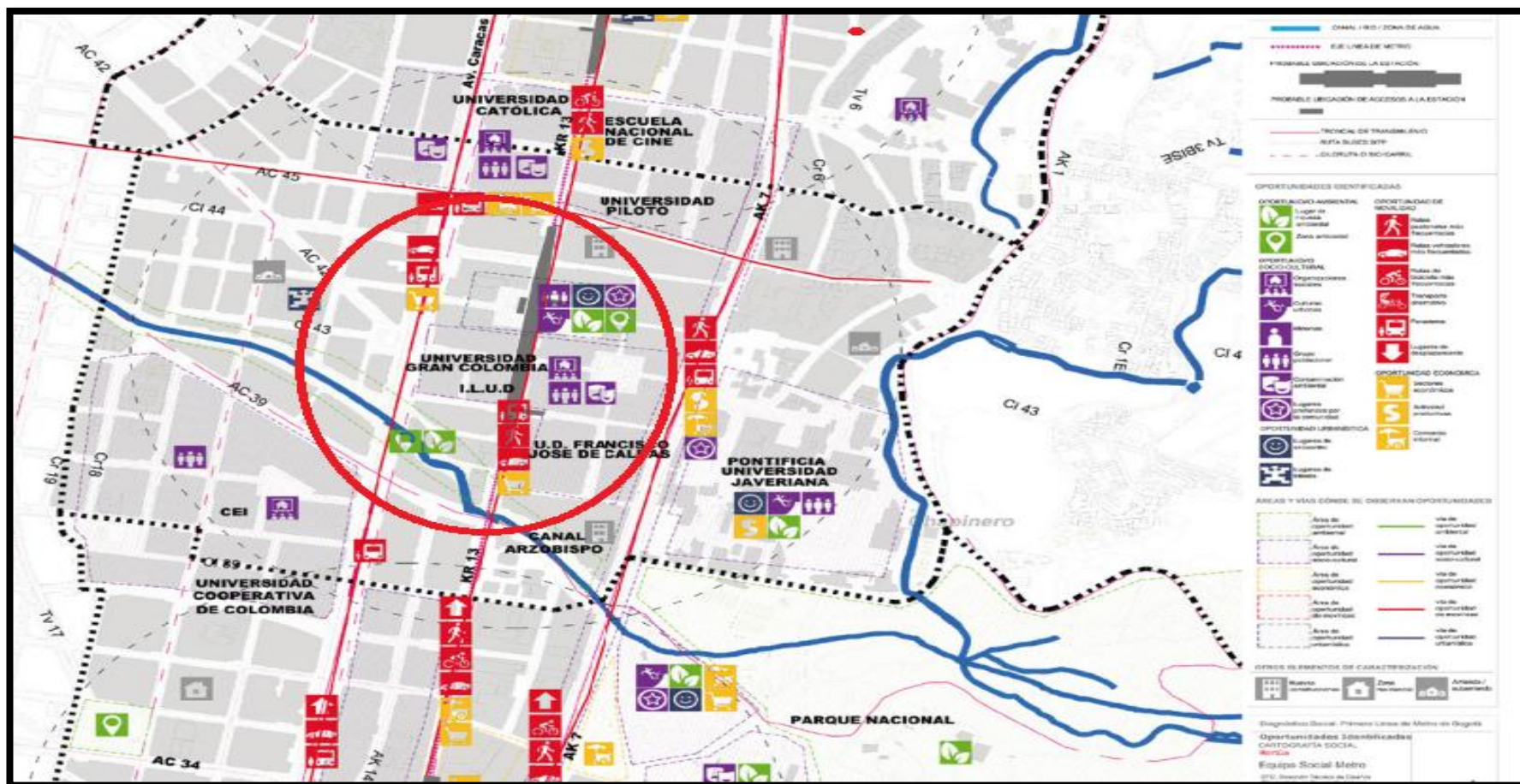
		general se precisa y adopta mediante el presente decreto, se enmarca en el literal e) del artículo 58 de la Ley 388 de 1997, que señala“...e) Ejecución de programas y proyectos de infraestructura vial y de sistemas de transporte masivo”.
	ARTÍCULO 7º	La Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital (UAECD) complementará los avalúos de referencia sobre la zona de influencia correspondientes al trazado general, para aquellos predios que, luego de la modificación del trazado, quedaron por fuera de la zona de influencia prevista en el Decreto 398 de 2009 y que se adoptan Mapa Anexo No.1 -Primera Línea Metro-.
	ARTÍCULO 8º	La Secretaría Distrital de Planeación (SDP), efectuará las modificaciones a que haya lugar en la cartografía oficial de las zonas a intervenir y sus áreas de influencia, según lo dispuesto en el presente Decreto.
	ARTÍCULO 9º	La liquidación y pago del efecto plusvalía, se acredita ante la autoridad competente para la expedición de la licencia de urbanismo o ante el notario, según corresponda, en los términos del artículo 14, párrafo 2º del Acuerdo 352 de 2008.
	ARTÍCULO	El presente decreto rige a partir de la

	10º	fecha de su publicación en el Registro Distrital, en el Catálogo de la Actividad Pública Inmobiliaria Distrital –CAPID y en la Gaceta de Urbanismo y Construcción de Obra.
--	------------	--

2.5. MARCO GEOGRÁFICO

Este proyecto se realizará en la localidad de Chapinero entre calles 42 a 45 de la ciudad de Bogotá, las cuales comprenden la futura estación del metro “Estación La Gran Colombia” (véase la Figura 4).

Figura 6. Sectorización de la futura estación “Estación la gran Colombia” PLMB.



FUENTE: proceso de gestión y promoción de la participación ciudadana en la etapa de ingeniería básica avanzada de la primera línea del metro de Bogotá (En Línea). [Citado el 29 de abril de 2015]. Disponible en internet: <[URL:http://app.idu.gov.co/seccion_metro/cartillas/gran%20colombia.pdf](http://app.idu.gov.co/seccion_metro/cartillas/gran%20colombia.pdf)>

El sector cuenta con tres importantes vías de comunicación con el norte y sur de la ciudad, la Av. Caracas, la K 13 y la K 7, las cuales presentan alto flujo peatonal y vehicular. La CL 45 y la CL 40b son importantes rutas vehiculares y peatonales de la zona, sin dejar atrás las grandes construcciones que están en este tramo.

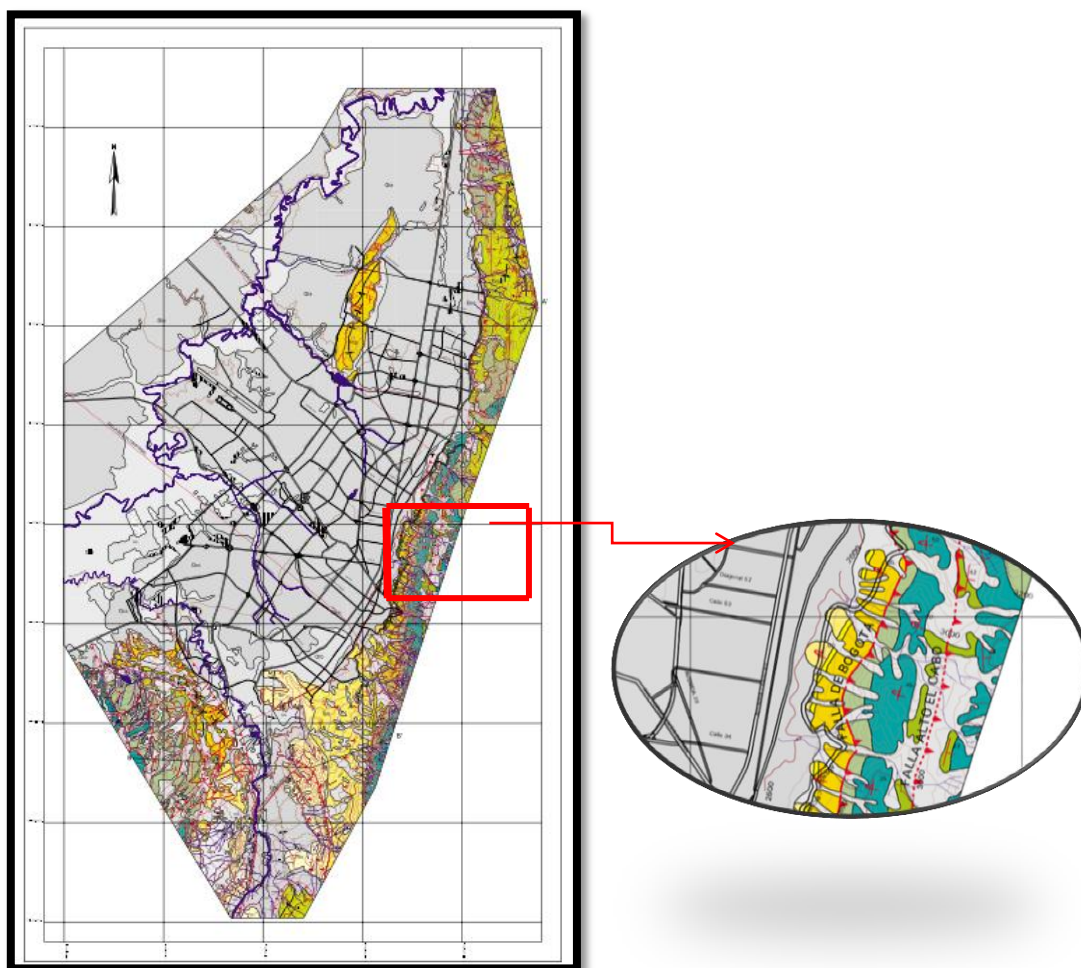
2.5.1 Geología Regional

Dentro del área de la Sabana de Bogotá se puede establecer dos estilos estructurales: el primero, localizado en el flanco oriental de la Cordillera Oriental, al oriente del sinclinal de Checua, con fallas de cabalgamiento con vergencia al Oriente y las otras de menor importancia se comportan como retrocabalgamiento con vergencia hacia el Occidente. El segundo estilo estructural se presenta al occidente, está caracterizado por fallas de cabalgamiento con vergencias al occidente como sistemas imbricados que nacen y son controlados por fallas de dirección noroeste que sirven como rampas laterales. Además de las estructuras regionales, existen zonas con diapirismo de sal generalmente localizadas en el núcleo de los anticlinales. El diapirismo es un generador de estructuras muy complejas como las observadas en Zipaquirá, Nemocón y posiblemente entre el sector de Sesquilé y La Calera. El área de la Sabana de Bogotá es una zona con gran diversidad de recursos que le permiten con un adecuado plan de ordenamiento el abastecimiento para esta misma área y vecinas, en minerales tales como carbón, arcillas, arenas y gravas²⁰.

En la figura 7 se observa el mapa geológico de la ciudad de Bogotá. Para una mejor ilustración de la geología de la zona de estudio.

²⁰ MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA INGEOMINAS. Geología de la sabana de Bogotá. Informe .Bogotá D.C.: El Instituto, 2005. 9 p

Figura 7. Mapa geológico de Bogotá



Fuente: Instituto colombiano de geología y minería. Mapa geológico de Santafé de Bogotá. Escala 1:50.000. bogota: Ingeominas, 1997. 1 plano: col; 118 x70 cm

2.5.2 Corte geológico del proyecto

Según la definición del mapa geológico de Bogotá, en la zona de estudio se encuentra gran variedad de material con una nomenclatura clara del sector que hace referencia a **QTA** lo cual informa que en el sector del proyecto a estudiar se localizaron una gran variedad de depósitos lacustres. (**VER ANEXO 1 PARA MEJOR ENTENDIMIENTO DEL MAPA**).

Aparte de encontrar un depósito lacustre, en el área de estudio también se puede encontrar que en la sabana de Bogotá hay cierta variedad de materiales que el mapa geológico está describiendo con una nomenclatura estipulada, esta zona es importante tenerla en cuenta ya que está muy cerca al área de estudio y es importante saber cómo está conformada esta sabana. A continuación se describirá sus nomenclaturas según el INGEOMINAS²¹ con sus características:

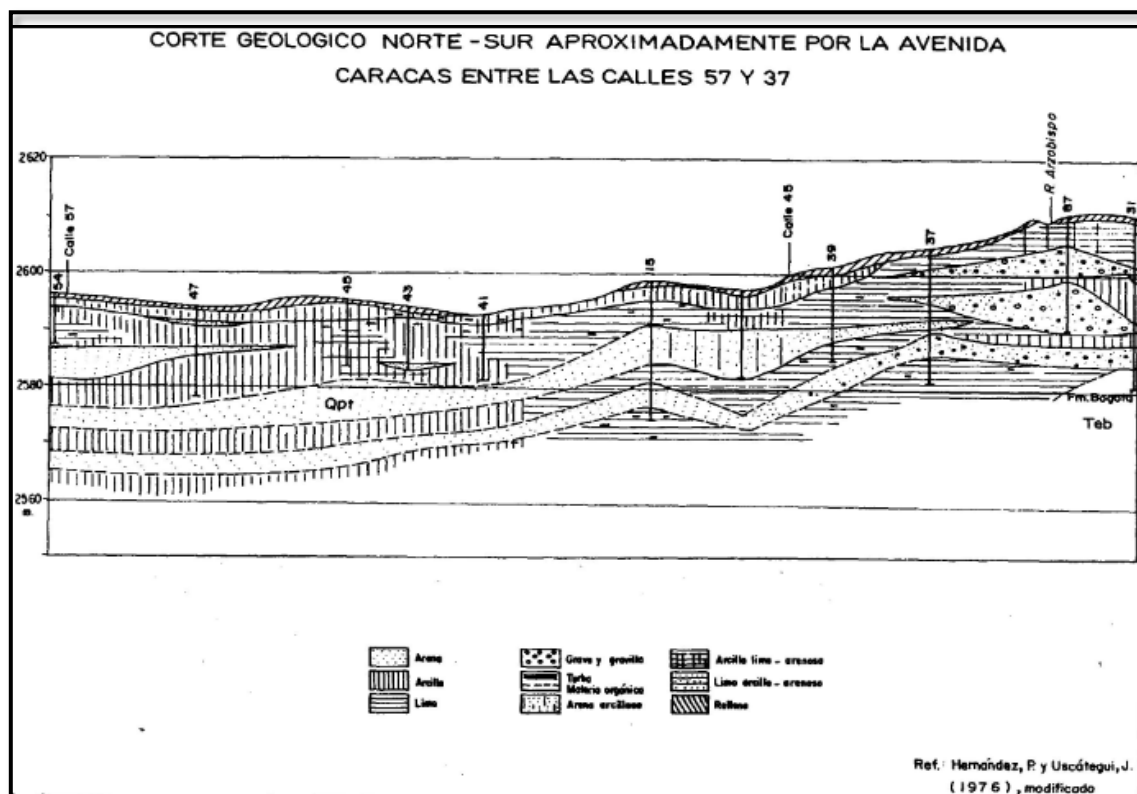
- ✓ **Tpc FORMACIÓN CACHO:** en el mapa esta nomenclatura hace referencia a que se encuentra unas Areniscas de grano grueso conglomerático, fiabiles, con unas intercalaciones esporádicas de arcillolitas, en el mapa se encuentra de color Amarillo **“ver anexo 1”**,
- ✓ **Ktg FORMACIÓN GUADUAS:** en el mapa esta nomenclatura hace referencia a que en la parte superior hay un predominio de arcillolitas, con esporádicas intercalaciones de areniscas; Intermedia, también se encuentran intercalaciones de areniscas con arcillolitas, en esta sección hay gran abundancia e importantes mantos de carbón, en el mapa lo podemos encontrar como un amarillo más oscuro **“ver anexo 1”**,
- ✓ **Ksgp FORMACIÓN PLAENERS:** en el mapa esta nomenclatura hace referencia a que en la parte superior hay un predominio de limolitas y arcillolitas silíceas; en la parte intermedia hay una alteración de arcillolitas, limolitas y areniscas; en la base se encuentra arcillolitas, arcillolitas silíceas y limolitas, en el mapa se observa con un verde grisáceo **“ver anexo 1”**.

²¹Instituto colombiano de geología y minería. Mapa geológico de Santafé de Bogotá. Escala 1:50.000. bogota: Ingeominas, 1997. 1 plano: col; 118 x70 cm

- ✓ **KSGD FORMACIÓN ARENISCA DURA:** en el mapa esta nomenclatura hace referencia a que se encuentra unas areniscas de color gris claro o blanco, con una variación de grano muy fino a un grano fino, con pocas intercalaciones de limolitas y arcillolitas silíceas, en el mapa se encuentra con un color azul marino **“ver anexo 1”**.
- ✓ **Ksch FORMACIÓN CHIPAQUE:** : en el mapa esta nomenclatura hace referencia a que encontramos unas lutitas negras, carbonosas, finamente laminadas, con intercalaciones esporádicas de arenisca de grano fino, en el mapa se encuentra con un color verde oscuro **“ver anexo 1”**

En la figura 8 se observa el corte longitudinal de gran parte de la avenida Caracas, el corte va desde las calles 57 a la 37; nos concentraremos únicamente en el análisis de la zona de estudio que comprende las calles 42 a la 45.

Figura 8. Perfil longitudinal de la zona de estudio



Fuente: VII JORNADAS GEOTECNICAS DE LA INGENIERIA DE COLOMBIA. (30, Octubre, 1992: Santa Fe de Bogotá, Colombia). Geología e Hidrogeología de Santafé de Bogotá y su Sabana. Sociedad Colombiana de Ingenieros – Sociedad Colombiana de Geotecnia.1992.

III. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. LINEA Y SUB LINEA DE INVESTIGACIÓN

La línea primaria de investigación es Geotecnia para el desarrollo de la infraestructura física regional sostenible, la competitividad y el desarrollo económico y social. Y la sub-línea de investigación es el análisis de subsidencias causadas por obras subterráneas.

3.2. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación tiene un enfoque de investigación cuantitativo ya, que se analiza mediante modelaciones en software los factores por los cuales se presenta la problemática, también se tiene en cuenta los estados y los factores en los cuales se encuentra en el suelo y toda las propiedades mecánicas que lo conforman.

3.3. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El estudio es de tipo analítico descriptivo, ya que se podrán analizar datos a partir de la información suministrada por los estudios de suelos realizados en la zona de estudio para PLMB tramo III.

3.4. FASES DE INVESTIGACIÓN

3.4.1. FASE 1. Caracterización geotécnica del sector:

- Recopilación de la información geotécnica dada al proyecto por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU).
- Organización de los datos obtenidos
- Caracterización de la zona del proyecto

3.4.2. FASE 2. Modelación geotécnica de la zona:

- Planteamiento de escenarios corriendo el software Phase 2.0
- Condiciones del túnel
- Condiciones de frontera
- Organización de los datos obtenidos por el software

3.5. INSTRUMENTOS

SOFTWARE PHASE 2.

Es un programa en 2D para el análisis de elementos finitos y análisis de estrés para excavaciones subterráneas o de superficie en rocas o suelo. Este puede ser utilizado para una amplia gama de proyectos de ingeniería y diseño, también puede ser utilizado para modelar la excavación de una mina a cielo abierto. El modelo puede ser excavado en etapas y puede incluir fallas sub-verticales que interceptan el terreno.

Para este proyecto se utilizara el software para modelar las excavaciones subterráneas que se realizarán en la primera línea del metro de Bogotá exactamente entre calles 45 a la 42 futura estación de La Gran Colombia en el sector de chapinero. Después de la modelación de este sector observar y analizar las subsidencias que sufre el suelo por causa de estas excavaciones ya que el software arroja datos de esfuerzos y estrés que tiene el suelo antes, durante y después realizada la excavación.

IV. RESULTADOS

4.1 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SECTOR

4.1.1 Caracterización del suelo

De acuerdo a la información analizada de los estudios geotécnicos de IDU²² (Anexo 1), se seleccionaron tres puntos de la zona. El punto **SE3-13**, el punto **SE3-14** y el punto **SL3-15**. (En los anexos 2, 3 y 4, se encuentra el estudio de suelo suministrados por el IDU, para cada uno de los puntos respectivamente).

- ✓ Para el punto **SE3-13**, de acuerdo al estudio de suelos analizado, posee gran variedad de características mecánicas del suelo, y también un nivel freático a 9 metros de profundidad, lo que quiere decir que la presencia de agua en este diseño es inminente y que se deben tomar las medidas correspondientes para poder darle un manejo adecuado a estas aguas.

Se pudo analizar y evidenciar que el suelo más predominante en este sector contiene gran material de Arcilla hasta los 50 metros de profundidad sin encontrar indicios de roca. Cabe aclarar que también se encuentra material en la rasante pero ya este material vendría siendo materia orgánica, un relleno asfáltico y un concreto hidráulico, por ende todos estos materiales son de propiedades demasiado insuficientes y no son útiles para el proyecto, por ende este material debe ser removido y debe ser remplazado.

- ✓ Para el punto **SE3-14**, de acuerdo al estudio de suelos realizado posee gran variedad de características mecánicas del suelo, en este caso claramente el

²²Información Geotécnica PLMB Tramo III (En Línea). [Citado el 27 de marzo de 2016]. Disponible en internet: <URL:http://app.idu.gov.co/seccion_metro_ASP/IntenasMain/PLMB3.asp>

nivel freático es más crítico dado que se encuentra a 1.50 metros de profundidad, el agua en este proyecto es claramente importante y no puede ser evadida. Claramente la presencia de agua en Bogotá y en el sector es normal dado que Bogotá está situado en depósitos lacustres y era de esperarse encontrar niveles freáticos críticos como los de este proyecto, igual que en el anterior sondeo se evidenciaron materiales como limos, Materia Orgánica, Concreto Hidráulico, pero el material predominante ha sido la arcilla sin ningún indicio de roca hasta los 50 metros.

- ✓ Para el punto **SEL-15**, de acuerdo al estudio de suelos realizado posee gran variedad de características mecánicas del suelo, en este caso el sondeo se comportó de manera diferente dado que no se encontró nivel freático y no se reportó en el estudio de suelos. En este sondeo se tienen los mismos materiales que en los sondeos anteriores Arcilla y Material Orgánico, pero excavando a 34 metros de profundidad se dio indicios de roca LUTITA, lo cual tiene un grado de meteorización V, que quiere decir que es un grado de descomposición de minerales y alteraciones bajas; esto se clasificó claramente con sus propiedades mecánicas lo cual se pueden evidenciar en el estudio del sondeo.
- ✓ Al tener todos estos datos ordenados claramente se puede evidenciar arcillas con diferentes aleaciones ya sea con limo con arena pero aun así la predominancia del sector conlleva a que es un material arcilloso el cual posee características como en este caso.

Para su desarrollo se debe tener en cuenta el comportamiento de esta arcilla dado que el actuar de ella es diferente cuando se tiene presencia de agua y cuando no, hay que hacer un análisis correcto para poder entablar el modelo aproximado de este proyecto, para tener una mejor claridad de la formación del suelo revisar el **ANEXO 5 Y 6** (el cual contiene el plano en planta del proyecto y

el perfil del suelo en estos dos planos se encuentra la ubicación de los sondeos).

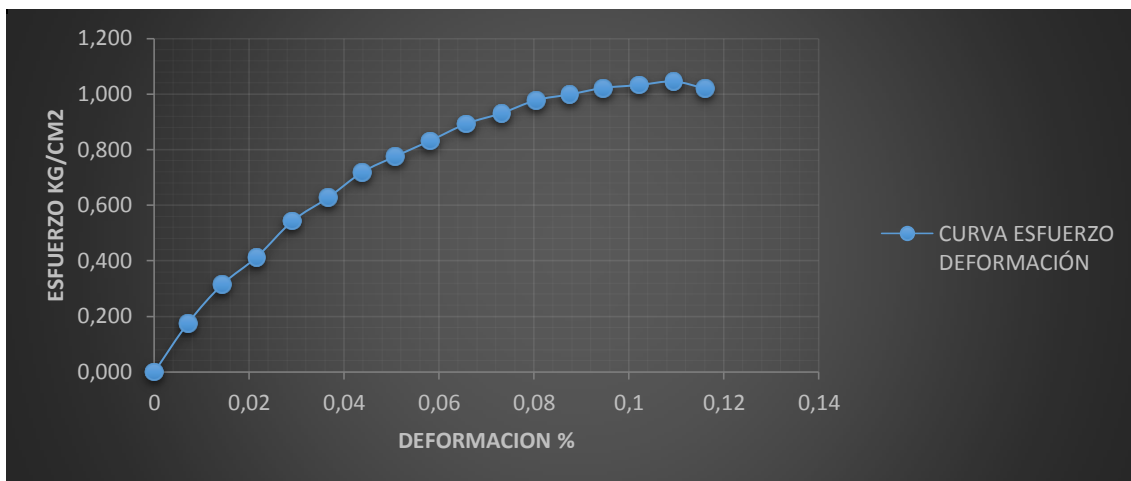
4.1.2 Ensayos

4.1.2.1. Compresión inconfiada en arcillas

En esta parte se representan los ensayos específicos o representativos que sirven de base para la elaboración del modelo geotécnico.

En la figura 9 se muestra el comportamiento del suelo según el ensayo de compresión inconfiada de las arcillas hallada en el sondeo **SE3-13**.

Figura 9. Gráfica esfuerzo deformación para arcillas.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos tomados del IDU (ver el anexo 7).

El ensayo de compresión inconfiada solo puede realizarse con materiales cohesivos que no expulsan agua durante la etapa de carga del ensayo y que mantienen su resistencia intrínseca después de remover las presiones de confinamiento, como las arcillas o los suelos cementados.

Para el análisis de este ensayo la resistencia a la compresión inconfiada del suelo en este caso la arcilla es el esfuerzo máximo alcanzado durante el ensayo.

Cuando la muestra llegue a un porcentaje de deformación menor sin que alcance al esfuerzo máximo, se toma como resultado del ensayo el esfuerzo obtenido para esa deformación.

Al obtener la gráfica de esfuerzo – deformación podemos obtener varios valores tales como el módulo de elasticidad y su relación de Poisson, estos dos valores son de mayor importancia y son los que tenemos en cuenta ya que son necesarios para elaborar nuestro modelo.

<i>v POISSON</i>	0,35
<i>E MODULO DE ELASTICIDAD (kgf/cm2)</i>	10,5887754
<i>E MODULO DE ELASTICIDAD (Mpa)</i>	1,03840414

El Q_u es un parámetro importante ya que muestra cual es el Mínimo esfuerzo compresivo necesario para romper una muestra no confinada de suelo, de forma cilíndrica, en condiciones normalizadas.

<i>$Q_u = 1,045 \text{ Kg/Cm}^2$</i>
<i>$C_u = 0,522 \text{ Kg/Cm}^2$</i>

Este parámetro se puede correlacionar con la bibliografía que nos indicara el rango de que tan consistente puede ser este material.

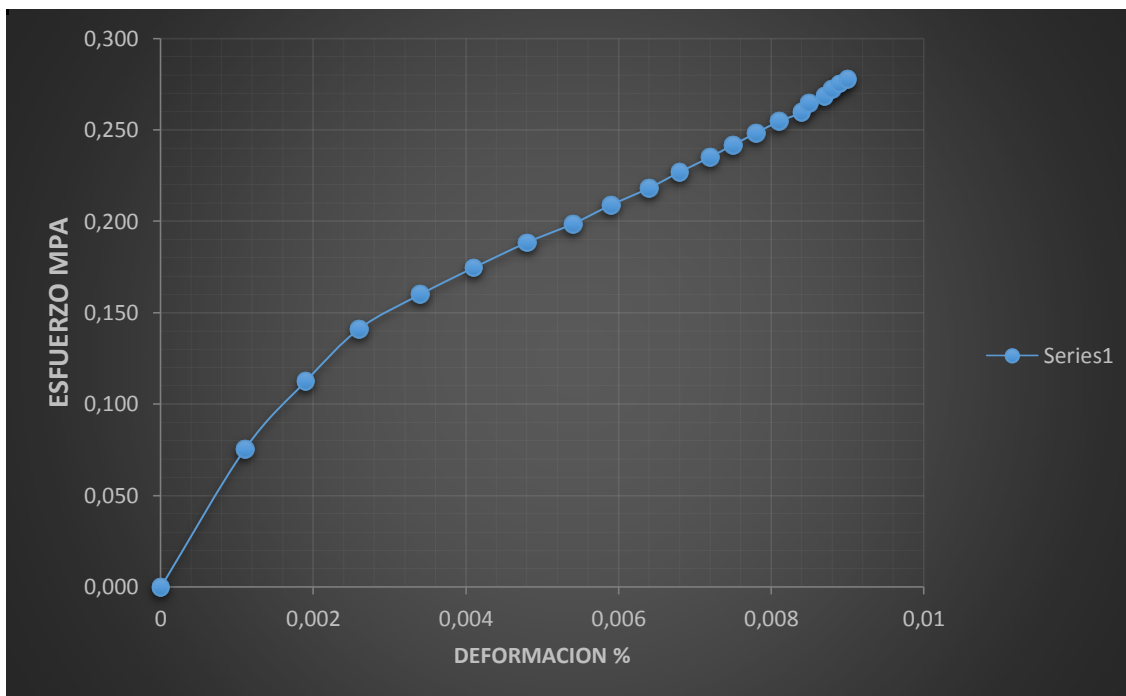
CONSISTENCIA DE LA ARCILLA	$Q_u \text{ (kg/cm}^2\text{)}$
Muy blanda	< 0,25
Blanda	0,25-0,5
Medio compacta	0,5-1
Compacta	1-2
Muy compacta	2-4
Dura	> 4

Como se puede ver en la bibliografía del libro (Das, 1997) utilizan un términos el cual indica que el Q_u nos tiene diferentes tipos de consistencia el cual tendrá un rango de valores que permitirá clasificar este valor, al analizar el valor de Q_u se evidencia que material tiene una consistencia compacta.

4.1.2.2. Compresión inconfiada de arena fina con arcillas

En la figura 10 se muestra el comportamiento del suelo según el ensayo de compresión inconfiada de arena fina con arcillas hallada en el sondeo **SE3-13**.

Figura 10. Gráfica esfuerzo deformación para arenas.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos tomados del IDU (ver el anexo 7).

Los suelos secos friables, los materiales fisurados o que tienen estructuras de falla, son muestras que tienen cantidades significantes de limos o arenas, (todos los cuales tienen normalmente propiedades cohesivas) no pueden ser analizados por este método para obtener valores significativos de la resistencia a la compresión no confinada, pero igual mente se calcularon sus parámetros correspondientes dado que tiene un componente cohesivo que está vinculado con las arcilla. Igual que en el ensayo anterior es necesario cálculos los módulos para poder lograr un modelo completo

v POISSON	0.45
E MODULO DE ELASTICIDAD (KN/cm2)	0,0645
E MODULO DE ELASTICIDAD (Mpa)	0,64521052

El Q_u es un parámetro importante como pudimos evidenciar en el ensayo anterior ya que es aquel que nos muestra cual es el Mínimo esfuerzo compresivo necesario para romper una muestra no confinada de suelo, de forma cilíndrica, en condiciones normalizadas.

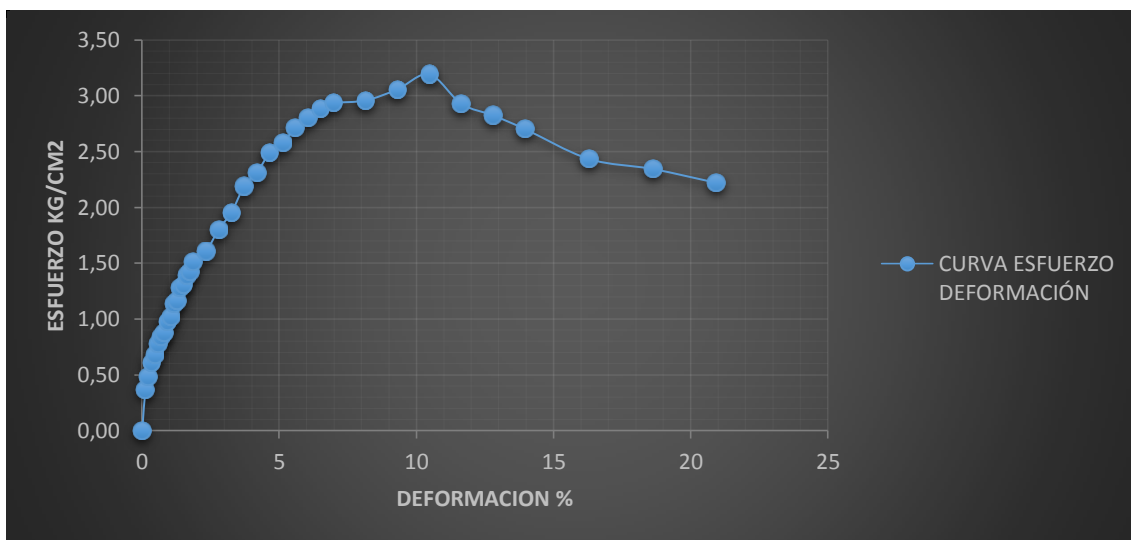
$$Q_u = 2,83 \text{ Kg/Cm}^2$$

$$C_u = 1,42 \text{ Kg/Cm}^2$$

4.1.2.3. Compresión inconfiada de arcilla limosa con grava

En la figura 11 se muestra el comportamiento del suelo según el ensayo de compresión inconfiada de arcilla limosa con grava hallada en el sondeo **SE3-13**.

Figura 11. Gráfica esfuerzo deformación para arcilla con grava.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos tomados del IDU (ver el anexo 7).

En el ensayo de compresión inconfiada solo puede realizarse con materiales cohesivos que no expulsan agua durante la etapa de carga del ensayo y que mantienen su resistencia intrínseca después de remover las presiones de confinamiento, como las arcillas o los suelos cementados pero en este caso se tiene una combinación de dos materiales que son arcillas y las arenas por ende se

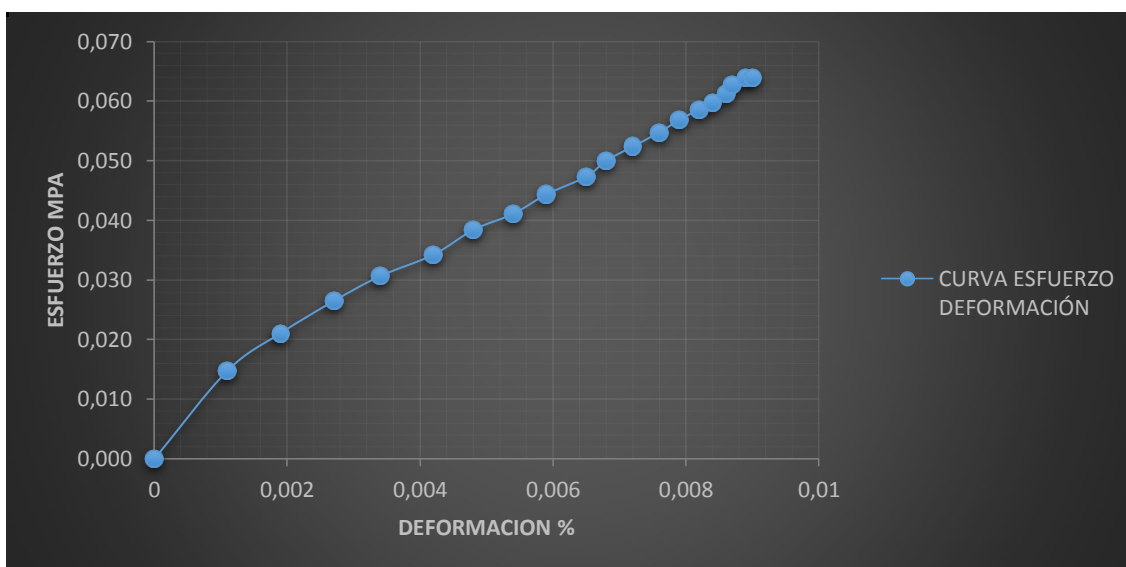
espera que el comportamiento de este material sea diferente pero de igual manera se le realizó el ensayo dado que tiene propiedades cohesivas.

v POISSON	0,35
E MODULO DE ELASTICIDAD (kgf/cm2)	2,38570093
E MODULO DE ELASTICIDAD (Mpa)	0,23395734

4.1.2.4. Compresión inconfiada rocas

En la figura 12 se muestra el comportamiento de la roca según el ensayo de compresión inconfiada de roca hallada en el sondeo **SE3-13**.

Figura 12. Gráfica esfuerzo deformación para rocas.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos tomados del IDU (ver el anexo 7).

Este ensayo es necesario analizarlo ya que con es aquel que nos permite determinar cuál es la resistencia uniaxial no confinada de la roca o en otros términos su resistencia a la compresión simple.

Al tener los datos y la gráfica de este ensayo este nos permite clasificar la roca dependiendo de su resistencia y de su deformabilidad.

$$Q_u = 0,65 \text{ Kg/Cm}^2$$

$$C_u = 0,33 \text{ Kg/Cm}^2$$

$$Q_u = 0,065 \text{ Mpa}$$

$$C_u = 0,033 \text{ Mpa}$$

ν POISSON	0,35
E MODULO DE ELASTICIDAD (Mpa)	0,16576956

Figura 13. Tabla de resistencia a la compresión para rocas.

Resistencia a la compresión simple (MPa)	ISRM (1981)	Geological Society of London (1970)	Bieniawski (1973)	Ejemplos
< 1	Suelos			
1-5	Muy blanda	Blanda > 1,25	Muy baja	Sal, lutita, limolita, marga, toba, carbón.
5-12,5	Blanda	Moderadamente blanda		
12,5-25		Moderadamente dura		
25-50	Moderadamente dura		Baja	Esquisto, pizarra.
50-100	Dura	Dura	Media	Rocas metamórficas esquistosas, mármol, granito, gneiss, arenisca, caliza porosa.
100-200	Muy dura	Muy dura	Alta	Rocas ígneas y metamórficas duras, arenisca muy cementada, caliza, dolomía.
> 200		Extremadamente dura	Muy alta	Cuarcita, gabbro, basalto.
> 250	Extremadamente dura			

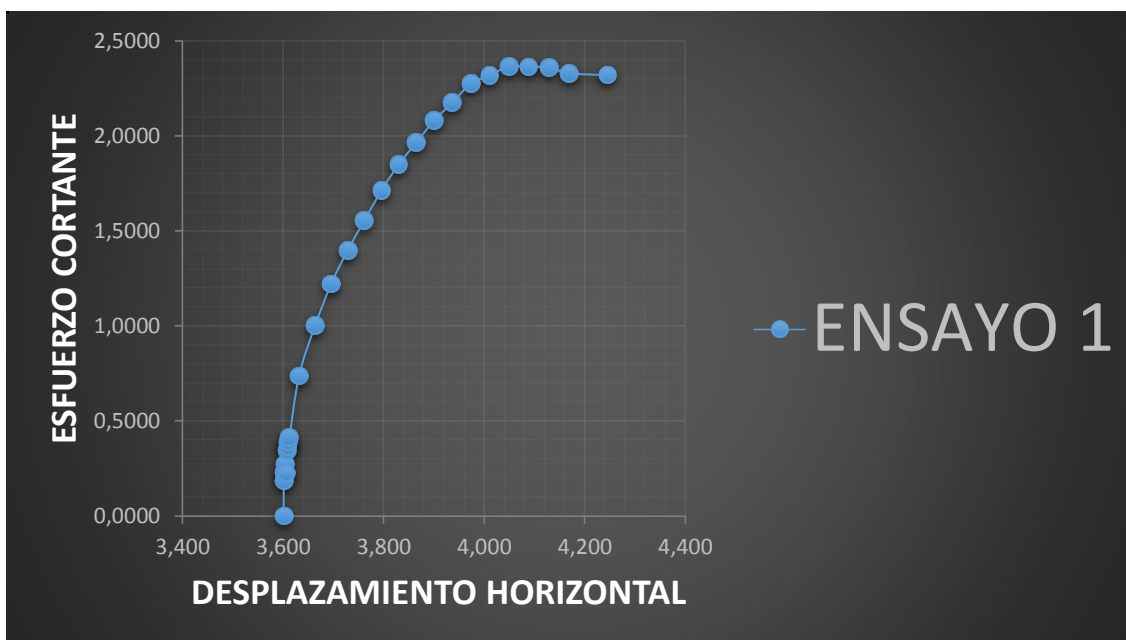
Al clasificar nuestra roca con los valores obtenidos claramente evidenciamos que la resistencia a la compresión es muy baja por ende nuestro suelo según la **figura 11** nuestra roca tiende a tener comportamientos más de tipo de suelo que de roca, independientemente de esto es necesario calcular sus valores de elasticidad y relación de poisson para lograr un modelo completo.

4.1.2.5. Ensayo de corte directo para arcillas

En las siguientes graficas se muestra el comportamiento del suelo según el ensayo de corte directo de las arcillas halladas en el sondeo **SE3-13**.

La finalidad que tiene este ensayo de corte en nuestro proyecto, es que nos permite determinar cuál es la resistencia de una muestra de suelo en este caso la arcilla, la cual este material se verá sometida a fatigas y/o varias deformaciones que nos simulen dependiendo de la aplicación de una carga.

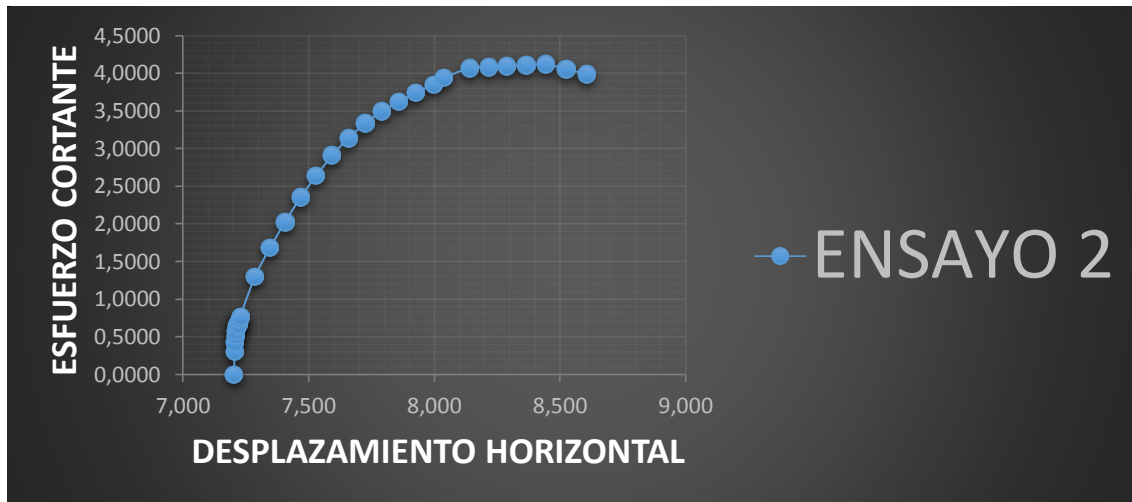
Figura 14. Ensayo 1 corte directo para arcillas.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos tomados del IDU (ver el anexo 7).

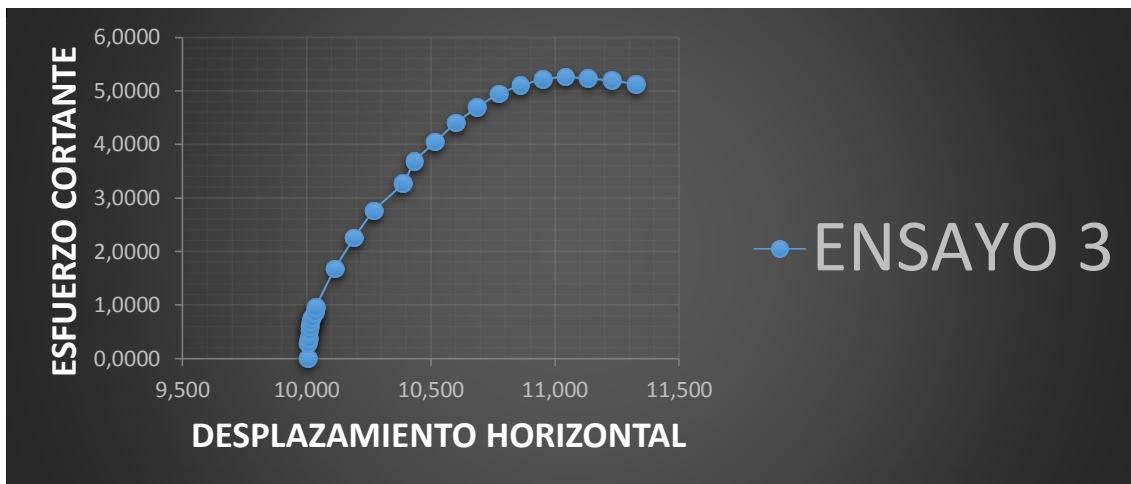
<i>ν POISSON</i>	0,35
<i>E MODULO DE ELASTICIDAD (Mpa)</i>	7,27507829

Figura 15. Ensayo 2 corte directo para arcillas.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos tomados del IDU (ver el anexo 7).

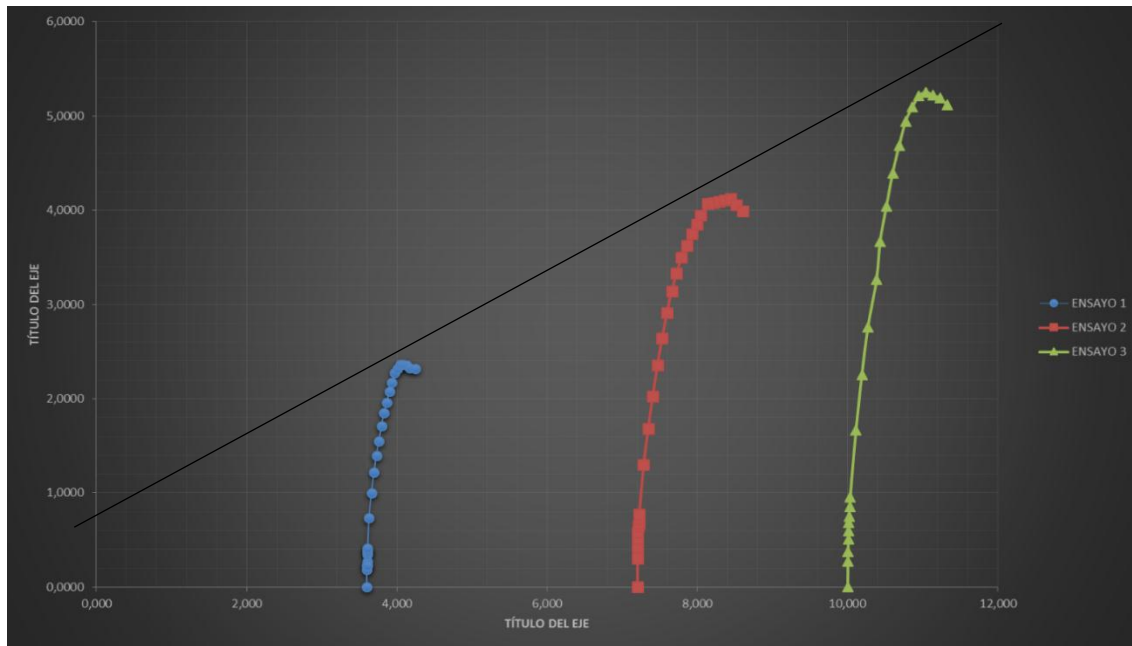
Figura 16. Ensayo 3 corte directo para arcillas.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos tomados del IDU (ver el anexo 7).

En este ensayo la arcilla tiende a alcanzar el estado crítico la cual se denomina rotura a volumen constante al obtener nuestras tres graficas evidenciamos que el material al verse sometido a varias cargas tuvo deformaciones diferentes con estas tres graficas podemos hacer un consolidado de las tres que es importante ya que con el podemos calcular cual es el Angulo de fricción y como es su cohesión, este consolidado se mostrara en la siguiente gráfica.

Figura 17. Gráfica consolidado total de los 3 ensayos



Fuente. Elaboración propia a partir de los datos tomados del IDU (ver el anexo 7).

Cohesion Mpa	0,05668
Angulo de Friccion ϕ	23,03°

Al obtener esta grafica que es el consolidado de la aplicación de diferentes cargas sobre la muestra la línea tangente que va en dirección al eje 0 nos indica cual es la cohesión inicial de la muestra y al sacarle la pendiente a línea tangente podemos conocer cuál es el ángulo de fricción de la muestra.

Al tener este ángulo de fricción se correlaciono con otra metodología para saber el ángulo de fricción y verificar si el ángulo de fricción oscilaba entre los mismos rangos de valores, esta correlación se desarrolló por el artículo de Mario Gonzales Spt el cual nos da varias formas de poder calcular este ángulo de fricción dependiendo del número de golpes realizados en el sondeo, y efectivamente el ángulo de fricción esta entre los rangos por estas dos metodologías de desarrollo (PARA MEJOR ENTENDIMIENTO Y VISUALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS Y EL CÁLCULO DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN VER EL ANEXO 7 Y 8).

TABLA RESUMEN DE PARÁMETROS DEL SUELO PARA EL MODELO REQUERIDO

Nº Material	Tipo de material	Cohesión Mpa	Angulo de Fricción	Módulo de elasticidad Mpa	Relación de poisson
1	Relleno Arcilloso	10.5	18.06	0.23	0.35
2	Arcilla con indicios de arena	10.5	23.68	0.23	0.35
3	Arena con limos	0	37	0.64	0.45
4	Arcilla con Arena	25.93	35	1.38	0.35
5	Arcilla	10.5	28.12	0.23	0.2
6	Arcillolitas	10.5	28	7.27	0.4

4.2. MODELACIÓN GEOTÉCNICA DE LA ZONA

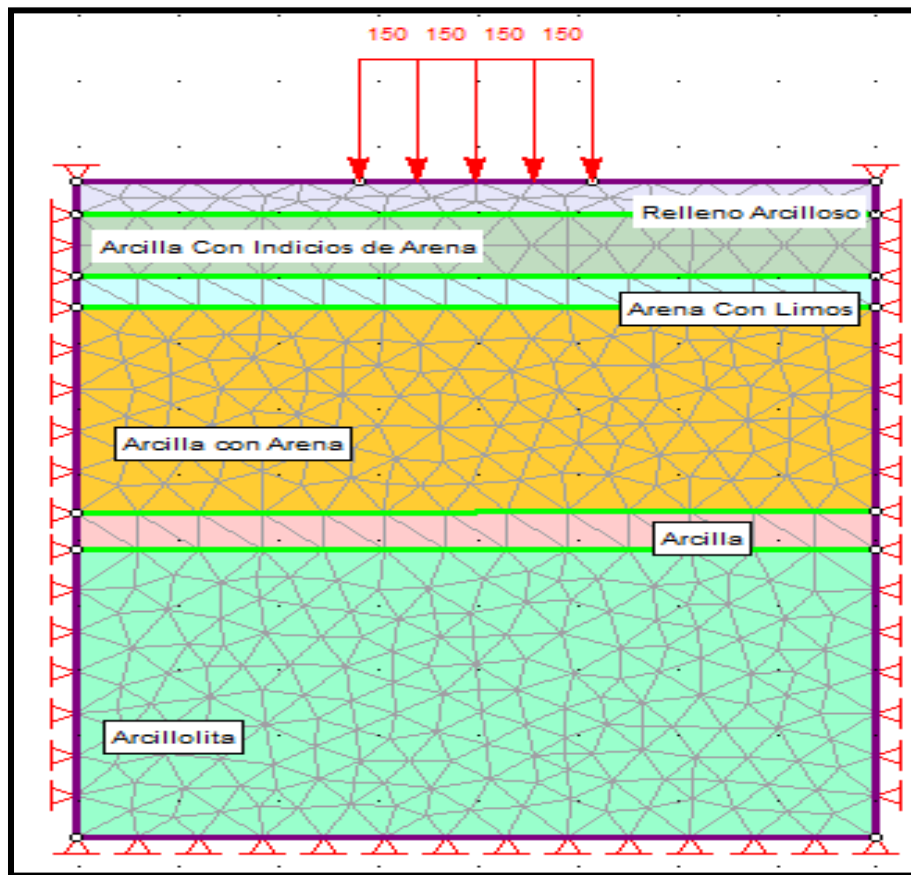
Para la Fase dos del proyecto la cual hace referencia a la modelación geotécnica de la zona, se tuvo en cuenta el planteamiento de escenarios corriendo el software Phase 2.0

Se tuvo en cuenta dos escenarios claves para el desarrollo de este modelo que fueron: una condición sin la excavación subterránea y otra condición con excavación subterránea, con el fin de evidenciar o verificar como se podría comportar cada uno de estos modelos.

Para lograr estos dos escenarios fue fundamental tener claridad sobre la litología del suelo teniendo en cuenta tipos de material, profundidades de cada material, su nivel freático, y cada parámetro de laboratorio, y también es necesario conocer la geometría del túnel subterráneo esto da un estudio más cercano a la realidad, de cómo pueden ser las condiciones del túnel logrando este modelo. A continuación se mostrará cuáles fueron los dos escenarios planteados para lograr el análisis.

En la figura 18 se muestra el escenario 1 en la cual el terreno se muestra en una condición sin excavación pero con esfuerzos en su superficie provocados por la vía existente que en este caso es la carrera 13.

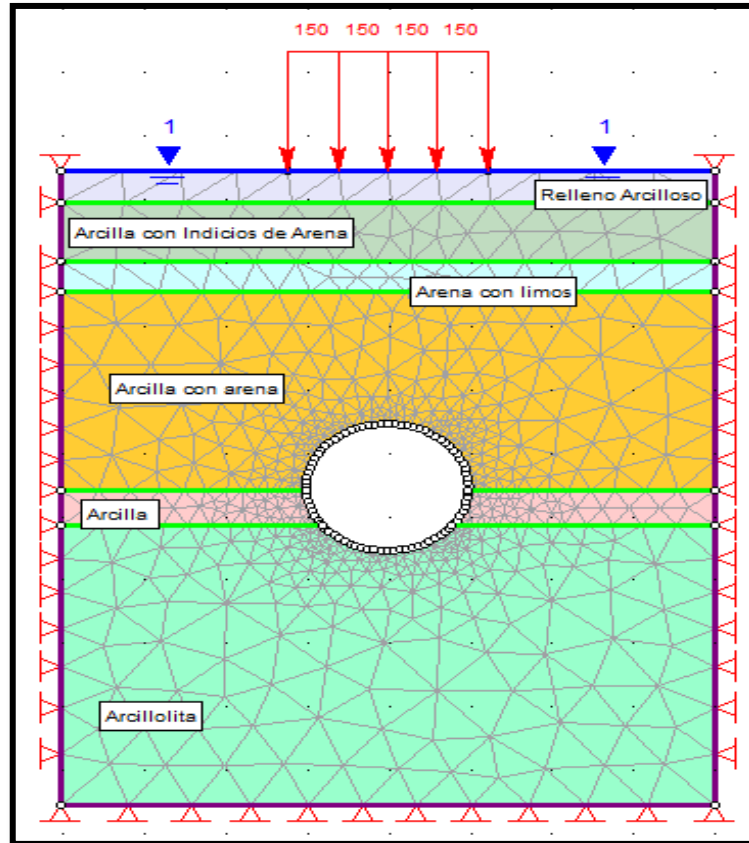
Figura 18. Modelación del Proyecto sin excavación subterránea.



Fuente: propia elaborado en el Software Phase 2.0

En la figura 19 se muestra el escenario numero 2 en el cual se ha hecho una excavacion subterranea en el modelo.

Figura 19. Modelación del proyecto con excavación subterránea

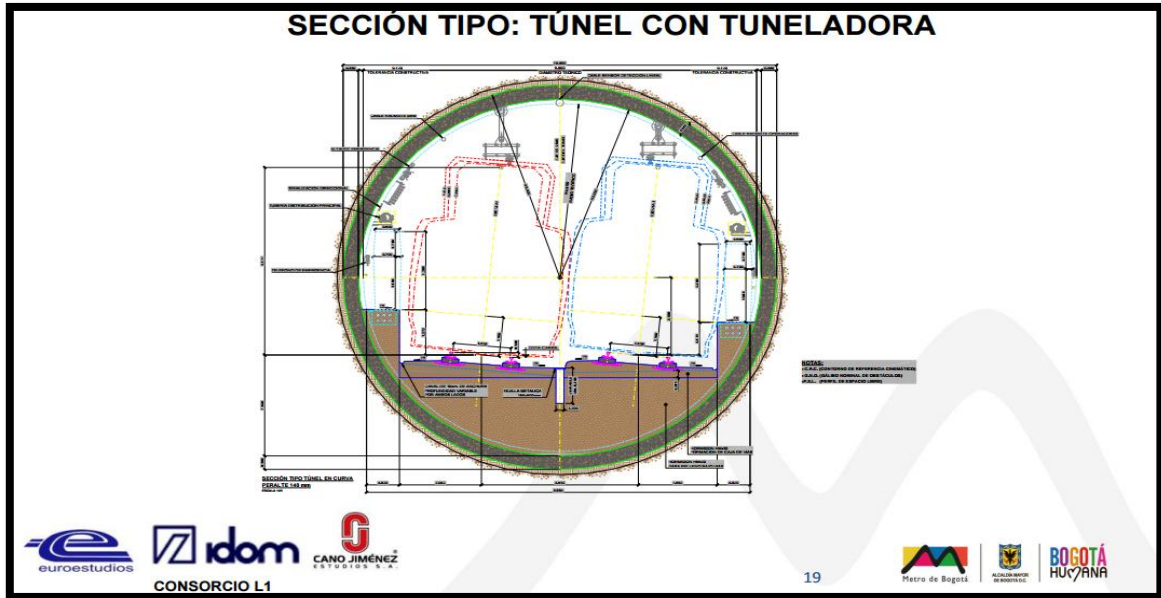


Fuente: propia elaborado en el Software Phase 2.0

4.2.1 Dimensiones de la sección del túnel

Para poder lograr el modelo es de vital importancia tener claro cuál es la geometría del túnel, (Ver anexo 9).

Figura 20. Sección túnel Metro de Bogotá



Las características que contendrán este túnel son las siguientes:

- ✓ Diámetro interno $\varnothing i = 10'04$ m
- ✓ Espesor de dovela de 38 cm
- ✓ Anillo universal de 6+1
- ✓ dovelas Relación entre la dovela de llave y la dovela tipo de 1/2 Dovelas rectangulares con un ángulo de $6'5^\circ$ en las juntas de la dovela de clave (Medido en el desarrollo del intradós)
- ✓ Longitud media del anillo de $1'2/1'8$ m
- ✓ Radio mínimo de curvatura de 265 m
- ✓ Número de posiciones= 13
- ✓ Ángulo adicional de 2° en las juntas radiales para la dovela de llave (Medidos en el plano del anillo) Geometría tal que la distancia entre el punto de aplicación de la carga de los gatos y la junta longitudinal sea la máxima posible.

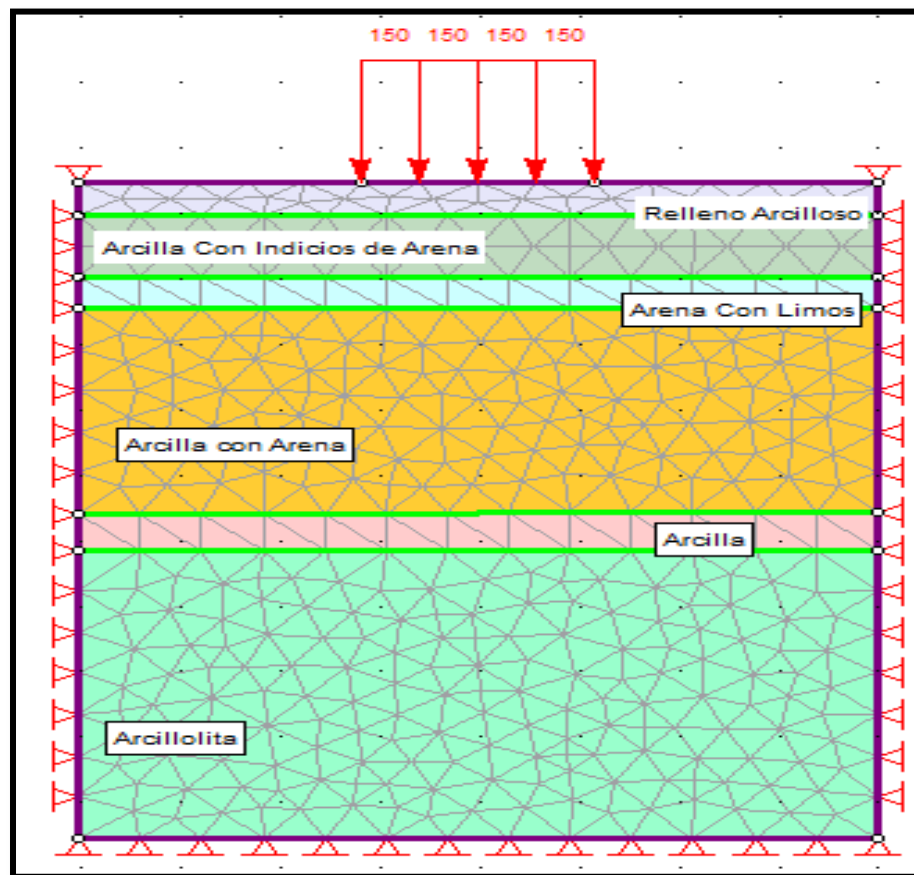
Con estos datos es posible trazar una geometría muy cercana del modelo a desarrollar.

ESCENARIO 1. Modelación del proyecto sin excavación subterránea.

Para poder lograr esta parte del modelo fue necesario tener en cuenta parámetros de resistencia, tipo de suelo, profundidad del material, su nivel freático y cuál es la carga que genera la vía con un tráfico actual.

A continuación en la figura 21 se mostrara como está el modelo actual y como son los análisis que se desarrollara en este modelo.

Figura 21. Modelo actual sin excavación subterránea.

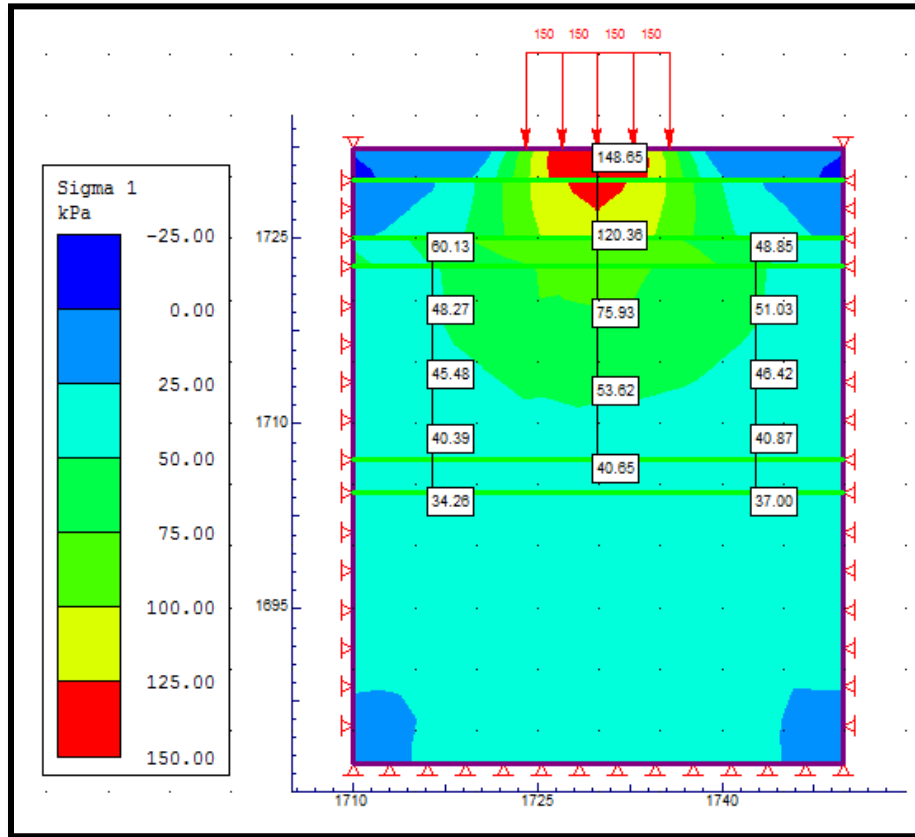


Fuente: propia elaborado en el Software Phase 2.0

- **ANÁLISIS SIGMA 1 “ σ_1 ”**

En la figura 22 se mostrara como es la distribución del fuerza principal SIGMA 1 “ σ_1 ” a profundidad.

Figura 22.Esfuerzo principal Sigma 1 “ σ_1 ” sin túnel



Fuente: propia elaborado en el Software Phase 2.0

En la figura 22 se puede observar que el campo de esfuerzos solo se ve afectado por la carga distribuida que contiene unos 150KN lo cual hace referencia que esta carga contiene aproximadamente unas 15 Ton, este valor es referenciado dado a la capacidad que tiene la vía considerando el tipo de vehículo que transcurre en este sector y su periodo de transurrencia, según la norma del IDU esta vía tiene que tener un diseño aproximado entre unas 15 Ton a 20 Ton dado que es una vía en el cual transcurre bastante vehículo sea de carga pesada o liviana. Para nuestro análisis esta carga es de suma importancia ya que esperamos que genere un nivel alto de esfuerzo en nuestro modelo.

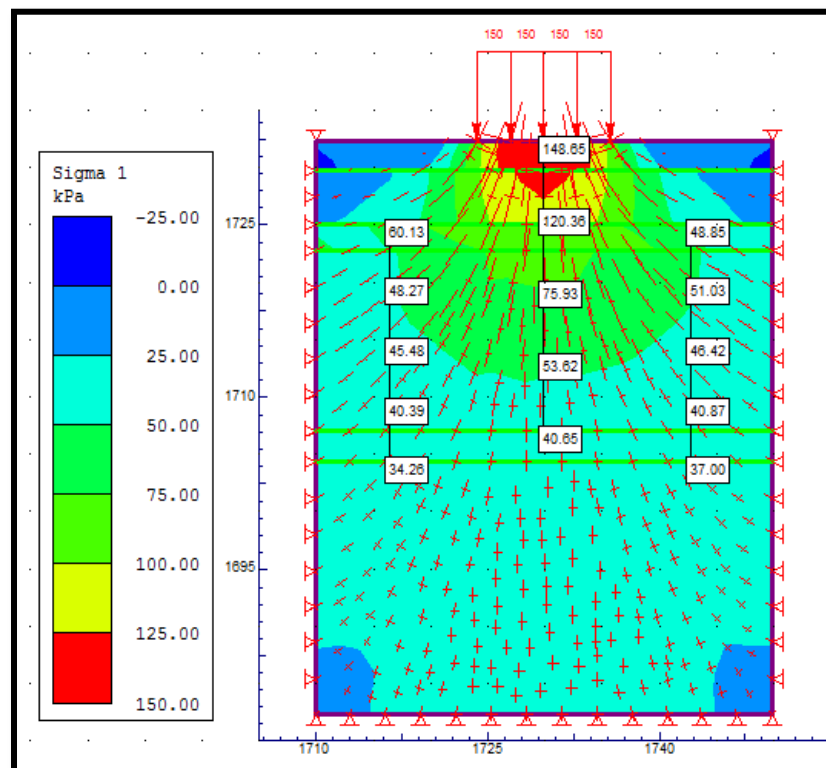
Como podemos evidenciar como esta distribuidos los esfuerzos a medida que incrementa la profundidad, en la parte superior encontramos un alto nivel de esfuerzo de 148.65 Kpa a medida que la profundidad cambia este esfuerzo está

disminuyendo considerablemente a condiciones de entre 70 Kpa y 40 Kpa. Claramente se evidencia que Sigma 1 " σ_1 " es más fuerte en la parte superior central y en la parte central del modelo.

- **ORIENTACIÓN DEL ESFUERZO PRINCIPAL SIGMA 1 " σ_1 "**

En la figura 23 encontraremos como es la dirección del esfuerzo principal mayor.

Figura 23. Orientación del esfuerzo principal sigma 1 " σ_1 " sin excavación.



Fuente: propia elaborado en el Software Phase 2.0

En la figura 23 las trayectorias del Esfuerzo principal se muestran como pequeñas cruces donde el eje más largo de la cruz está orientado en la dirección del mayor Esfuerzo principal en el plano (Sigma 1) y el eje corto es la dirección del menor Esfuerzo en el plano principal en el plano (Sigma 3).

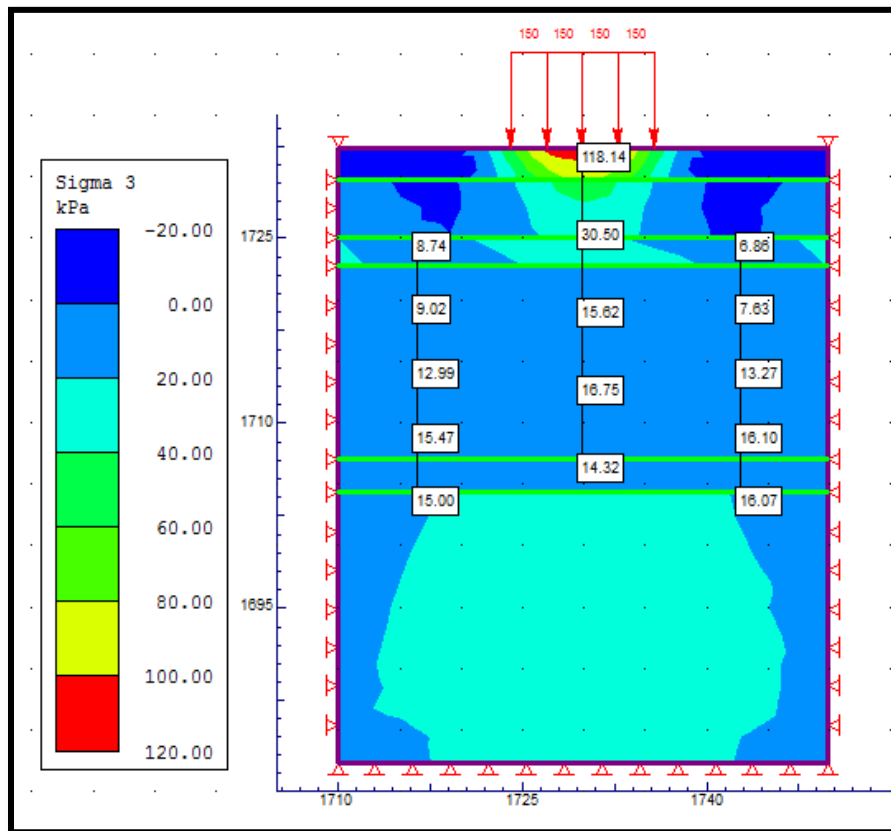
Esto quiere decir y se evidencia claramente que el esfuerzo principal Sigma 1 " σ_1 " tiene una mayor concentración en la parte superior del modelo y en la parte central

debido al peso total de la vía, el cual se tomó en cuenta el tráfico que pasa por este sector, siendo tráfico pesado y tráfico liviano.

- **ANÁLISIS SIGMA 3 “ σ_3 ”**

En la figura 24 se mostrara como es la distribución del fuerza principal SIGMA 3 “ σ_3 ” a profundidad.

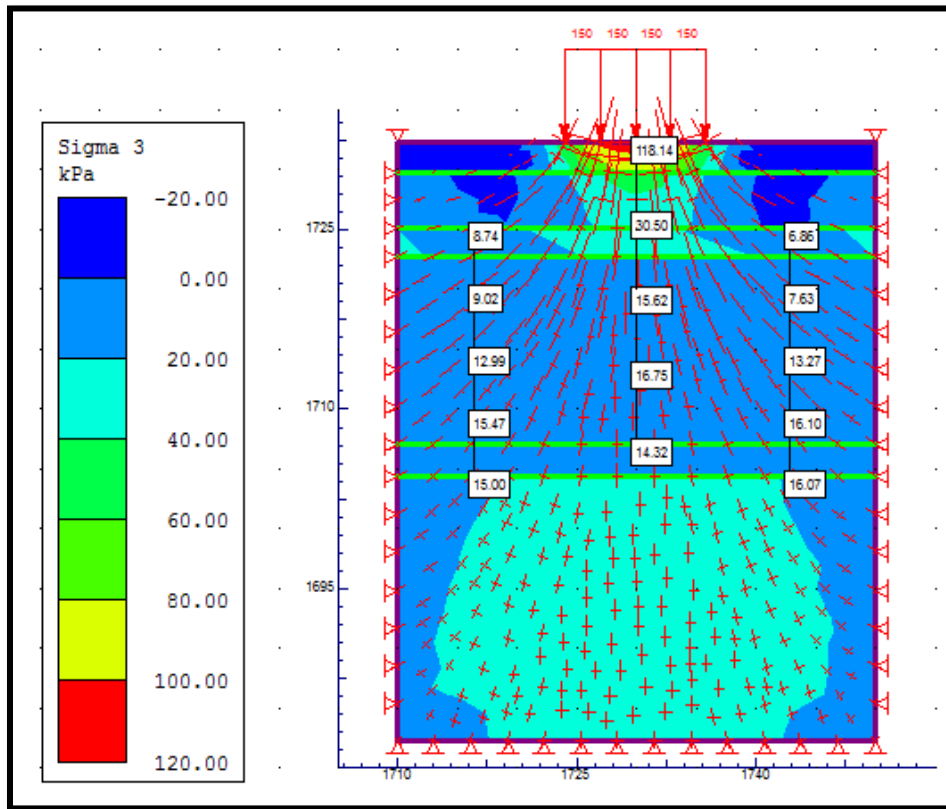
Figura 24. Esfuerzo principal Sigma 3 “ σ_3 ” sin túnel



Fuente: propia elaborado en el Software Phase 2.0

Podemos observar en la figura 22 que el efecto de esfuerzos en los contornos Sigma 3 “ σ_3 ” solo se ve afectado por la carga distribuida que hace referencia como ya indicamos y explicamos en el anterior modelo al peso de la vía con su respectivo análisis del porque tomamos esa carga para referenciar nuestro modelo. Pero en este grafico se evidencia claramente que el esfuerzo Sigma 3 “ σ_3 ” es mucho menor que el Sigma 1 “ σ_1 ” como podemos ver en la figura 22.

Figura 25. Esfuerzo principal Sigma 3 “ σ_3 ” sin excavación



Fuente: propia elaborado en el Software Phase 2.0

En la figura 23 las trayectorias del Esfuerzo principal se muestran como pequeña cruz donde el eje más largo de la cruz está orientado en la dirección del mayor Esfuerzo principal en el plano (Sigma 3) y el eje corto es la dirección del menor Esfuerzo en el plano principal en el plano (Sigma 1).

Esto quiere decir y se evidencia claramente que el esfuerzo principal Sigma 3 “ σ_3 ” es menor que el sigma 1 “ σ_1 ” esto nos da a entender que la incidencia y la acumulación de esfuerzos en el área es muy importante y hay que tenerla en cuenta ya que estos esfuerzos nos indican cómo está sometido el suelo y nos da una idea de cómo podría ser el comportamiento de este suelo.

- **FACTOR DE RESISTENCIA**

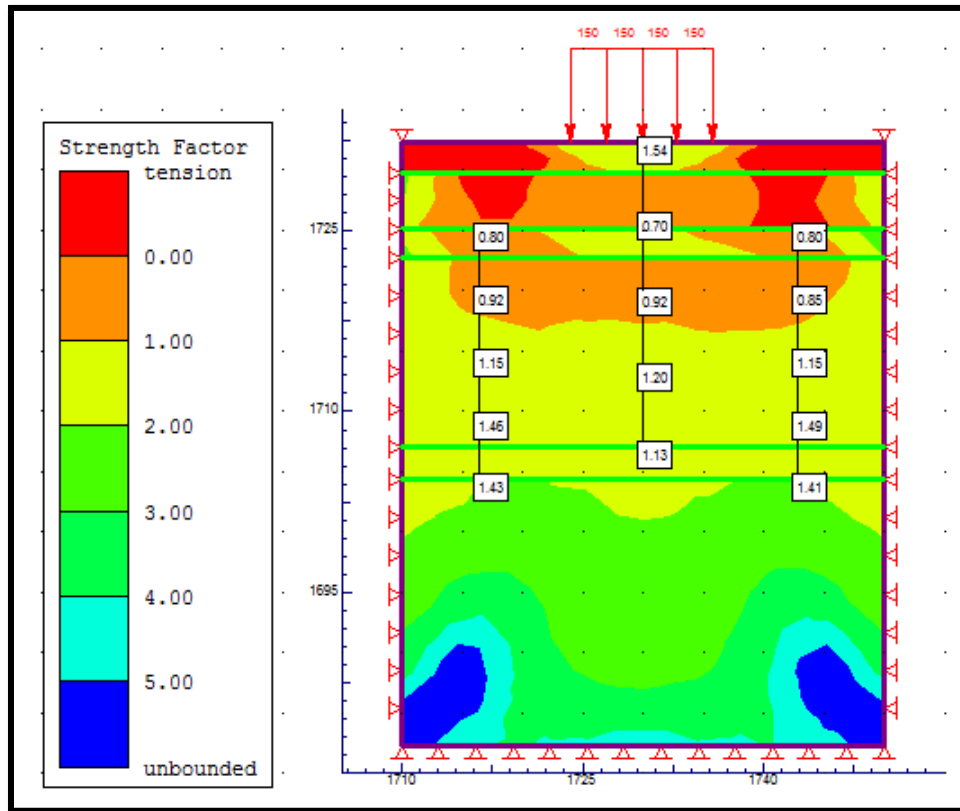
El factor de resistencia o Strength Factor sirve para representar la relación de la resistencia del material a la tensión inducida, en cualquier punto dado. La resistencia del material se basa en las propiedades de resistencia de su material, pero las tensiones inducidas se determinan por la distribución de la tensión elástica calculada a partir del análisis de elementos de contorno.

Para nuestro análisis este parámetro nos demostrara cuales son las tres tensiones principales (σ_1 , σ_3 y σ_z) el cual se utiliza para el cálculo del factor de resistencia.

Primero que todo si el factor de resistencia “Strength Factor” es menor que 1, esto indica que la tensión en el material supera la resistencia del material (es decir, el material fallaría, si se pudiera llevar a cabo un análisis de la plasticidad). Para un análisis de tensión elástica, se permite que la tensión en el material exceda la resistencia del material (es decir, fallo del material no puede ocurrir).

Por otro lado, si el factor de resistencia es mayor que 1, esto indica que la resistencia del material es mayor que la tensión inducida. Estas dos relaciones se demostraran con el modelo empleado para un mejor entendimiento de este análisis.

Figura 26. Strength Factor sin excavación

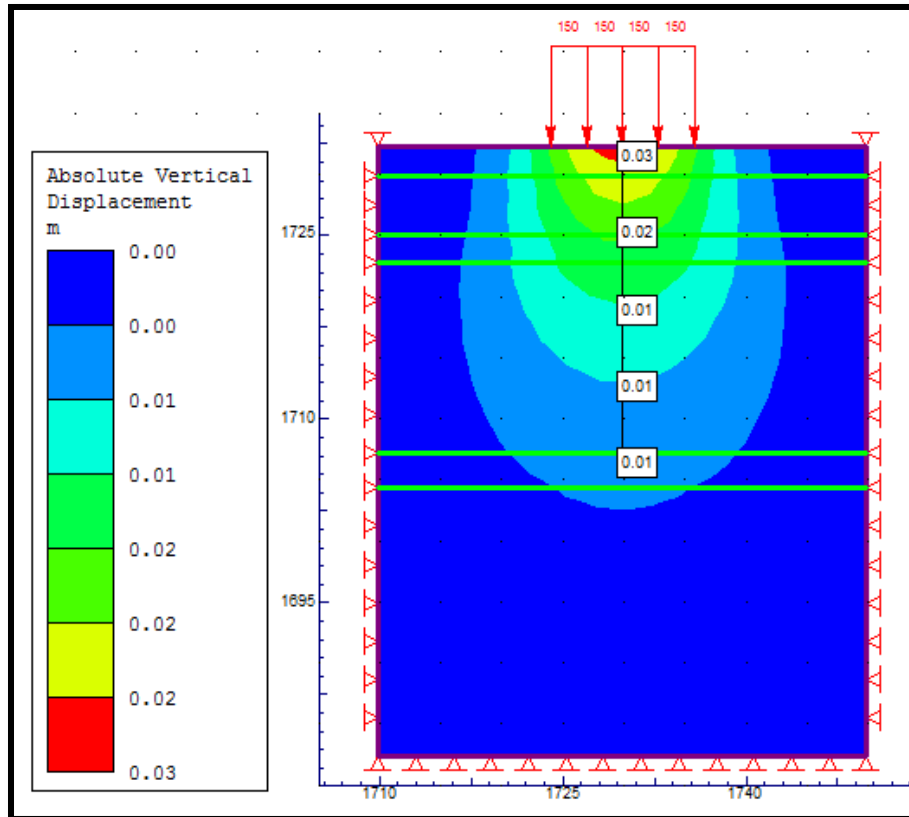


Fuente: propia elaborado en el Software Phase 2.0

En la figura 26 claramente podemos evidenciar que el material es crítico ya que la franja roja nos indica claramente que el material tendrá tendencias a fallar teniendo Strength factor entre 0.80 y 0.90, como se explicó anteriormente mientras este parámetro este por debajo de 1 el material va a tender a fallar.

- **DESPLAZAMIENTO VERTICAL**

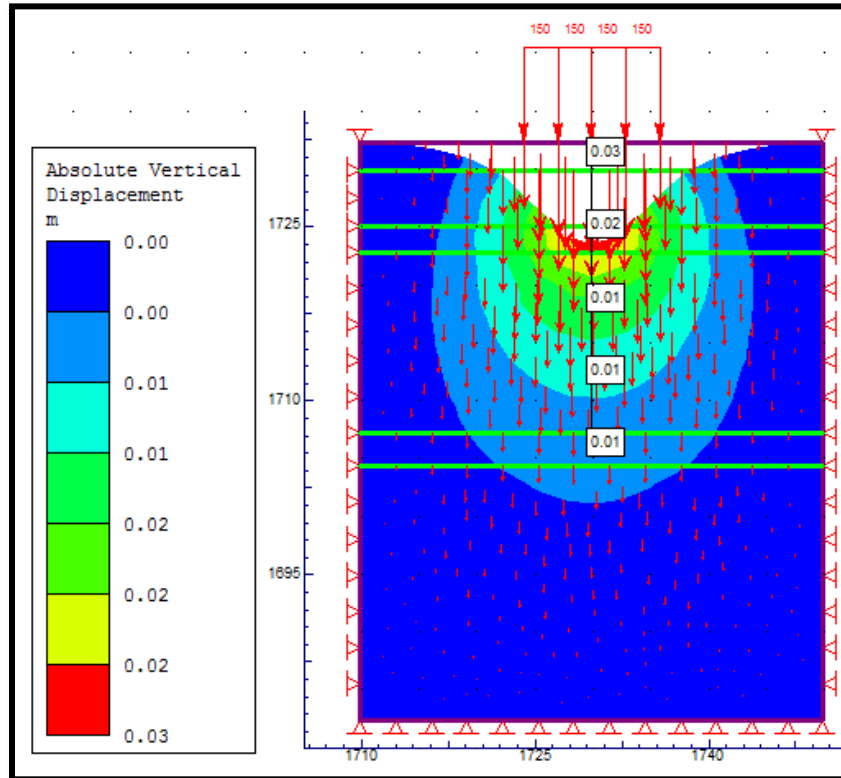
Figura 27. Desplazamiento vertical sin excavación



Fuente: propia elaborado en el Software Phase 2.0

Como podemos observar en la figura 27 el desplazamiento vertical que está generando el modelo sin túnel es considerable, Se puede observar que el desplazamiento máximo para todos los casos se está presentando cerca a nivel de terreno, efectuando deformaciones entre los 2 y 3 centímetros, teniendo una variación entre ellos a medida que va incrementando su profundidad, de esta manera se ilustra un poco en el software Phase 2 como es la influencia de estas deformaciones para poder obtener resultados más concretos y precisos.

Figura 28. Desplazamiento vertical con su deformación



Fuente: propia elaborado en el Software Phase 2.0

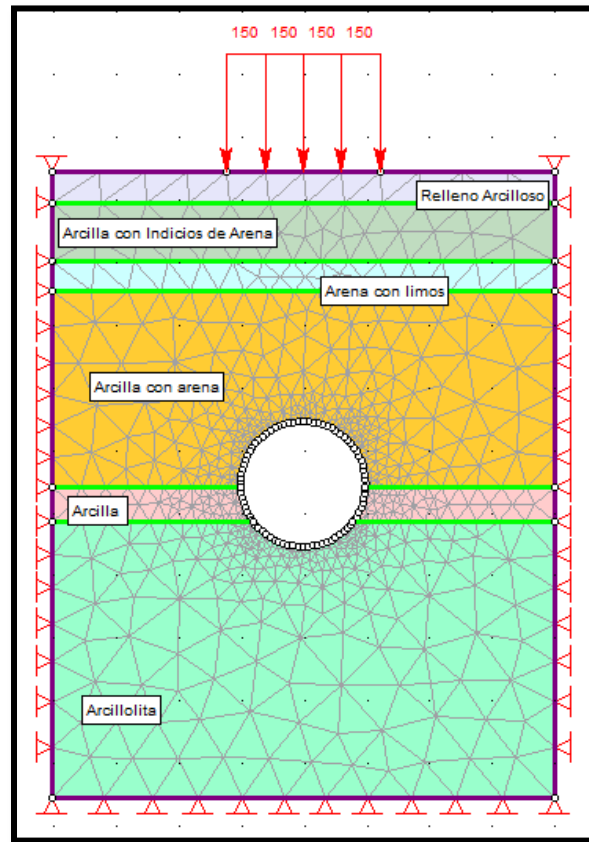
Esta la figura 28 y 27 se demostró que es necesario hacer un análisis de asentamientos para todo tipo de obra, dado que al generar una carga sobre la superficie esta tendrá una intención a generar una deformación vertical, y es necesario controlar estas deformaciones dado que presentaría problemas en su construcción.

ESCENARIO 2. Modelación del proyecto con excavación

Para poder lograr esta parte del modelo fue necesario tener en cuenta parámetros de resistencia, tipo de suelo, profundidad del material, su nivel freático y cuál es la carga que genera la vía con u trafico actual y lo más importante tener la geometría de excavación y la profundidad de esta excavación.

A continuación se mostrara como está el modelo actual y como son los análisis que se desarrollara en este modelo

Figura 29. Modelación del proyecto con excavación

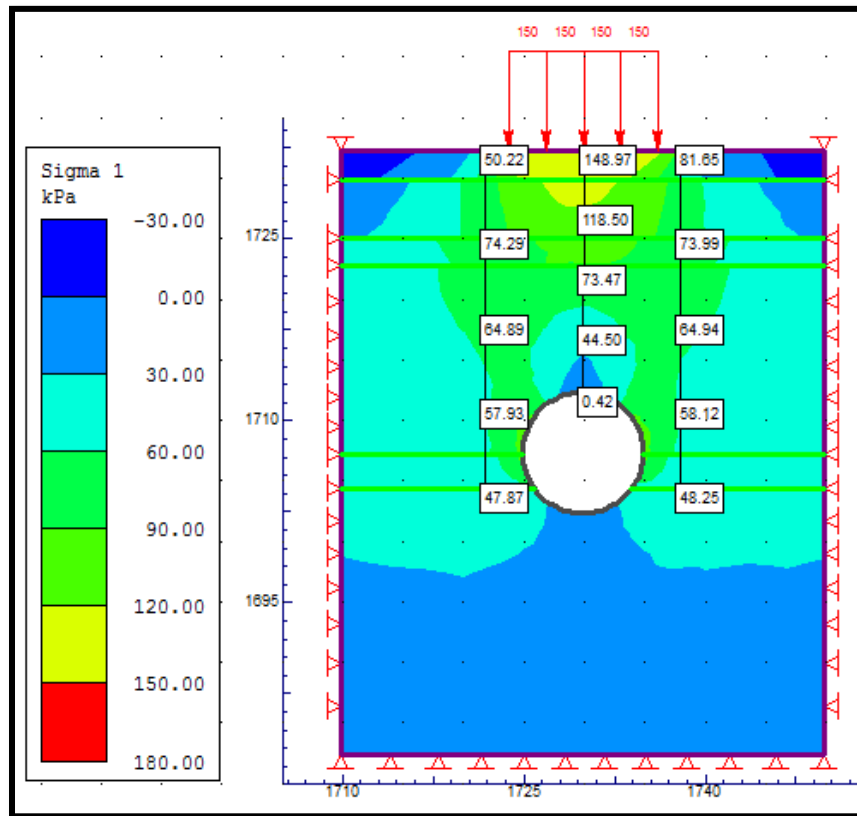


Fuente: propia elaborado en el Software Phase 2.0

ANÁLISIS SIGMA 1 “ σ_1 ” CON EXCAVACIÓN

En esta sección se mostrara como es la distribución del fuerza principal SIGMA 1 “ σ_1 ” a profundidad, ya teniendo una excavación subterránea.

Figura 30. Esfuerzo principal Sigma 1 " σ_1 " con excavación



Fuente: propia elaborado en el Software Phase 2.0

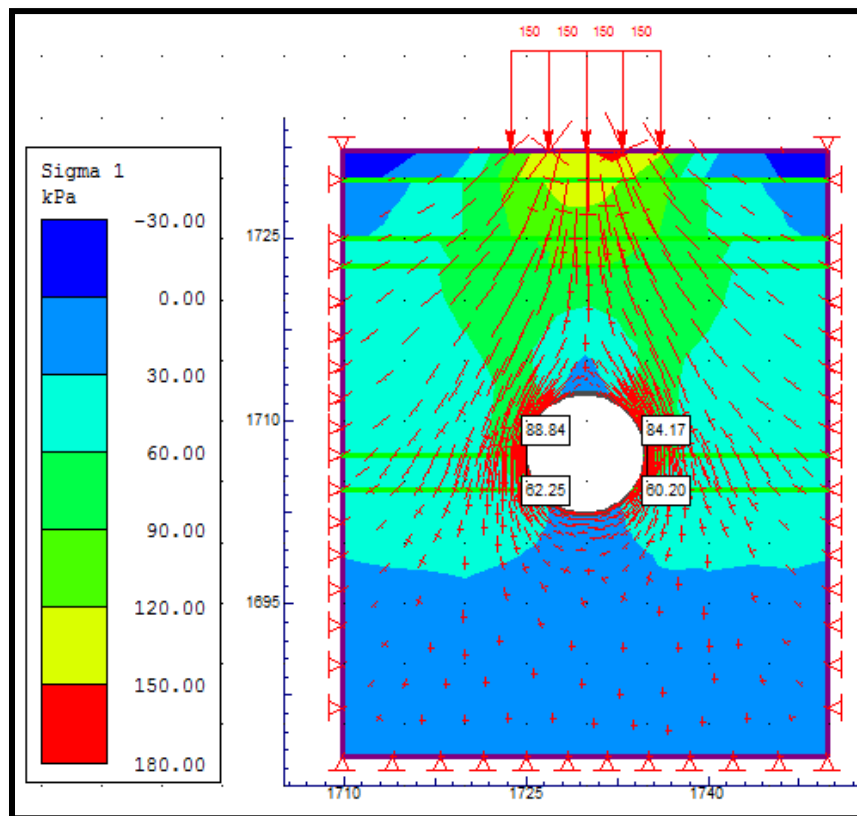
En la figura 30 se puede observar que el campo de esfuerzos solo se ve afectado por la carga distribuida que contiene unos 150KN, este valor se referencio dado a la capacidad que tiene la vía considerando el tipo de vehículo que transcorre en este sector y su periodo de transurrencia, estos parámetros se explicaron anteriormente. En nuestro análisis esta carga es de suma importancia ya que esperamos que genere un nivel alto de esfuerzo en nuestro modelo, como podemos evidenciar como es la distribución de los esfuerzos a medida que incrementa la profundidad su distribución tiende a reducirse, en la parte superior encontramos el esfuerzo máximo de 148.97 Kpa esto es aproximadamente unas 14 toneladas, comparando con el modelo anterior este esfuerzo es mayor y podemos inferir que al incrementar su esfuerzo podemos decir que su desplazamiento vertical también tendra a tener un aumento, pero a medida que

la profundidad cambia este esfuerzo está disminuyendo considerablemente a condiciones de entre 120 Kpa y 45 Kpa. Claramente se evidencia que Sigma 1 “ σ_1 ” es más fuerte en la parte superior central.

ORIENTACIÓN DEL ESFUERZO PRINCIPAL SIGMA 1 “ σ_1 ” CON EXCAVACIÓN

En esta sección observaremos como es la concentración de esfuerzos más crítica en el túnel.

Figura 31. Orientación del esfuerzo principal sigma 1 “ σ_1 ” con excavación



Fuente: propia elaborado en el Software Phase 2.0

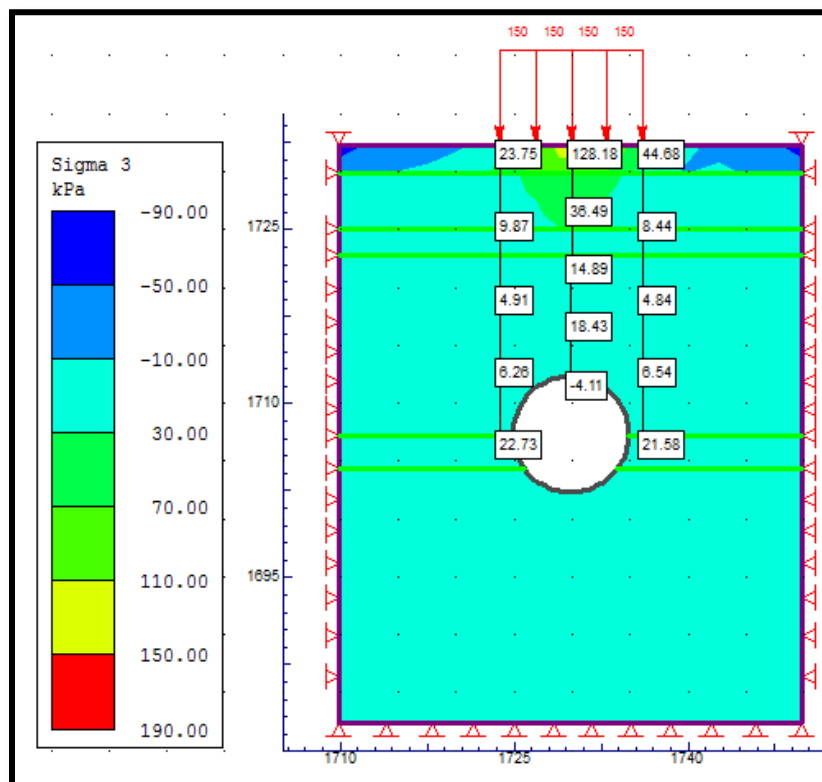
En la figura 31 la trayectoria del Esfuerzo principal se muestran como pequeña cruz donde el eje más largo de la cruz está orientado en la dirección del mayor Esfuerzo principal en el plano (Sigma 1) y el eje corto es la dirección del menor Esfuerzo en el plano principal en el plano (Sigma 3).

Esto quiere decir y se evidencia claramente que el esfuerzo principal Sigma 1 “ σ_1 ” tiene una mayor concentración las paredes del túnel estas paredes lo cual están sometidas a unos esfuerzos altos que oscilan entre los 80 Kpa y 60 Kpa y estos esfuerzos podrían afectar esta obra intentando deformar la sección de este tunel.

- **ANÁLISIS SIGMA 3 “ σ_3 ” CON EXCAVACIÓN**

En esta sección se mostrara como es la distribución del fuerza principal SIGMA 3 “ σ_3 ” a profundidad, ya teniendo una excavación subterránea.

Figura 32. Esfuerzo principal Sigma 3 “ σ_3 ” con excavación



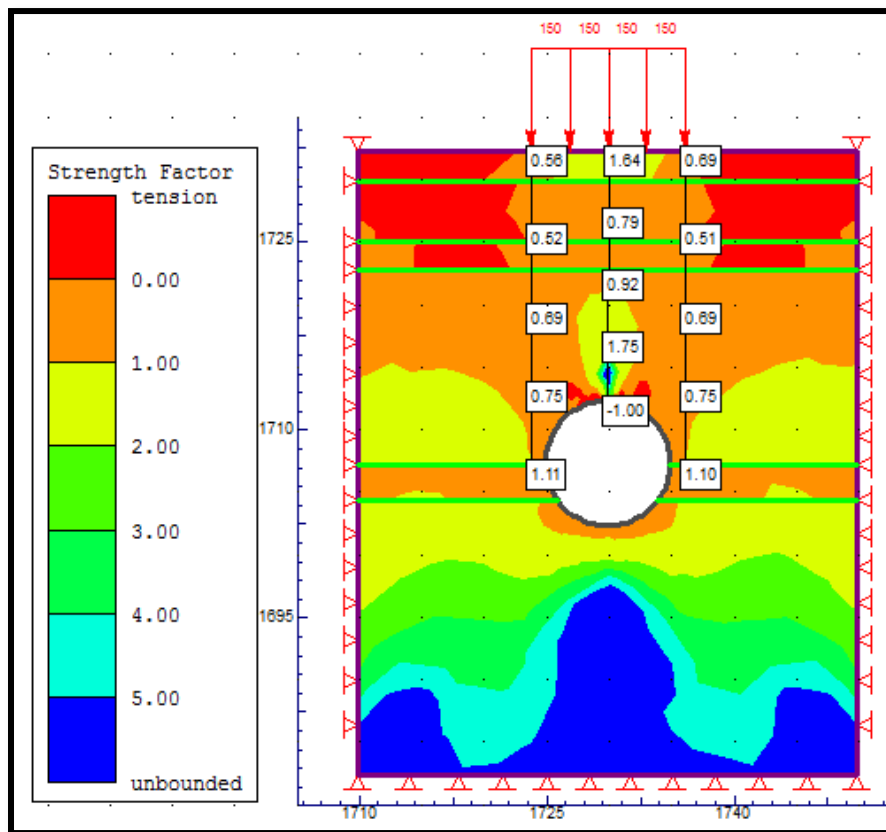
Fuente: propia elaborado en el Software Phase 2.0

En la figura 32 al comparar Sigma 3 “ σ_3 ” con Sigma 1 “ σ_1 ” podemos observar como es la variación de esfuerzos con el modelo anterior sin excavación, esta comparación nos indica que al generar una excavación subterránea estos esfuerzos incrementaran entre un rango de 118 Kpa a 128 Kpa debido a que el suelo es alterado mecánicamente por la excavación subterránea.

- **FACTOR DE RESISTENCIA**

Como mencionamos anteriormente para este caso es necesario analizar dos variables el cual se explicó anteriormente y era si el “*Strength Factor era menor que 1*” o que si el “*Strength Factor era mayor que 1*”. Para mejor entendimiento se mostrara el modelo realizado de este parámetro.

Figura 33. Strength Factor con excavación



Fuente: propia elaborado en el Software Phase 2.0

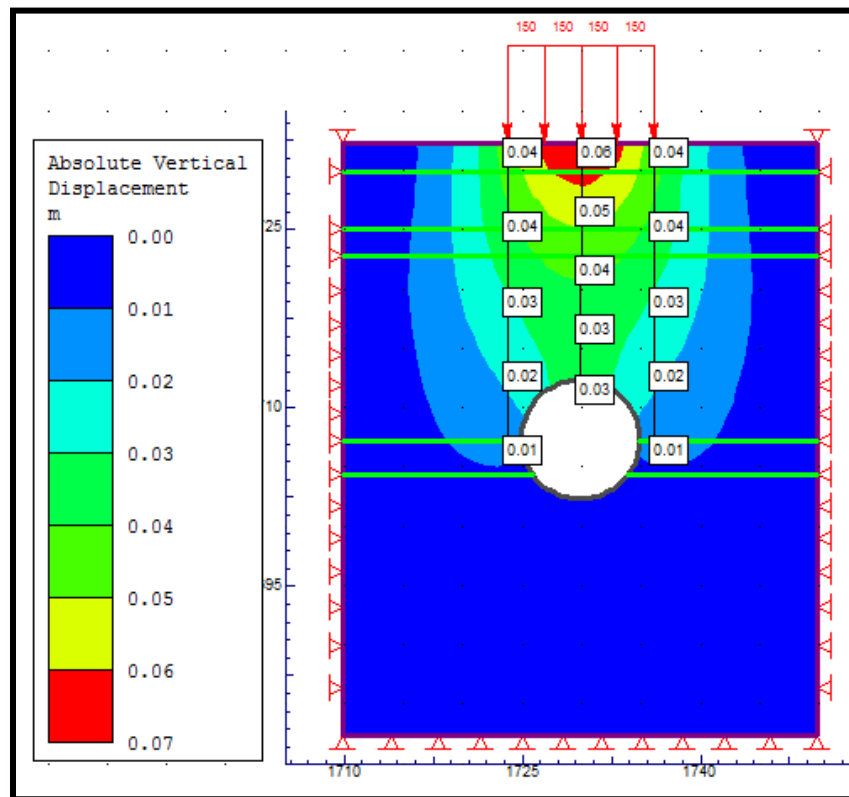
En la figura 33 claramente evidenciamos que el material es crítico en ciertas partes del terreno como por ejemplo en los hastiales del túnel, sus valores están muy redondeados hacia el valor límite de falla el cual oscilan entre 1.11 y 0.75, pero también tenemos que tener en cuenta que en el terreno se encuentran materiales que están por debajo de este parámetro y la tensión del material supera

la resistencia, esto indica que la tensión en el material supera la resistencia del material (es decir, el material fallaría).

Este modelo nos da un análisis claro de que el material tendrá tendencias a fallar mientras el Strength factor aumente el material poseerá mejores propiedades de resistencia.

- **DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL CON EXCAVACIÓN**

Figura 34. Desplazamiento horizontal con excavación

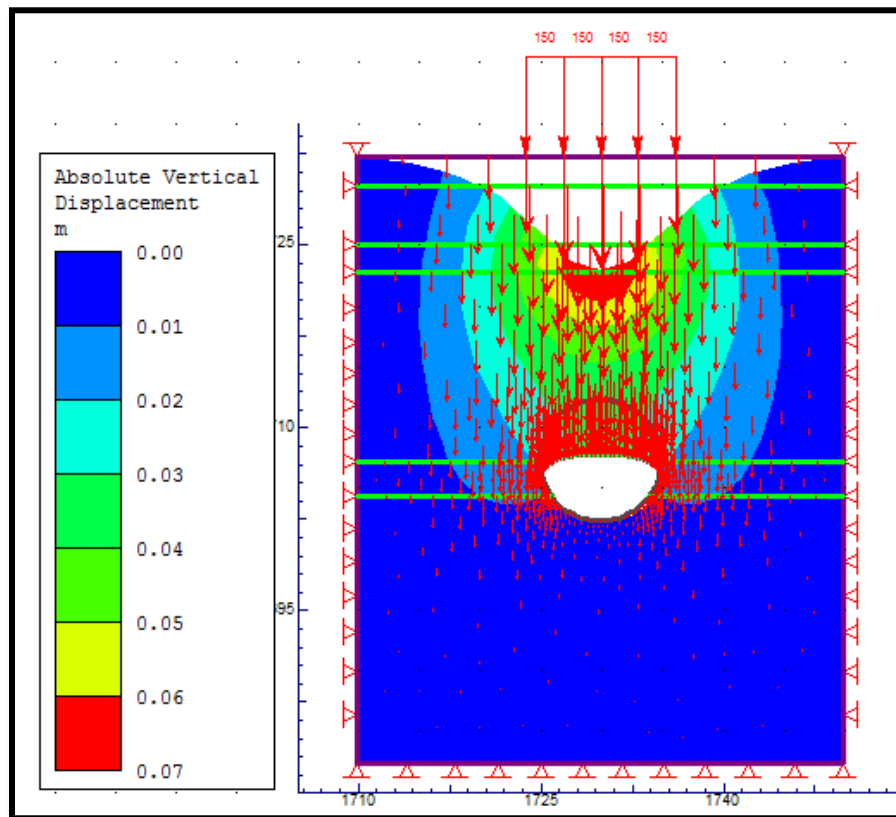


Fuente: propia elaborado en el Software Phase 2.0

Como podemos observar en la figura 34 este es el parámetro más importante del modelo ya que con el analizamos que tanto puede afectar la intervención del suelo que tanto puede desplazarse verticalmente este terreno.

El desplazamiento vertical que está generando el modelo con excavación es considerable al modelo anterior , Se puede observar que el desplazamiento máximo para todos los casos se está presentando cerca a nivel de terreno, efectuando deformaciones entre los 6 y 4 centímetros aumentando casi el doble comparando con el modelo anterior, claro está que es una deformación que tiene una variación entre ellos a medida que va incrementando su profundidad, de esta manera se ilustra un poco en el software Phase 2 como es la influencia de estas deformaciones para poder obtener resultados más concretos y precisos.

Figura 35. Desplazamiento vertical con la excavación y su deformación



Fuente: propia elaborado en el Software Phase 2.0

Esta la figura 35 y 34 se demostró que es necesario hacer un análisis de asentamientos o deformaciones para todo tipo de obra, dado que al generar una carga sobre la superficie esta tendrá una intención a generar una deformación

vertical, y es necesario controlar estas deformaciones dado que presentaría problemas en su construcción.

Pero para nuestro caso el túnel analizado nos indica que las deformaciones son considerables y deben tratarse con el mayor análisis posible ya que Bogotá tiene suelos muy comprensibles y pueden ser afectados con facilidad ya sean agentes como el agua o por agentes atmosféricos.

V. CONCLUSIONES

1. En los tres estudios de suelos realizados en el sector entre la calle 42 y la calle 45 por parte del IDU se evidencio presencia de diferentes tipos de materiales en cada sondeo realizado, el cual fue necesario analizar uno por uno verificando cual era la variación de cada material y cuál era el comportamiento mecánico de este material dependiendo de su profundidad ya que esto nos puede dar un análisis más detallado con el cual pudimos cumplir el análisis de nuestro proyecto.
 - Para el sondeo **SEL-13**, de acuerdo al estudio de suelos analizado, posee una gran variedad de características mecánicas de suelo, en el cual también contiene un nivel freático a 9 metros de profundidad, lo que quiere decir que la presencia de agua en este diseño es inminente y que se deben que tomar las medidas correspondientes para poder darle un manejo adecuado a estas aguas. También se concluyó que el suelo más predominante en este sector es de material de Arcilloso, y también se encontró una roca entre los 35m y 50 de profundidad pero es una roca que contiene propiedades mecánicas y de resistencia muy bajas.
 - Para el sondeo **SE3-14**, claramente se concluye que el nivel freático es cada vez más crítico dado a que lo encontramos a 1.50 metros de profundidad, el agua en este proyecto es claramente importante y no puede ser evadida. La presencia de agua en Bogotá y en el sector es normal dado que Bogotá está situado en depósitos lacustres y era de esperarse encontrar niveles freáticos críticos como los de este proyecto, igual que en el anterior sondeo se evidenciaron materiales como limos,

Materia Orgánica, Concreto Hidráulico, pero el material que predomina como en el anterior es la arcilla sin ningún indicio de roca hasta los 50 metros.

- Para el sondeo **SEL-15**, de acuerdo al estudio de suelos realizado se concluye que el sondeo se comportó de manera diferente dado que no se encontró nivel freático y no se reportó en el estudio de suelos. En este sondeo se tienen los mismos materiales que en los sondeos anteriores Arcilla y Material Orgánico, pero excavando a 34 metros de profundidad se dio indicios de roca ARCILLOLITA, lo cual tiene un grado de meteorización V, que quiere decir que es un grado de descomposición de minerales y alteraciones; esto se clasificó claramente con sus propiedades mecánicas lo cual se pueden evidenciar en el estudio del sondeo.
- Con los ensayos de laboratorio que se realizaron como corte directo y compresión inconfiada pudimos sacar parámetros como el ángulo de fricción, cohesión del material, módulos de elasticidad y relación de poisson estos datos son los parámetros de entrada para poder lograr el análisis de nuestro modelo.

Concluyendo los parámetros analizados al comparar los datos obtenidos del IDU con las tablas de los libros de geotecnia y suelos existe una diferencia mínima, lo cual permite trabajar sin ningún problema y utilizarlos en el software Phase 2, como datos de entrada válidos.

Pero para que haya una mayor productividad en la ejecución de cualquier obra es necesario tener los parámetros completos del suelo, los estudios geológicos y geotécnicos tienen que tener relación con tablas de libros o trabajos ya realizados sobre este tema para que tengan una mayor credibilidad los resultados obtenidos.

2. En este trabajo de investigación se presentaron estudios de elementos finitos en 2D, donde se investiga la influencia de las estructuras y las características del suelo que influyen en el comportamiento del terreno. Se hicieron modelaciones del perfil del suelo sin excavación y con excavación, con el fin de investigar cómo influye la construcción del túnel sobre la superficie del terreno que posteriormente podrían afectar las estructuras de los alrededores.

Al realizar este tipo de análisis se pueden obtener predicciones de los posibles desplazamientos del terreno a lo largo de la construcción del túnel y con estas dar soluciones de estabilidad para protección de todas las construcciones adyacentes.

3. La carga de la vía cambia drásticamente el régimen de nuestros dos modelos, la cual influye el comportamiento de los esfuerzos y los desplazamientos tanto horizontales y verticales, pero para nuestro análisis es necesario solo analizar el comportamiento en los desplazamientos verticales ya que este parámetro nos indica cuanto puede deformarse y como podría causar subsidencia en las zonas aledañas al proyecto
 - La mayor concentración de los esfuerzos antes de analizar las deformaciones se presentan principalmente alrededor del túnel y en la interacción de la vía – suelo, al comparar los dos modelos tanto sin excavación y con excavación podemos evidenciar que el incremento de esfuerzos en la zona donde se realizaría la excavación tiene un incremento ya que el túnel se verá sometido a compresiones más altas, después de analizar los esfuerzos se compendió cómo funcionaba el Strength factor el cual indica que si la tensión del material supera la resistencia del mismo podría inducirse

a una falla, este parámetro fue muy evidente teniendo una mayor concentración en la superficie del terreno y en las caras del túnel mostrando como es el comportamiento del material y demostrando que tendría fallas súbitas en estos puntos, presentando subsidencia en la superficie del suelo. en la deformación alrededor del túnel que a su vez afecta la superficie del terreno generando subsidencia.

- Teniendo todos estos análisis el pavimento trata de disipar la mayor cantidad de esfuerzos que se está viendo sometida por los ejes de tráfico, pero al ser un pavimento que al ser diseñado su resistencia está por debajo del carga ultima de estos esfuerzos no se disipan en el pavimento y llegan al suelo con una carga considerable por ende se confirma la subsidencia del terreno o deformación en este sector dado que el pavimento no cumplió con su función que era disipar esfuerzos para que cuando lleguen al suelo evitaran estas deformaciones, el pavimento al no cumplir con los requerimiento el suelo tiende a tener deformaciones hasta de 3Cm en un modelo sin excavación pero al generar una excavación estas deformaciones aumentan en un 3% y son deformaciones que son progresivas y que pueden tener afectaciones en las zonas aledañas .

VI. BIBLIOGRAFIA

- TOMÁS JOVER, Roberto, et al. Subsistencia del terreno. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 2009 Vol. 17, no.3, p 302.
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Suelos arcillosos de Bogotá, proclives al hundimiento. Disponible en internet:<<http://www.agenciadenoticias.unal.edu.co/ndetalle/article/suelos-arcillosos-de-bogota-proclives-al-hundimiento.html>> [citado en 7 de septiembre de 2015]
- ESPINOZA CHAVARRÍA, Donald Agustín. Análisis de subsidencia producida por la excavación de túneles de la línea 4 del metro de Caracas, aplicando el método de los elementos finitos. Trabajo de grado Ingeniero civil. Caracas D.C.: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería, Noviembre de 2005. p 176.
- PACHECO MARTÍNEZ, Jesús. Modelo de subsidencia del valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales. Trabajo de posgrado Doctor en ciencias de la tierra (exploración). Querétaro (México): Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de ingeniería. Departamento de Centro de geociencias, Agosto de 2007. P 225.
- HERRERA PÉREZ Iván Leonardo. Análisis de la susceptibilidad a la subsidencia en el estado de San Luis Potosí. Trabajo de posgrado Maestría en Ciencias Ambientales. San Luis Potosí (México): Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Ciencias Químicas, Ingeniería y Medicina. Programas multidisciplinarios de posgrado en ciencias ambientales, Agosto de 2012. P. 1,2
- UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA. Movimientos inducidos por túneles [en línea]. La Universidad [citado el 24 de septiembre de 2015].Disponible en internet: <URL: <http://www.etcg.upc.edu/asg/TiMR/descargas/11Movimientos.pdf>>

- UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA GRADO EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN. Tema 9 métodos numéricos en geotecnia [en línea]. Cataluña: La Universidad [citado 30 de septiembre, 2015]. Disponible en internet<[URL:http://ocw.camins.upc.edu/materials_guia/250240/2014/tema_09_metodos_numericos_m.pdf;jsessionid=789B77018A2D81850005EEDC7AA6AC30](http://ocw.camins.upc.edu/materials_guia/250240/2014/tema_09_metodos_numericos_m.pdf;jsessionid=789B77018A2D81850005EEDC7AA6AC30)>
- FRÍAS VALERO, Eduardo. Tesis Doctoral Ingeniería Eléctrica. Cataluña (España): Universitat Politècnica de Catalunya. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Noviembre de 2004.p.352.
- REY SABÍN, Alberto; PARDO FERNÁNDEZ, Gabriel y HURTADO AGRA, Raúl. Túneles y Obras Subterráneas. Madrid: Sika S.A.U, 2010. p. 211.
- YEPES PIQUERAS, Víctor. Métodos y equipos de excavaciones en túneles. En: Universidad Politécnica de Valencia blogs@upv.es [en línea]. 23- junio, 2015. [Citado 8-octubre, 2015]. Disponible en: <http://victoryepes.blogs.upv.es/2013/11/09/tuneladoras-epb-escudos-de-presion-de-tierras/>
- EXTREMIANA VÁZQUEZ. Ignacio. Gestión de riesgos en proyectos de túneles. Trabajo fin de estudios Master interuniversitario en dirección de proyectos. (España): Universidad de la Rioja. Dpto. de ingeniería mecánica, Septiembre de 2011. P. 96.
- Proceso de gestión y promoción de la participación ciudadana en la etapa de ingeniería básica avanzada de la primera línea del metro de Bogotá (En Línea). [Citado el 29 de abril de 2015]. Disponible en internet: <[URL:http://app.idu.gov.co/seccion_metro/cartillas/gran%20colombia.pdf](http://app.idu.gov.co/seccion_metro/cartillas/gran%20colombia.pdf)>.
- MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA INGEOMINAS. Geología de la sabana de Bogotá. Informe .Bogotá D.C.: El Instituto, 2005. P 104.
- VII JORNADAS GEOTECNICAS DE LA INGENIERIA DE COLOMBIA. (30, Octubre, 1992: Santa Fe de Bogotá, Colombia). Geología e Hidrogeología

de Santafé de Bogotá y su Sabana. Sociedad Colombiana de Ingenieros –
Sociedad Colombiana de Geotecnia.1992.

VII. TABLA DE ANEXOS

- ✓ ANEXO 1: Mapa geológico de Bogotá.
- ✓ ANEXO 2: Registro Sondeo SEL-13, Registro Sondeo SEL-14, Registro Sondeo SEL-15.
- ✓ ANEXO 3: Plano en planta localización con ubicación de los sondeos.
- ✓ ANEXO 4: Plano del perfil del suelo con localización de los sondeos.
- ✓ ANEXO 5: Ensayos de laboratorio.
- ✓ ANEXO 6: Tabla Correlación Mario Gonzales SPT.
- ✓ ANEXO 7: Sección tipo túnel con tuneladora.
- ✓ ANEXO 8: Guía de Inicio.