



ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EL DISEÑO DEL SITIO INESTABLE K5+600 AL K6+100

INFORME GEOTÉCNICO - VERSIÓN 1.

CONTRATO DE OBRA -2096-2022



INVIAS
INSTITUTO NACIONAL DE VIAS

JUNIO DE 2025

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	7
1.1	OBJETIVOS	7
2	LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	8
2.1	ANTECEDENTES	10
3	DIAGNÓSTICO	12
3.1	ALTERNATIVA SOLUCIÓN	12
4	GEOLOGÍA	14
4.1	OBJETIVO GENERAL	14
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
4.3	ALCANCE	14
4.4	METODOLOGÍA	14
4.5	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	15
4.6	ESTUDIOS DE CAMPO	15
4.7	CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA Y GEOMORFOLÓGICA	15
4.8	LEVANTAMIENTO DE COLUMNA ESTRATIGRÁFICA	15
4.8.1	DESCRIPCIÓN GEOMORFOLÓGICA Y MORFODINÁMICA	15
4.8.2	INFORME FINAL GEOLOGÍA	16
4.9	GEOLOGÍA REGIONAL Y OBSERVACIONES DE CAMPO	16
4.10	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	22
4.11	GEOMORFOLOGÍA	23
4.12	RESULTADOS	26
4.13	CONCLUSIONES	30
5	CONSIDERACIONES DE DISEÑO	31
5.1	CARACTERIZACIÓN SÍSMICA	31
5.2	EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO	32
5.3	ENSAYOS DE LABORATORIO	39

5.4	PERFIL ESTRATIGRÁFICO PROMEDIO – MODELO GEOLÓGICO GEOTÉCNICO	41
5.5	NIVEL FREÁTICO	54
6	DISEÑO GEOTÉCNICO	55
6.1	PARÁMETROS DE DISEÑO	55
6.2	PARÁMETROS DE RESISTENCIA EN ROCAS	56
6.3	MODELO Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD – CONDICIÓN INICIAL	59
6.4	MODELO Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD – CONDICIÓN CON OBRAS	71
6.5	MODELO Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD PARA LA CONFORMACIÓN DE CORTES TEMPORALES	78
6.6	CAPACIDAD DE CARGA PARA CIMIENTOS PROFUNDOS	80
6.7	DETERMINACIÓN DE PRESIONES DE TIERRA PARA LAS ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN	85
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
8	LIMITACIONES	90
9	ANEXOS	91
	ANEXO 1. EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO	92
	ANEXO 2. MEMORIAS DE CÁLCULO	93
	ANEXO 3. PLANOS	94
	ANEXO 4. MODELOS GEOLÓGICOS	95

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Corredor vial - Ataco - Planadas	8
Imagen 2. Mapa Geológico del sector K5+600 - K6+100, modificado de Plancha 301 Planadas, escala 1.100.000, SGC.	17
Imagen 3. Afloramiento de rocas cristalinas del Batolito de Ibagué en cercanías al sector La Brecha (K5+700) vía Ataco - Planadas. Fuente: Modificado de Google Earth (2022).	18
Imagen 4. Afloramiento de rocas de la Formación Gualanday Inferior, vía Ataco - Planadas.	19
Imagen 5. Afloramiento de rocas de la Formación Gualanday Medio, casco urbano de Santiago Pérez.	20
Imagen 6. Depósitos recientes, Santiago Pérez. Fuente: Diseños Geotécnicos S.A.S	20
Imagen 7. Depósitos Coluviales, sector K5+600 - K6+100.	21
Imagen 8. Depósitos Coluviales, sector K5+600 - K6+100.	22
Imagen 9. Falla Santiago Pérez.	22
Imagen 10. Geomorfología general del sector K1+800.	23
Imagen 11. Depósitos Coluviales, sector K5+600 - K6+100.	23
Imagen 12. Principales características morfológicas, sector K5+600 - K6+100.	25
Imagen 13. Planta geológica sitio crítico K5+600.	27
Imagen 14. Perfil Transversal A-A', sitio K5+970.	28
Imagen 15. Perfil Transversal B-B', sitio K5+750.	28
Imagen 16. Perfil Transversal C-C', sitio K5+710.	29
Imagen 17. Perfil Transversal D-D', sitio K5+650.	29
Imagen 18. Perfil Transversal E-E', sitio K5+870. Fuente: Diseños Geotécnicos S.A.S	29
Imagen 19. Variación de la resistencia a la compresión confinada (Qu) y al corte no drenada (Su) en profundidad.	32
Imagen 20. Localización en planta de los sondeos ejecutados sector inestable K5+600 a K6+100	34
Imagen 21. Resumen grafico de las propiedades índice sondeo 1	42
Imagen 22. Resumen grafico de las propiedades índice sondeo 2	43
Imagen 23. Resumen grafico de las propiedades índice sondeo 3	44
Imagen 24. Resumen grafico de las propiedades índice sondeo 4	45
Imagen 25. Resumen grafico de las propiedades índice sondeo 5	46
Imagen 26. Resumen grafico de las propiedades índice sondeo 6	47
Imagen 27. Resumen grafico de las propiedades índice sondeo 7	48
Imagen 28. Resumen grafico de las propiedades índice sondeo 8	49
Imagen 29. Resumen grafico de las propiedades índice sondeo 9	50
Imagen 30. Resumen grafico de las propiedades índice sondeo 10	51
Imagen 31. Perfil Transversal A-A', sitio K5+650.	52
Imagen 32. Perfil Transversal B-B', sitio K5+720.	52
Imagen 33. Perfil Transversal C-C', sitio K5+840.	53
Imagen 34. Perfil Transversal D-D', sitio K5+870.	53
Imagen 35. Perfil Transversal E-E', sitio K5+970. Fuente: Diseños Geotécnicos S.A.S	54
Imagen 36. Parámetros de roca según el criterio de Hoek-Brown basadas en el software RocLab de Roc Science.	57
Imagen 37. Parámetros de roca según el criterio de Hoek-Brown basadas en el software RocLab de Roc Science.	58
Imagen 38. Geometría de análisis K5+650	60
Imagen 39. Factor de seguridad C. inicial – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+650	60
Imagen 40. Factor de seguridad C. inicial – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+650	61
Imagen 41. Factor de seguridad C. inicial – Pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+650	61
Imagen 42. Factor de seguridad C. inicial – Pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+650	62
Imagen 43. Factor de seguridad C. inicial – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+720	62
Imagen 44. Factor de seguridad C. inicial – Pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+720	63

Imagen 45.	Factor de seguridad C. inicial – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+720	63
Imagen 46.	Factor de seguridad C. inicial – Pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+720	64
Imagen 47.	Factor de seguridad C. inicial – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+840	64
Imagen 48.	Factor de seguridad C. inicial – Pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+840	65
Imagen 49.	Factor de seguridad C. inicial – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+840	65
Imagen 50.	Factor de seguridad C. inicial – Pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+840	66
Imagen 51.	Factor de seguridad C. inicial – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+870	66
Imagen 52.	Factor de seguridad C. inicial – Pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+870	67
Imagen 53.	Factor de seguridad C. inicial – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+870	67
Imagen 54.	Factor de seguridad C. inicial – Pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+870	68
Imagen 55.	Factor de seguridad C. inicial – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+970	68
Imagen 56.	Factor de seguridad C. inicial – pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+970	69
Imagen 57.	Factor de seguridad C. inicial – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+970	69
Imagen 58.	Factor de seguridad C. inicial – pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+970	70
Imagen 59.	Factor de seguridad C. obras – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+650	72
Imagen 60.	Factor de seguridad C. obras –pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+650	72
Imagen 61.	Factor de seguridad C. obras – pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+650	72
Imagen 62.	Factor de seguridad C. obras – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+650	73
Imagen 63.	Factor de seguridad C. obras – pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+650	73
Imagen 64.	Factor de seguridad C. obras –estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+720	74
Imagen 65.	Factor de seguridad C. obras –pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+720	74
Imagen 66.	Factor de seguridad C. obras –estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+720	75
Imagen 67.	Factor de seguridad C. obras –pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+720	75
Imagen 68.	Factor de seguridad C. obras – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+970	76
Imagen 69.	Factor de seguridad C. obras – pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+970	76
Imagen 70.	Factor de seguridad C. obras – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+970	77
Imagen 71.	Factor de seguridad C. obras – pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+970	77
Imagen 72.	Factor de seguridad cortes temporales – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+600– K6+100	79
Imagen 73.	Factor de seguridad cortes temporales – pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+600– K6+100	79
Imagen 74.	Capacidad de carga de seguridad caisson tramo K5+600 a K6+100	81
Imagen 75.	Coeficiente de reacción horizontal (Kh) K5+600 a K6+100	83
Imagen 76.	Capacidad de carga de seguridad caisson tramo K5+600 a K6+100– estado límite de evento extremo	83
Imagen 77.	Capacidad de carga Lateral de seguridad para la geometría del caisson seleccionado	84
Imagen 78.	Resistencia a la Tracción para el caisson seleccionado	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Condiciones sísmicas del Proyecto	31
Tabla 2. Localización de sondeos	33
Tabla 3. Resumen ensayos de laboratorio sondeos 1, 2 y 3.....	40
Tabla 4. Resumen ensayos de laboratorio sondeos 4,5, 6 y 7	40
Tabla 5. Resumen ensayos de laboratorio sondeos 8, 9 y 10.....	41
Tabla 6. Corrección de N - Número de golpes promedio del ensayo de penetración estándar (SPT), estratos 1.....	55
Tabla 7. Correlación N vs. Peso Unitario (fuente: Design of Sheet Pile Walls, U. S. Army Corps of Engineers, Table 3-1 Granular Soil Properties)	56
Tabla 8. Constantes elásticas de diferentes suelos modificadas de acuerdo con el U.S. Department of the Navy (1982) y Bowles (1988) (Fuente: Manual de Cimentaciones del Invias)	56
Tabla 9. Parámetros de diseño seleccionados sector inestable K5+600 – K6+100	58
Tabla 10. Parámetros de diseño seleccionados con base en retrocálculo - sector inestable K5+600 – K6+100	59
Tabla 11. Factores de seguridad sector inestable K5+600 A K6+100	70
Tabla 12. Factores de seguridad sector inestable K5+600 A K6+100	70
Tabla 13. Características de los materiales de contención ingresados al programa	71
Tabla 14. Factores de seguridad sector inestable K5+600 A K6+100	78
Tabla 15. Factores de seguridad sector inestable K5+600 A K6+100	78
Tabla 16. Factores de seguridad cortes temporales sector inestable K5+600– K6+100.....	80
Tabla 17. Capacidad de carga de seguridad para los caisson K5+600 a K6+100.	81
Tabla 18. Capacidad de carga de seguridad para los caisson K5+600 a K6+100 – estado límite de evento extremo	83
Tabla 19. Capacidad de carga Lateral de seguridad para la geometría del caisson seleccionado	84
Tabla 20. Resistencia a la Tracción.....	85
Tabla 21. Coeficiente de presión activa, coeficiente de presión en reposo y Mononobe Okabe	86

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Panorámica general del sector inestable entre las abscisas K5+600 a K6+100	9
Fotografía 2. Empozamientos a nivel de vía y talud externo K5+600 a K6+100.....	10
Fotografía 3 y 4. Exploración de subsuelo sondeo 1 sector K5+600 a K6+100.....	35
Fotografía 5 y 6. Exploración de subsuelo sondeo 2 sector K5+600 a K6+100.....	35
Fotografías 7 y 8. Exploración de subsuelo sondeo 3 sector K5+600 a K6+100.....	35
Fotografías 9 y 10. Exploración de subsuelo sondeo 4 sector K5+600 a K6+100.....	36
Fotografías 11, 12 y 13. Exploración de subsuelo sondeo 5 sector K5+600 a K6+100.....	36
Fotografías 14, 15 y 16. Exploración de subsuelo sondeo 6 sector K5+600 a K6+100.....	37
Fotografías 17 y 18. Exploración de subsuelo sondeo 7 sector K5+600 a K6+100.....	37
Fotografías 19 y 20. Exploración de subsuelo sondeo 8 sector K5+600 a K6+100.....	38
Fotografías 21 y 22. Exploración de subsuelo sondeo 9 sector K5+600 a K6+100.....	38
Fotografías 23 y 24. Exploración de subsuelo sondeo 10 sector K5+600 a K6+100.....	38
Fotografía 25 y 26. Materiales característicos del estrato 1.....	41
Fotografía 27 y 28. Materiales característicos del estrato 2.....	42

1 INTRODUCCIÓN

La vía que conecta los municipios de Ataco y Planadas hace parte de la red vial secundaria del departamento del Tolima, la cual requiere mejoramiento, rehabilitación, la adecuación de su sección transversal junto con la intervención en zonas de inestabilidad geotécnica, para garantizar la normal operación en el corredor. Estas últimas han sido motivo de re nivelaciones y pérdidas de banca parcial o total, que a la fecha las dejan en condiciones de vulnerabilidad, que compromete la seguridad de los usuarios y obligan a proveer una solución. Por tal razón La Gobernación del Tolima y El Instituto Nacional de Vías INVIAS delegó al CONSORCIO VIAS Y EQUIPOS TOLIMA SUR 2023 mediante el contrato No. 2096 de 2022 “El Mejoramiento de la vía Ataco – Planadas en el departamento del Tolima”. Que a cargo de su departamento técnico realizó la inspección de la información existente, verificación de las condiciones de capacidad, deformabilidad y estabilidad al momento de ejecución del contrato.

Los estudios y diseños mostrados en el presente documento contemplan análisis geotécnicos basados en el plan de exploración del subsuelo, información secundaria, visita diagnóstica y levantamiento topográfico, evaluación de la condición de capacidad deformabilidad y estabilidad, proponiendo finalmente el sistema de cimentación más favorable en razón a las condiciones de terreno y proceso constructivo.

1.1 OBJETIVOS

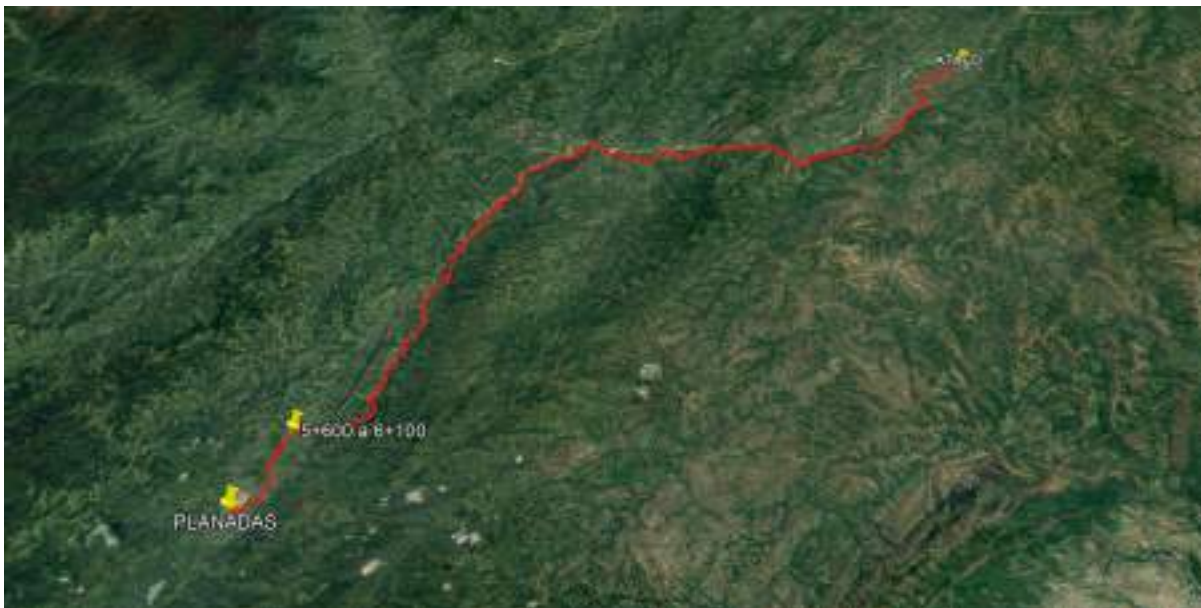
Se ha determinado como objetivo general del presente estudio, determinar las causas que generan la inestabilidad y pérdida de la banca en el sitio localizado entre las abscisas K5+600 y K6+100, realizar el análisis geotécnico de las obras necesarias para garantizar la estabilidad en la zona y el paso seguro de los vehículos y usuarios de la vía.

- Para dar cumplimiento al objetivo principal se requiere establecer los siguientes alcances:
- Visita técnica de reconocimiento a la zona del proyecto por parte de los especialistas en geotecnia y geología.
- Realización e interpretación del programa de exploración del subsuelo, que permita la caracterización física y mecánica de los materiales que conforman el perfil estratigráfico de la zona en estudio.
- Planteamiento del modelo geológico-geotécnico de análisis, con base en la topografía del sector en estudio y en los parámetros geomecánicos derivados de la evaluación de la etapa de exploración del subsuelo.
- Determinar el nivel de fundación para las estructuras proyectadas de acuerdo con las con las propiedades físicas y mecánicas del material que lo constituye, con el fin de establecer la resistencia del sistema de cimentación.
- Efectuar análisis de resistencia, deformabilidad y estabilidad, de acuerdo a los materiales reportados durante la etapa de exploración del subsuelo y a los procesos constructivos planteados.
- Realizar las recomendaciones constructivas relacionadas con la ejecución de las actividades de cimentación o adecuación del terreno.
- Realizar la implantación y definición de niveles de cimentación acordes con el diseño geométrico y niveles aprobados para la rasante de la vía, con la menor afectación predial.

2 LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El objeto del presente estudio se localiza en el departamento del Tolima, específicamente en la vía que conecta a los municipios de Planadas – Ataco (ver **Imagen 1**), a la que se puede acceder desde el interior del país a través de la ruta 40, por el segmento Bogotá - Ibagué, desviando a la altura del municipio de Espinal, este último en dirección sur en ruta 45 con rumbo al municipio de Natagaima, y derivando al occidente a la altura del Corregimiento de Castilla en busca de los municipios de Coyaima y ataco respectivamente.

Imagen 1. Corredor vial - Ataco - Planadas



Fuente: Google Earth

En el sector objeto de estudio se encuentra localizado entre el K5+600 y el K6+100 de la vía Ataco – Planadas, en el que se observa un deslizamiento del depósito de coluvión generando inestabilidad tanto en el talud interno como en el talud externo, la afectación es de aproximadamente 80m.

En este sector el talud interno cuenta con alturas variables entre 2,5m y 10m y una pendiente variable entre 10 y 20 grados. La vegetación en el talud interno es escasa, se observan algunos árboles propios de la región hacia la parte alta, y pastos que son utilizados para el pastoreo.

El talud externo cuenta con alturas variables entre 3,0m y 5,0m y una pendiente variable entre 10 y 15 grados. La vegetación en el talud interno es escasa, se observan algunos árboles propios de la región hacia la parte baja, y pastos que son utilizados para el pastoreo.

Se observa la presencia de varios cuerpos de agua provenientes del talud interno que corren sin control por el talud interno saturando los materiales superficiales que conforman el perfil estratigráfico de la zona, los cuales llevan sus aguas hasta el río Ata.

De igual manera se observan empozamientos y saturación total de los taludes en el sector inestable, por otra parte, se evidencia que no existen obras hidráulicas a lo largo del tramo afectado, por lo tanto, se generan también empozamientos y hundimientos a nivel de vía, ocasionando dificultad en la movilidad y afectación a los habitantes

del sector. En las fotografías a continuación se muestra un panorama general del sector inestable objeto de estudio.

Fotografía 1. Panorámica general del sector inestable entre las abscisas K5+600 a K6+100



Fuente: Diseños Geotécnico SAS

Fotografía 2. Empozamientos a nivel de vía y talud externo K5+600 a K6+100



Fuente: Diseños Geotécnico SAS

2.1 ANTECEDENTES

Como se mencionó con anterioridad existen distintos sectores de este importante corredor del sur del Tolima que presentan afectación de estabilidad de la banca con motivo de la incursión de los ríos Atá y Saldaña, de los cuales se hace mención de los siguientes:

- Municipio Ataco, entre las abscisas K35+900 – K41+450, sector vereda Aguadulce presentó múltiples interrupciones con motivo de la incursión del río Atá, condición que motivó la realización de estudio Hidráulico mediante contrato de consultoría 280379, entre la Federación Nacional de Cafeteros y la empresa AIM LTDA. Producto del estudio resultó la construcción de obras de protección marginal en dicho río, mediante espolones.
- De manera general se comenta que existen al menos 14 puntos de erosión marginal en la carretera Coyaima – Planadas en los cuales se ve comprometida la transitabilidad en el corto a mediano plazo, como ejemplo de este comportamiento la emergencia ocurrida a la altura del K2+350 de la vía Ataco - Coyaima.
- De igual manera en el sector del K21+100 sector el Cóndor se presentó pérdida total de la banca afectando la transito vehicular entre las poblaciones de Santiago Pérez y Planadas.
- En el sector de Caño fisto a la altura del K16, se presentó de igual manera pérdida parcial de la banca debido a la acción que ejerce el río Atá sobre la margen derecha, ocasionando múltiples problemas y colocando en riesgo el tránsito vehicular y a la población que circula por este corredor.

- De igual manera y como se ha mencionado, en el K1+800 se presenta un deslizamiento rotacional el cual ha desplazado la vía en por lo menos 4m, ocasionando la pérdida de las estructuras hidráulicas y la falla total de la vía.
- En el K5+600 al K6+100 se observan movimientos tipo rotacional superficial, acompañado de flujos de detritos, ocasionando movimientos y deformaciones a nivel de vía, los cuales colocan en riesgo el tránsito vehicular y la integridad de las personas que habitan en la zona
- Con alcance en contrato de obra **No.CN2013-1190 de 2013**, se adelantó la construcción del puente sobre la Quebrada Montalvo¹ en el año 2015, el autor acompañó el proceso constructivo de la cimentación, la consultoría estuvo a cargo de la empresa UG21 para el DPS - 2012.

3 DIAGNÓSTICO

En este aparte se presentan los principales aspectos observados durante los trabajos de campo para identificar las causas que se presentan en sector de estudio desarrollados por **DISEÑOS GEOTÉCNICOS S.A.S.** en el marco de Esta Consultoría; identificando la magnitud de la afectación, su naturaleza, los factores detonantes y la alternativa solución.

De acuerdo con las visitas de reconocimiento y en la exploración del subsuelo efectuada, se considera que en el estado actual del sitio objeto de estudio se debe desarrollar una intervención importante siendo necesario diseñar las obras de protección que garanticen la estabilidad de la zona afectada, para esto fue necesario adelantar un análisis de tipo geológico, geotécnico e hidráulico, con el fin evaluar la condición de estabilidad general de la ladera.

En el tramo de estudio, como se ha mencionado anteriormente fueron identificados varias inestabilidades de tipo rotacional superficial y flujo de detritos que compromete parte de la banca el talud interno y el talud externo entre las abscisas K5+600 y K6+100 en una longitud de 500m aproximadamente. Es importante mencionar que estos movimientos han desplazado en algunos puntos del tramo en estudio el alineamiento de la vía entre 1m y 2m aproximadamente y están orientados aproximadamente W-E con dirección de movimiento a favor de la pendiente hacia el este de la zona. La magnitud de la inestabilidad se correlaciona con la extensión del material movilizado y los rasgos morfológicos sobre el paisaje con lo cual se tiene una cobertura transversal (sentido N-S) de 515 metros y longitudinal (W-E) de hasta 280 metros aproximadamente ocupando un área de 7,3 ha y cuyos espesores van entre los 1,5 y 3,5 m. Los procesos de remoción en masa, como se ha mencionado, mantienen un movimiento hacia el E movilizand material superficial compuesto por depósitos coluviales arcillosos con espesores variables que alcanzan hasta los 5 metros y que se generan sobre el talud interno de la vía.

En virtud de lo anterior, en este sector se llevó a cabo la ejecución de diez (10) sondeos con equipo mecánico los cuales alcanzaron profundidades 10m, con el fin de conocer el perfil estratigráfico promedio de la zona y así definir la cimentación técnica y económicamente más adecuada de las obras de contención necesarias para garantizar la estabilidad de la ladera, la recuperación de la banca y el paso seguro de los vehículos y comunidad en el sector de la referencia.

También se llevó a cabo la definición del modelo el modelo geológico geotécnico que permitió establecer las obras más adecuadas teniendo en cuenta el estado actual del contrato y los recursos disponibles. De igual forma y con base en la topografía detallada se verificó la condición de capacidad portante y la estabilidad general de los taludes, adicionalmente se llevó a cabo un reconocimiento detallado desde el punto de vista geológico y geotécnico.

3.1 ALTERNATIVA SOLUCIÓN

De acuerdo a las condiciones de entorno, al grado de inestabilidad y a la variación de los espesores de los materiales reportados, se plantea en el talud interno la construcción de un muro de contención apoyado sobre elementos profundos tipo caisson, los cuales contarán con un diámetro de 1,20m y longitud de 3m, el muro se apoyará sobre una fila de caisson y se implantará sobre el borde interno de la vía en dos tramos, el primero de ellos entre las abscisas K5+775 a K5+820 en una longitud aproximada de 45m, y el segundo tramo entre las abscisas K5+845 a K5+890, esta solución será implantada en una longitud aproximada de 45m.

En el borde externo de la vía se plantea la construcción de un muro de contención apoyado sobre pilotes de 1,20m de diámetro y 3m de longitud, esta solución se implantará en dos tramos, el primero de ellos entre las abscisas K5+765 a K5+823 con una longitud aproximada de 58m, el segundo tramo se desarrollará entre las abscisas K5+848 y K5+898, en una longitud aproximada de 50m, en este tramo los muros se apoyarán sobre elementos profundos tipo caisson los cuales alcanzaran una profundidad de 5m y diámetro de 1,20m.

El tercer tramo, se construirá entre las abscisas K5+938 a K6+010, en este sector los muros se apoyarán sobre caisson de 3m de longitud y 1,20m de diámetro, esta solución se implantará en una longitud aproximada de 72m.

Es importante mencionar que, si bien el nivel freático no se detectó en ninguna de las perforaciones, los taludes se encuentran completamente saturados, razón por la cual adicional a las obras de contención, se deberán abatir estas aguas mediante una línea de drenes subhorizontales en el talud interno, los cuales contarán con una longitud de 20m, inclinados 5 grados y separados 10m en la horizontal.

Adicional a lo anterior se acometerán obras hidráulicas tal y como lo especifica el estudio de hidrología e hidráulica efectuado para este sector.

4 GEOLOGÍA

4.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del estudio de geología consiste en la descripción y análisis de las características geológicas y geomorfológicas del sector inestable localizado en la vía Ataco – Planadas entre las abscisas K5+600 y K6+100. Con base a los resultados obtenidos se define la configuración geológica y geomorfológica de la zona, además de las condiciones de estabilidad y reconocimiento de las posibles causas de fallamiento del sitio.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generación de los mapas geológicos del tramo del corredor vial con base a la cartografía existente 1:100.000 y el análisis realizado a la topografía y mapa de amenazas y susceptibilidad a movimientos en masa. Los mapas geológicos delimitan las unidades litológicas presentes en la zona de estudio.
- De igual forma, los mapas generados van acompañados de la memoria explicativa que describe la composición litológica de la unidad, características de resistencia de las rocas y comportamiento geomecánico general acompañado de la respectiva columna estratigráfica. De igual forma, se incluyen análisis de estructuras como fallas locales y regionales presentes en la zona y planos de foliación.
- Generación de los mapas geomorfológicos del tramo del corredor vial con base al análisis realizado a topografía, y mapa de susceptibilidad a movimientos en masa. Los mapas geológicos delimitan las unidades geomorfológicas y homogéneas presentes en la zona de estudio. De igual forma, los mapas generados van acompañados de la memoria explicativa que describe la morfología y geometría de cada una de las unidades plasmadas en los planos.

4.3 ALCANCE

El alcance del estudio en el componente geológico, consiste en efectuar un análisis vertical y en planta con el objetivo de identificar las litologías que se presentan en la zona de estudio. Adicionalmente, se establecen las estructuras geológicas y geomorfológicas más importantes, las cuales pueden evidenciar la morfodinámica de la zona.

Con base a los resultados obtenidos de correlación de sondeos geotécnicos y perfiles transversales se pueden obtener conclusiones útiles para el geotecnista encargado del diseño de las estructuras de soporte del corredor vial. Así mismo, la recuperación de muestras y la ejecución de los ensayos de campo son fundamentales para realizar una validación de los resultados obtenidos del levantamiento de los perfiles geológicos.

4.4 METODOLOGÍA

Para este estudio se llevó a cabo en primer lugar la revisión bibliográfica de la información existente de la zona proporcionada por el Servicio Geológico Colombiano y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Seguidamente con la campaña exploratoria en campo se logró la caracterización y mapeo de las unidades geológicas del área, además del levantamiento de la estratigrafía y caracterización geomorfológica.

4.5 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La revisión bibliográfica consistió en la búsqueda de toda la información que pudiera ser relevante al estudio de geología. Para ello se buscó información en planchas y memorias geológicas, informes de geología y literatura. Toda la información obtenida se complementó con base a los estudios realizados en campo.

4.6 ESTUDIOS DE CAMPO

Los estudios de campo consistieron en la caracterización geológica la zona aferente a las abscisas K5+600 y K6+100. Para ello se tomaron diferentes muestras tanto de suelo rodado como de roca in situ para poder realizar la caracterización litológica de las rocas. Algunos de los parámetros identificados fueron: grado de meteorización, caracterización de la matriz rocosa, forma de los clastos, selección de los clastos, etc. Adicionalmente, esta caracterización se realizó de la mano de los sondeos realizados en campo y que se describen más adelante en la sección del programa de exploración. Con ayuda de las muestras adquiridas en campo, se realizó la cartografía geológica en una escala relevante al proyecto. Para realizar el mapeo se tomó como base la cartografía geológica a escala 1:100.000.

Con base a la cartografía geomorfológica, amenazas y susceptibilidad a movimientos en masa también se identificaron unidades geomorfológicas del proyecto en estudio. Con base en estas unidades se describen los procesos morfodinámicos que pueden llegar a afectar el sitio crítico.

4.7 CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA Y GEOMORFOLÓGICA

La cartografía de la zona de estudio se mapeo por todo el corredor vial con base a la visita realizada en campo. La cartografía se realizó teniendo como base la topografía, el diseño geométrico definitivo, áreas de corte, áreas de terraplén y localización de los sondeos realizados.

La información obtenida en campo consistió en descripciones litológicas, análisis de afloramientos, toma de datos de lineaciones en zonas de taludes y toma de registros fotográficos y de georreferenciación. Adicionalmente, se buscaron los contactos entre las unidades geológicas descritas en la memoria explicativa de la plancha 301 Planadas. Con base a lo descrito en la literatura y las observaciones realizadas en campo, se realizó un mapa geológico y geomorfológico actualizado que muestre a detalle los contactos, lineaciones (foliaciones, fallas y diaclasas), procesos morfodinámicos, drenajes erosivos que se presentan en toda el área de estudio.

4.8 LEVANTAMIENTO DE COLUMNA ESTRATIGRÁFICA

El levantamiento de la columna estratigráfica y de los cortes geológicos se realizó con base a los sondeos realizados en campo y con la exploración de campo. La definición de los horizontes litológicos permite al geotecnista establecer la resistencia de suelos y rocas. Estos parámetros son necesarios para generar los modelos de estabilidad en las zonas críticas del proyecto.

4.8.1 DESCRIPCIÓN GEOMORFOLÓGICA Y MORFODINÁMICA

El análisis geomorfológico y morfodinámico se basa principalmente en la topografía de la zona de estudio. Para ello se definieron las unidades geomorfológicas presentes en toda la zona abarcada por la Plancha geológica 301 Planadas definida por el Servicio Geológico Colombiano. Para ello se consultó además la memoria explicativa del mapa geomorfológico de la zona, la cual se mencionó previamente. Adicionalmente, se consulta la literatura para correlacionar los resultados del análisis realizado con otros estudios ejecutados en la misma zona. La topografía de la zona de estudio fue obtenida de los estudios realizados en campo.

De esta forma, con ayuda de la topografía se empieza a realizar una correlación de información para finalmente obtener el mapa de geomorfología de la zona junto con su respectiva morfodinámica. Las zonas erosivas, depósitos aluviales y coluviales, etc., son algunas de las zonas más importantes a identificar. De igual forma, la identificación de zona inestables da indicios de la morfodinámica de la zona tales como reptaciones, erosiones concentradas, terracetos, entre otras.

4.8.2 INFORME FINAL GEOLOGÍA

El informe final consiste en la presentación de toda la información obtenida del análisis geológico y geomorfológico. De esta forma, las demás áreas asociadas al proyecto podrán definir los parámetros, geometrías, corredores etc. que deberán utilizarse para la ejecución del proyecto.

El informe final de geología consistirá en la memoria detallada de las unidades geológicas y geomorfológicas que atraviesan el tramo vial analizados junto con su análisis respectivo. Adicionalmente, el informe final incluye la presentación de los mapas geológicos, geomorfológicos y cortes geológicos longitudinales al corredor vial.

4.9 GEOLOGÍA REGIONAL Y OBSERVACIONES DE CAMPO

El área asociada al sector entre las abscisas K5+600 y K6+100 se localiza en la plancha 301 Planadas, definida por el Servicio Geológico Colombiano (SGC). La plancha cubre un área de 1960 km² que comprende el borde oriental de la Cordillera Central. Las unidades más importantes que afloran en cercanías a la zona de estudio son las rocas ígneas plutónicas del Batolito de Ibagué que representan un 75% aproximado del área; el restante corresponde a las formaciones sedimentarias y volcánicas con algunos cuerpos intrusivos, que abarcan desde el Triásico hasta el Reciente.

A continuación, se presenta el mapa geológico del sector y la descripción de las principales unidades geológicas que afloran o componen el sector. Como se observa el sitio de estudio se encuentra sobre rocas de la Formación Guaduas (TKg) Durante la visita de campo se caracterizaron y delimitaron las unidades geológicas y geomorfológicas presentes en el sector.

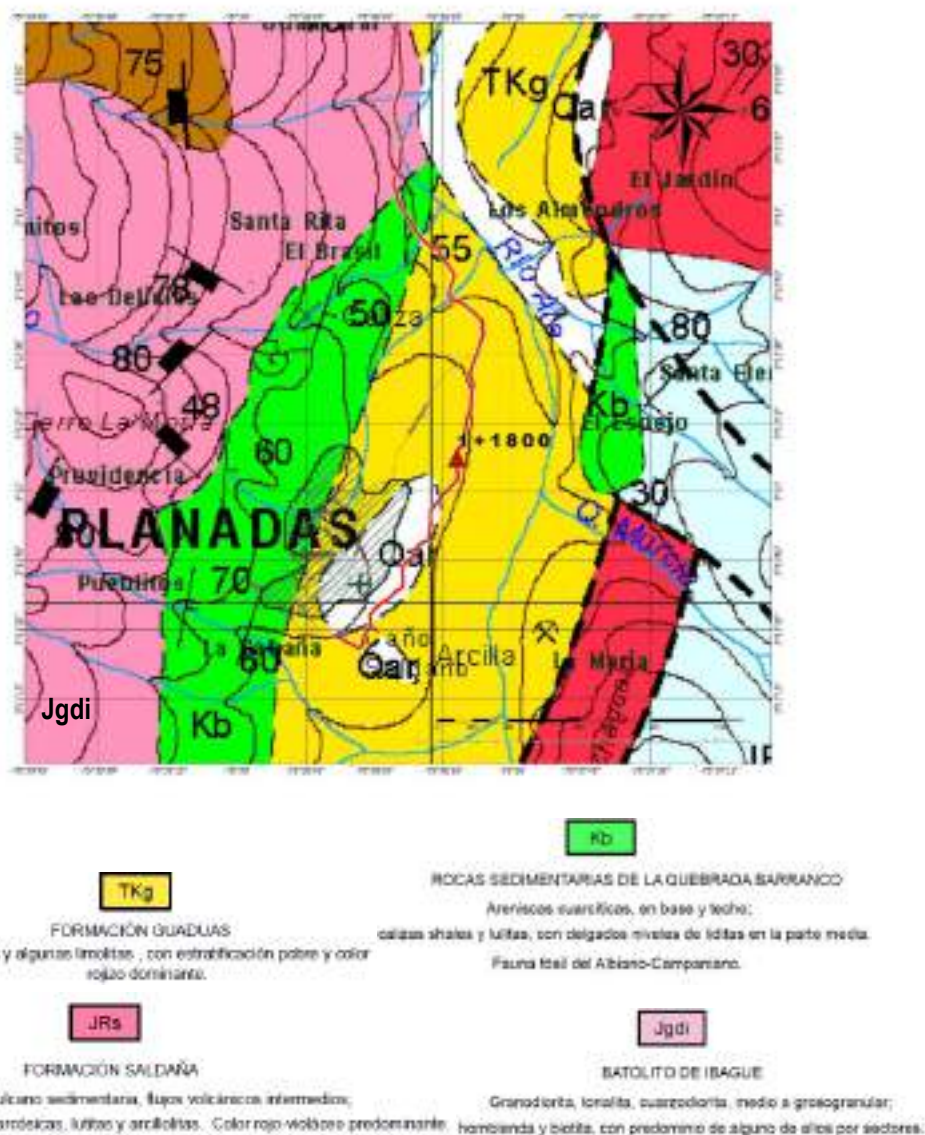


Imagen 2. Mapa Geológico del sector K5+600 - K6+100, modificado de Plancha 301 Planadas, escala 1.100.000, SGC.

BATOLITO DE IBAGUÉ (JGDI)

De acuerdo con el Servicio Geológico Colombiano, en este cuerpo intrusivo mayoritariamente se presentan rocas granodioritas, sin embargo, se pueden diferenciar zonas donde predominan las tonalitas y cuarzodioritas, en otros sectores afloran en menor proporción granitos, cuarzomonzonitas y cuarzomonzodioritas. Se le ha asignado un edad Jurásica superior mediante dataciones radiométricas. Geomorfológicamente estos cuerpos constituyen el principal relieve montañoso del área.



Imagen 3. Afloramiento de rocas cristalinas del Batolito de Ibagué en cercanías al sector La Brecha (K5+700) vía Ataco - Planadas. Fuente: Modificado de Google Earth (2022).

ROCAS SEDIMENTARIAS DE LA QUEBRADA BARRANCO (KB)

Esta formación se compone de una sucesión de rocas sedimentarias marinas que afloran desde el sur de Planadas hasta el norte de Santiago Pérez. Tiene un espesor aproximado de 575 m, su base está en contacto con el Batolito de Ibagué y la Formación Yaví, mientras que en su tope se encuentra concordante con la Formación Guaduas. Se conforma de areniscas y niveles de conglomerados cuarzosos irregulares en su base, a medida que se asciende en la sucesión las areniscas pasan de arcóscicas a cuarcíticas. Un segundo conjunto intermedio de la sucesión se encuentra constituido por bancos gruesos de caliza muy resistente.

Seguidamente aparece un conjunto de lutitas oscuras con concreciones de tamaño variable, mientras que el miembro superior de la formación se conforma de cuarzoareniscas con cemento calcáreo con intercalaciones delgadas de limolitas y lutitas calcáreas. La edad de esta formación corresponde al Cretácico entre Aptiano y Maastrichtiano.

FORMACIÓN GUADUAS (TKg)

Esta formación se encuentra suprayaciendo en contacto concordante a las Rocas Sedimentarias de la quebrada Barroso e infrayaciendo a las areniscas y conglomerados de la Formación Gualanday Inferior en contacto fallado.

Está compuesta por arcillolitas rojas y violáceas, ocasionalmente amarillentas y grises, con delgadas intercalaciones de limolitas. Se le ha asignado una edad entre el Maastrichtiano y Paleoceno. Su espesor en el área no se ha determinado debido a las pocas exposiciones y el tectonismo del área.

GRUPO GUALANDAY (TMGI – TMGM)

Este grupo se ha subdividido en tres miembros, sin embargo, en el área de estudio solo afloran dos de estos: el miembro Gualanday inferior y Gualanday medio.

Formación Gualanday Inferior (Tmgi)

Se limita en su base con la Formación Guaduas con un contacto tectónico y en su tope concordantemente con la Formación Gualanday Medio. Esta formación se compone de una sucesión de conglomerados y areniscas conglomeráticas con algunas intercalaciones de arcillolitas con tonos rojizos en conjunto. En su base son comunes los conglomerados cuyos clastos están conformados principalmente por chert en una matriz areno-arcillosa de color crema. Hacia el tope son más abundantes las areniscas conglomeráticas y silíceas. Se le ha asignado una edad de Eoceno medio.



Imagen 4. Afloramiento de rocas de la Formación Gualanday Inferior, vía Ataco - Planadas.
Fuente: Diseños Geotécnicos S.A.S

Formación Gualanday Medio (Tmgm)

Se puede observar en gran parte de la vía Ataco – Planadas, en los sectores de Las Señoritas y Santiago Pérez. Está en contacto concordante con la Formación Gualanday Inferior en su base, mientras que el contacto superior está erosionado por lo que no aparecen los bancos conglomeráticos gruesos del miembro superior del Grupo Gualanday.

Esta formación está compuesta en su mayoría por arcillolitas rojizas con algunos niveles de areniscas arcillosas y conglomerados de grano fino. No presenta una estratificación bien definida y se pueden ver cambios de facies. Debido a los pocos afloramientos no se tiene una estratificación completa y su espesor aún no se determina. Se le ha asignado una edad entre Eoceno y Oligoceno.



Imagen 5. Afloramiento de rocas de la Formación Gualanday Medio, casco urbano de Santiago Pérez.
Fuente: Diseños Geotécnicos S.A.S

DEPÓSITOS RECIENTES (QAR)

Son depósitos sedimentarios de origen aluvial y coluvial cuya edad es cuaternaria, se encuentran en las zonas bajas comúnmente en el río Atá. Estas acumulaciones consisten en cantos de rocas ígneas y sedimentarias en matriz arenó-arcillosa.



Imagen 6. Depósitos recientes, Santiago Pérez. Fuente: Diseños Geotécnicos S.A.S

OBSERVACIONES DE CAMPO

Durante los días 28 de marzo a 01 de abril de 2022 se realizó una visita exploratoria donde se caracterizaron las unidades geológicas que afloran en la zona y los factores de inestabilidad de varios sectores de la vía Ataco - Planadas.

A continuación, se muestran las principales observaciones de la exploración geológica sobre la zona inestable referente al tramo K5+600 - K6+100.

Coordenadas. 03°14.103' N, 75°38.317' W, h = 986 m.s.n.m.

El sector se encuentra sobre rocas de la Formación Guaduas, principalmente sobre estratos de arcillolitas rojizas altamente meteorizadas en capas gruesas con espesores métricos y rumbo N-S buzando hacia el NE, en general, con orientación 192°/43°. Sobre el talud interno y externo se observa el desarrollo de espesos suelos residuales y depósitos cuaternarios de ladera (depósitos coluviales) principalmente arcillosos generados por la meteorización de las arcillolitas de la Fm. Guaduas. Estos depósitos son producto de procesos de remoción en masa sobre el material meteorizado y saturado que compone los suelos residuales.

Morfológicamente se identifican varias coronas de escarpes coalescentes a lo largo del tramo productos de varios eventos de similar naturaleza. Estos movimientos tienen carácter rotacional y afectan los suelos residuales formando depósitos con el material transportado pendiente a bajo. Se aprecia que existen dos factores principales de susceptibilidad sobre el área correspondientes a la inclinación o buzamiento de los estratos a favor de la pendiente del talud y el desarrollo de espesos suelos residuales. El detonante principal de los movimientos de remoción se asocia a las lluvias debido a la pérdida de resistencia por la disminución de la succión al saturarse el material, incrementando por el factor condicionante del patrón de drenaje sub-dendrítico a paralelo sobre unidad geomorfológica de ladera erosiva que conforma regionalmente la Fm. Guaduas. Dichos drenajes procedentes de la parte alta del talud no cuentan con un sistema de manejo funcional, por lo tanto, se producen surcos erosivos y saturación en el material superficial.

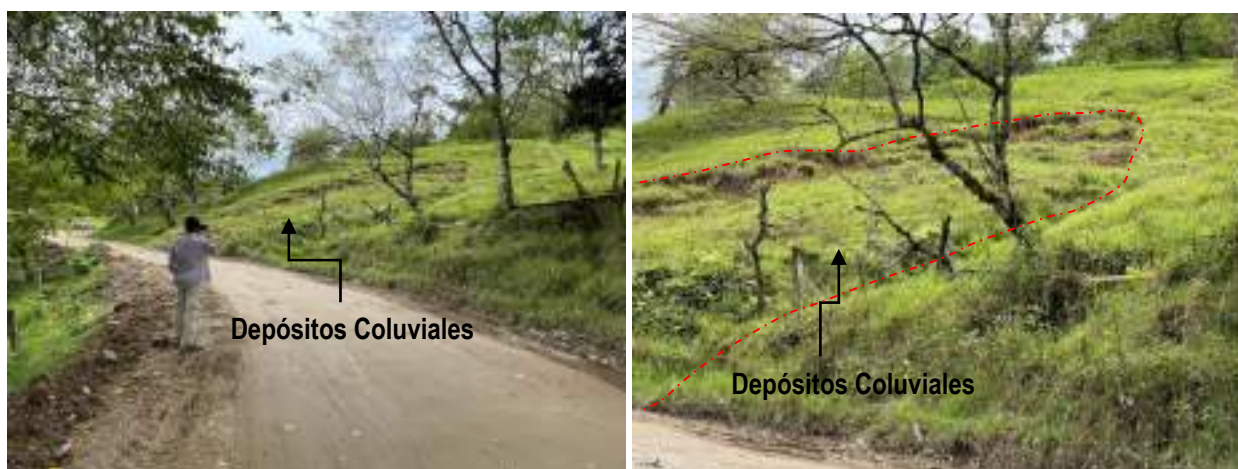


Imagen 7. Depósitos Coluviales, sector K5+600 - K6+100.
Fuente: Diseños Geotécnicos S.A.S

El material que compone los depósitos coluviales es de grano fino, tipo arcilla, no consolidado y altamente saturado. Su origen está en la meteorización química y física de las rocas de la Formación Guaduas. A lo largo del sector se puede observar este material saturado con un movimiento aparentemente lento pendiente a bajo y algunas fuentes de agua que transcurren directamente sobre la vía.



Imagen 8. Depósitos Coluviales, sector K5+600 - K6+100.
Fuente: Diseños Geotécnicos S.A.S

4.10 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Entre los rasgos estructurales que se destacan en la zona se encuentran algunos lineamientos y fallas como la de Santiago Pérez (ver Imagen 2 y 9). En lo que respecta al sector de estudio no se encuentran afectaciones directas de fallas geológicas.

FALLA SANTIAGO PÉREZ

Esta falla marca el contacto entre el Batolito de Ibagué, las rocas sedimentarias cretáceas (entre ellas las Rocas Sedimentarias de la Quebrada Barranco) y la Formación Gualanday Inferior. Tiene un rumbo N-S con un movimiento vertical en el cual el bloque este descende con relación al bloque oeste. En esta área la Falla pone en contacto las rocas de la Formación Guaduas y la Formación Gualanday Inferior; además el río Atá sigue su lineamiento en este sector.



Imagen 9. Falla Santiago Pérez.
Fuente: Modificado de Google Earth (2022).

4.11 GEOMORFOLOGÍA

El sector se encuentra sobre una zona homogénea correspondiente a una ladera alargada de génesis denudacional por su desarrollo erosivo. Litológicamente se desarrolla sobre las rocas arcillolíticas de la Formación Guaduas y mantienen una extensión N-S. Dicha ladera erosiva mantiene una forma cóncava y pendientes muy inclinadas, lo cual establece un factor de susceptibilidad a movimientos de remoción en masa. Hacia el E esta geoforma se limita con el cauce del río Atá y el inicio de la sierra y lomos de presión generados por la Falla Santiago Pérez al SE. Mientras al NE se limita por la sierra homoclinal de los estratos de la Formación Guaduas. Hacia el W se tiene la sierra denudacional formada por la erosión de las rocas del Batolito de Ibagué, correspondiente a una prominencia topográfica de morfología irregular.



Imagen 10. Geomorfología general del sector K1+800.
Fuente: Modificado de Google Earth (2022).

Localmente el sector K5+600 a K6+100 está sobre una ladera erosiva la cual se encuentra cubierta por suelos y depósitos coluviales de espesores variables y bajo grado de consolidación que pueden presentar flujos de tierra pequeños y, eventualmente, deslizamientos de tipo rotacional. La frecuencia y susceptibilidad de estos movimientos son acelerados por la saturación del material en la parte alta de la ladera, en este caso, algunas quebradas que provienen del W saturan el material causando la movilización hacia el E y posteriormente afectando la vía.



Imagen 11. Depósitos Coluviales, sector K5+600 - K6+100.
Fuente: Diseños Geotécnicos S.A.S

Como se aprecia en la imagen 11, en la zona se presentan varias geoformas de tipo lóbulo, cuyo eje está orientado aproximadamente W-E y dirección de movimiento hacia el E a favor de la pendiente. Estas unidades delimitadas por las líneas en color negro están asociadas a los depósitos coluviales formados por los procesos de remoción en masa que afectan los suelos residuales de la parte alta. En línea roja se delimitan los escarpes principales que indican el inicio de los movimientos que se presentan en el área. Como se observa, estos movimientos se originan sobre el talud interno de la vía, sin embargo, algunos escarpes secundarios tienen lugar dentro de los escarpes principales sugiriendo movimientos posteriores del material removido.

La extensión transversal (sentido N-S) de los movimientos o el material transportado varía entre los 30 a 80 metros, sin embargo, debido a la coalescencia de los eventos se tiene una extensión total de 515 m. Longitudinalmente alcanzan extensiones entre los 240 y 280 m ocupando un área aproximada total de 7,3 ha. Sobre la vía, este evento afecta a cerca de 375 metros del tramo ocasionando la pérdida de la banca en algunos sectores y, generalmente, desplazando el eje hacia el E (mismo sentido del movimiento).

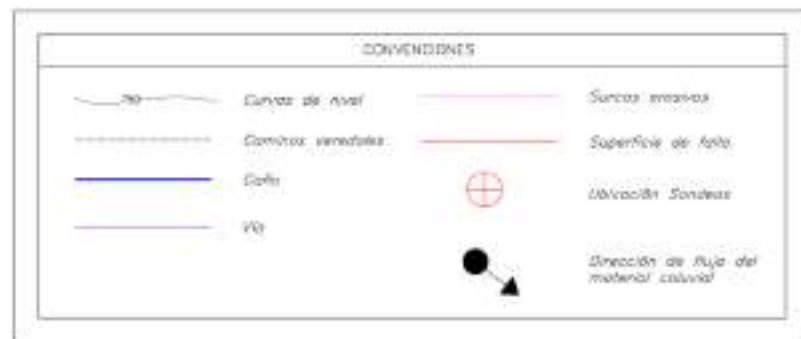
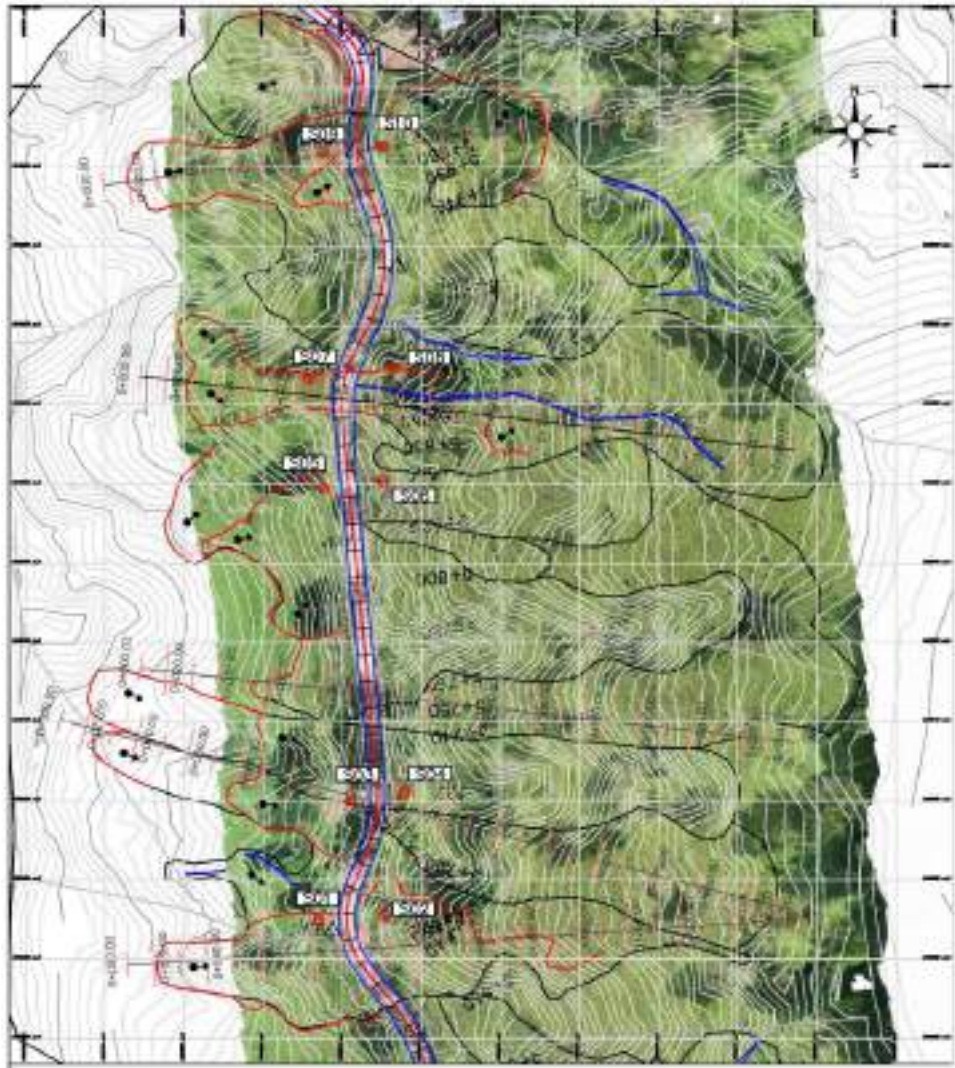


Imagen 12. Principales características morfológicas, sector K5+600 - K6+100.
Fuente: Diseños Geotécnicos S.A.S

4.12 RESULTADOS

Con base a la exploración geológica de campo, fotografías aéreas y topografía se definió el mapa geológico del sitio, caracterizando las unidades geológicas involucradas y ya definidas en este capítulo: Formación Guaduas (Tkg) y Depósitos Coluviales (Qar). Con esta vista en planta de la zona se delimita la extensión de los depósitos sobre el talud interno y externo de la vía.

Asimismo, se presentan los perfiles geológicos promedios de la zona. Dichos perfiles se tomaron sobre los ejes de los movimientos principales a fin de caracterizar las zonas más críticas y donde se tienen los espesores mayores de material movilizado. Como se observa, los espesores de estos materiales varían entre los 1,5 y los 3,5 metros, siendo procesos superficiales, pero dada su extensión involucren un volumen importante de material movilizado.



Calle 36 No. 18 – 23 - Tel.: 3204820
gerencia@ingenieriadevias.com.co - Bogotá, D.C.

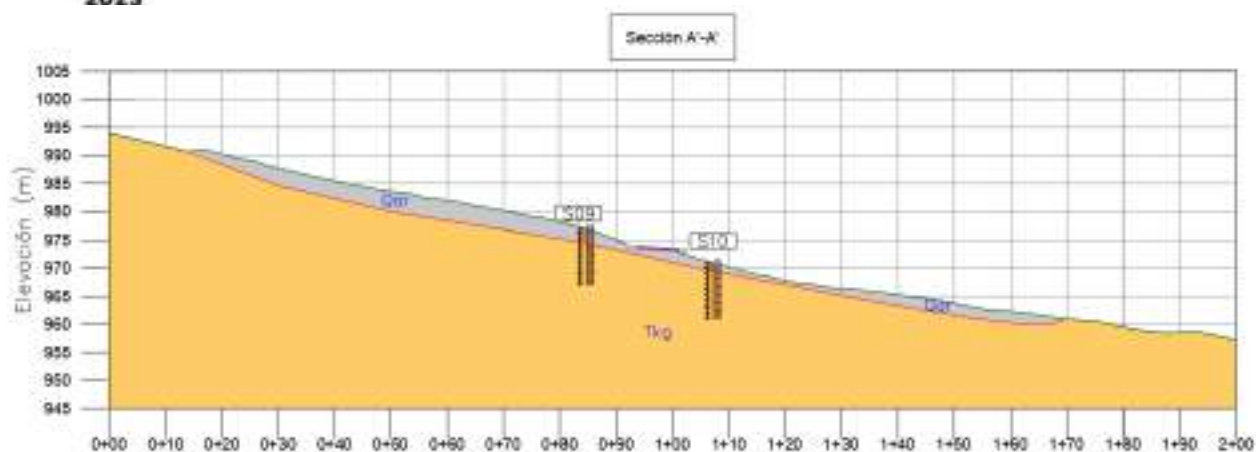


Imagen 14. Perfil Transversal A-A', sitio K5+970.
Fuente: Diseños Geotécnicos S.A.S

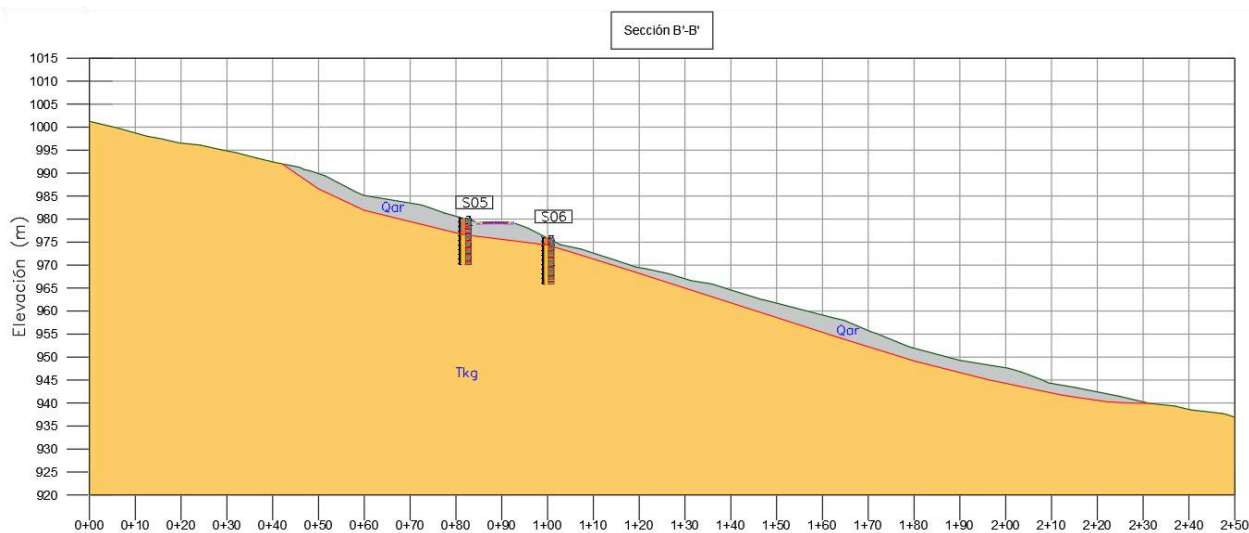


Imagen 15. Perfil Transversal B-B', sitio K5+750.
Fuente: Diseños Geotécnicos S.A.S

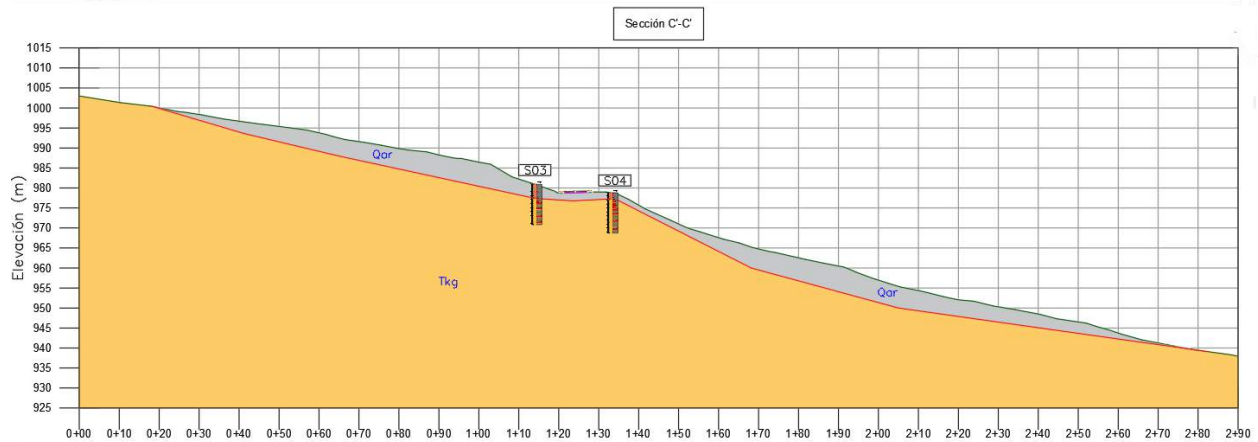


Imagen 16. Perfil Transversal C-C', sitio K5+710.
Fuente: Diseños Geotécnicos S.A.S

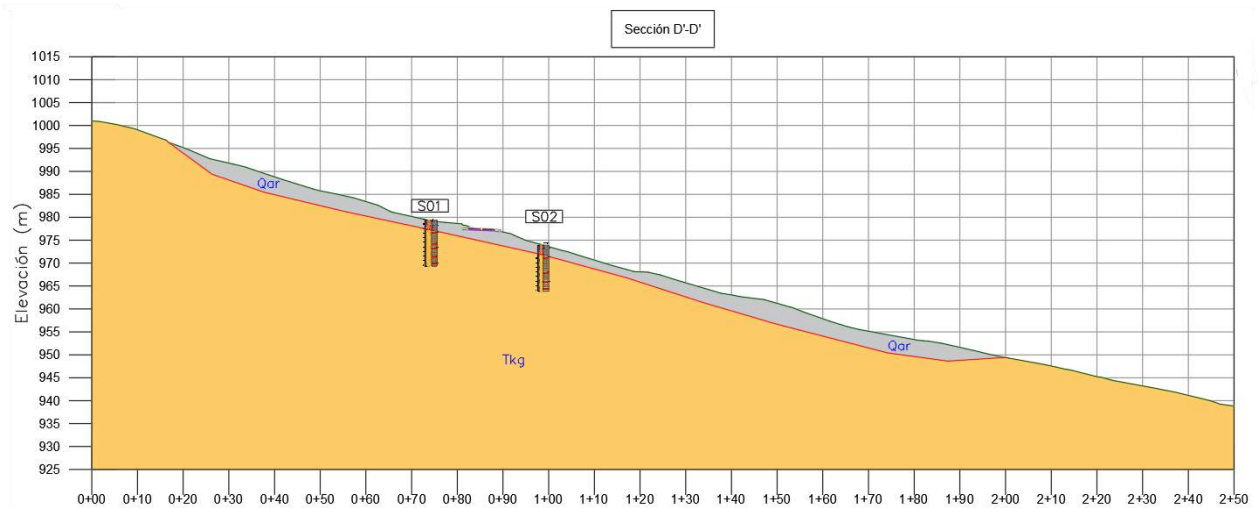


Imagen 17. Perfil Transversal D-D', sitio K5+650.
Fuente: Diseños Geotécnicos S.A.S

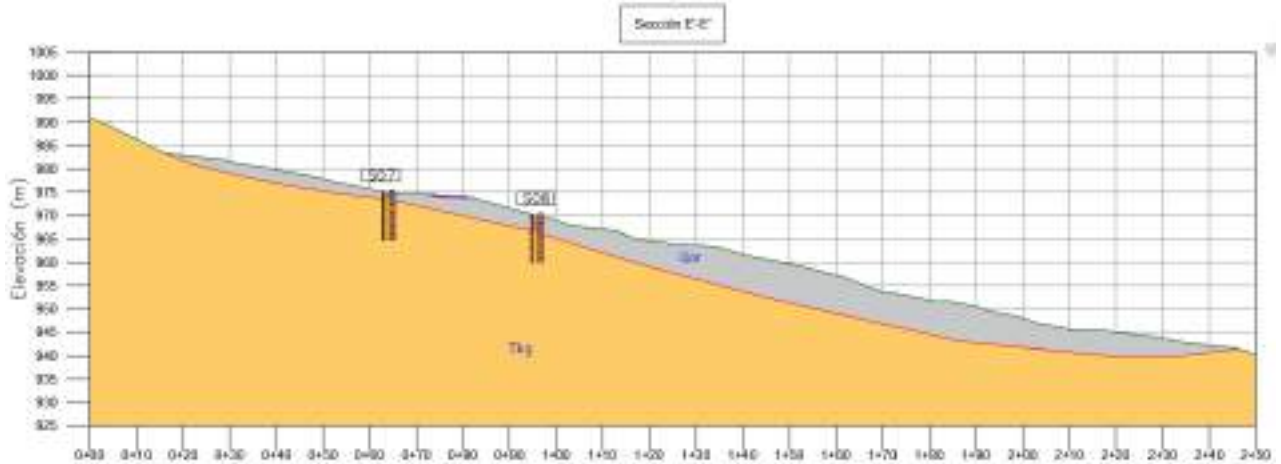


Imagen 18. Perfil Transversal E-E', sitio K5+870. Fuente: Diseños Geotécnicos S.A.S

4.13 CONCLUSIONES

Con la información existente recolectada de estudios anteriores, además de la recolectada en campo de la misma área de estudio se dejan las siguientes consideraciones desde el punto de vista geológico:

El sector de estudio presenta varios factores de inestabilidad que han desencadenado una serie de procesos de remoción en masa coalescentes. El principal factor condicionante es la existencia de suelos residuales sobre las rocas de la Fm. Guaduas, cuyo buzamiento va a favor de la pendiente y configura un plano de falla en el contacto entre dichas rocas y suelos. La saturación del material meteorizado (suelos residuales) de la Formación Guaduas (mayoritariamente arcillolitas) reduce las propiedades mecánicas de las rocas lo que proporciona un condicionante a la inestabilidad, conformando entonces los depósitos coluviales de la zona cuando el material es movilizado.

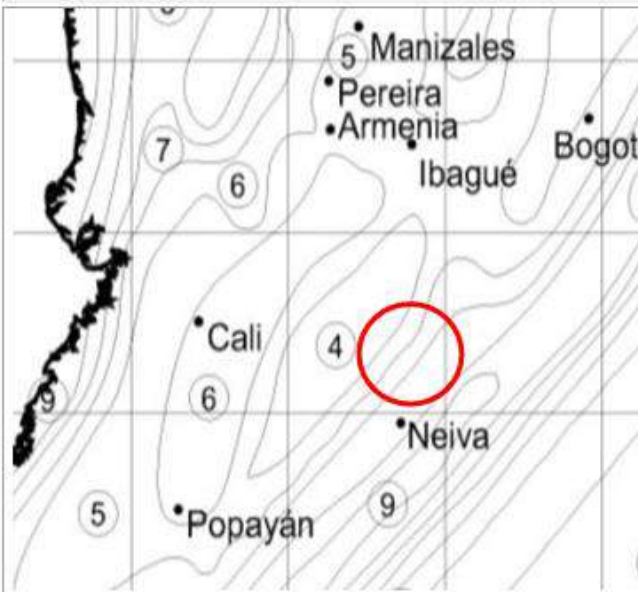
Estos depósitos no consolidados y saturados son producto de varios eventos de tipo rotacional y superficiales cuyas coronas se conectan entre sí, formando escarpes de mayor extensión. Entre otro de los factores, se encuentra la geomorfología de ladera erosiva con una pendiente muy inclinada, cuyo patrón de drenaje sub-dendrítico a paralelo erosiona y satura material que posteriormente se remueve. Lo anterior sumado a los factores geológicos establecen una susceptibilidad moderada a alta a los movimientos de remoción en masa acelerados por actividades antrópicas y fuertes lluvias principalmente. Se recomienda tener en cuenta estos factores para las obras que se proyecten sobre el sitio, las cuales además de tener una función de contención deben estar enfocadas en el buen manejo de las aguas.

5 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

5.1 CARACTERIZACIÓN SÍSMICA

De acuerdo con el perfil promedio del sitio, los inventarios de fuentes sísmicas del país y especialmente con el contenido de la nueva versión del Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes (NSR-10), y lo estipulado en la Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14, fue posible establecer los con coeficientes de aceleración pico horizontal del terreno (PGA) de 0,25, y coeficientes de aceleración espectral horizontal de periodos de vibración corto y periodo de vibración largo (Ss y S1) respectivamente. De acuerdo con lo anterior y a lo establecido en la norma el nivel de amenaza sísmica de la zona es **alta**. En la siguiente tabla se presenta un resumen de las propiedades sísmicas del proyecto:

Tabla 1 Condiciones sísmicas del Proyecto

UBICACIÓN	PARÁMETRO	VALOR
	Coeficiente de aceleración pico Horizontal del terreno PGA (Región 5)	0,25
	Coeficiente de aceleración espectral horizontal periodo corto Ss	0,50
	Coeficiente de aceleración espectral horizontal periodo largo S1	0,25
	Valor del factor de sitio Fpga	1,3
	Perfil suelo de Cimentación	C

Fuente: Código Colombiano de Diseño de puentes CCP-14 – NSR-10

Como se muestra en la tabla 1, el valor de PGA es de 0,25 y de acuerdo con lo considerado en el código de puentes CCP14 el coeficiente de aceleración horizontal para los análisis de estabilidad puede ser considerado como $K_h = PGA \cdot F_{PGA}$, que para estructuras sin ningún tipo de restricción al desplazamiento puede considerarse un factor multiplicador entre 0,5 y 1,0. De conformidad con lo anterior el coeficiente de aceleración pico horizontal corresponde a un valor de 0,26 utilizando un factor de 0,8, y el coeficiente de aceleración vertical corresponde al 10% del coeficiente horizontal. Sin embargo, para las modelaciones de estabilidad solo se considera el coeficiente de aceleración horizontal toda vez que estas aceleraciones no suelen presentarse simultáneamente.

Se adopta el perfil de suelo tipo C, dadas las condiciones del suelo en el cual se apoyará la estructura proyectada, tomando como base el ensayo de resistencia a la penetración estándar y adoptando lo descrito en la tabla 3.10.3.1-1 “Definición de los tipos de perfil de suelo” del CCP-14 en donde se tienen materiales con valores de resistencia al corte

no drenado mayores o iguales que 100KPa o 1kgf/cm² que definen un perfil de suelo tipo C tal y como se presenta en la siguiente figura.

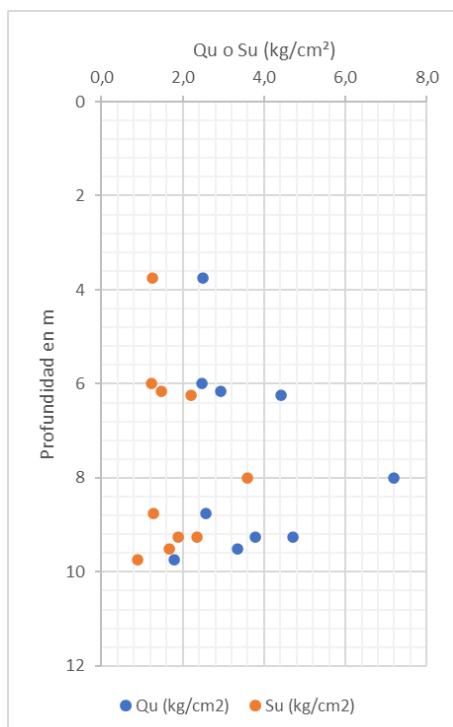


Imagen 19. Variación de la resistencia a la compresión inconfiada (Qu) y al corte no drenada (Su) en profundidad.
Fuente: Diseños Geotécnicos S.A.S

5.2 EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO

Con el fin de establecer las propiedades físicas y mecánicas de los materiales que conforman el subsuelo y las afectaciones que se presentan en este sector, fue llevado a cabo un programa de exploración, el cual consistió en la ejecución diez (10) perforaciones con equipo mecánico de rotación, percusión y lavado, las cuales alcanzaron profundidades de 10m, adicionalmente fueron recuperadas muestras para para la ejecución de ensayos de laboratorio.

Durante la ejecución del sondeo fueron identificados y descritos visualmente los diferentes estratos. En los suelos en donde debido a la elevada consistencia de los materiales finos o a la presencia de materiales granulares no fue posible la recuperación de muestras inalteradas, fue adelantado el ensayo de penetración estándar (SPT), con la respectiva recuperación de la muestra alterada mediante el tubo de cuchara partida (Split Spoon).

En la tabla a continuación se observa la localización de las perforaciones ejecutadas

Tabla 2. Localización de sondeos

Sondeo No	Profundidad (m)	Tipo de perforación	Localización	Coordenadas	
				ESTE	NORTE
1	10	Mecánica	Borde interno de la vía	4706814,512	1915607,629
				4706813,532	1915629,192
2	10	Mecánica	Borde externo de la vía		
3	10	Mecánica	Talud interno de la vía	4706819,070	1915690,953
4	10	Mecánica	Borde externo de la vía	4706817,336	1915701,977
5	10	Mecánica	Talud interno de la vía	4706766,887	1915811,729
6	10	Mecánica	Borde externo de la vía	4706768,089	1915790,702
7	10	Mecánica	Talud interno de la vía	4706798,797	1915793,586
8	10	Mecánica	Borde externo de la vía	4706801,063	1915808,564
9	10	Mecánica	Talud interno de la vía	4706919,381	1915947,555
10	10	Mecánica	Borde externo de la vía	4706768,357	1915896,953

Fuente: Diseños Geotécnicos S.A.S

En la Imagen a continuación se muestra en planta la localización de los sondeos efectuados en cada uno de los tramos objeto de estudio



Imagen 20. Localización en planta de los sondeos ejecutados sector inestable K5+600 a K6+100

En las fotografías a continuación se muestran las actividades de exploración asociadas al sector inestable K5+600 a K6+100



Fotografía 3 y 4. Exploración de subsuelo sondeo 1 sector K5+600 a K6+100

Sondeo No 2



Fotografía 5 y 6. Exploración de subsuelo sondeo 2 sector K5+600 a K6+100

Sondeo No 3



Fotografías 7 y 8. Exploración de subsuelo sondeo 3 sector K5+600 a K6+100



TOLIMA SUR
2023

Sondeo No 4

DISEÑO SITIO CRÍTICO
K5+600 AL K6+100



Fotografías 9 y 10. Exploración de subsuelo sondeo 4 sector K5+600 a K6+100

Sondeo No 5



Fotografías 11, 12 y 13. Exploración de subsuelo sondeo 5 sector K5+600 a K6+100



Fotografías 14, 15 y 16. Exploración de subsuelo sondeo 6 sector K5+600 a K6+100

Sondeo No 7



Fotografías 17 y 18. Exploración de subsuelo sondeo 7 sector K5+600 a K6+100

Sondeo No 8



Fotografías 19 y 20. Exploración de subsuelo sondeo 8 sector K5+600 a K6+100

Sondeo No 9



Fotografías 21 y 22. Exploración de subsuelo sondeo 9 sector K5+600 a K6+100

Sondeo No 10



Fotografías 23 y 24. Exploración de subsuelo sondeo 10 sector K5+600 a K6+100

5.3 ENSAYOS DE LABORATORIO

Todas las muestras obtenidas durante la etapa de exploración fueron identificadas visualmente, rotuladas y empacadas cuidadosamente para su posterior envío al laboratorio y sobre un número representativo de ellas llevar a cabo ensayos tendientes a conocer su comportamiento geomecánico. Las pruebas de laboratorio que se ejecutaron son:

- **Clasificación**

La clasificación de los materiales encontrados se realizó mediante los límites de Atterberg y la composición granulométrica de los materiales muestreados.

- **Condiciones In situ**

El contenido de humedad y la densidad de los materiales en el sitio del proyecto, se establecieron mediante los ensayos de humedad natural y peso unitario.

Estas pruebas junto con las de clasificación, permiten establecer una primera aproximación del comportamiento mecánico de los materiales encontrados.

- **Resistencia al corte**

Los parámetros de diseño fueron seleccionados empleando diferentes metodologías de análisis, como lo son las correlaciones empíricas con el ensayo de penetración estándar, y entre las cuales se pueden mencionar a De Mello (1971), Muromachi (1974), Peck (1974), Meyerhof (1956), teniendo en cuenta que fueron calibradas con la formulación propuesta por el Japan Road Bureau (JRB) al constituir una de las formulaciones más conservadoras para la determinación del ángulo de fricción.

Adicionalmente se adelantó el ensayo de penetración estándar (SPT) y se correlacionó con parámetros de resistencia no drenados con el fin de calibrar y verificar los parámetros derivados de los ensayos de laboratorio.

En las tablas a continuación se presenta el resumen de los ensayos de laboratorio ejecutados.

Tabla 3. Resumen ensayos de laboratorio sondeos 1, 2 y 3

Profundidad	Código muestra	MB/STN	TR	Gravim	Moist	Porosidad	W _p	W _L	W _U	W ₅₀	W ₆₀	W ₇₀	W ₈₀	W ₉₀	W ₁₀₀	W ₁₅₀	W ₂₀₀	W ₂₅₀	W ₃₀₀	W ₃₅₀	W ₄₀₀	W ₄₅₀	W ₅₀₀	W ₅₅₀	W ₆₀₀	W ₆₅₀	W ₇₀₀	W ₇₅₀	W ₈₀₀	W ₈₅₀	W ₉₀₀	W ₉₅₀	W ₁₀₀₀	W ₁₀₅₀	W ₁₁₀₀	W ₁₁₅₀	W ₁₂₀₀	W ₁₂₅₀	W ₁₃₀₀	W ₁₃₅₀	W ₁₄₀₀	W ₁₄₅₀	W ₁₅₀₀	W ₁₅₅₀	W ₁₆₀₀	W ₁₆₅₀	W ₁₇₀₀	W ₁₇₅₀	W ₁₈₀₀	W ₁₈₅₀	W ₁₉₀₀	W ₁₉₅₀	W ₂₀₀₀	W ₂₀₅₀	W ₂₁₀₀	W ₂₁₅₀	W ₂₂₀₀	W ₂₂₅₀	W ₂₃₀₀	W ₂₃₅₀	W ₂₄₀₀	W ₂₄₅₀	W ₂₅₀₀	W ₂₅₅₀	W ₂₆₀₀	W ₂₆₅₀	W ₂₇₀₀	W ₂₇₅₀	W ₂₈₀₀	W ₂₈₅₀	W ₂₉₀₀	W ₂₉₅₀	W ₃₀₀₀	W ₃₀₅₀	W ₃₁₀₀	W ₃₁₅₀	W ₃₂₀₀	W ₃₂₅₀	W ₃₃₀₀	W ₃₃₅₀	W ₃₄₀₀	W ₃₄₅₀	W ₃₅₀₀	W ₃₅₅₀	W ₃₆₀₀	W ₃₆₅₀	W ₃₇₀₀	W ₃₇₅₀	W ₃₈₀₀	W ₃₈₅₀	W ₃₉₀₀	W ₃₉₅₀	W ₄₀₀₀	W ₄₀₅₀	W ₄₁₀₀	W ₄₁₅₀	W ₄₂₀₀	W ₄₂₅₀	W ₄₃₀₀	W ₄₃₅₀	W ₄₄₀₀	W ₄₄₅₀	W ₄₅₀₀	W ₄₅₅₀	W ₄₆₀₀	W ₄₆₅₀	W ₄₇₀₀	W ₄₇₅₀	W ₄₈₀₀	W ₄₈₅₀	W ₄₉₀₀	W ₄₉₅₀	W ₅₀₀₀	W ₅₀₅₀	W ₅₁₀₀	W ₅₁₅₀	W ₅₂₀₀	W ₅₂₅₀	W ₅₃₀₀	W ₅₃₅₀	W ₅₄₀₀	W ₅₄₅₀	W ₅₅₀₀	W ₅₅₅₀	W ₅₆₀₀	W ₅₆₅₀	W ₅₇₀₀	W ₅₇₅₀	W ₅₈₀₀	W ₅₈₅₀	W ₅₉₀₀	W ₅₉₅₀	W ₆₀₀₀	W ₆₀₅₀	W ₆₁₀₀	W ₆₁₅₀	W ₆₂₀₀	W ₆₂₅₀	W ₆₃₀₀	W ₆₃₅₀	W ₆₄₀₀	W ₆₄₅₀	W ₆₅₀₀	W ₆₅₅₀	W ₆₆₀₀	W ₆₆₅₀	W ₆₇₀₀	W ₆₇₅₀	W ₆₈₀₀	W ₆₈₅₀	W ₆₉₀₀	W ₆₉₅₀	W ₇₀₀₀	W ₇₀₅₀	W ₇₁₀₀	W ₇₁₅₀	W ₇₂₀₀	W ₇₂₅₀	W ₇₃₀₀	W ₇₃₅₀	W ₇₄₀₀	W ₇₄₅₀	W ₇₅₀₀	W ₇₅₅₀	W ₇₆₀₀	W ₇₆₅₀	W ₇₇₀₀	W ₇₇₅₀	W ₇₈₀₀	W ₇₈₅₀	W ₇₉₀₀	W ₇₉₅₀	W ₈₀₀₀	W ₈₀₅₀	W ₈₁₀₀	W ₈₁₅₀	W ₈₂₀₀	W ₈₂₅₀	W ₈₃₀₀	W ₈₃₅₀	W ₈₄₀₀	W ₈₄₅₀	W ₈₅₀₀	W ₈₅₅₀	W ₈₆₀₀	W ₈₆₅₀	W ₈₇₀₀	W ₈₇₅₀	W ₈₈₀₀	W ₈₈₅₀	W ₈₉₀₀	W ₈₉₅₀	W ₉₀₀₀	W ₉₀₅₀	W ₉₁₀₀	W ₉₁₅₀	W ₉₂₀₀	W ₉₂₅₀	W ₉₃₀₀	W ₉₃₅₀	W ₉₄₀₀	W ₉₄₅₀	W ₉₅₀₀	W ₉₅₅₀	W ₉₆₀₀	W ₉₆₅₀	W ₉₇₀₀	W ₉₇₅₀	W ₉₈₀₀	W ₉₈₅₀	W ₉₉₀₀	W ₉₉₅₀	W ₁₀₀₀₀	W ₁₀₀₅₀	W ₁₀₁₀₀	W ₁₀₁₅₀	W ₁₀₂₀₀	W ₁₀₂₅₀	W ₁₀₃₀₀	W ₁₀₃₅₀	W ₁₀₄₀₀	W ₁₀₄₅₀	W ₁₀₅₀₀	W ₁₀₅₅₀	W ₁₀₆₀₀	W ₁₀₆₅₀	W ₁₀₇₀₀	W ₁₀₇₅₀	W ₁₀₈₀₀	W ₁₀₈₅₀	W ₁₀₉₀₀	W ₁₀₉₅₀	W ₁₁₀₀₀	W ₁₁₀₅₀	W ₁₁₁₀₀	W ₁₁₁₅₀	W ₁₁₂₀₀	W ₁₁₂₅₀	W ₁₁₃₀₀	W ₁₁₃₅₀	W ₁₁₄₀₀	W ₁₁₄₅₀	W ₁₁₅₀₀	W ₁₁₅₅₀	W ₁₁₆₀₀	W ₁₁₆₅₀	W ₁₁₇₀₀	W ₁₁₇₅₀	W ₁₁₈₀₀	W ₁₁₈₅₀	W ₁₁₉₀₀	W ₁₁₉₅₀	W ₁₂₀₀₀	W ₁₂₀₅₀	W ₁₂₁₀₀	W ₁₂₁₅₀	W ₁₂₂₀₀	W ₁₂₂₅₀	W ₁₂₃₀₀	W ₁₂₃₅₀	W ₁₂₄₀₀	W ₁₂₄₅₀	W ₁₂₅₀₀	W ₁₂₅₅₀	W ₁₂₆₀₀	W ₁₂₆₅₀	W ₁₂₇₀₀	W ₁₂₇₅₀	W ₁₂₈₀₀	W ₁₂₈₅₀	W ₁₂₉₀₀	W ₁₂₉₅₀	W ₁₃₀₀₀	W ₁₃₀₅₀	W ₁₃₁₀₀	W ₁₃₁₅₀	W ₁₃₂₀₀	W ₁₃₂₅₀	W ₁₃₃₀₀	W ₁₃₃₅₀	W ₁₃₄₀₀	W ₁₃₄₅₀	W ₁₃₅₀₀	W ₁₃₅₅₀	W ₁₃₆₀₀	W ₁₃₆₅₀	W ₁₃₇₀₀	W ₁₃₇₅₀	W ₁₃₈₀₀	W ₁₃₈₅₀	W ₁₃₉₀₀	W ₁₃₉₅₀	W ₁₄₀₀₀	W ₁₄₀₅₀	W ₁₄₁₀₀	W ₁₄₁₅₀	W ₁₄₂₀₀	W ₁₄₂₅₀	W ₁₄₃₀₀	W ₁₄₃₅₀	W ₁₄₄₀₀	W ₁₄₄₅₀	W ₁₄₅₀₀	W ₁₄₅₅₀	W ₁₄₆₀₀	W ₁₄₆₅₀	W ₁₄₇₀₀	W ₁₄₇₅₀	W ₁₄₈₀₀	W ₁₄₈₅₀	W ₁₄₉₀₀	W ₁₄₉₅₀	W ₁₅₀₀₀	W ₁₅₀₅₀	W ₁₅₁₀₀	W ₁₅₁₅₀	W ₁₅₂₀₀	W ₁₅₂₅₀	W ₁₅₃₀₀	W ₁₅₃₅₀	W ₁₅₄₀₀	W ₁₅₄₅₀	W ₁₅₅₀₀	W ₁₅₅₅₀	W ₁₅₆₀₀	W ₁₅₆₅₀	W ₁₅₇₀₀	W ₁₅₇₅₀	W ₁₅₈₀₀	W ₁₅₈₅₀	W ₁₅₉₀₀	W ₁₅₉₅₀	W ₁₆₀₀₀	W ₁₆₀₅₀	W ₁₆₁₀₀	W ₁₆₁₅₀	W ₁₆₂₀₀	W ₁₆₂₅₀	W ₁₆₃₀₀	W ₁₆₃₅₀	W ₁₆₄₀₀	W ₁₆₄₅₀	W ₁₆₅₀₀	W ₁₆₅₅₀	W ₁₆₆₀₀	W ₁₆₆₅₀	W ₁₆₇₀₀	W ₁₆₇₅₀	W ₁₆₈₀₀	W ₁₆₈₅₀	W ₁₆₉₀₀	W ₁₆₉₅₀	W ₁₇₀₀₀	W ₁₇₀₅₀	W ₁₇₁₀₀	W ₁₇₁₅₀	W ₁₇₂₀₀	W ₁₇₂₅₀	W ₁₇₃₀₀	W ₁₇₃₅₀	W ₁₇₄₀₀	W ₁₇₄₅₀	W ₁₇₅₀₀	W ₁₇₅₅₀	W ₁₇₆₀₀	W ₁₇₆₅₀	W ₁₇₇₀₀	W ₁₇₇₅₀	W ₁₇₈₀₀	W ₁₇₈₅₀	W ₁₇₉₀₀	W ₁₇₉₅₀	W ₁₈₀₀₀	W ₁₈₀₅₀	W ₁₈₁₀₀	W ₁₈₁₅₀	W ₁₈₂₀₀	W ₁₈₂₅₀	W ₁₈₃₀₀	W ₁₈₃₅₀	W ₁₈₄₀₀	W ₁₈₄₅₀	W ₁₈₅₀₀	W ₁₈₅₅₀	W ₁₈₆₀₀	W ₁₈₆₅₀	W ₁₈₇₀₀	W ₁₈₇₅₀	W ₁₈₈₀₀	W ₁₈₈₅₀	W ₁₈₉₀₀	W ₁₈₉₅₀	W ₁₉₀₀₀	W ₁₉₀₅₀	W ₁₉₁₀₀	W ₁₉₁₅₀	W ₁₉₂₀₀	W ₁₉₂₅₀	W ₁₉₃₀₀	W ₁₉₃₅₀	W ₁₉₄₀₀	W ₁₉₄₅₀	W ₁₉₅₀₀	W ₁₉₅₅₀	W ₁₉₆₀₀	W ₁₉₆₅₀	W ₁₉₇₀₀	W ₁₉₇₅₀	W ₁₉₈₀₀	W ₁₉₈₅₀	W ₁₉₉₀₀	W ₁₉₉₅₀	W ₂₀₀₀₀	W ₂₀₀₅₀	W ₂₀₁₀₀	W ₂₀₁₅₀	W ₂₀₂₀₀	W ₂₀₂₅₀	W ₂₀₃₀₀	W ₂₀₃₅₀	W ₂₀₄₀₀	W ₂₀₄₅₀	W ₂₀₅₀₀	W ₂₀₅₅₀	W ₂₀₆₀₀	W ₂₀₆₅₀	W ₂₀₇₀₀	W ₂₀₇₅₀	W ₂₀₈₀₀	W ₂₀₈₅₀	W ₂₀₉₀₀	W ₂₀₉₅₀	W ₂₁₀₀₀	W ₂₁₀₅₀	W ₂₁₁₀₀	W ₂₁₁₅₀	W ₂₁₂₀₀	W ₂₁₂₅₀	W ₂₁₃₀₀	W ₂₁₃₅₀	W ₂₁₄₀₀	W ₂₁₄₅₀	W ₂₁₅₀₀	W ₂₁₅₅₀	W ₂₁₆₀₀	W ₂₁₆₅₀	W ₂₁₇₀₀	W ₂₁₇₅₀	W ₂₁₈₀₀	W ₂₁₈₅₀	W ₂₁₉₀₀	W ₂₁₉₅₀	W ₂₂₀₀₀	W ₂₂₀₅₀	W ₂₂₁₀₀	W ₂₂₁₅₀	W ₂₂₂₀₀	W ₂₂₂₅₀	W ₂₂₃₀₀	W ₂₂₃₅₀	W ₂₂₄₀₀	W ₂₂₄₅₀	W ₂₂₅₀₀	W ₂₂₅₅₀	W ₂₂₆₀₀	W ₂₂₆₅₀	W ₂₂₇₀₀	W ₂₂₇₅₀	W ₂₂₈₀₀	W ₂₂₈₅₀	W ₂₂₉₀₀	W ₂₂₉₅₀	W ₂₃₀₀₀	W ₂₃₀₅₀	W ₂₃₁₀₀	W ₂₃₁₅₀	W ₂₃₂₀₀	W ₂₃₂₅₀	W ₂₃₃₀₀	W ₂₃₃₅₀	W ₂₃₄₀₀	W ₂₃₄₅₀	W ₂₃₅₀₀	W ₂₃₅₅₀	W ₂₃₆₀₀	W ₂₃₆₅₀	W ₂₃₇₀₀	W ₂₃₇₅₀	W ₂₃₈₀₀	W ₂₃₈₅₀	W ₂₃₉₀₀	W ₂₃₉₅₀	W ₂₄₀₀₀	W ₂₄₀₅₀	W ₂₄₁₀₀	W ₂₄₁₅₀	W ₂₄₂₀₀	W ₂₄₂₅₀	W ₂₄₃₀₀	W ₂₄₃₅₀	W ₂₄₄₀₀	W ₂₄₄₅₀	W ₂₄₅₀₀	W ₂₄₅₅₀	W ₂₄₆₀₀	W ₂₄₆₅₀	W ₂₄₇₀₀	W ₂₄₇₅₀	W ₂₄₈₀₀	W ₂₄₈₅₀	W ₂₄₉₀₀	W ₂₄₉₅₀	W ₂₅₀₀₀	W ₂₅₀₅₀	W ₂₅₁₀₀	W ₂₅₁₅₀	W ₂₅₂₀₀	W ₂₅₂₅₀	W ₂₅₃₀₀	W ₂₅₃₅₀	W ₂₅₄₀₀	W ₂₅₄₅₀	W ₂₅₅₀₀	W ₂₅₅₅₀	W ₂₅₆₀₀	W ₂₅₆₅₀	W ₂₅₇₀₀	W ₂₅₇₅₀	W ₂₅₈₀₀	W ₂₅₈₅₀	W ₂₅₉₀₀	W ₂₅₉₅₀	W ₂₆₀₀₀	W ₂₆₀₅₀	W ₂₆₁₀₀	W ₂₆₁₅₀	W ₂₆₂₀₀	W ₂₆₂₅₀	W ₂₆₃₀₀	W ₂₆₃₅₀	W ₂₆₄₀₀	W ₂₆₄₅₀	W ₂₆₅₀₀	W ₂₆₅₅₀	W ₂₆₆₀₀	W ₂₆₆₅₀	W ₂₆₇₀₀	W ₂₆₇₅₀	W ₂₆₈₀₀	W ₂₆₈₅₀	W ₂₆₉₀₀	W ₂₆₉₅₀	W ₂₇₀₀₀	W ₂₇₀₅₀	W ₂₇₁₀₀	W ₂₇₁₅₀	W ₂₇₂₀₀	W ₂₇₂₅₀	W ₂₇₃₀₀	W ₂₇₃₅₀	W ₂₇₄₀₀	W ₂₇₄₅₀	W ₂₇₅₀₀	W ₂₇₅₅₀	W ₂₇₆₀₀	W ₂₇₆₅₀	W ₂₇₇₀₀	W ₂₇₇₅₀	W ₂₇₈₀₀	W ₂₇₈₅₀	W ₂₇₉₀₀	W ₂₇₉₅₀	W ₂₈₀₀₀	W ₂₈₀₅₀	W ₂₈₁₀₀	W ₂₈₁₅₀	W ₂₈₂₀₀	W ₂₈₂₅₀	W ₂₈₃₀₀	W ₂₈₃₅₀	W ₂₈₄₀₀	W ₂₈₄₅₀	W ₂₈₅₀₀	W ₂₈₅₅₀	W ₂₈₆₀₀	W ₂₈₆₅₀	W ₂₈₇₀₀	W ₂₈₇₅₀	W ₂₈₈₀₀	W ₂₈₈₅₀	W ₂₈₉₀₀	W ₂₈₉₅₀	W ₂₉₀₀₀	W ₂₉₀₅₀	W ₂₉₁₀₀	W ₂₉₁₅₀	W ₂₉₂₀₀	W ₂₉₂₅₀	W ₂₉₃₀₀	W ₂₉₃₅₀	W ₂₉₄₀₀	W ₂₉₄₅₀	W ₂₉₅₀₀	W ₂₉₅₅₀	W ₂₉₆₀₀	W ₂₉₆₅₀	W ₂₉₇₀₀	W ₂₉₇₅₀	W ₂₉₈₀₀	W ₂₉₈₅₀	W ₂₉₉₀₀	W ₂₉₉₅₀	W ₃₀₀₀₀	W ₃₀₀₅₀	W ₃₀₁₀₀	W ₃₀₁₅₀	W ₃₀₂₀₀	W ₃₀₂₅₀	W ₃₀₃₀₀	W ₃₀₃₅₀	W ₃₀₄₀₀	W ₃₀₄₅₀	W ₃₀₅₀₀	W ₃₀₅₅₀	W ₃₀₆₀₀	W ₃₀₆₅₀	W ₃₀₇₀₀	W ₃₀₇₅₀	W ₃₀₈₀₀	W ₃₀₈₅₀	W ₃₀₉₀₀	W ₃₀₉₅₀	W ₃₁₀₀₀	W ₃₁₀₅₀	W ₃₁₁₀₀	W ₃₁₁₅₀	W ₃₁₂₀₀	W ₃₁₂₅₀	W ₃₁₃₀₀	W ₃₁₃₅₀	W ₃₁₄₀₀	W ₃₁₄₅₀	W ₃₁₅₀₀	W ₃₁₅₅₀	W ₃₁₆₀₀	W ₃₁₆₅₀	W ₃₁₇₀₀	W ₃₁₇₅₀	W ₃₁₈₀₀	W ₃₁₈₅₀	W ₃₁₉₀₀	W ₃₁₉₅₀	W ₃₂₀₀₀	W ₃₂₀₅₀	W ₃₂₁₀₀	W ₃₂₁₅₀	W ₃₂₂₀₀	W ₃₂₂₅₀	W ₃₂₃₀₀	W ₃₂₃₅₀	W ₃₂₄₀₀	W ₃₂₄₅₀	W ₃₂₅₀₀	W ₃₂₅₅₀	W ₃₂₆₀₀	W ₃₂₆₅₀	W ₃₂₇₀₀	W ₃₂₇₅₀	W ₃₂₈₀₀	W ₃₂₈₅₀	W ₃₂₉₀₀	W ₃₂₉₅₀	W ₃₃₀₀₀	W ₃₃₀₅₀	W ₃₃₁₀₀	W ₃₃₁₅₀	W ₃₃₂₀₀	W ₃₃₂₅₀	W ₃₃₃₀₀	W ₃₃₃₅₀	W ₃₃₄₀₀	W ₃₃₄₅₀	W ₃₃₅₀₀	W ₃₃₅₅₀	W ₃₃₆₀₀	W ₃₃₆₅₀	W ₃₃₇₀₀	W ₃₃₇₅₀	W ₃₃₈₀₀	W ₃₃₈₅₀	W ₃₃₉₀₀	W ₃₃₉₅₀	W ₃₄₀₀₀	W ₃₄₀₅₀	W ₃₄₁₀₀	W ₃₄₁₅₀	W ₃₄₂₀₀	W ₃₄₂₅₀	W ₃₄₃₀₀	W ₃₄₃₅₀	W ₃₄₄₀₀	W ₃₄₄₅₀	W ₃₄₅₀₀	W ₃₄₅₅₀	W ₃₄₆₀₀	W ₃₄₆₅₀	W ₃₄₇₀₀	W ₃₄₇₅₀	W ₃₄₈₀₀	W ₃₄₈₅₀	W ₃₄₉₀₀	W ₃₄₉₅₀	W ₃₅₀₀₀	W ₃₅₀₅₀	W ₃₅₁₀₀	W ₃₅₁₅₀	W ₃₅₂₀₀	W ₃₅₂₅₀	W ₃₅₃₀₀	W ₃₅₃₅₀	W ₃₅₄₀₀	W ₃₅₄₅₀	W ₃₅₅₀₀	W ₃₅₅₅₀	W ₃₅₆₀₀	W ₃₅₆₅₀	W ₃₅₇₀₀	W ₃₅₇₅₀	W ₃₅₈₀₀	W ₃₅₈₅₀	W ₃₅₉₀₀	W ₃₅₉₅₀	W ₃₆₀₀₀	W ₃₆₀₅₀	W ₃₆₁₀₀	W ₃₆₁₅₀	W ₃₆₂₀₀	W ₃₆₂₅₀	W ₃₆₃₀₀	W ₃₆₃₅₀	W ₃₆₄₀₀	W ₃₆₄₅₀	W ₃₆₅₀₀	W ₃₆₅₅₀	W ₃₆₆₀₀	W ₃₆₆₅₀	W ₃₆₇₀₀	W ₃₆₇₅₀	W ₃₆₈₀₀	W ₃₆₈₅₀	W ₃₆₉₀₀	W ₃₆₉₅₀	W ₃₇₀₀₀	W ₃₇₀₅₀	W ₃₇₁₀₀	W ₃₇₁₅₀	W ₃₇₂₀₀	W ₃₇₂₅₀	W ₃₇₃₀₀	W ₃₇₃₅₀	W ₃₇₄₀₀	W ₃₇₄₅₀	W ₃₇₅₀₀	W ₃₇₅₅₀	W ₃₇₆₀₀	W ₃₇₆₅₀	W ₃₇₇₀₀	W ₃₇₇₅₀	W ₃₇₈₀₀	W ₃₇₈₅₀	W ₃₇₉₀₀	W ₃₇₉₅₀	W ₃₈₀₀₀	W ₃₈₀₅₀	W ₃₈₁₀₀	W ₃₈₁₅₀	W ₃₈₂₀₀	W ₃₈₂₅₀ </
-------------	----------------	--------	----	--------	-------	-----------	----------------	----------------	----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	-----------------------

Tabla 5. Resumen ensayos de laboratorio sondeos 8, 9 y 10

[illegible]

Fuente: Diseños Geotécnicos

5.4 PERFIL ESTRATIGRÁFICO PROMEDIO – MODELO GEOLÓGICO GEOTÉCNICO

Con base en los trabajos de exploración del subsuelo llevados a cabo en el sector objeto de estudio y en los ensayos de laboratorio efectuados, se establece la siguiente secuencia estratigráfica promedio para el sector en estudio.

Desde la superficie actual del terreno y hasta una profundidad promedio la cual varía entre 1,0m y 3,50m, se detecta la presencia de un depósito coluvial (Qar), el cual está conformado por gravas y bloques en matriz arcillosa de color café con vetas rojizas y moradas, de compacidad muy suelta a suelta en los granulares y de consistencia blanda a media en la matriz. Presenta valores de resistencia promedio a la penetración estándar entre 3 y 7 golpes/pie. En las fotografías a continuación se observan los materiales característicos de este estrato.



Fotografía 25 y 26. Materiales característicos del estrato 1

Subyaciendo el estrato anterior y hasta la máxima profundidad de exploración (10m), se reporta la existencia arcillolitas de color café con vetas grises y rojizas, pertenecientes a la formación Guaduas (Tkg), fracturadas. Exhiben valores de rechazo al ensayo de resistencia a la penetración estándar SPT. En las fotografías a continuación se observan los materiales característicos de este estrato.



Fotografía 27 y 28. Materiales característicos del estrato 2

En las figuras a continuación se muestra el resumen gráfico de las propiedades índice de cada uno de los sondeos efectuados en el tramo objeto de estudio.

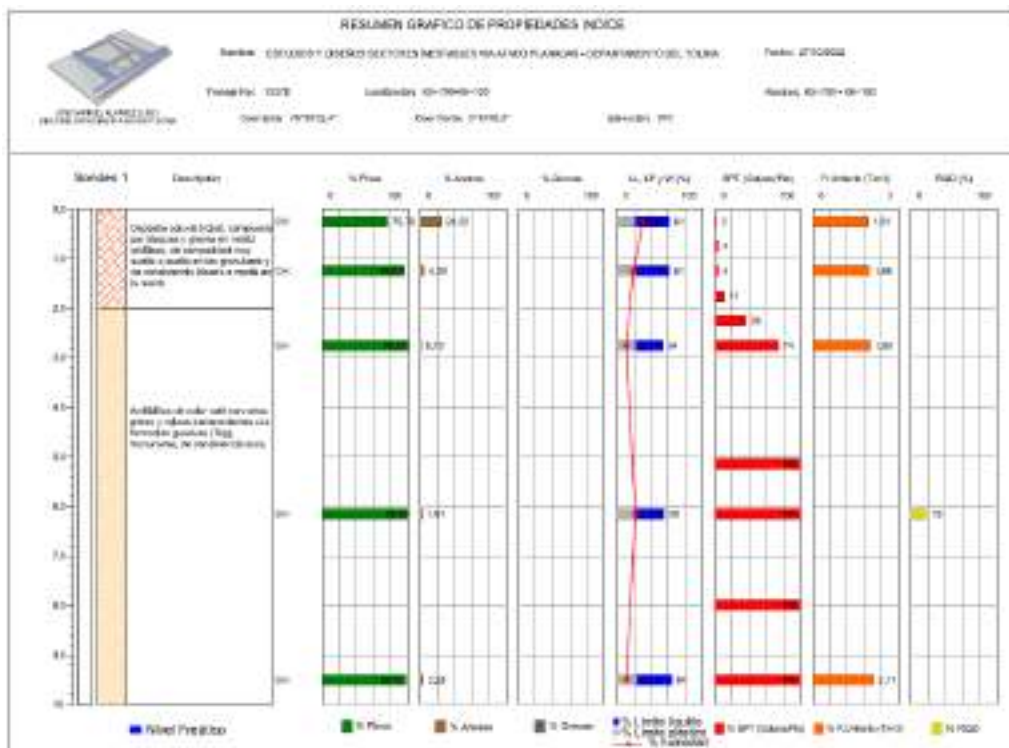


Imagen 21. Resumen grafico de las propiedades índice sondeo 1

Fuente: Diseños Geotécnicos

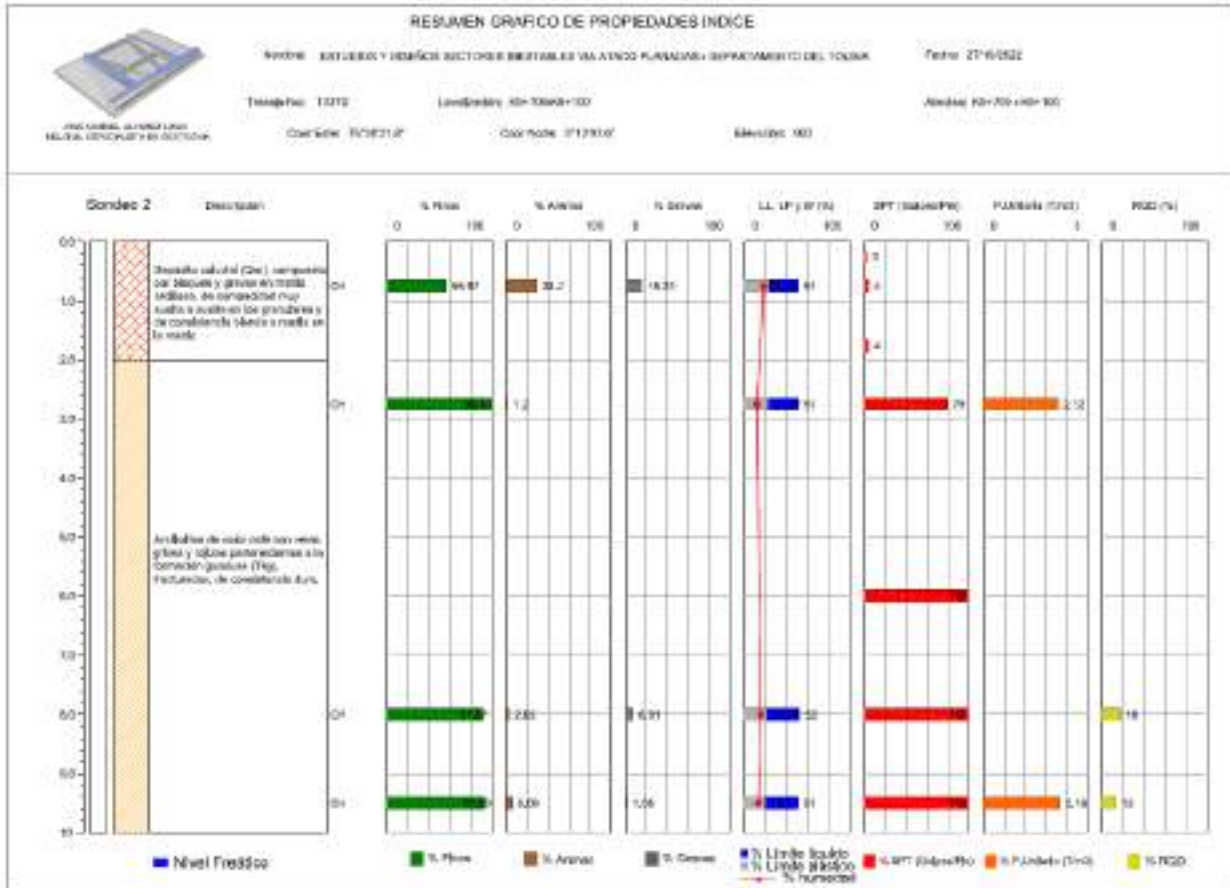


Imagen 22. Resumen gráfico de las propiedades índice sondeo 2

Fuente: Diseños Geotécnicos

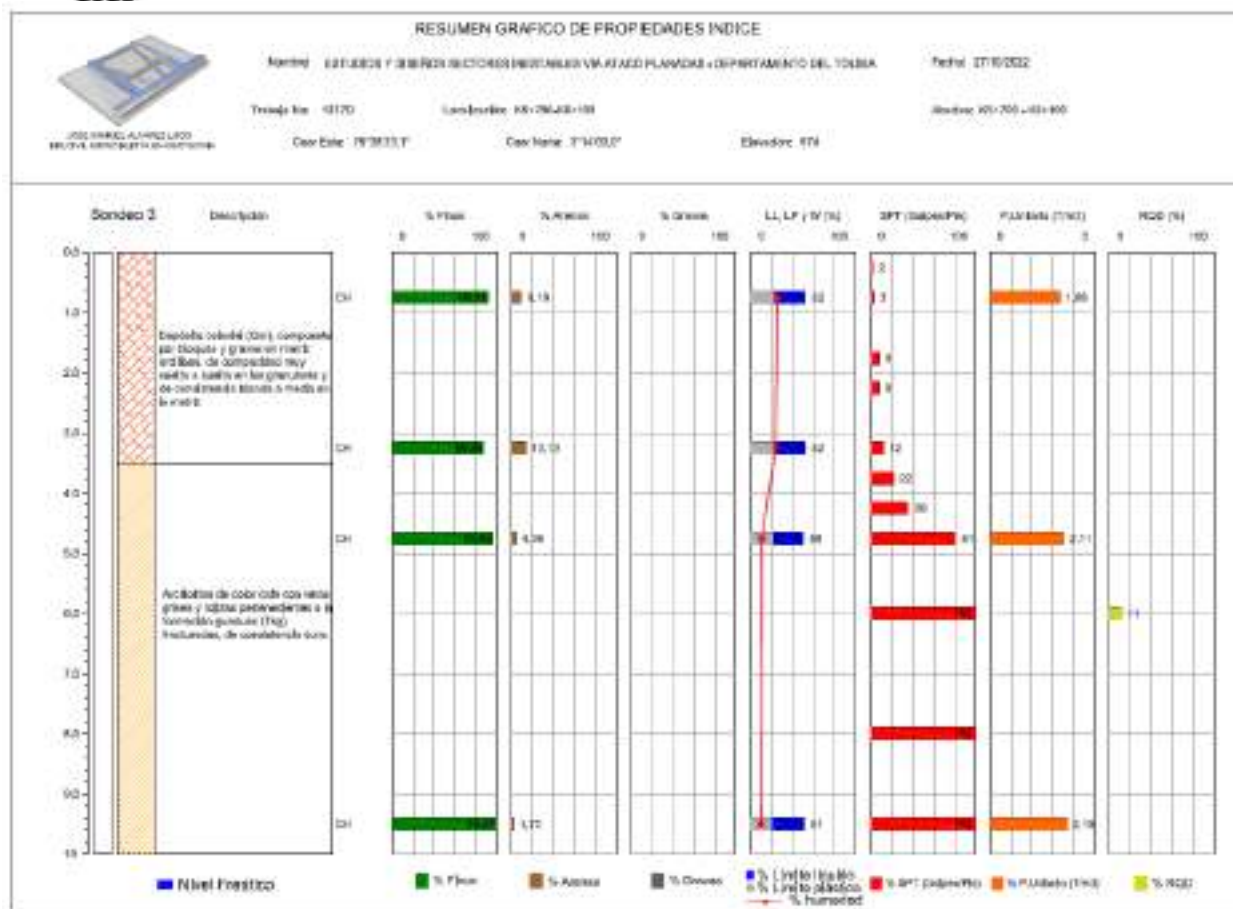


Imagen 23. Resumen grafico de las propiedades índice sondeo 3

Fuente: Diseños Geotécnicos

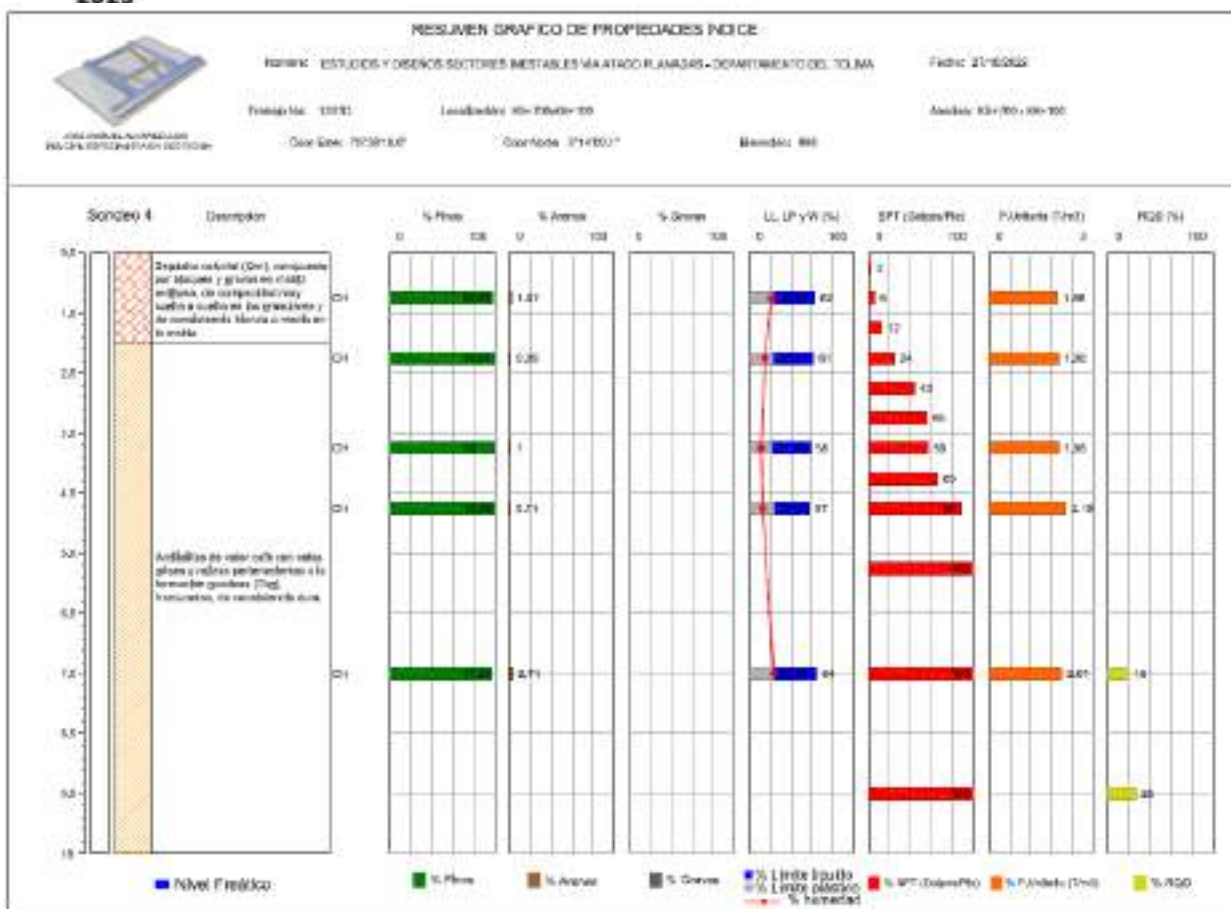


Imagen 24. Resumen grafico de las propiedades índice sondeo 4

Fuente: Diseños Geotécnicos

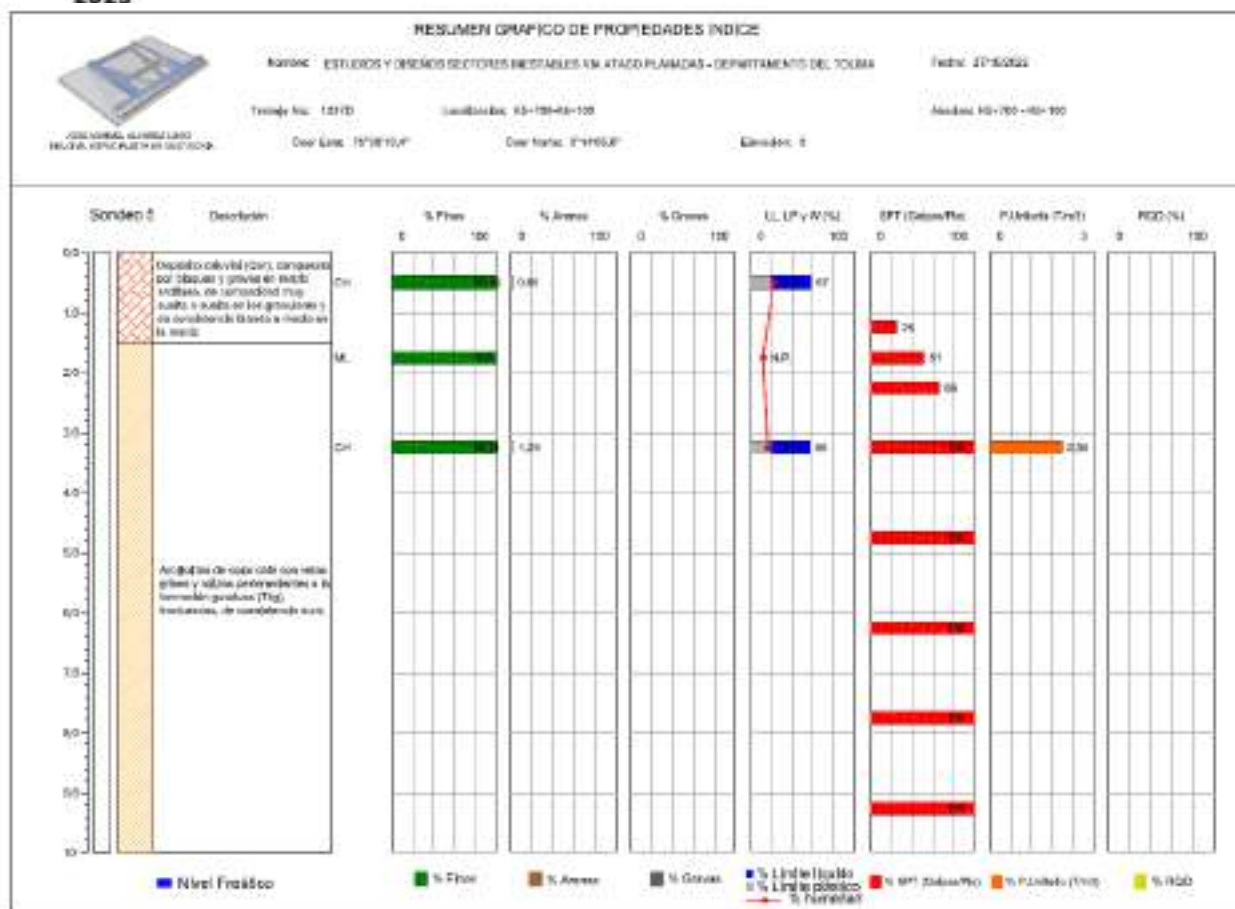


Imagen 25. Resumen grafico de las propiedades índice sondeo 5

Fuente: Diseños Geotécnicos

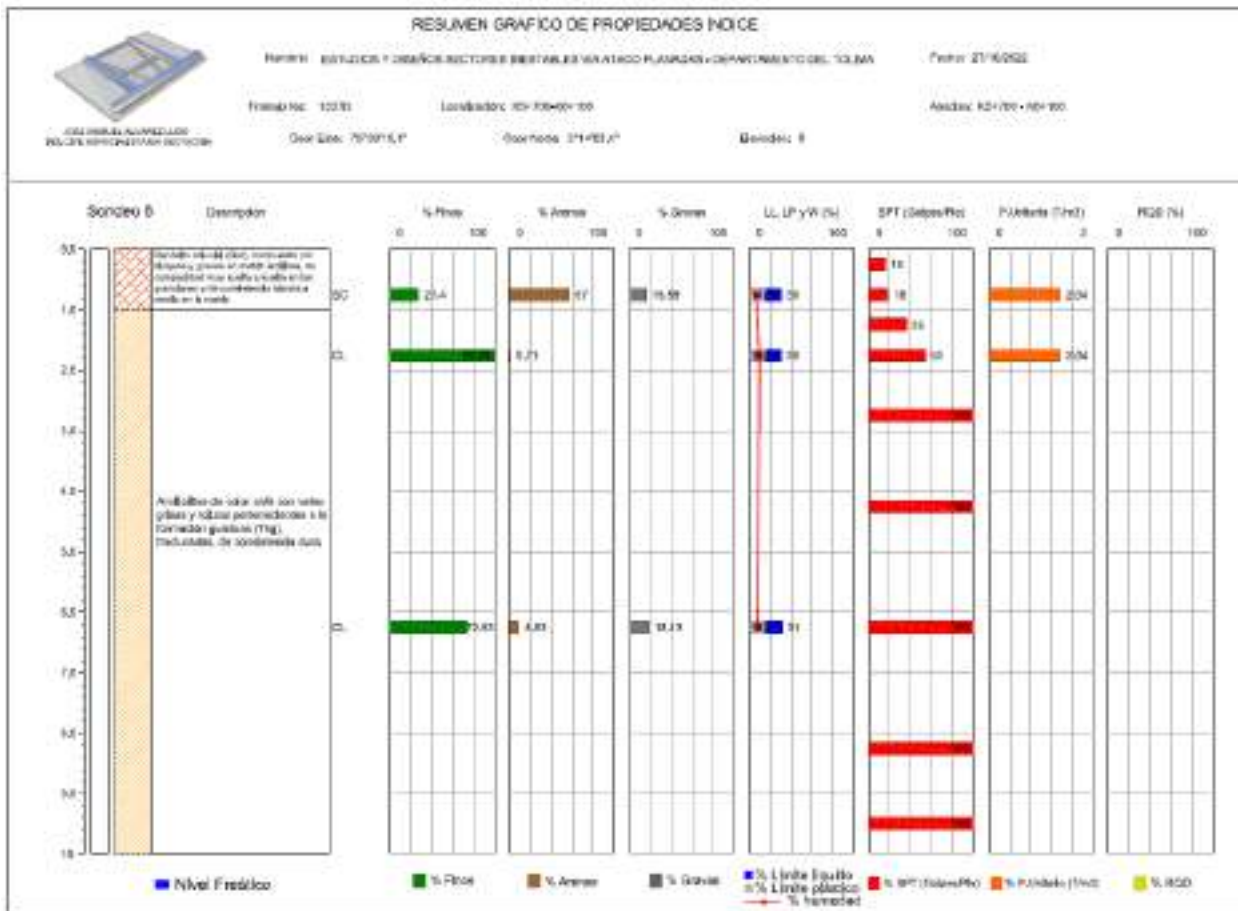


Imagen 26. Resumen grafico de las propiedades índice sondeo 6

Fuente: Diseños Geotécnicos

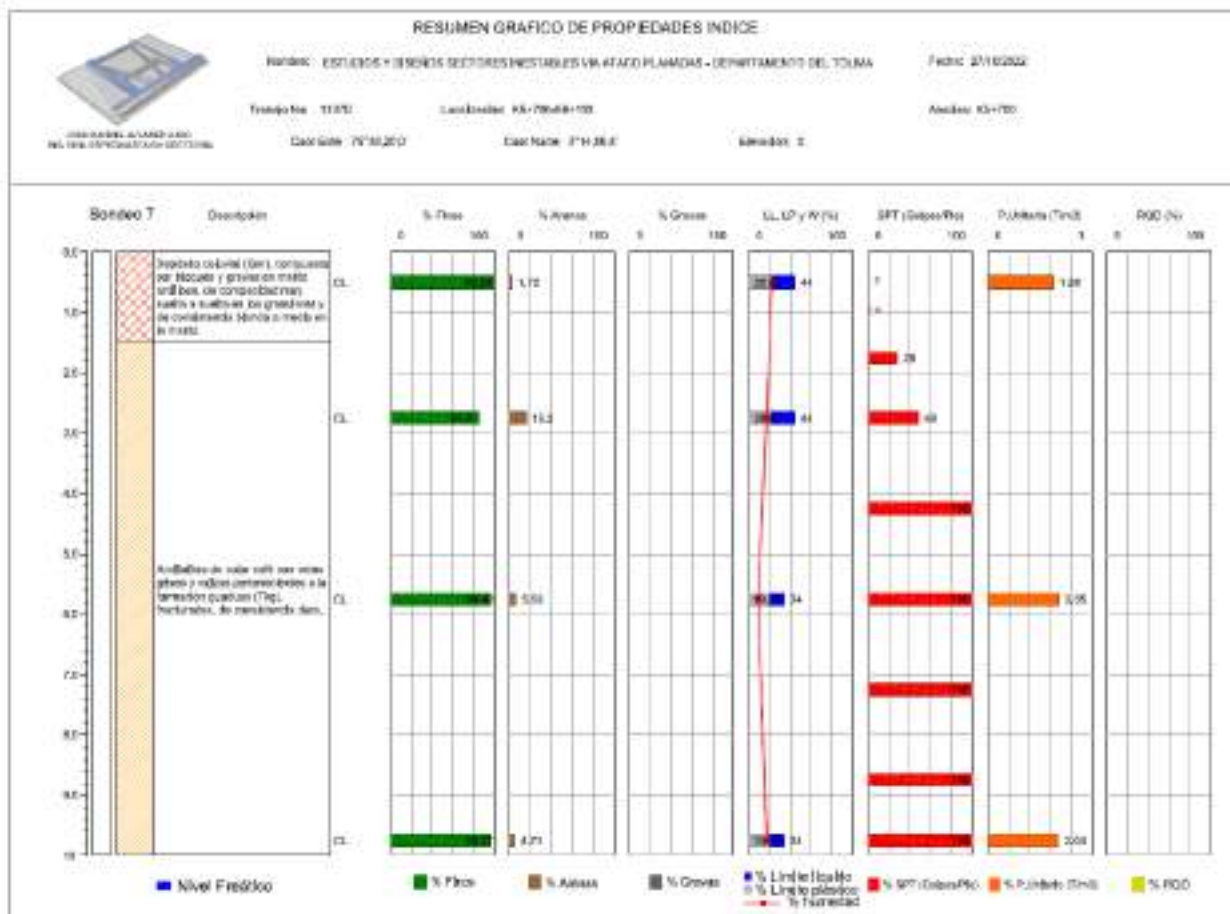


Imagen 27. Resumen grafico de las propiedades índice sondeo 7

Fuente: Diseños Geotécnicos

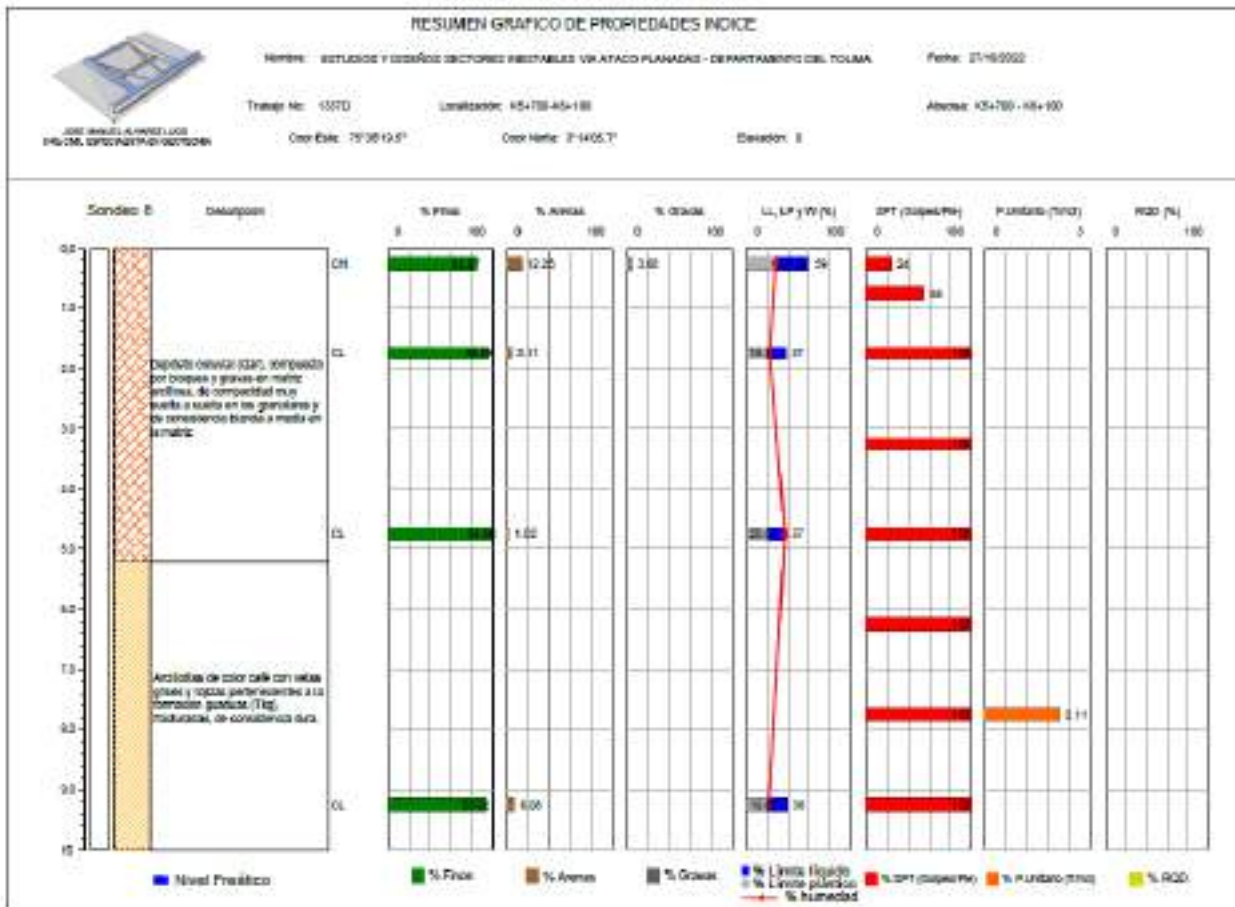


Imagen 28. Resumen grafico de las propiedades índice sondeo 8

Fuente: Diseños Geotécnicos

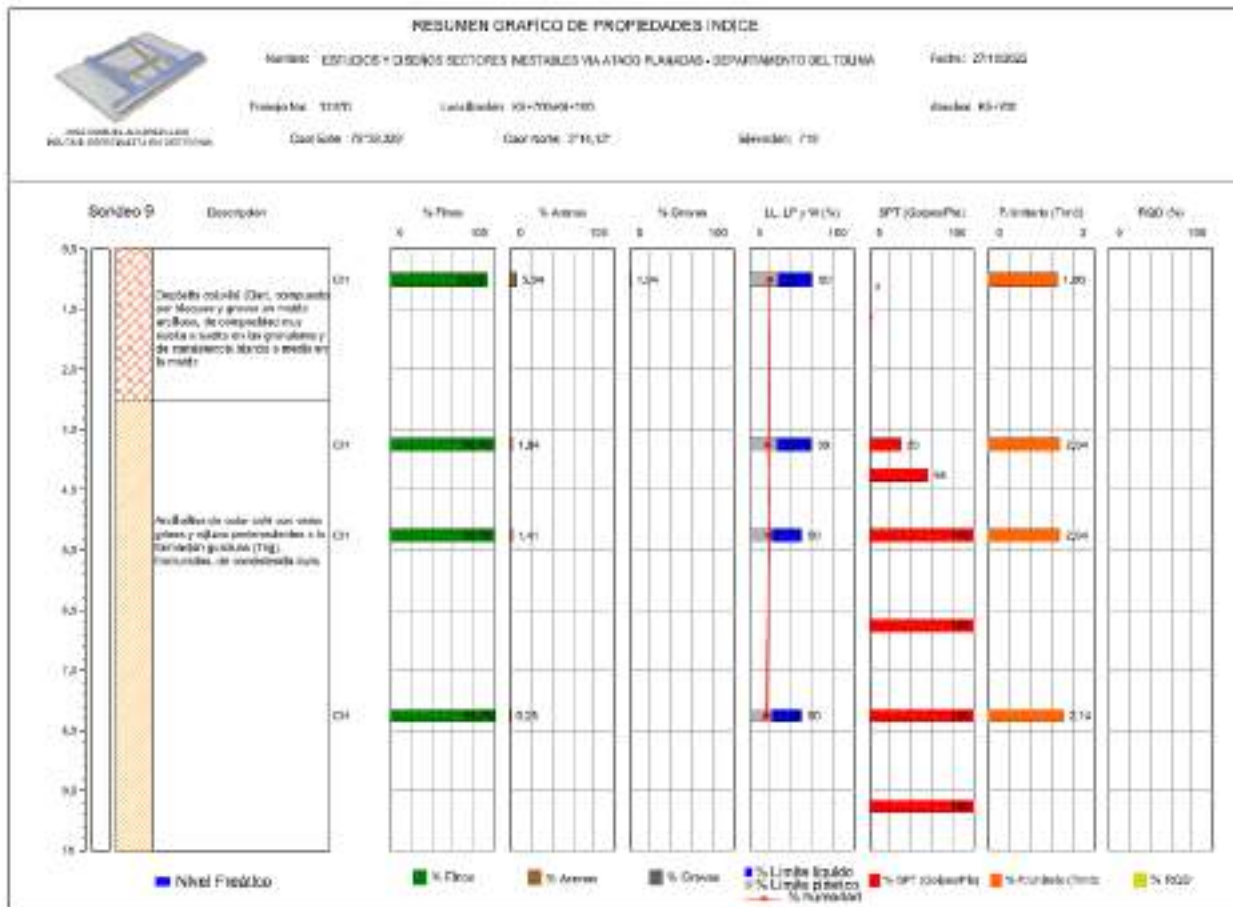


Imagen 29. Resumen grafico de las propiedades índice sondeo 9

Fuente: Diseños Geotécnicos

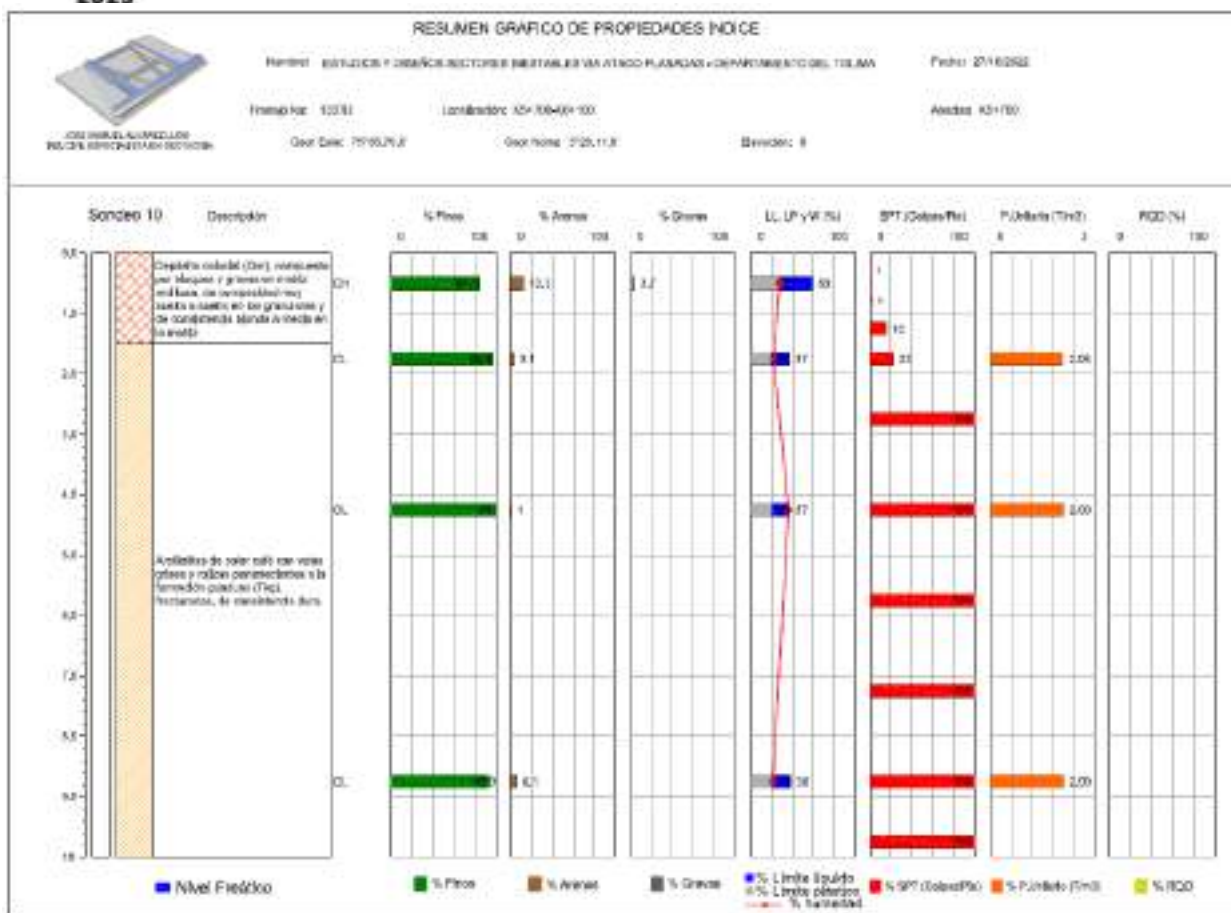


Imagen 30. Resumen grafico de las propiedades índice sondeo 10

Fuente: Diseños Geotécnicos

En las imágenes a continuación se muestra el modelo geológico – geotécnico definido para el sector inestable del K5+600 a K6+100

Sección de análisis K5+650

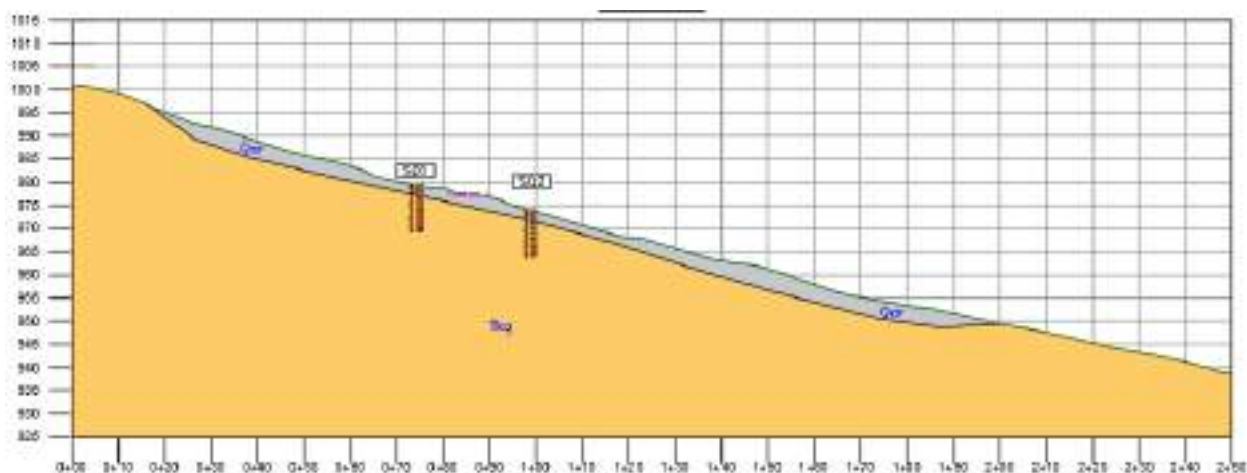


Imagen 31. Perfil Transversal A-A', sitio K5+650.
Fuente: Diseños Geotécnicos S.A.S

Sección de análisis K5+720

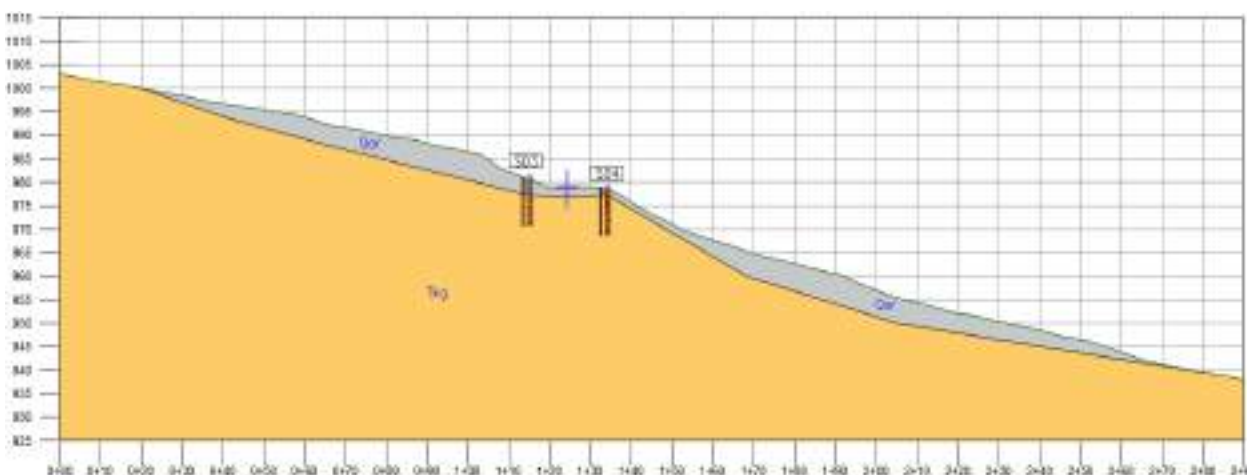


Imagen 32. Perfil Transversal B-B', sitio K5+720.
Fuente: Diseños Geotécnicos S.A.S

Sección de análisis K5+840

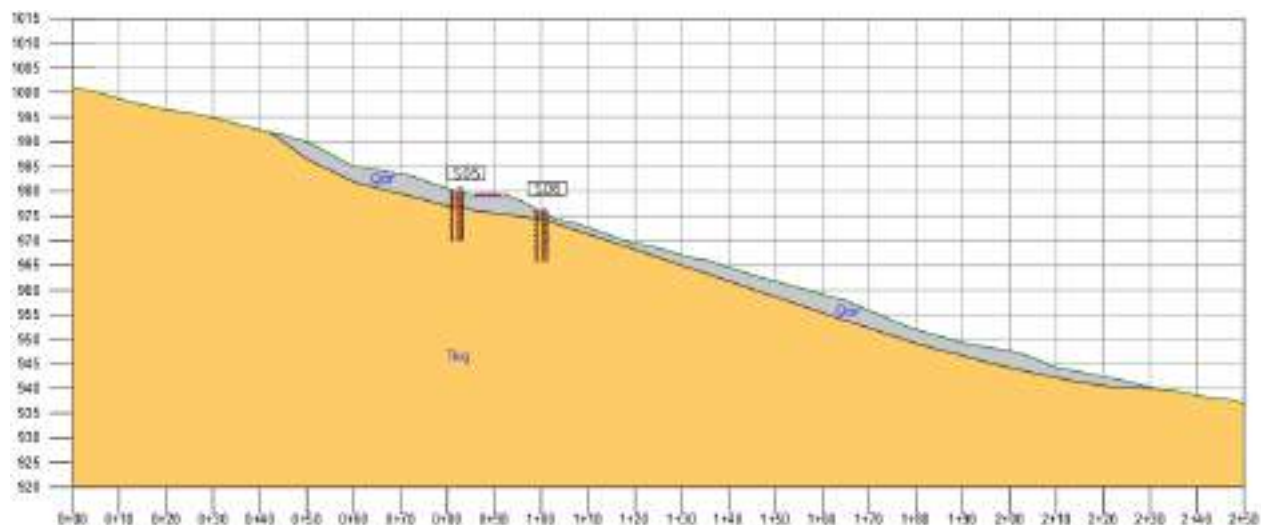


Imagen 33. Perfil Transversal C-C', sitio K5+840.
Fuente: Diseños Geotécnicos S.A.S

Sección de análisis K5+870

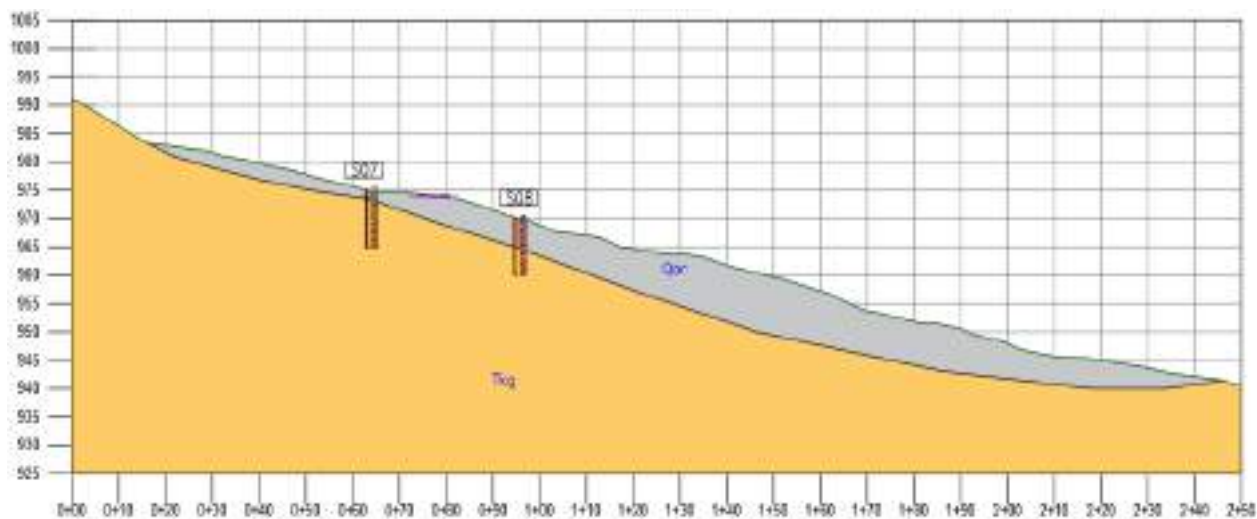


Imagen 34. Perfil Transversal D-D', sitio K5+870.
Fuente: Diseños Geotécnicos S.A.S

Sección de análisis K5+970

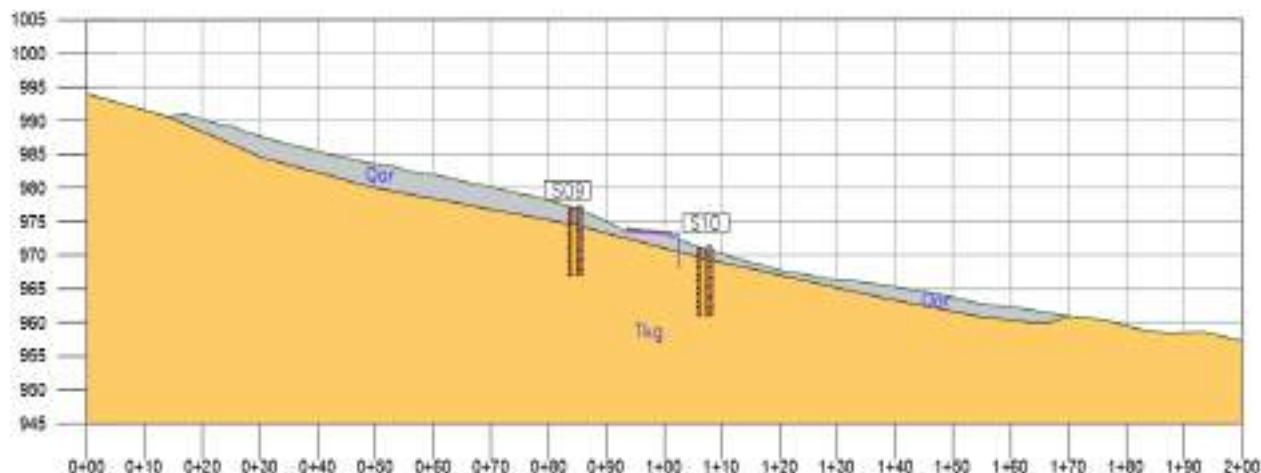


Imagen 35. Perfil Transversal E-E', sitio K5+970. Fuente: Diseños Geotécnicos S.A.S

De acuerdo a las perforaciones realizadas y a los análisis efectuados se puede observar la diferencia de resistencias de los materiales que conforman el perfil estratigráfico el cual varía con la profundidad, por tal razón, los elementos de cimentación deberán quedar embebidos en el material competente como mínimo tres veces el diámetro.

5.5 NIVEL FREÁTICO

El nivel freático no fue detectado en ninguna de las perforaciones efectuadas en el sector objeto de estudio. Sin embargo, es importante mencionar que los taludes se encuentran saturados completamente en superficie, debido a las lluvias que se presentan en la zona y a los cauces que corren sobre los taludes sin ningún control.

6 DISEÑO GEOTÉCNICO

Con base en las propiedades geomecánicas de los materiales que conforman el perfil estratigráfico del tramo en estudio, y teniendo en cuenta tanto las condiciones de entorno como las características del mismo, fueron llevados a cabo los análisis geotécnicos

6.1 PARÁMETROS DE DISEÑO

Para la selección de los parámetros de diseño, se emplearon los datos de resistencia derivados de ensayos de penetración estándar SPT. Adicionalmente, tal y como se muestra en el modelo geotécnico, fueron tenidos en cuenta aspectos como el porcentaje de finos y la presión de confinamiento para la evaluación y selección de los parámetros.

Así las cosas, los parámetros de diseño fueron seleccionados a partir de diferentes metodologías de análisis, como son correlaciones empíricas con el ensayo de penetración estándar, considerando entre las cuales se pueden mencionar a De Mello (1971), Muromachi (1974), Peck (1974), Meyerhof (1956). Así mismo se han tenido en cuenta los resultados de los ensayos de laboratorio, los cuales a su vez han sido calibrados con los estipulados en la literatura existente; en cuanto a la componente cohesiva, se ha considerado teniendo en cuenta los porcentajes de finos reportados en la matriz. Para tal fin fueron empleadas las correlaciones de Stroud and Butler (1974) y de la NAVFAC (1971) este último en función del índice de plasticidad de la fracción fina.

Así mismo de acuerdo con lo descrito en el Código Colombiano de Diseño de Puentes CCP-14 se han calculado los valores de N para el estrato No 1. Por lo tanto:

Tabla 6. Corrección de N - Número de golpes promedio del ensayo de penetración estándar (SPT), estratos 1

i	di (m)	Ni	N60i	di/Ni
1	0,5	2	2,5	0,20
2	0,5	2	2,5	0,20
3	0,5	3	3,75	0,13
4	0,5	2	2,5	0,20
5	0,5	3	3,75	0,13
6	0,5	3	3,75	0,13
7	0,5	4	5	0,10
8	0,5	3	3,75	0,13
9	0,5	3	3,75	0,13
Σ	4,5			1,37

Nprom	3
--------------	---

Los valores de peso unitario de los materiales identificados fueron tomados en promedio de los resultados de los ensayos de laboratorio, sin embargo y teniendo en cuenta los valores de N obtenidos del ensayo de SPT, estos han sido calibrados y verificados de acuerdo a la literatura existente tal y como se relaciona en la tabla a continuación.

Tabla 7. Correlación N vs. Peso Unitario (fuente: Design of Sheet Pile Walls, U. S. Army Corps of Engineers, Table 3-1 Granular Soil Properties)

N	Peso Unitario
≤ 6	1600
≤ 10	1680
≤ 15	1750
≤ 20	1800
≤ 25	1850
≤ 30	1900
≤ 40	1950
> 40	2000

A partir del manual de cimentaciones del INVIAS, se tomaron las relaciones para el cálculo del módulo de elasticidad y coeficiente de poisson presentadas en la tabla 4.6.2 Constantes elásticas de diferentes suelos modificadas de acuerdo con el U.S. Department of the Navy (1982) y Bowles (1988).

Tabla 8. Constantes elásticas de diferentes suelos modificadas de acuerdo con el U.S. Department of the Navy (1982) y Bowles (1988) (Fuente: Manual de Cimentaciones del Invias)

TIPO DE SUELO	RANGO DE VALORES TÍPICOS MÓDULO DE YOUNG E_s (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON μ (ADIMENSIONAL)	ESTIMACIÓN DE E_s A PARTIR DE N	
			TIPO DE SUELO	E_s (MPa)
Arcilla: Blanda	2-4-15	0,2 – 0,5	Limos, limos arenosos, mezclas ligeramente cohesivos.	0,4N
sensible	15-50	0,4-0,5 (no drenada)	Arenas limpas finas a medias y arenas ligeramente limosas.	0,7N
Medianamente rígida a rígida	50-100	0,20 – 0,5	Arena gruesa y arena con poca grava.	1,0N
Muy rígida	> 60	0,20 – 0,5	Grava arenosa y gravas.	1,1N
Loes Limo	15-60 2-20	0,1-0,3 0,3-0,35	Grava arenosa y gravas	1,1N

6.2 PARÁMETROS DE RESISTENCIA EN ROCAS

El criterio de rotura de macizos rocosos de Hoek-Brown:

Es considerablemente aceptado y muy aplicado en un gran número de proyectos a nivel mundial. Aunque el criterio se considera agradable, existen algunas incertidumbres e inexactitudes que ha creado inconvenientes en su implementación a modelos numéricos y a programas de computación de equilibrio límite. En particular, la dificultad de encontrar un ángulo de fricción y resistencia cohesiva equivalentes para un macizo rocoso dado, ha sido un inconveniente desde la publicación original del criterio en 1980. Un programa de computación asociado, denominado "RocLab", ha sido desarrollado con la finalidad de ser un medio conveniente para la obtención de parámetros de resistencia por Hoek-Brown al criterio más conocido mohr coulomb.

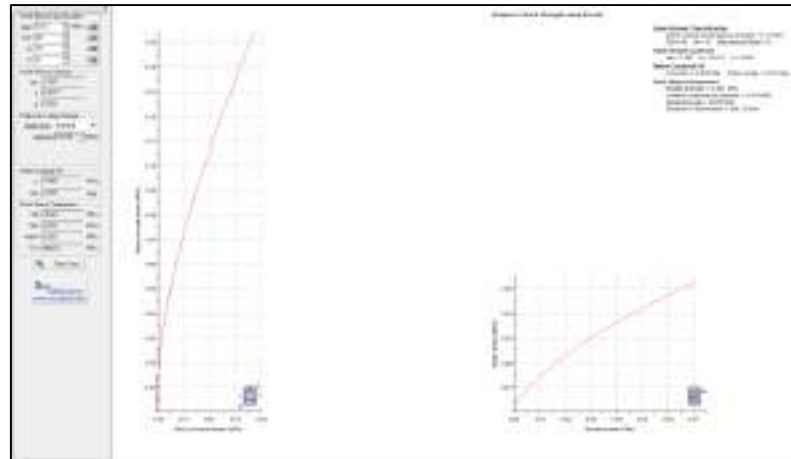


Imagen 36. Parámetros de roca según el criterio de Hoek-Brown basadas en el software RocLab de Roc Science.

Para adquirir los parámetros bajo el criterio de Mohr coulomb, se debe alimentar el programa bajo el análisis de 4 parámetros:

La resistencia a la compresión no confinada de la roca intacta σ_{ci}
 El parámetro de la roca intacta m_i
 El índice de resistencia geológica GSI
 El factor de perturbación D

El índice de resistencia geológica GSI, fue desarrollado por Hoek (1994) para corregir los problemas detectados con el uso del índice RMR para evaluar la resistencia de macizos rocosos según el criterio generalizado de Hoek-Brown. Se sostiene bajo criterios de la composición mineralógica y proceso de formación de la roca, y el RQD.

Para el caso en estudio, encontramos que el macizo está compuesto de areniscas y arcillolitas altamente fracturadas, por tal razón se optó por un GSI= 60, de una resistencia regular.

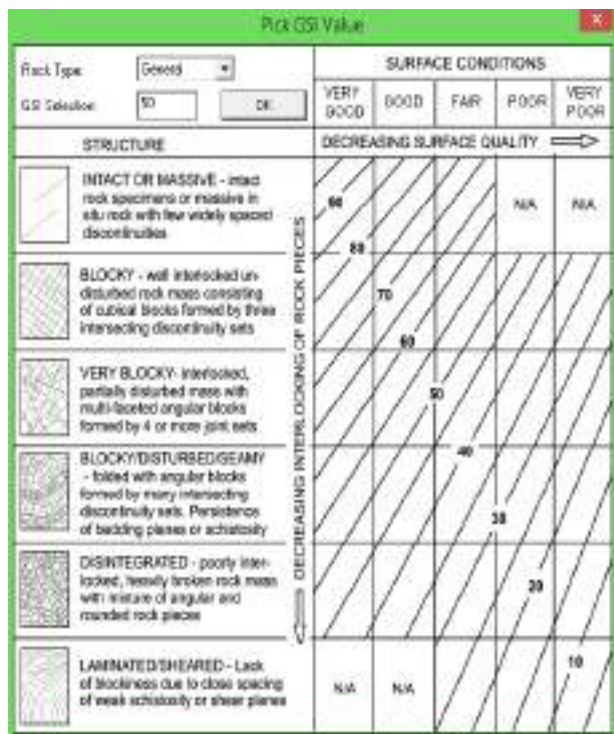


Imagen 37. Parámetros de roca según el criterio de Hoek-Brown basadas en el software RocLab de Roc Science.

Los parámetros de diseño seleccionados se han establecido para el depósito de coluvión a partir del retro cálculo, en donde se ejecutó de manera repetitiva el análisis de estabilidad variando el Angulo de fricción y la cohesión hasta encontrar un mecanismo de falla que se ajuste con el identificado en campo y que tenga un factor de seguridad cercano a 1,0.

Con base en lo anterior, en las tablas a continuación se presentan los parámetros de diseño seleccionados para la ejecución de los análisis geotécnicos requeridos para el diseño de las alternativas propuestas para cada uno de los pontones en estudio.

Tabla 9. Parámetros de diseño seleccionados sector inestable K5+600 – K6+100

Material	Profundidad (m)	Cohesión (t/m ²)	Angulo de fricción (φ)	γ (t/m ³)	Módulo de elasticidad (t/m ²)
Depósito coluvial (Qar), el cual está conformado por gravas y bloques en matriz arcillosa de color café con vetas rojizas y moradas, de compacidad muy suelta a suelta en los granulares y de consistencia blanda a media en la matriz	0,00 – 3,5	1,0	20	1,95	350
Arcillolita de color café con vetas grises, pertenecientes a la formación Guaduas (Tkg), fracturadas.	3,5- 10,0	1,0	33	2,09	70228

6.3 MODELO Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD – CONDICIÓN INICIAL

Con base en las observaciones de campo y en la etapa de exploración del subsuelo, fue definido el modelo estratigráfico para este sector, con el cual se llevaron a cabo los análisis de estabilidad general de la ladera, tendientes a la determinación del factor de seguridad actual.

Para tal efecto y haciendo uso de un modelo de equilibrio límite mediante el programa de computador SLIDE. El modelo geotécnico fue representado mediante un espacio bidimensional. El comportamiento mecánico de los estratos definidos fue establecido mediante un modelo de comportamiento tipo Mohr-Coulomb, los valores de factor de seguridad fueron evaluados con base en los mínimos valores obtenidos de cientos de superficies de falla de tipo planar.

La carga aplicada en los modelos corresponde a la establecida en la normatividad vigente (H.5.1.2 — ESTADOS LÍMITE DE FALLA-NSR-10), y que es transmitida por el tránsito vehicular, la cual equivale a 1,50 t/m².

Así las cosas, en las imágenes a continuación se muestra la geometría de análisis para el modelo analizado en condición inicial estático y Pseudoestático.

Los análisis de estabilidad efectuados contemplan diferentes mecanismos de falla para representar las diferentes condiciones de la ladera. Los modelos de estabilidad de taludes presentan las condiciones de estabilidad de la parte baja del talud externo, en donde debido a la disección que provocan los cauces presentes en la zona, se tienen taludes inestables que arrastran los depósitos hasta el nivel de la banca.

En los siguientes modelos numéricos se presentan los parámetros establecidos para el depósito a partir del retrocálculo, en donde se ejecutó de forma repetitiva el análisis de estabilidad variando el ángulo de fricción y la cohesión hasta encontrar un mecanismo de falla que se ajuste con el identificado en campo y que tenga un FS cercano a 1,0. En la siguiente tabla se presentan los parámetros definidos para el modelo geotécnico con base en el retrocálculo efectuado:

Tabla 10. Parámetros de diseño seleccionados con base en retrocálculo - sector inestable K5+600 – K6+100

Material	Profundidad (m)	Cohesión (t/m ²)	Angulo de fricción (φ)	γ (t/m ³)	Módulo de elasticidad (t/m ²)
Depósito coluvial (Qar), el cual está conformado por gravas y bloques en matriz arcillosa de color café con vetas rojizas y moradas, de compactación muy suelta a suelta en los granulares y de consistencia blanda a media en la matriz	0,00 – 3,5	0,7	12	1,95	350
Arcillolita de color café con vetas grises, pertenecientes a la formación Guaduas (Tkg), fracturadas.	3,5- 10,0	1,0	33	2,09	70228

Los materiales de depósito se están moviendo sobre las arcillolitas de color café con vetas grises, pertenecientes a la formación Guaduas (Tkg) las cuales se encuentran estables.

Sección de análisis K5+650



Imagen 38. Geometría de análisis K5+650

Condición inicial – Estático – talud interno

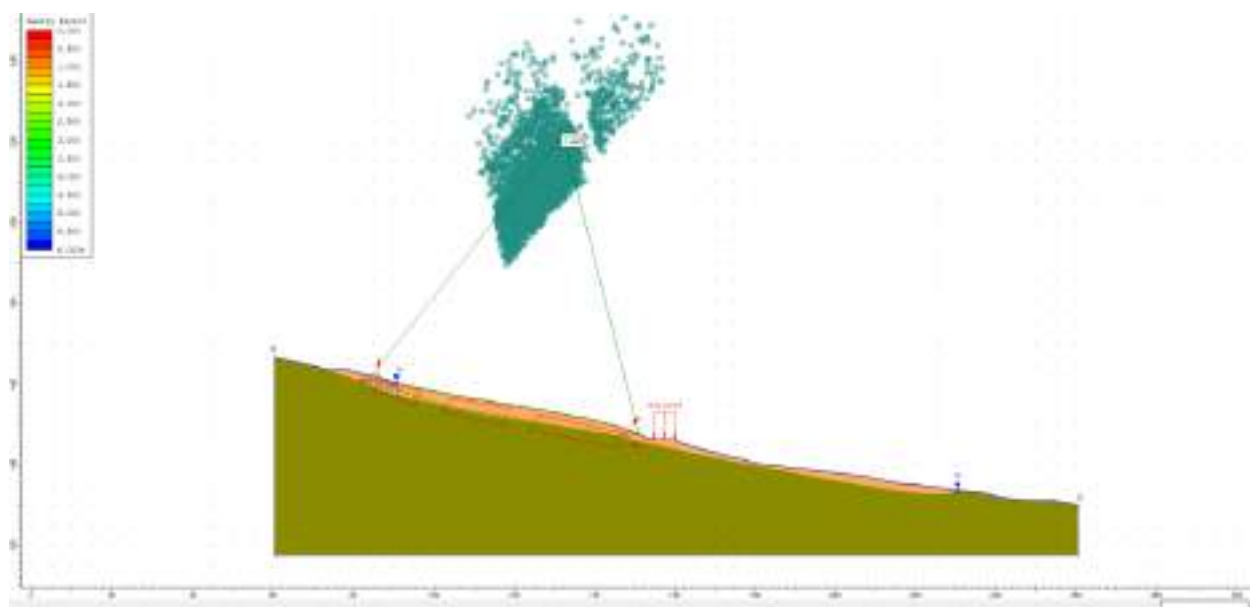


Imagen 39. Factor de seguridad C. inicial – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+650

Condición inicial – Estático – talud externo

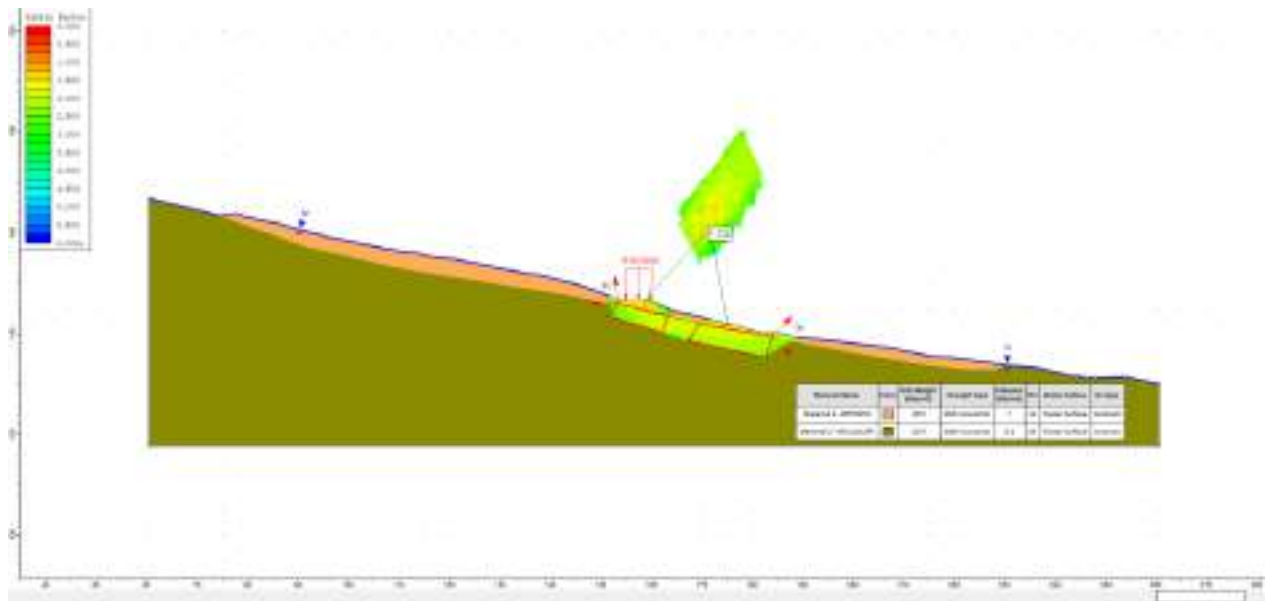


Imagen 40. Factor de seguridad C. inicial – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+650

Condición inicial – Pseudoestático – talud interno

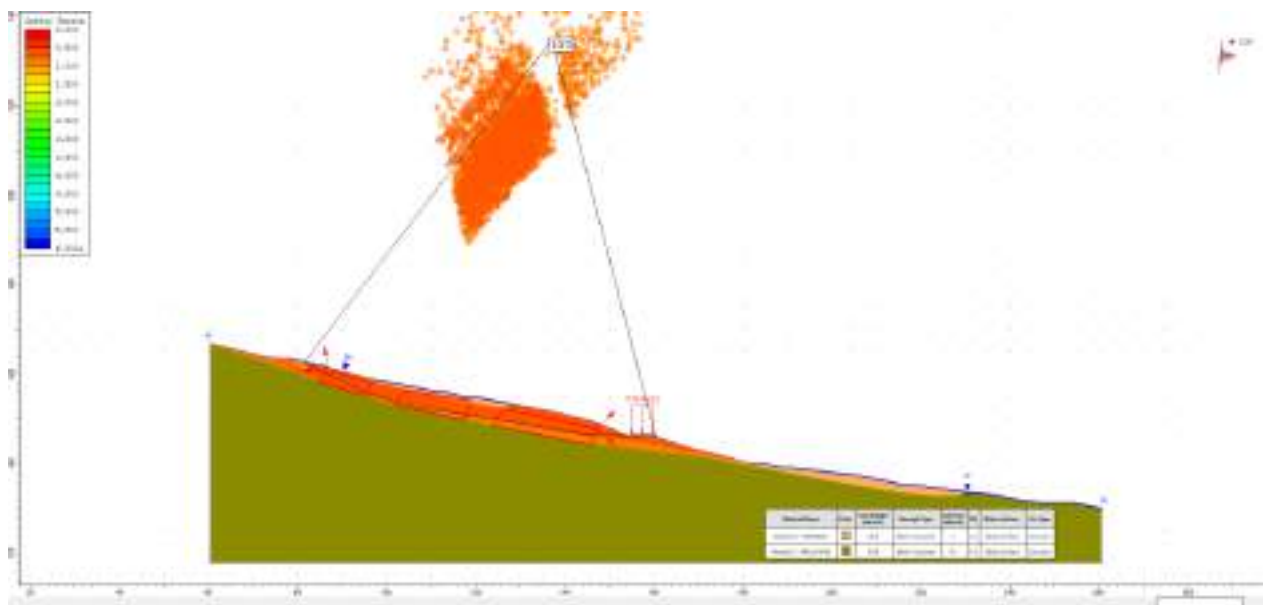


Imagen 41. Factor de seguridad C. inicial – Pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+650

Condición inicial – Pseudoestático – talud externo

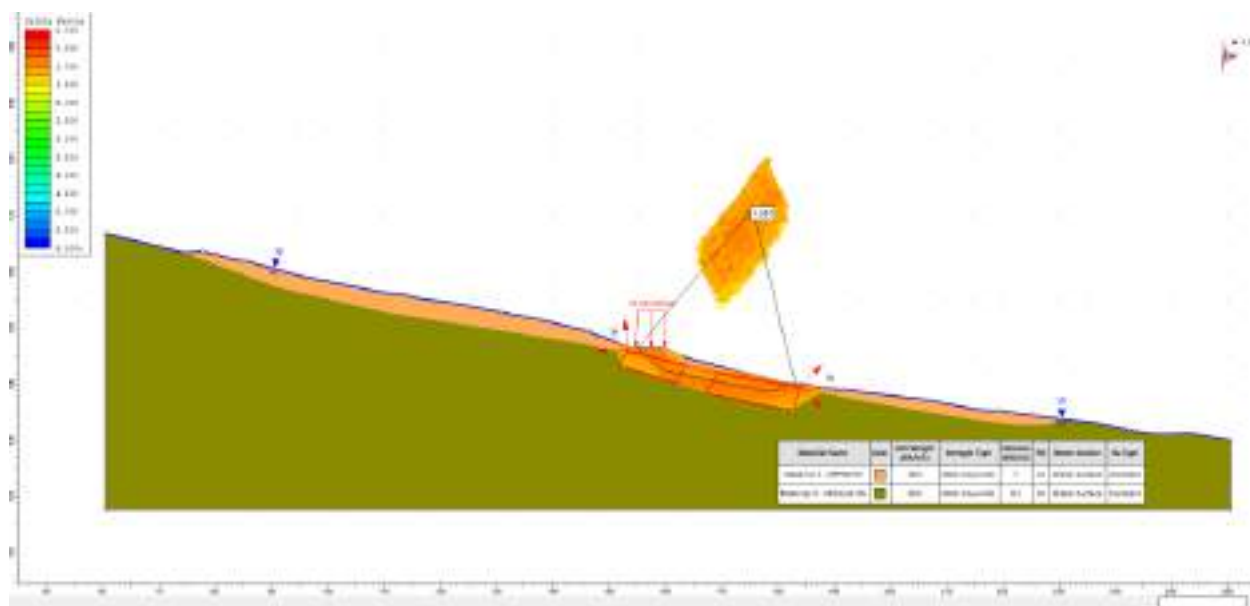


Imagen 42. Factor de seguridad C. inicial – Pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+650

Sección de análisis K5+720 - Estático– talud interno



Imagen 43. Factor de seguridad C. inicial – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+720

Sección de análisis K5+720 - pseudoestático- talud interno

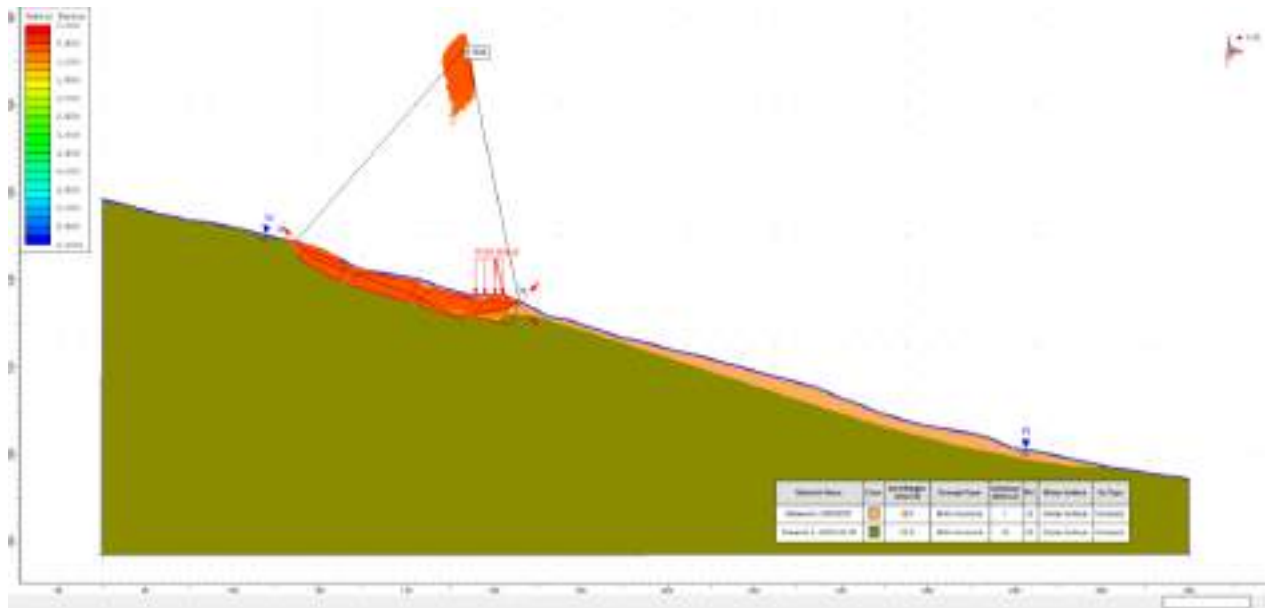


Imagen 44. Factor de seguridad C. inicial – Pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+720

Sección de análisis K5+720 - estático- talud externo

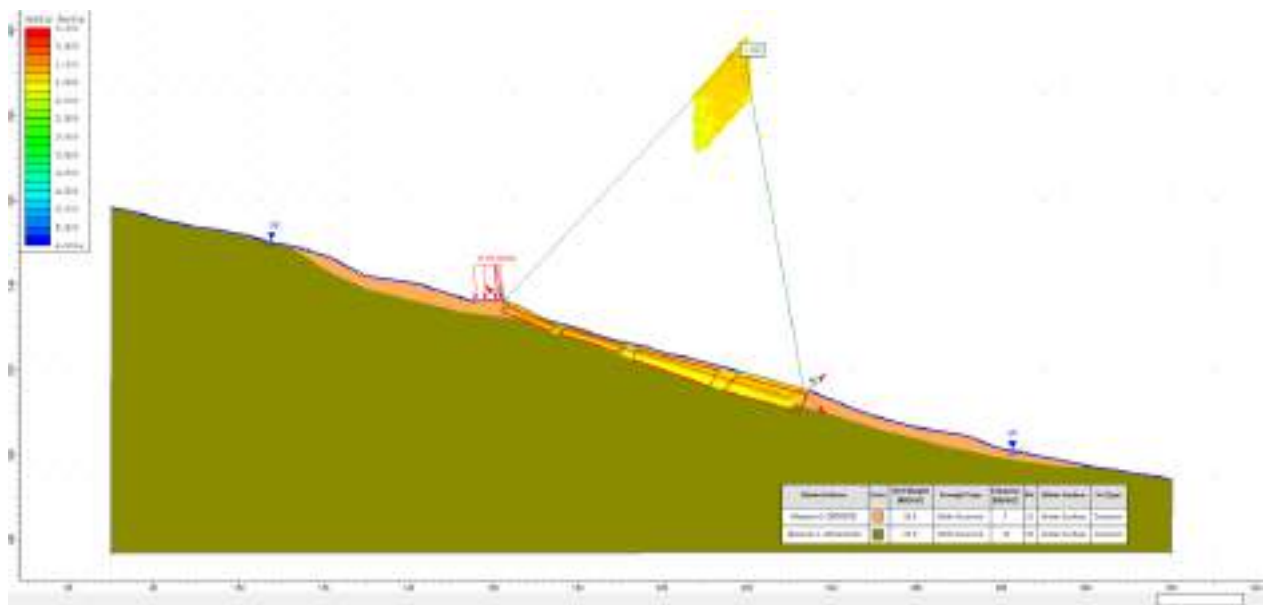


Imagen 45. Factor de seguridad C. inicial – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+720

Sección de análisis K5+720 - pseudoestático– talud externo

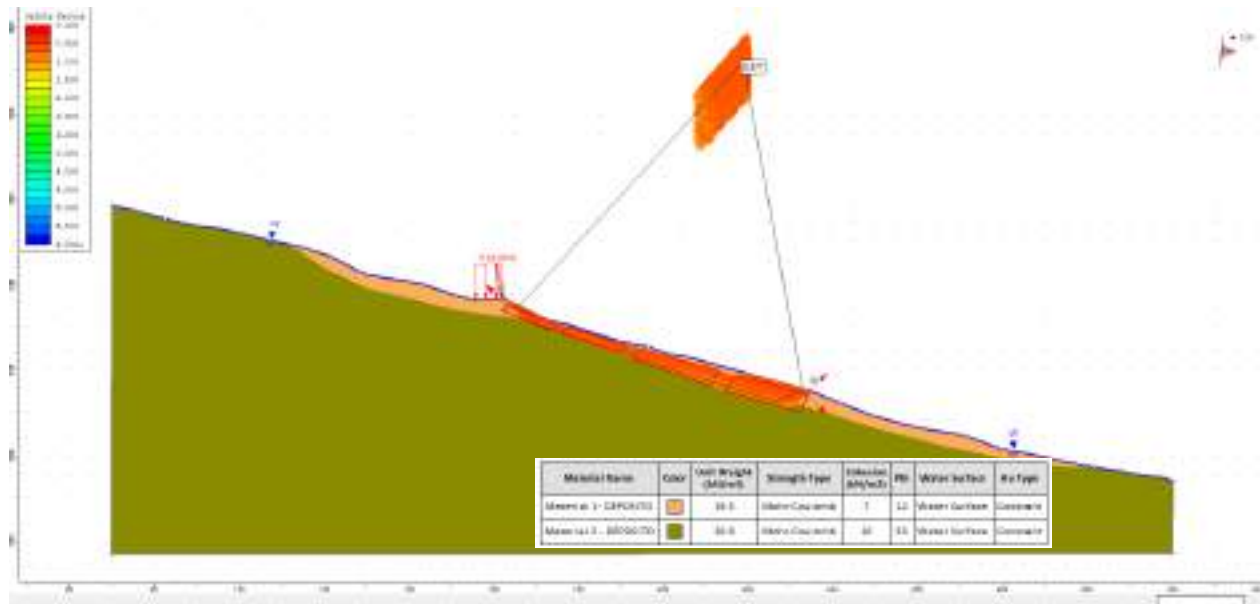


Imagen 46. Factor de seguridad C. inicial – Pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+720

Sección de análisis K5+840 - estático– talud interno

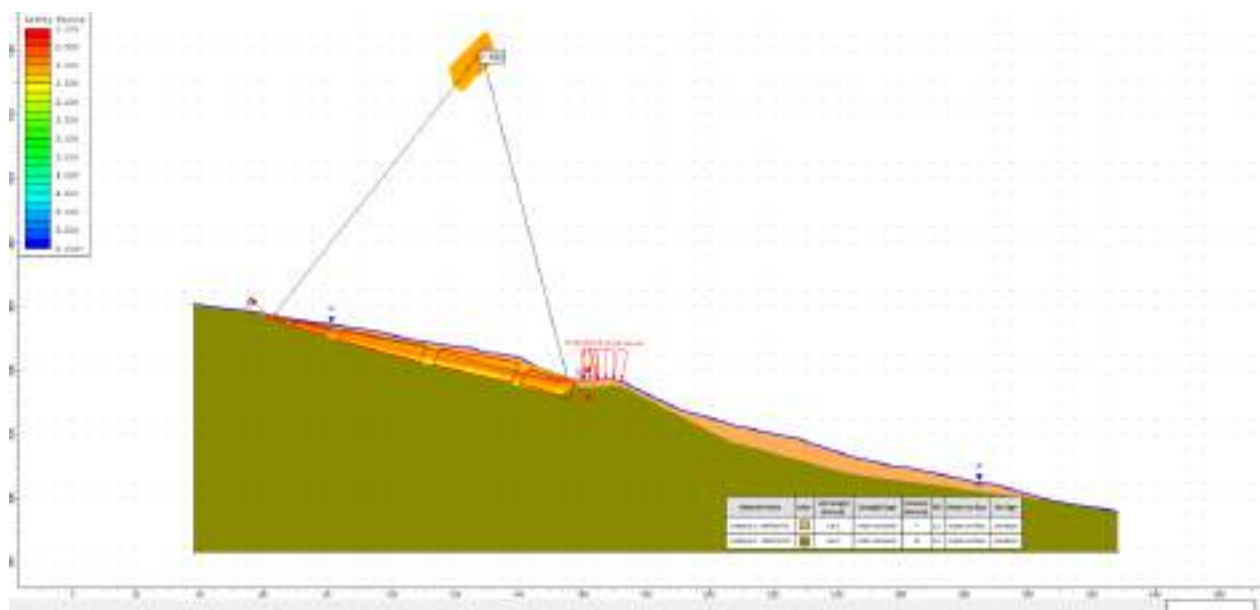
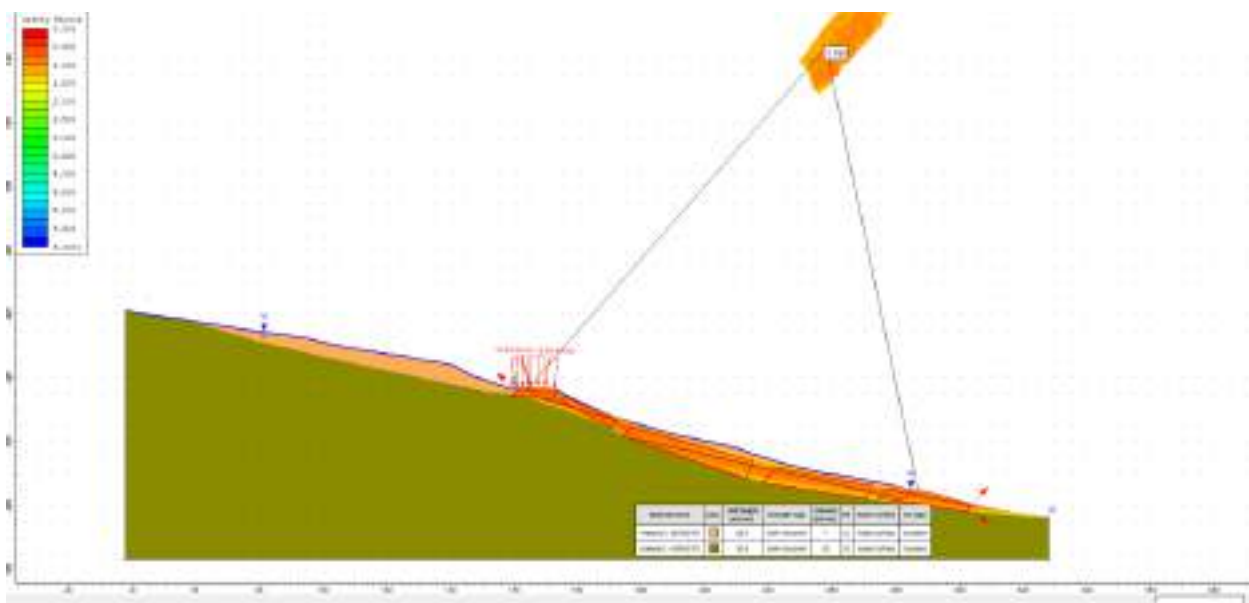


Imagen 47. Factor de seguridad C. inicial – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+840

The figure shows a cross-section of a slope with a green upper layer and a brown lower layer. A red area at the top left indicates a failure surface or slip surface. A vertical line labeled "Vertical Excavation" is shown near the center. A color scale on the left ranges from 0.000 to 0.700. A legend at the bottom right identifies materials and their properties.

Material Name	Type	Unit Weight (kN/m³)	Cohesion (kPa)	Internal Friction Angle (°)	Modulus of Elasticity (GPa)	Poisson's Ratio	Failure Mode
Upper Layer Material	Soil	18	10	30	1.0	0.3	Stress
Lower Layer Material	Rock	25	20	45	2.0	0.2	Strain

Sección de análisis K5+840 - estático- talud Externo



Página 65 de 96

Sección de análisis K5+840 - pseudoestático– talud Externo

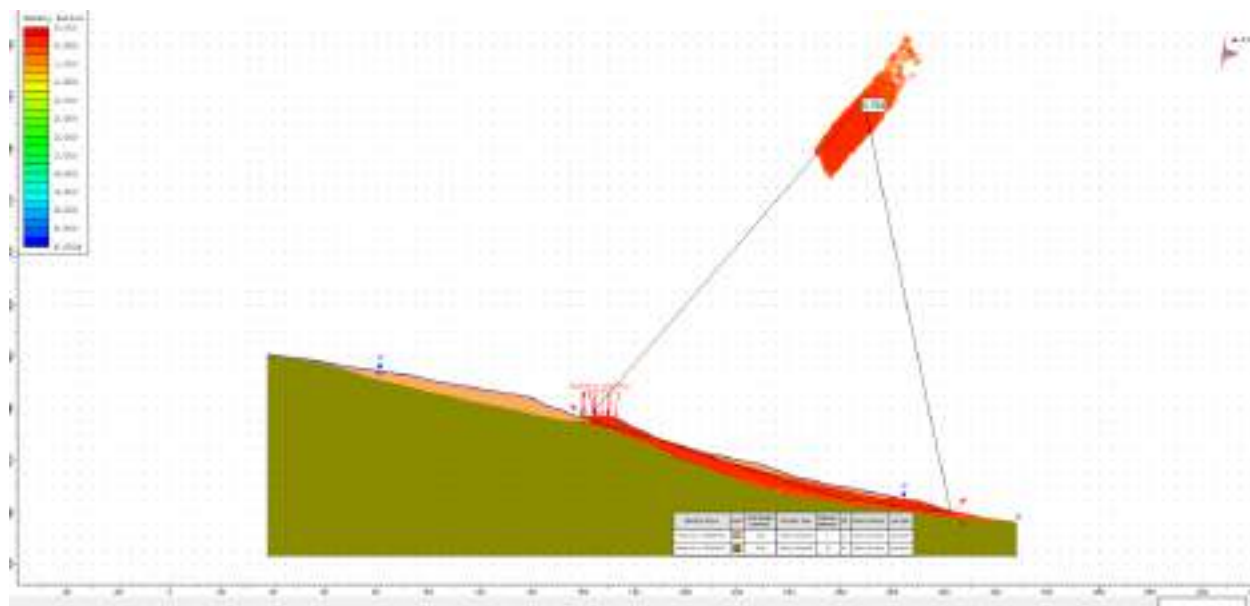


Imagen 50. Factor de seguridad C. inicial – Pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+840

Sección de análisis K5+870 - estático– talud interno

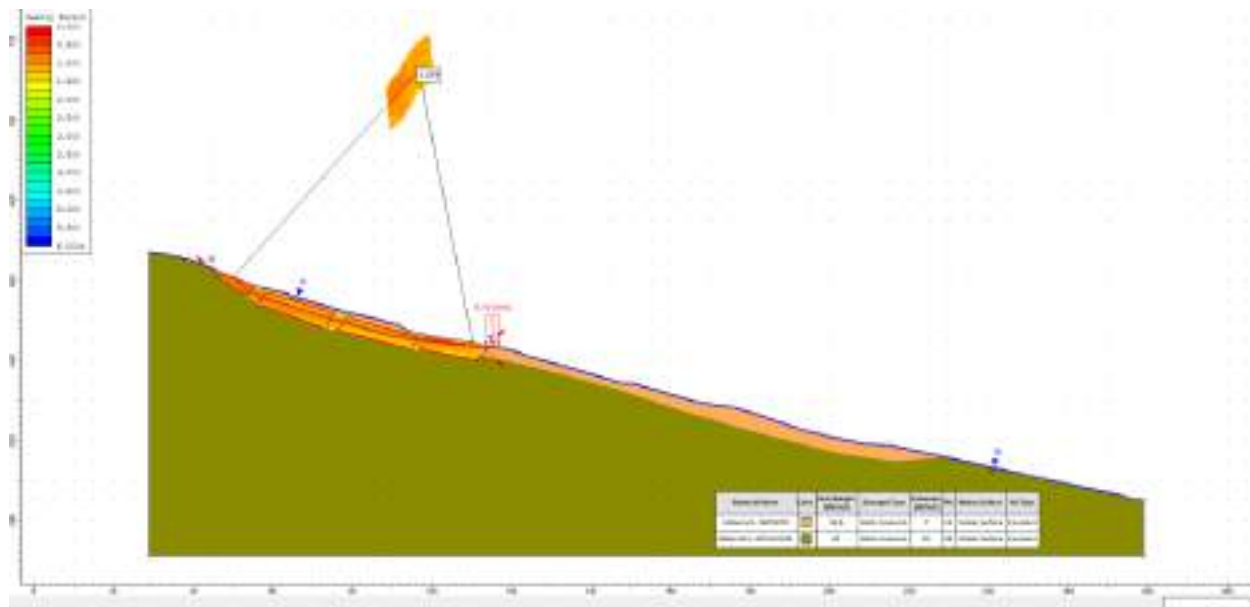


Imagen 51. Factor de seguridad C. inicial – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+870

Figure 10 is a 2D cross-section of a dam and its foundation. The dam is shown in red, with a red flag on top. The foundation is shown in green. A color scale on the left indicates the magnitude of the stress or strain, ranging from 0.000 to 1.000. A table at the bottom right provides material properties for the dam and foundation.

Material Name	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Unit Weight (kN/m³)	Compressive Strength (MPa)	Shear Strength (MPa)	Friction Angle (°)	Cohesion (MPa)
Concrete (Dam)	30000	0.2	24	30	10	30	0
Foundation (Soil)	10000	0.3	18	10	5	30	0

Imagen 52. Factor de seguridad C. inicial – Pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+870

Imagen 53. Factor de seguridad C. inicial – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+870

Sección de análisis K5+870 - pseudoestático– talud externo

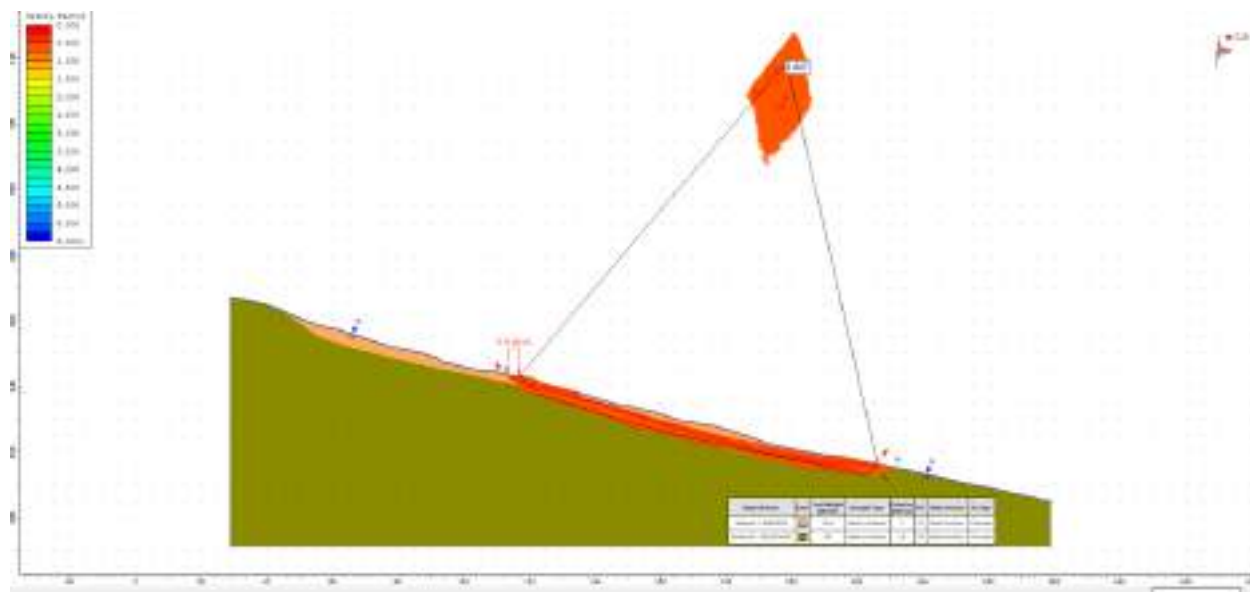


Imagen 54. Factor de seguridad C. inicial – Pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+870

Sección de análisis K5+970 - estático– talud interno

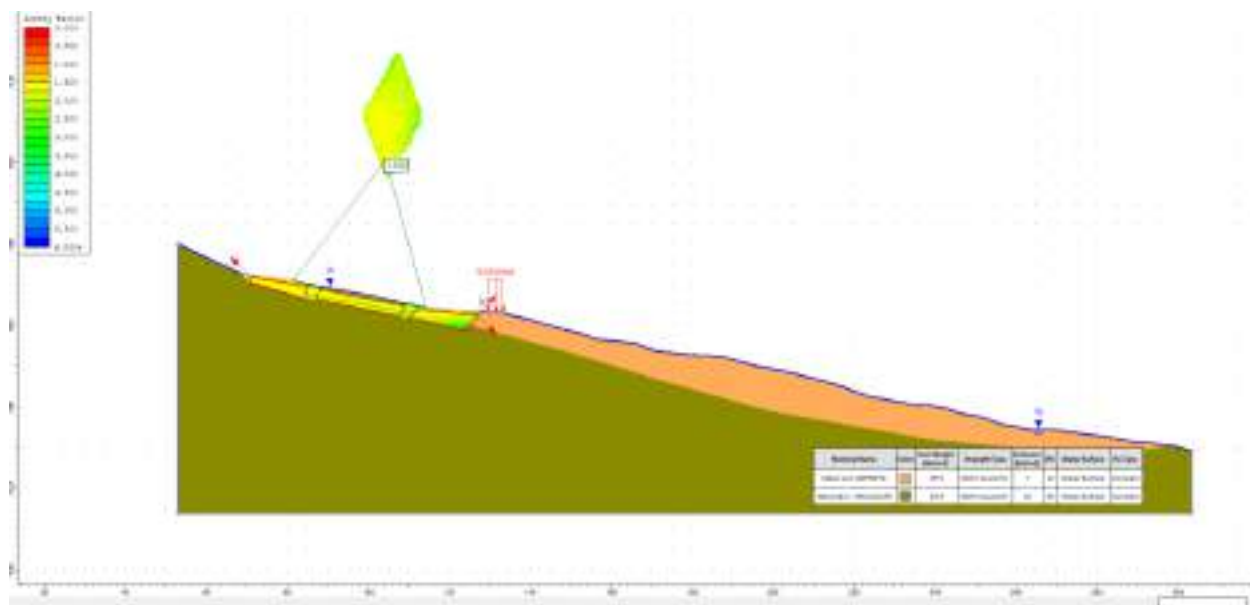


Imagen 55. Factor de seguridad C. inicial – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+970

Sección de análisis K5+970 - pseudoestático– talud interno

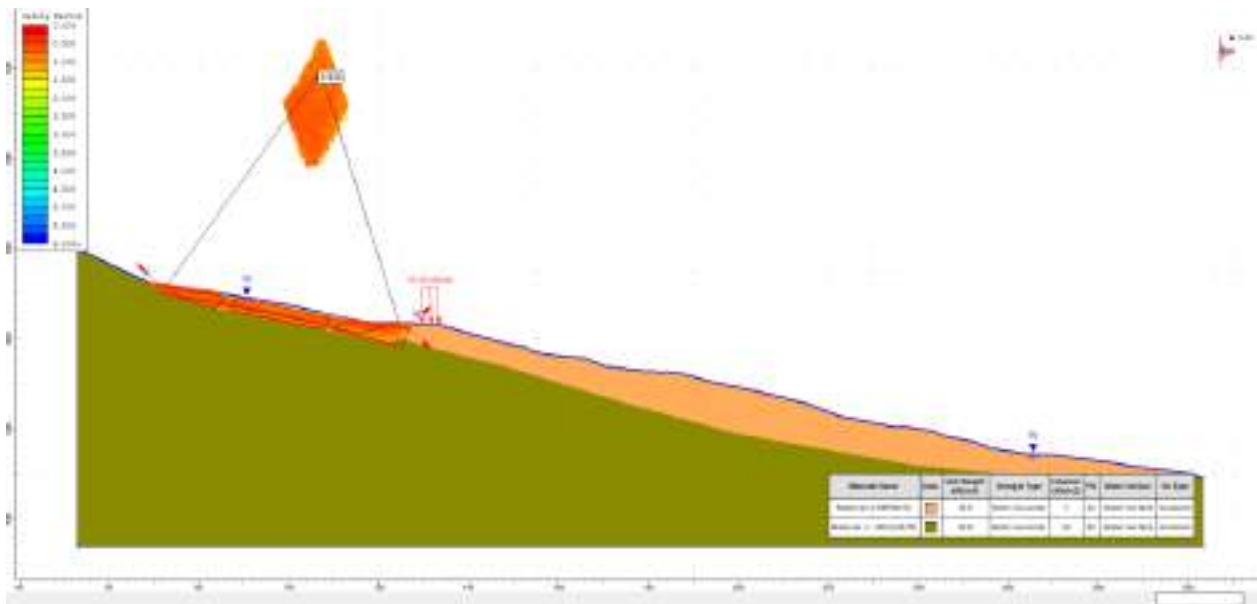


Imagen 56. Factor de seguridad C. inicial – pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+970

Sección de análisis K5+970 - estático– talud externo

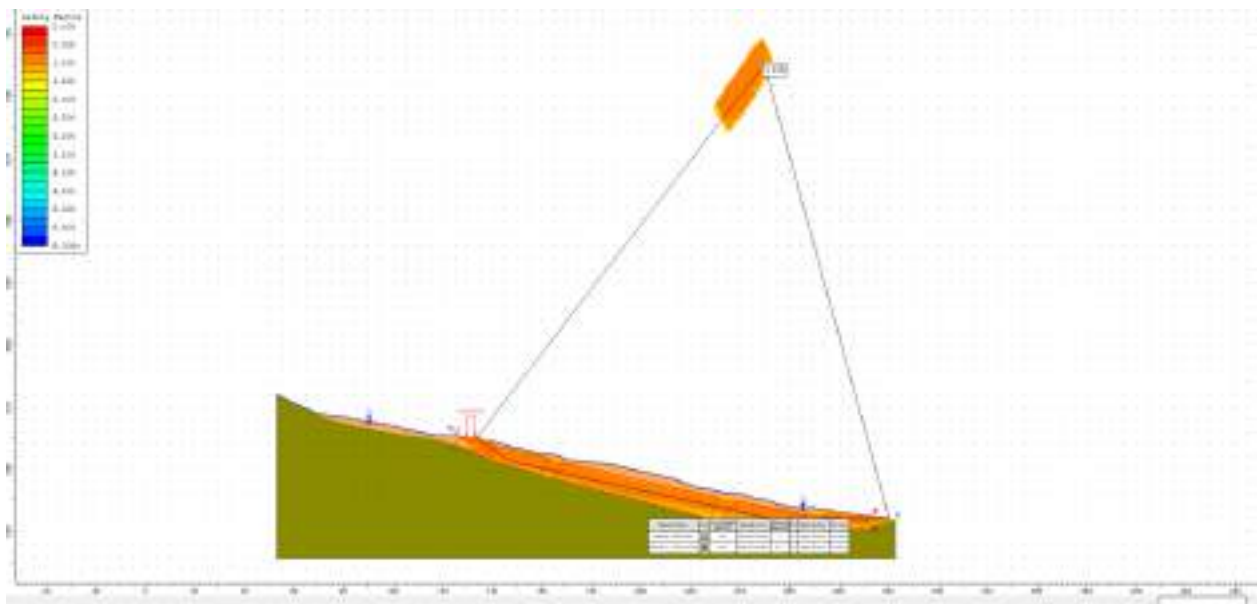


Imagen 57. Factor de seguridad C. inicial – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+970

Sección de análisis K5+970 - pseudoestático– talud externo

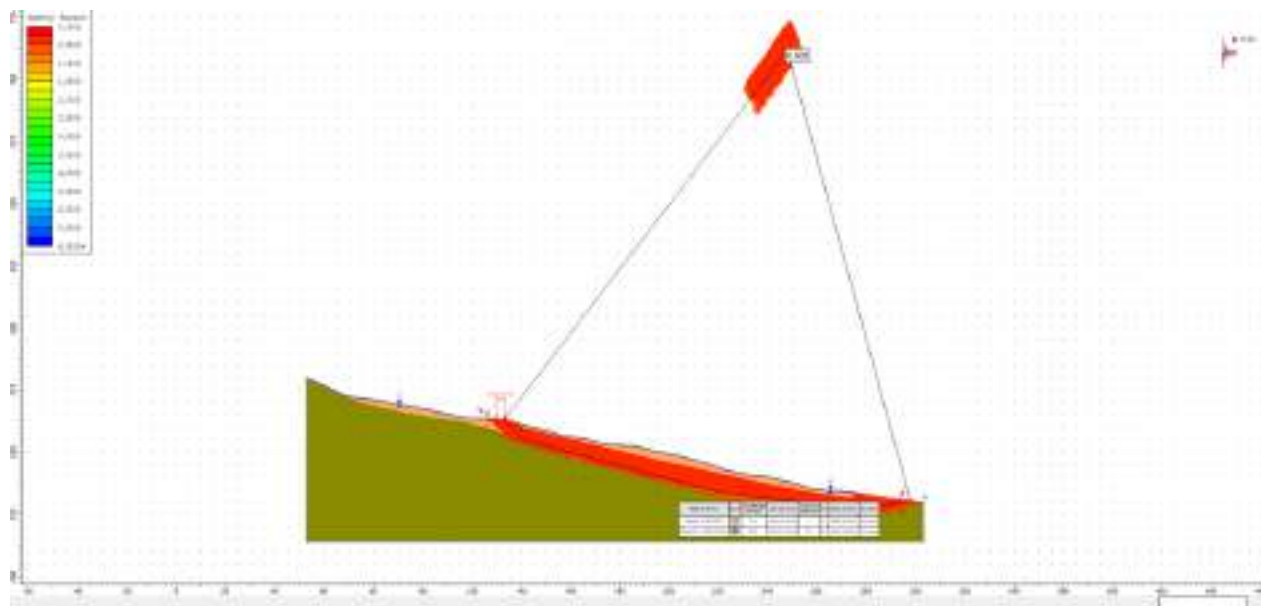


Imagen 58. Factor de seguridad C. inicial – pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+970

En la tabla a continuación se relacionan los factores de seguridad obtenidos en cada uno de los modelos analizados en el talud interno.

Tabla 11. Factores de seguridad sector inestable K5+600 A K6+100

Condición	Factor de seguridad	
	Estático	Dinámico
General – inicial Talud interno		
K5+650	1.224	0.913
K5+720	1.036	0.944
K5+840	1.180	0.723
K5+870	1.079	0.803
K5+970	1.526	0.935

En la tabla a continuación se relacionan los factores de seguridad obtenidos en cada uno de los modelos analizados en el talud externo.

Tabla 12. Factores de seguridad sector inestable K5+600 A K6+100

Condición	Factor de seguridad	
	Estático	Dinámico
General – inicial Talud externo		
K5+650	1.332	1.001
K5+720	1.167	0.877
K5+840	1.169	0.764
K5+870	1.010	0.807
K5+970	1.119	0.689

Dentro de los modelos de análisis se han establecido puntos de control para la selección de las superficies de falla, tal y como se observa en las imágenes 38 a 58. Para las condiciones estáticas y pseudoestáticas analizadas se observan factores de seguridad cercanos a la unidad e inferiores a la unidad para la condición pseudoestática, lo cual es consistente con los modelos presentados y con las condiciones actuales del sitio.

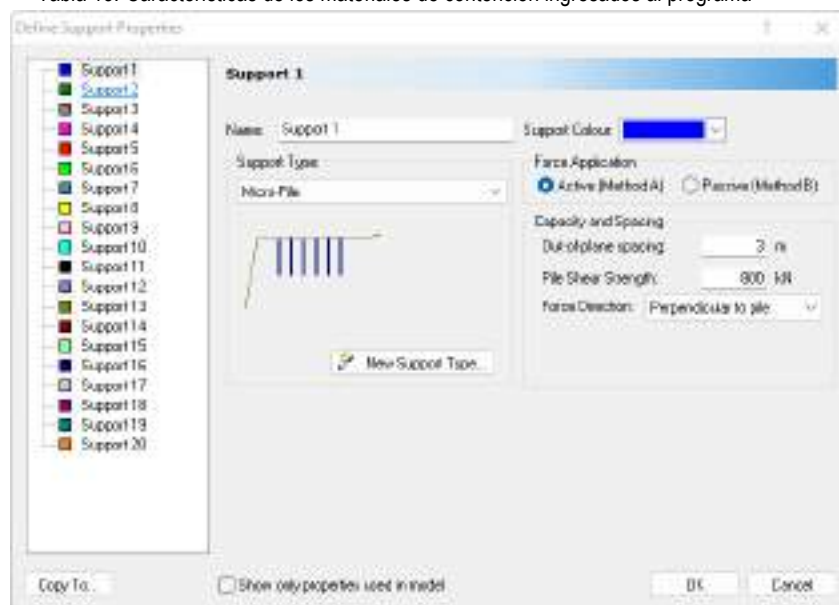
6.4 MODELO Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD – CONDICIÓN CON OBRAS

Con el fin de garantizar la estabilidad de la zona afectada y el paso seguro de los vehículos y comunidad por el sector del K5+600 a K6+100, se procedió a realizar los análisis de estabilidad mediante la implantación de obras de contención en el talud externo e interno según sea el caso.

En las imágenes a continuación se muestran los análisis de estabilidad global con la implementación de las obras propuestas con el fin de obtener un factor de seguridad adecuado, de acuerdo a la normatividad vigente.

Para la modelación de las obras de contención del talud interno en el programa, se han tenido en cuenta las siguientes características:

Tabla 13. Características de los materiales de contención ingresados al programa



De acuerdo con las obras preestablecidas en el numeral 3.1 alternativa solución, a continuación se presenta el modelo de análisis el cual está compuesto por la misma geometría del modelo geotécnico con una reconformación de la vía y un muro de protección lateral y confinamiento del material de relleno. Dentro de las obras previstas se han considerado las diferentes secciones de análisis presentadas en el numeral 6.3, en donde, dependiendo de la sección de análisis requiere la implementación de obras de contención en el talud interno, externo o en ambos. Para efectos de la evaluación de la estabilidad se han utilizado diferentes mecanismos de falla, tanto planares como circulares con el fin de buscar el mecanismo de falla que se adapte al proceso identificado. Es de resaltar que los mecanismos de falla circulares utilizados obedecen a radios muy altos, equivalentes fallas planares, o por el contrario mecanismos de falla de mayor profundidad que se puedan gestar por debajo de las estructuras de contención. En las siguientes figuras se presentan las superficies de falla en cada sección, allí se observa que el FS más bajo supera el mínimo requerido por

la normatividad colombiana, además se observa que la banca de la vía es completamente estable al tener FS superiores.

Sección de análisis K5+650 – C. obras estático – Talud interno

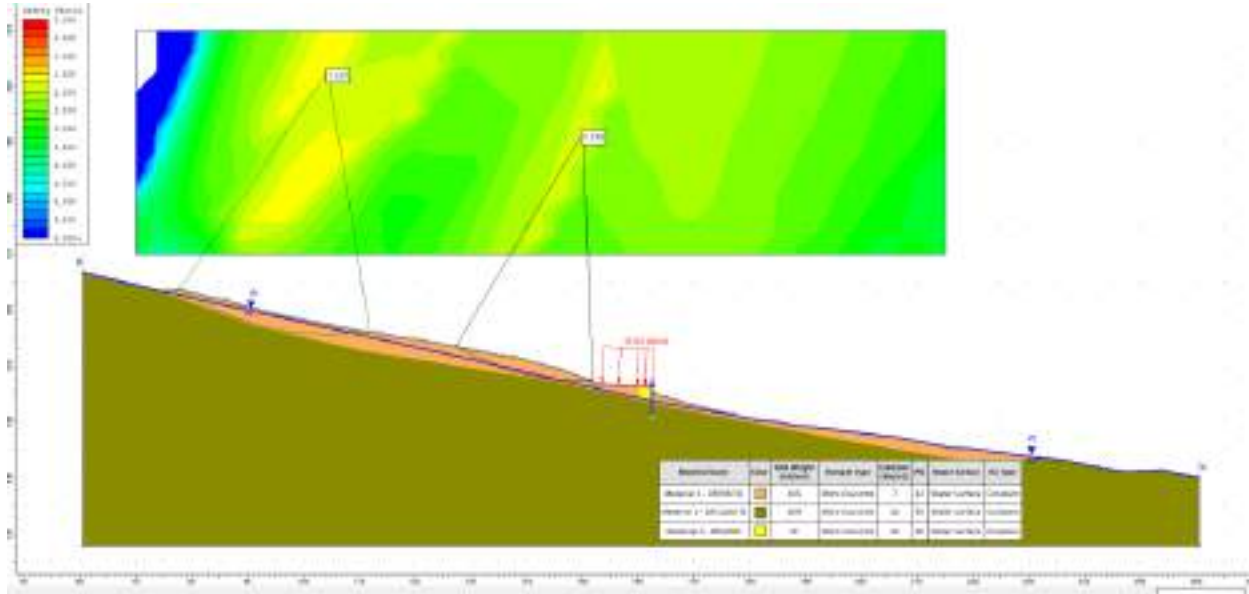


Imagen 59. Factor de seguridad C.obras – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+650

Sección de análisis K5+650 – C. obras pseudoestático estático – Talud interno

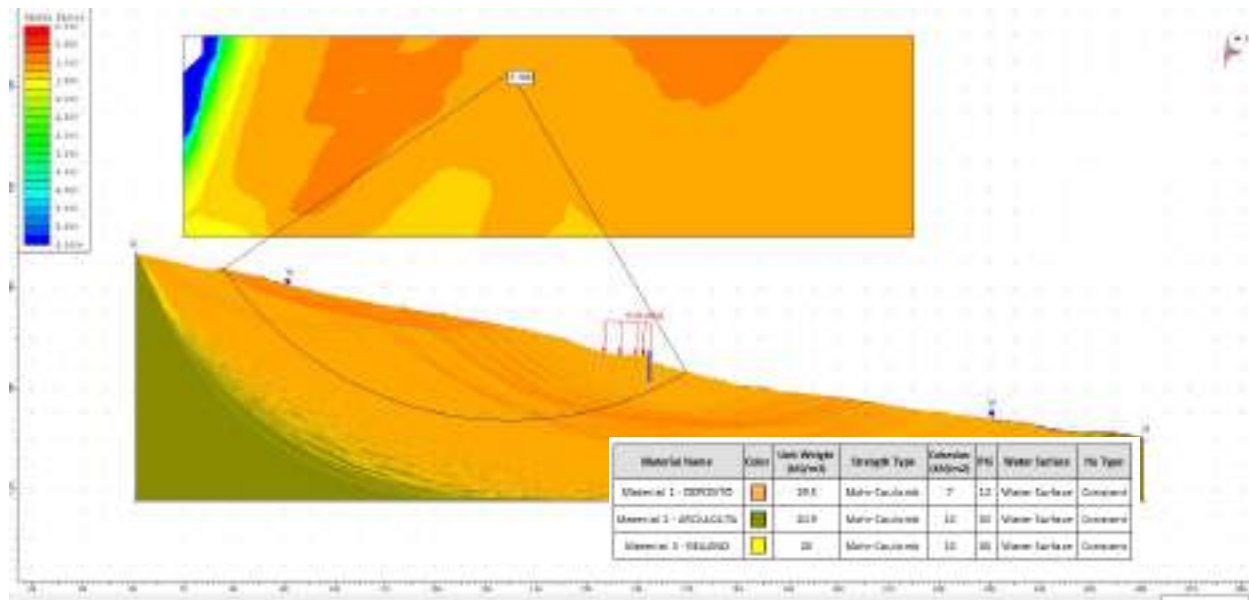


Imagen 61. Factor de seguridad C.obras – pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+650

Sección de análisis K5+650 – C. obras estático – Talud externo

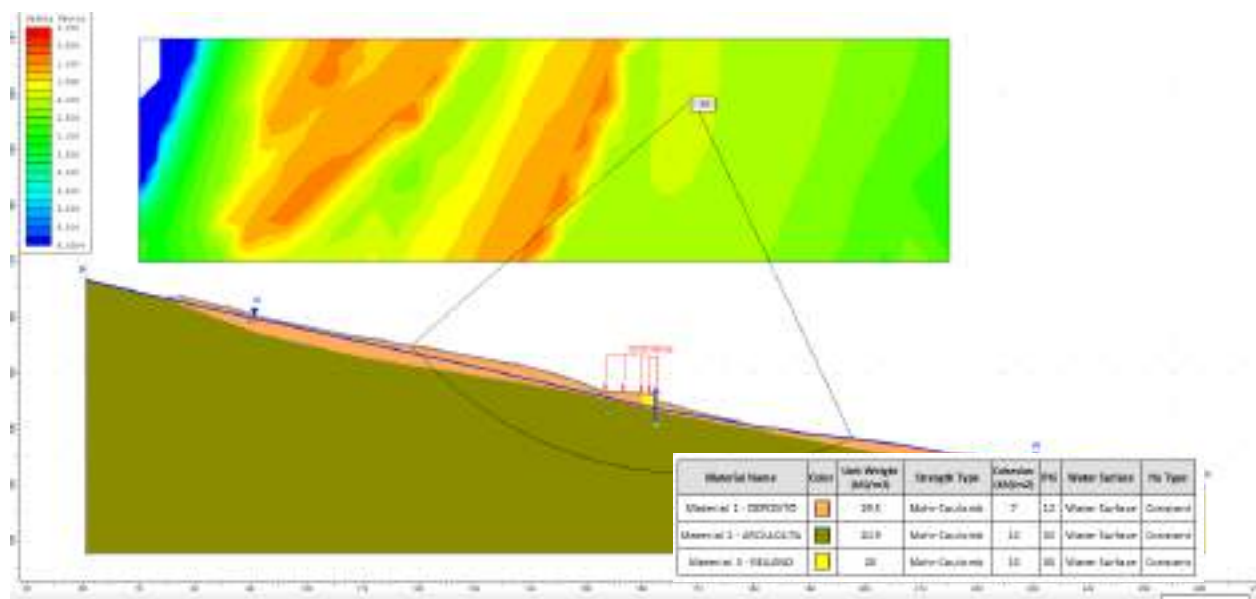


Imagen 62. Factor de seguridad C. obras – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+650

Sección de análisis K5+650 – C. obras pseudoestático – Talud externo

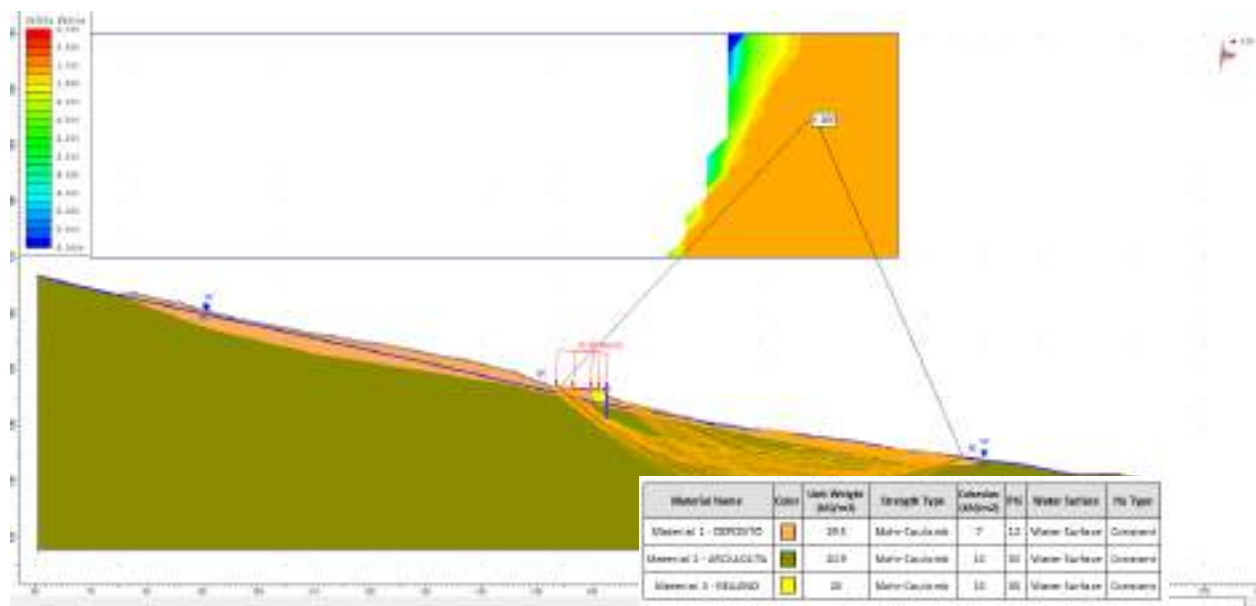


Imagen 63. Factor de seguridad C. obras – pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+650

[illegible]

Sección de análisis K5+720 – C. obras - pseudoestático – Talud interno



Página 74 de 96

Sección de análisis K5+720 – C. obras - estático – Talud externo

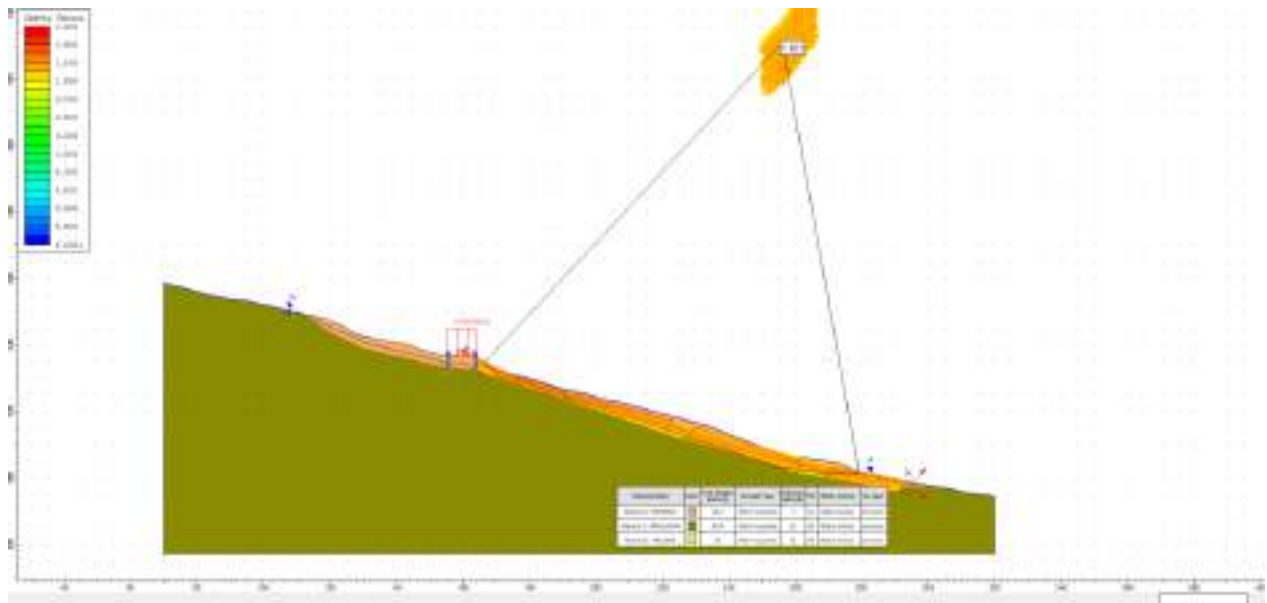


Imagen 66. Factor de seguridad C. obras –estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+720

Sección de análisis K5+720 – C. obras - pseudoestático – Talud externo

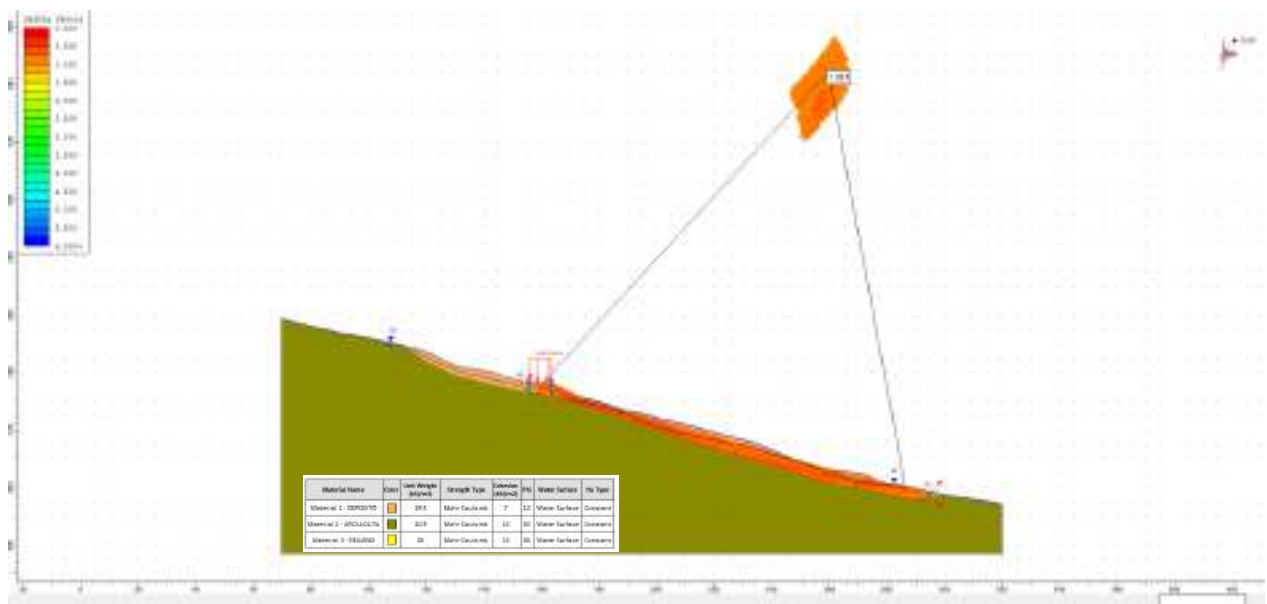


Imagen 67. Factor de seguridad C. obras –pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+720

Sección de análisis K5+970 – C. obras - estático – Talud externo

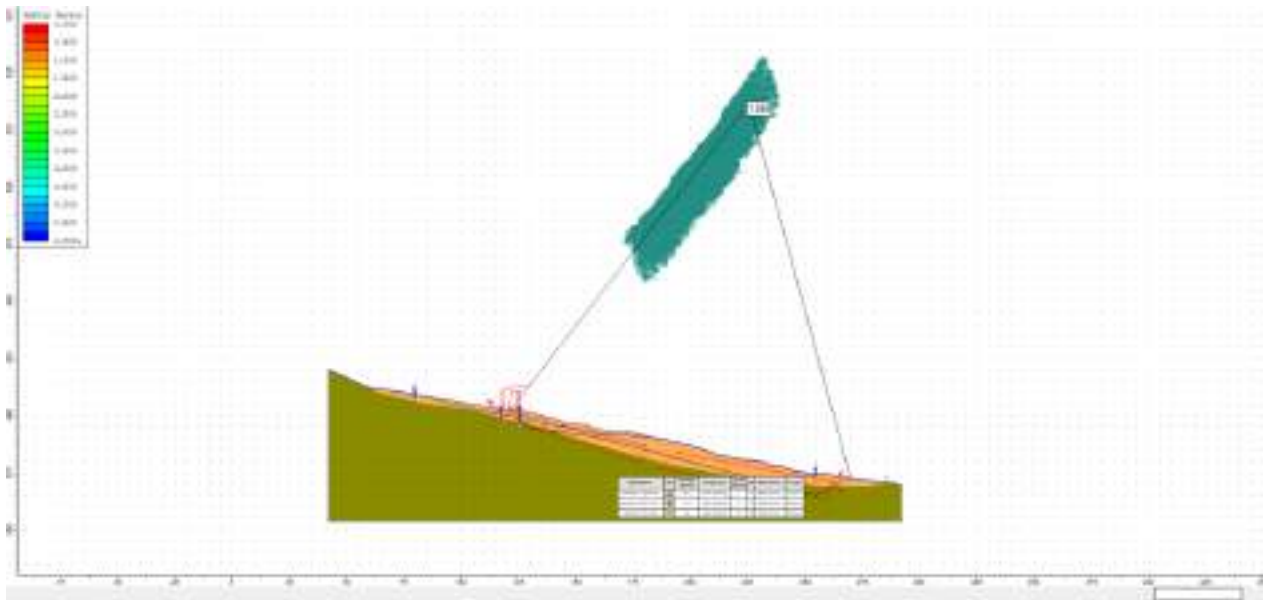


Imagen 70. Factor de seguridad C. obras – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+970

Sección de análisis K5+970 – C. obras - pseudoestático – Talud externo

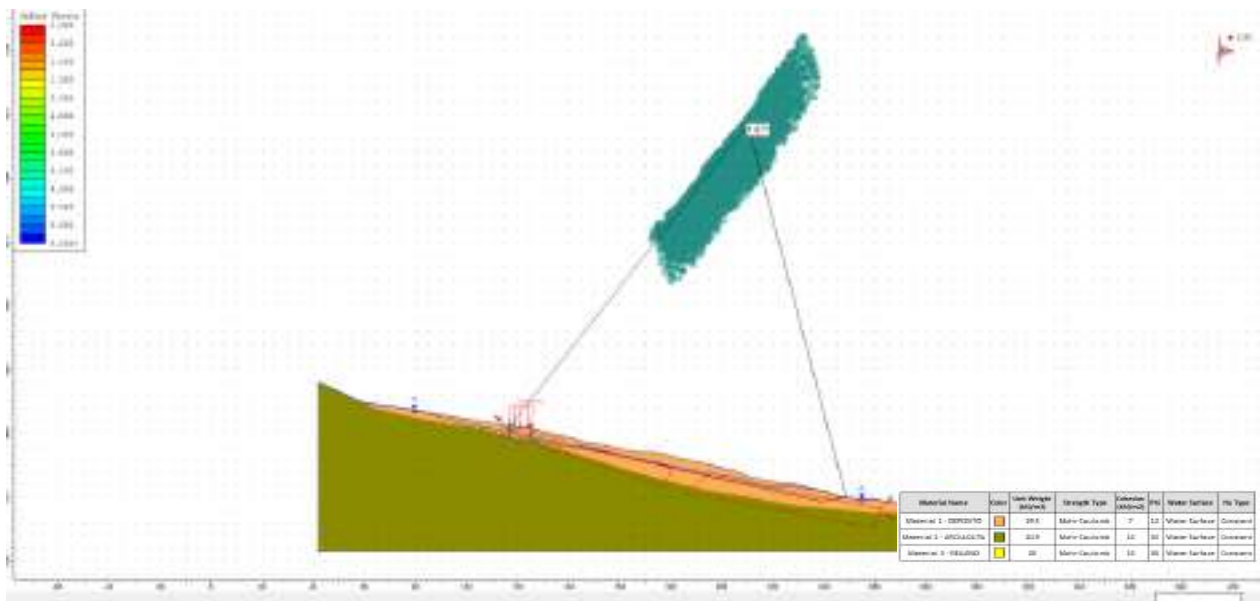


Imagen 71. Factor de seguridad C. obras – pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+970

En la tabla a continuación se relacionan los factores de seguridad obtenidos en cada uno de los modelos analizados en el talud interno.

Tabla 14. Factores de seguridad sector inestable K5+600 A K6+100

Condición	Factor de seguridad	
	Estático	Dinámico
General – obras Talud interno		
K5+650	1.507	1.108
K5+720	1.637	1.155
K5+970	1.941	1.170

En la tabla a continuación se relacionan los factores de seguridad obtenidos en cada uno de los modelos analizados en el talud externo.

Tabla 15. Factores de seguridad sector inestable K5+600 A K6+100

Condición	Factor de seguridad	
	Estático	Dinámico
General – obras Talud externo		
K5+650	1.981	1.065
K5+720	1.621	1.061
K5+970	1.669	1.071

6.5 MODELO Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD PARA LA CONFORMACIÓN DE CORTES TEMPORALES

Para tal efecto y haciendo uso de un modelo de equilibrio límite mediante el programa de computador SLIDE. El modelo geotécnico fue representado mediante un espacio bidimensional. El comportamiento mecánico de los estratos definidos fue establecido mediante un modelo de comportamiento tipo Mohr-Coulomb, los valores de factor de seguridad fueron avaluados con base en los mínimos valores obtenidos de cientos de superficies de falla de tipo circular.

Se evalúa en el presente capítulo, el comportamiento de las paredes de las excavaciones, los factores de seguridad asociados al proceso y las inclinaciones de seguridad.

Teniendo en cuenta la profundidad de las excavaciones para la instalación de las estructuras proyectadas es necesario ejecutar de manera temporal la conformación de cortes para las excavaciones.

Con base en lo anterior fueron realizados análisis de estabilidad considerando la sobrecarga con el fin de determinar la geometría con que deben ejecutarse las excavaciones en campo.

Por otra parte, es importante mencionar que el control y manejo de aguas superficiales se deberá realizar antes de efectuar los cortes temporales para la implantación de las estructuras propuestas.

A partir de los parámetros de diseño seleccionados, fueron evaluadas varias alternativas contemplando como profundidad máxima de corte y excavación 3,0m con inclinaciones de 72° (1H: 3V).

Evaluación de cortes temporales - Estático

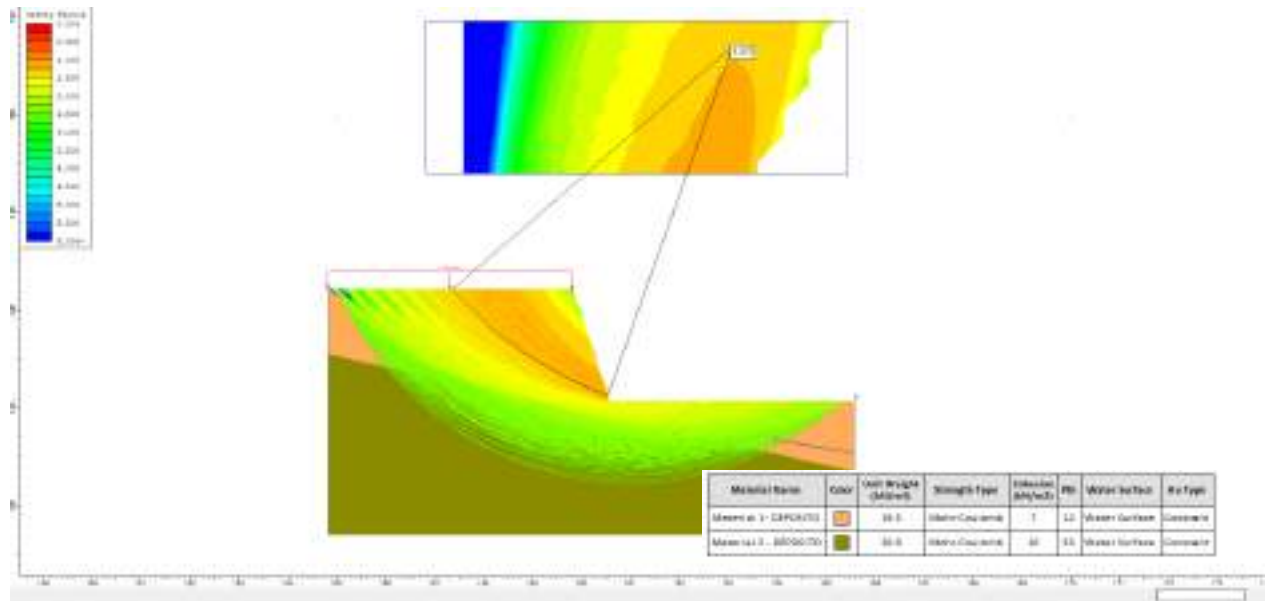


Imagen 72. Factor de seguridad cortes temporales – estático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+600– K6+100

Evaluación de cortes temporales - pseudoestático

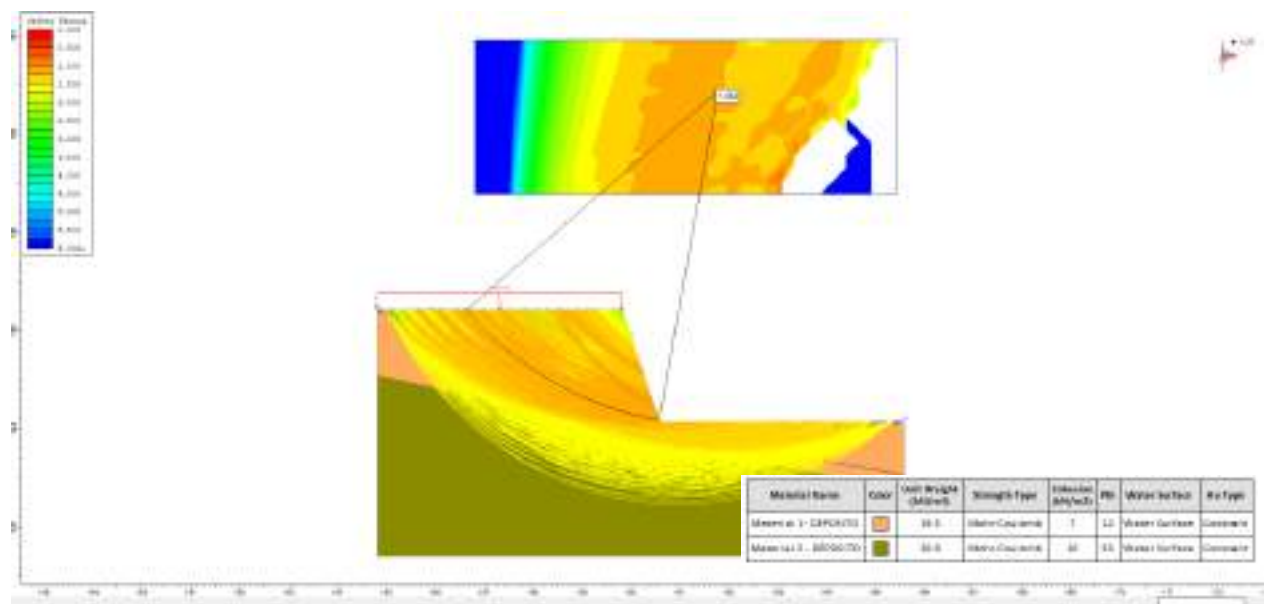


Imagen 73. Factor de seguridad cortes temporales – pseudoestático – Método de GLE/Morgenstern-Price – K5+600– K6+100

En la tabla a continuación se relacionan los factores de seguridad obtenidos el modelo analizado para la conformación de cortes temporales

Tabla 16. Factores de seguridad cortes temporales sector inestable K5+600– K6+100

Altura máxima de corte (m)	Inclinación	Factor de seguridad	
3,0	(1,0H; 3,0V)	Estático	Dinámico
		1.271	1.060

Los criterios de aceptación de los factores de seguridad, se basa en lo descrito en la norma de construcción sismo resistente NSR-10, tabla H.2.4-1 “Factores de Seguridad Básicos Mínimos directos” tal y como se relacionan a continuación:

Tabla H.2.4-1
Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos

Condición	F _{con}		F _{acc}	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Carga Muerta + Carga Viva Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	1.25	1.10	1.40	1.15
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo estático	1.10	1.00 (*)	No se permite	No se permite
Taludes – Condición Estática y Agua Subterránea Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Taludes – Condición Seudo-estática con Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de Diseño	1.05	1.00 (*)	No se permite	No se permite

(*) Nota: Los parámetros sísmicos seudo estáticos de Construcción serán el 50% de los de Diseño

(Fuente NSR-10)

6.6 CAPACIDAD DE CARGA PARA CIMIENTOS PROFUNDOS

De acuerdo a las condiciones de entorno, al grado de inestabilidad y a la variación de los espesores de los materiales reportados, se plantea en el talud interno la construcción de un muro de contención apoyado sobre elementos profundos tipo caisson, los cuales contarán con un diámetro de 1,20m y longitud de 3m, el muro se apoyará sobre una fila de caisson y se implantará sobre el borde interno de la vía en dos tramos, el primero de ellos entre las abscisas K5+775 a K5+820 en una longitud aproximada de 45m, y el segundo tramo entre las abscisas K5+845 a K5+890, esta solución será implantada en una longitud aproximada de 45m.

En el borde externo de la vía se plantea la construcción de un muro de contención apoyado sobre pilotes de 1,20m de diámetro y 3m de longitud, esta solución se implantará en dos tramos, el primero de ellos entre las abscisas K5+765 a K5+823 con una longitud aproximada de 58m, el segundo tramo se desarrollará entre las abscisas K5+848 y K5+898, en una longitud aproximada de 50m, en este tramo los muros se apoyarán sobre elementos profundos tipo caisson los cuales alcanzaran una profundidad de 5m y diámetro de 1,20m.

El tercer tramo, se construirá entre las abscisas K5+938 a K6+010, en este sector los muros se apoyarán sobre caisson de 3m de longitud y 1,20m de diámetro, esta solución se implantará en una longitud aproximada de 72m.

El nivel de cimentación se obtendrá haciendo la excavación a la altura correspondiente y garantizando la uniformidad de los materiales. Los caisson estarán separados tres veces el diámetro entre ejes.

Entre los análisis realizados fueron llevados a cabo modelos de resistencia por punta para suelos principalmente friccionantes, en función de las propiedades geomecánicas del subsuelo de la zona donde se implantarán las estructuras en mención.

Conforme a lo establecido en la norma CCP 14 para los pilotes perforados se debe considerar el diseño a partir de los estados límites, con lo cual a continuación se hace una descripción general de lo requerido para el diseño de cimentaciones profundas asociadas a cada estado límite.

Estado límite de Resistencia tramo K5+600 a K6+100

Así las cosas y con el fin de brindar varias alternativas para la selección del sistema de cimentación, se ha evaluado la magnitud de la capacidad de carga de seguridad para diversas geometrías de caisson, con diámetros variables entre 1,20 y 1,6m y longitudes entre 3m y 7m, para el sector en mención.

En la tabla y figura a continuación se presentan los valores de capacidad de seguridad de los caisson a carga vertical, ya se les ha afectado por el factor de reducción y se ha descontado el peso de los mismos.

Tabla 17. Capacidad de carga de seguridad para los caisson K5+600 a K6+100.

Diam (m)	Carga de trabajo (ton)				
	Longitud (m)				
	3	4	5	6	7
1,20	283,41	366,658	449,910	533,161	616,413
1,3	332,609	430,314	528,02	625,724	723,43
1,4	385,748	499,063	612,377	725,602	839,007
1,5	442,82	572,903	702,98	833,065	963,145
1,6	503,834	651,837	799,840	947,843	1095,845

*carga en toneladas

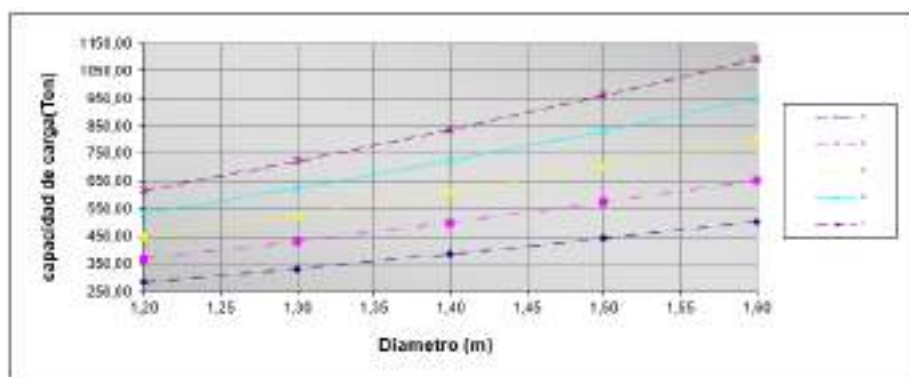


Imagen 74. Capacidad de carga de seguridad caisson tramo K5+600 a K6+100

Estado límite de servicio

El estado límite de servicio está determinado por lo expuesto en el numeral 10.5.2.1 y 10.8.2.2.1 del Código Colombiano de Diseño de Puentes CCP-14.

De acuerdo con el numeral 10.5.2.1, el diseño de la cimentación en el estado límite de servicio debe incluir:

- Asentamientos
- Movimientos horizontales
- Estabilidad global y
- Socavación para la inundación de diseño.

Así las cosas, para este caso en particular no se ha contemplado socavación. A continuación, se presentan los valores de asentamientos elásticos esperados y de los coeficientes de reacción vertical y horizontal.

El análisis de asentamientos se llevó a cabo mediante la Teoría Elástica y fue realizado de acuerdo con las propuestas existentes, fundamentadas en correlaciones entre el módulo de elasticidad, la relación de Poisson del material de fundación y coeficientes en función de la geometría del cimiento.

Los módulos de elasticidad de los materiales para el análisis de asentamientos elásticos han sido establecidos con base en las correlaciones propuestas por Bowles (1982) y el U.S. Department of the Navy (1982).

Con base en lo anterior, han sido determinados los asentamientos elásticos máximos esperados para la estructura proyectada los cuales son de **6,5cm**.

Coeficiente de reacción vertical (K_v)

El objetivo de este parámetro es el de reemplazar una masa de suelo por resortes elásticos equivalentes, con una constante k por unidad de área, lo que realmente es una conveniencia matemática que facilita los cálculos de esfuerzos y deformaciones en las interfaces estructura-suelo, puesto que las deformaciones se hacen directamente proporcionales a los esfuerzos aplicados.

En caso de emplear un solo resorte en la base de los caisson el valor correspondiente será de **4306,5 ton/m**, si es de preferencia del Ingeniero Estructural utilizar los resortes repartidos cada metro a lo largo del fuste el valor de dicho resorte será de **210,76ton/m³**.

Valores de Resorte Horizontal (K_h)

El coeficiente de reacción horizontal (K_h) fue calculado a partir de la resistencia de los suelos de confinamiento a lo largo del fuste hasta la máxima profundidad de diseño de los elementos de cimentación considerando la resistencia al corte lateral del suelo de acuerdo a las propuestas de W. G. K. Fleming.

Estos valores de resorte se presentan patronados al diámetro del caisson, es decir para determinar el valor de resorte horizontal volumétrico (relación esfuerzo/deformación) basta con dividir el valor de la gráfica entre el diámetro.

Adicionalmente, se da la alternativa para el diseño estructural, si se va a aplicar a un modelo de resistencia lineal (Winkler) (relación fuerza/deformación) debido a la diferencia conceptual en los parámetros utilizados, en donde el valor del K_h será establecido multiplicando el valor de la gráfica por el diámetro.

En la gráfica siguiente se presentan los valores de resorte horizontal (K_h) hasta una profundidad de 8m.

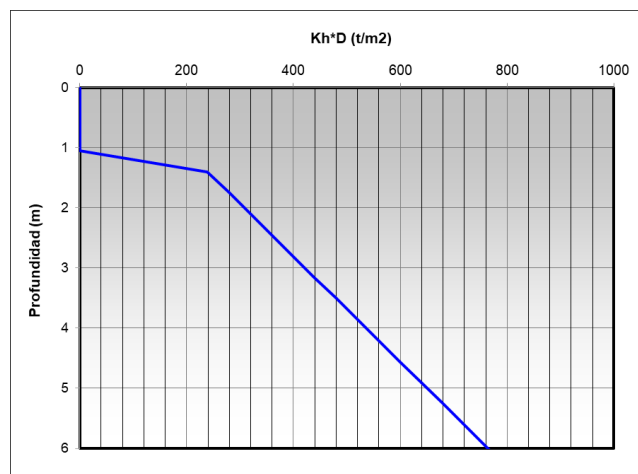


Imagen 75. Coeficiente de reacción horizontal (K_h) K5+600 a K6+100

Estado límite de evento extremo - tramo K5+600 a K6+100

Tabla 18. Capacidad de carga de seguridad para los caisson K5+600 a K6+100 – estado límite de evento extremo

Diam (m)	Carga de trabajo (ton)				
	Longitud (m)				
	3	4	5	6	7
1.20	850.22	1099.975	1349.729	1699.484	1849.239
1.3	997.827	1290.942	1584.06	1877.173	2170.29
1.4	1157.243	1497.188	1837.132	2177.076	2517.020
1.5	1328.47	1718.710	2108.95	2499.194	2889.436
1.6	1511.502	1955.510	2399.519	2843.628	3287.636

*carga en toneladas

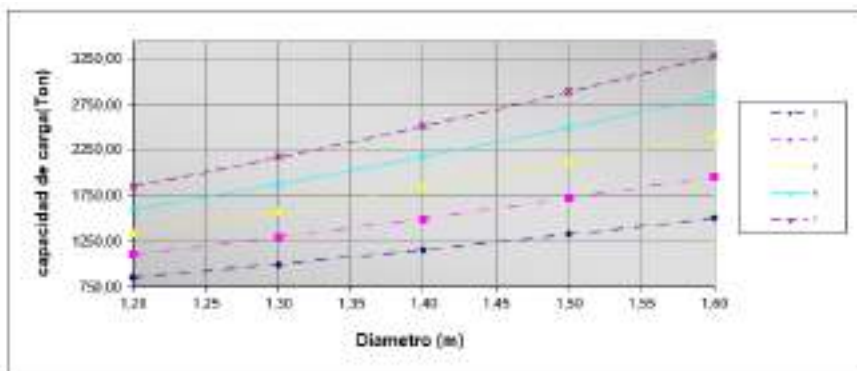


Imagen 76. Capacidad de carga de seguridad caisson tramo K5+600 a K6+100– estado límite de evento extremo

Capacidad de carga lateral - Método de Broms

Broms desarrolló un método para calcular los desplazamientos y momentos de pilotes en suelos cohesivos y no cohesivos utilizando el coeficiente de Balasto, mediante este método se pueden analizar pilotes aislados de cualquier longitud, libres o con restricción a la rotación en la cabeza.

Broms Limita este método a cargas de servicio que se encuentren entre $1/3$ y $1/2$ de la carga ultima. Para este rango de cargas, Broms, asume que el suelo es linealmente elástico. Adicionalmente, y para simplificar el análisis, consideró que para los suelos cohesivos el coeficiente de balasto es constante con la profundidad y que aumenta linealmente con esta en suelos no cohesivos.

Para el cálculo de la carga última en suelos cohesivos, Broms asume una distribución de la reacción del suelo uniforme es igual a 9 veces el diámetro por la resistencia a cortante del suelo, excepto para la parte más cercana a la superficie en la que considera que el sustrato no ofrece resistencia.

En suelos no cohesivos considera que la reacción del suelo aumenta con la profundidad, alcanzando una resistencia ultima de 3 veces el empuje pasivo de Rankine. Así las cosas, a continuación, se presentan los resultados de los análisis de carga lateral.

Tabla 19. Capacidad de carga Lateral de seguridad para la geometría del caisson seleccionado

Diam (m)	Longitud (m)				
	3	4	5	6	7
1.2	32,25	58,64	91,39	130,51	176
1.3	34,93	63,52	99,01	141,38	191
1.4	37,62	68,41	106,62	152,26	205
1.5	40,31	73,30	114,24	163,14	220
1.7	43,00	78,18	121,86	174,01	235

*carga en toneladas

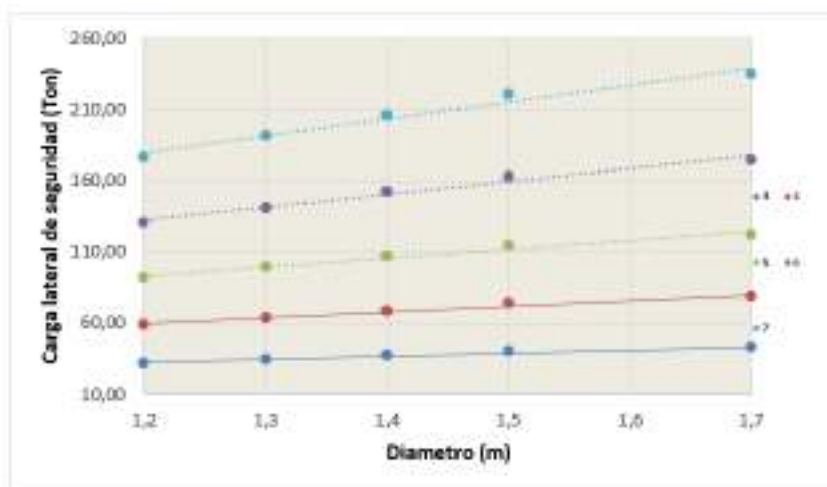


Imagen 77. Capacidad de carga Lateral de seguridad para la geometría del caisson seleccionado

Resistencia a la Tracción

Los valores a continuación corresponden a la resistencia a la tracción de los caisson para el tramo K5+600 a K6+100, ya se les ha afectado por el factor de reducción.

Tabla 20. Resistencia a la Tracción

Diam (m)	Longitud (m)				
	3	4	5	6	7
1,2	19,46	29,63	41,30	54,46	69,13
1,3	21,81	33,08	45,96	60,47	76,61
1,4	24,28	36,68	50,82	66,71	84,35
1,5	26,87	40,43	55,86	73,17	92,35
1,6	29,56	44,33	61,09	79,86	100,62

* carga en toneladas

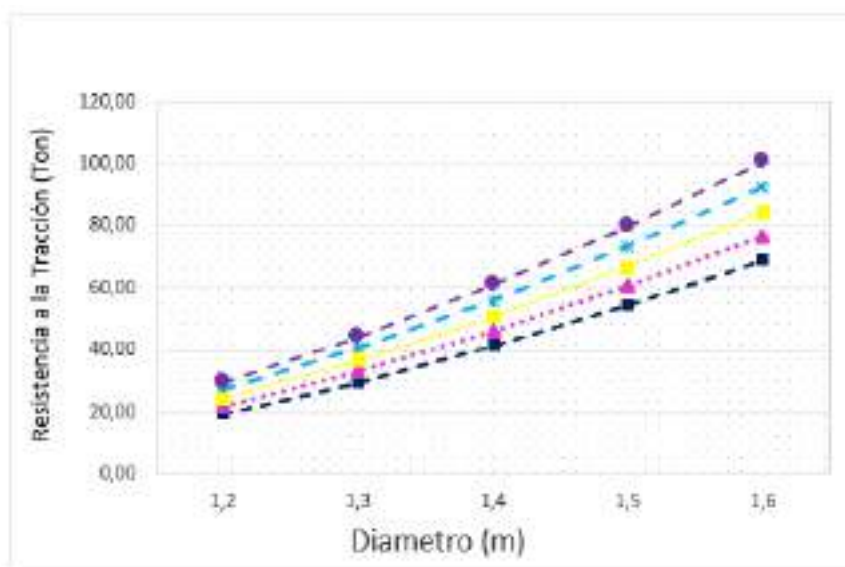


Imagen 78. Resistencia a la Tracción para el caisson seleccionado

6.7 DETERMINACIÓN DE PRESIONES DE TIERRA PARA LAS ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN

Para el diseño de los elementos estructurales del muro de contención que soportan la acción de cargas generadas por los materiales de relleno, han sido realizados los análisis de esfuerzos laterales, los cuales fueron evaluados mediante la teoría clásica de Rankine, la cual se fundamenta en las teorías del *equilibrio plástico*, que en suelos se refiere a la condición en que cada punto en una masa de suelo está a punto de fallar.

De la misma forma con base en la formulación pseudo-estática propuesta por Mononobe – Okabe, fueron determinados los coeficientes de presión de tierras para condición dinámica.

De acuerdo a lo anterior, se recomienda utilizar diagramas de presiones laterales triangulares, propias de suelos friccionantes, considerando los siguientes parámetros:

Tabla 21. Coeficiente de presión activa, coeficiente de presión en reposo y Mononobe Okabe

DATOS		
Aceleración A_a	0,25	CCF=14
Peso unitario del material de Relleno	2	t/m3
Angulo de fricción interna	30	°
Sobrecarga tránsito vehicular (H.5.1.2 — Estados límite de Falla-NR-10)	1,5	t/m2
Coeficiente de presión activa (K_a)		
$K_a = (1 - \sin \phi) / (1 + \sin \phi)$		
$K_a =$	0,333	
Coeficiente de presión en reposo (K_o)		
$K_o = (1 + \sin \phi)$		
$K_o =$	0,5	
CÁLCULO DE MONONOBE OKABE		
A_a	0,25	
A_r	0	
ϕ	30	
δ	20	
η	-	
DA	2,262084636	
K_a (mononobe okabe)	0,5082	
K_o	0,5000	
K_a	0,3333	

Los materiales de relleno, deberán seleccionarse de acuerdo con los lineamientos establecidos por el artículo No. 610 del INVIAS denominado “Relleno para Estructuras”, garantizando como mínimo la colocación de materiales tipo “Adecuados”.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en las observaciones de detalle ejecutadas durante la visita técnica adelantada, en el programa de investigación del subsuelo, en la interpretación de los resultados de los ensayos de laboratorio, así como en las hipótesis de diseño, ha sido posible establecer las siguientes conclusiones y recomendaciones

Perfil Estratigráfico promedio

Teniendo en cuenta lo anterior y a la exploración del subsuelo, ha sido posible establecer la existencia de dos (2) estratos los cuales se relacionan a continuación:

Depósito coluvial (Qar), el cual está conformado por gravas y bloques en matriz arcillosa de color café con vetas rojizas y moradas, de compacidad muy suelta a suelta en los granulares y de consistencia blanda a media en la matriz, en un espesor promedio de 3,5m

Subyaciendo el estrato anterior y hasta la máxima profundidad de exploración (10m), se detectó una arcillolita de color café con vetas grises, pertenecientes a la formación Guaduas (Tkg), fracturadas.

Estructuras de contención proyectadas:

De acuerdo a las condiciones de entorno, al grado de inestabilidad y a la variación de los espesores de los materiales reportados, se plantea en el talud interno la construcción de un muro de contención apoyado sobre elementos profundos tipo caisson, los cuales contarán con un diámetro de 1,20m y longitud de 3m, el muro se apoyará sobre una fila de caisson y se implantará sobre el borde interno de la vía en dos tramos, el primero de ellos entre las abscisas K5+775 a K5+820 en una longitud aproximada de 45m, y el segundo tramo entre las abscisas K5+845 a K5+890, esta solución será implantada en una longitud aproximada de 45m.

En el borde externo de la vía se plantea la construcción de un muro de contención apoyado sobre pilotes de 1,20m de diámetro y 3m de longitud, esta solución se implantará en dos tramos, el primero de ellos entre las abscisas K5+765 a K5+823 con una longitud aproximada de 58m, el segundo tramo se desarrollará entre las abscisas K5+848 y K5+898, en una longitud aproximada de 50m, en este tramo los muros se apoyarán sobre elementos profundos tipo caisson los cuales alcanzaran una profundidad de 5m y diámetro de 1,20m.

El tercer tramo, se construirá entre las abscisas K5+938 a K6+010, en este sector los muros se apoyarán sobre caisson de 3m de longitud y 1,20m de diámetro, esta solución se implantará en una longitud aproximada de 72m.

Es importante mencionar que, si bien el nivel freático no se detectó en ninguna de las perforaciones, los taludes se encuentran completamente saturados, razón por la cual adicional a las obras de contención, se deberán abatir estas aguas mediante una línea de drenes subhorizontales en el talud interno, los cuales contarán con una longitud de 20m, inclinados 5 grados y separados 10m en la horizontal.

Adicional a lo anterior se acometerán obras hidráulicas tal y como lo especifica el estudio de hidrología e hidráulica efectuado para este sector.

Respecto a los procesos constructivos

Si bien es poco frecuente, ha sido una práctica en la ingeniería la construcción de caisson mediante deslizamiento vertical de camisas prefabricadas, este método constructivo debido a las características del terreno suele presentar fricciones muy elevadas a lo largo del fuste lo que típicamente para profundidades superiores a 5 metros impide la movilización de la camisa. Por lo anteriormente expuesto se recomienda que el encamisado sea fundido y no hincado.

Las excavaciones de los caissons se deberán encamisar en su totalidad, ya que los materiales son susceptibles a desconfinarse por efecto del agua, lo que generaría el cierre de la excavación.

Estos elementos deben excavar y fundirse de manera intercalada es decir no consecutiva, con el fin de no generar zonas muy amplias de desconfinamiento, de igual manera se recomienda que se dé inicio a su construcción desde los extremos del movimiento hacia el centro.

Para la construcción de los muros tanto en el talud interno como en el talud externo se debe seguir los siguientes pasos:

1. Excavación temporal hasta el nivel de la zarpa.
2. Construcción de los caisson.
3. Construcción de la zarpa.
4. Construcción del vástago.
5. Construcción de los filtros al espaldar del muro.
6. efectuar los Rellenos y reconfiguración de los taludes y superficies.

En cuanto a los análisis de estabilidad

Se han realizado análisis de estabilidad en condición actual, mostrando los resultados que los factores de seguridad son iguales a la unidad, lo que refleja la condición de inestabilidad en la zona de estudio.

Los factores de seguridad con obras en condición estática arrojan valores entre 1,507 y 1,941 y en condición dinámica entre 1,108 y 1,170 para el talud interno, y para el talud externo alcanzan factores de seguridad entre 1,621 y 1,981 en condición estática y entre 1,061 y 1,071 en condición dinámica, los cuales cumplen con la normatividad vigente y demuestran que las obras propuestas son las adecuadas.

Así mismo los factores de seguridad para la conformación de cortes temporales cumplen en condición estática y dinámica para una inclinación de (1,0H; 3,0V), de acuerdo a la normatividad vigente.

Una vez efectuados los análisis de estabilidad con las obras propuestas se observa que la superficie de falla es coincidente a la condición actual, la cual se encuentra muy cerca a la interfaz entre el depósito coluvial y que no toca para nada los materiales rocosos, la superficie de falla mostrada es evidencia de las condiciones de estabilidad de la vía como tal, cuyos factores de seguridad son superiores a 1,5 los cuales cumplen con la normatividad vigente.

Adicional, a las obras de conformación de taludes de corte, es necesario acometer la construcción de obras de drenaje y de protección contra erosión, con el fin de mejorar las condiciones generales de los taludes internos, externos y de la calzada, para de esta manera evitar la activación de procesos de inestabilidad.

En las zonas donde se requiera, deberá ser objeto de labores de bioingeniería correspondientes a sellado de grietas, retiro de materiales y/o bloques sueltos y revegetalización de las superficies erosionadas o expuestas.

En las zonas donde se proyecten cortes del talud, es necesario brindar una adecuada protección a los materiales superficiales que queden expuestos en los taludes y bermas, esta protección se deberá llevar a cabo mediante sistemas de control de erosión.

El recubrimiento de los taludes es fundamental y se debe realizar inmediatamente se conforma los taludes de corte, pues esta actividad garantiza la estabilidad del terreno minimizando la aparición de procesos de erosión.

8 LIMITACIONES

Todos los análisis, conclusiones y recomendaciones se basan en los resultados del programa de exploración del subsuelo, el cual es de carácter puntual, si en el momento de ejecutar las obras se aprecian condiciones diferentes a las expuestas en el presente documento se debe dar aviso oportuno, con el fin de evaluar su incidencia en el proyecto.

9 ANEXOS

- Anexo 1. Exploración del subsuelo
- Anexo 2. Memorias de cálculo
- Anexo 3. Planos
- Anexo 4. Modelos Geológicos

ANEXO 1. EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO

ANEXO 2. MEMORIAS DE CÁLCULO

ANEXO 3. PLANOS

ANEXO 4. MODELOS GEOLÓGICOS
