



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,  
Canales y Puertos

Estudio de la estabilización de la ladera localizada en el  
p.k. 433+600 de la carretera A-7 y su afección  
socioeconómica,  
término municipal de Muro de Alcoy (Alicante).

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Civil

AUTOR/A: Escribano Peralta, Sergio

Tutor/a: Cuadrado Tarodo, Álvaro

Cotutor/a: Garrido de la Torre, María Elvira

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



E.T.S. INGENIERÍA DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

---

ESTUDIO DE LA ESTABILIZACIÓN DE LA LADERA LOCALIZADA EN EL PK 433+600 DE LA CARRETERA A-7  
Y SU AFECCIÓN SOCIOECONÓMICA, TÉRMINO MUNICIPAL DE MURO DE ALCOY, ALICANTE.

---

*Presentado por*

Escribano Peralta, Sergio

---

*Para la obtención del*

Grado en Ingeniería Civil

**Curso:** 2022/2023

**Fecha:** 15/06/2023

**Tutora:** M<sup>ª</sup> Elvira Garrido

**Tutor:** Álvaro Cuadrado



## ÍNDICE DE CONTENIDO:

1.INTRODUCCIÓN .....	6	6.4 Análisis de sensibilidad .....	38
1.1 Antecedentes .....	6	6.5 Interpretación de resultados .....	40
1.2 Objeto del estudio.....	7	7.ESTUDIO DE SOLUCIONES DE CORRECCIÓN Y/O ESTABILIZACIÓN .....	41
1.3 Metodología de trabajo .....	8	7.1 Medidas de estabilización.....	41
2.TRABAJOS PREVIOS .....	8	7.2 Revisión de alternativas factibles .....	44
2.1 Climatología .....	8	7.3 Estudio de soluciones.....	46
2.2 Sismicidad .....	9	7.4 Análisis de sensibilidad .....	50
2.3 Geomorfología .....	10	8.ESTUDIO DE TRÁFICO .....	51
2.4 Hidrología.....	10	8.1 Datos de partida.....	51
3.GEOLOGÍA.....	11	8.2 Metodología.....	52
3.1 Geología regional .....	11	8.3 Interpretación de resultados .....	53
3.2 Geología local.....	12	9.RESTAURACIÓN DEL PAISAJE.....	53
4.TRABAJO DE CAMPO .....	13	9.1 Actuaciones básicas .....	53
4.2 Drenaje transversal.....	16	9.2 Elección de actuación.....	57
4.3 Patologías.....	18	10. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO .....	57
4.4 Obra de emergencia.....	20	11.PLAN DE OBRA .....	62
4.5 Otras medidas de estabilización de ladera .....	20	12. VALORACIÓN DE LAS OBRAS .....	62
4.6 Conclusiones y recomendaciones .....	22	13. RESUMEN Y CONCLUSIONES .....	64
5.CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL TERRENO .....	23	ANEJOS.....	66
5.1 Enumeración de trabajos de campo y laboratorio .....	23		
5.2 Ensayos realizados .....	23		
5.2.1 Proyecto de Autovía del mediterráneo.....	23		
5.2.2 Ensayos Laboratorio de Geotecnia de la UPV.....	24		
5.3 Parametrización del terreno .....	27		
5.3.1 Resultados del anejo geotécnico. ....	27		
5.3.2 Resultados de los ensayos en laboratorio. ....	29		
6.ESTABILIDAD GLOBAL DE LA LADERA .....	33		
6.1 Revisión teórica previa.....	33		
6.2 Estudio previo de inestabilidades .....	34		
6.3 Análisis del tramo de estudio.....	35		

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES:

Figura 1 Imagen satélite de la zona de estudio. Fuente: Google Earth.....	6
Figura 2 Imagen aérea de la calzada. Fuente: Elaboración propia.....	6
Figura 3 Situación previa al desprendimiento. Fuente: Google Earth.....	7
Figura 4 Situación posterior al desprendimiento. Fuente: Google Earth.....	7
Figura 5 Temperaturas medias y precipitaciones. Fuente: Meteoblue.....	8
Figura 6 Temperaturas máximas. Fuente: Meteoblue.....	9
Figura 7 Mapa sísmico de España señalado el área de estudio. Fuente: Norma Sismorresistente NCSE-02.....	9
Figura 8 Geomorfología actual de la zona. Fuente: Google Earth.....	10
Figura 9 Barrancos próximos a la zona de estudio. Fuente: Google Maps.....	10
Figura 10 Fragmento de la hoja geológica nº 821 denominada “Alcoy” (1:50000) Fuente: IGME sobre imagen satélite de Google Earth.....	11
Figura 11 Leyenda geológica. Fuente: IGME.....	12
Figura 13 Talud del P.K. 433+600 (zona de estudio). Fuente: elaboración propia.....	13
Figura 14 Vías secundarias de acceso a la A-7. Fuente: Google Earth.....	13
Figura 15 Cartel informativo de localidad cercana (dirección Valencia). Fuente: Google Earth.....	14
Figura 16 Obtención de muestra para realizar ensayos. Fuente: elaboración propia.....	14
Figura 17 Cuneta de guarda en el margen derecho (dirección Alicante). Fuente: elaboración propia.....	14
Figura 18 Cuneta de guarda en el margen derecho (dirección Valencia). Fuente: elaboración propia.....	14
Figura 19 Cuneta de berma en el margen derecho (dirección Alicante). Fuente: elaboración propia.....	15
Figura 20 Cuneta de pie de desmonte revestida. Fuente: elaboración propia.....	15
Figura 21 Obra de drenaje transversal (ODT). Fuente: elaboración propia.....	15
Figura 22 Berma. Fuente: elaboración propia.....	15
Figura 23 Arcenes exteriores e interiores más caz. Fuente: elaboración propia.....	16
Figura 24 Estado del desagüe de la ODT de la cuneta de guarda. Fuente: elaboración propia.....	16
Figura 25 Estado de la bajante margen derecho dirección Alicante. Fuente: elaboración propia.....	17
Figura 26 ODT de la A-7. Fuente: Google Earth.....	17
Figura 27 Equipo de conservación realizando una inspección visual. Fuente: elaboración propia.....	17
Figura 28 Estado actual de la capa de rodadura. Fuente: elaboración propia.....	18
Figura 29 Estado de la bajante margen derecho dirección Valencia. Fuente: Google Earth.....	18
Figura 30 Estado actual de la capa de rodadura reparada. Fuente: elaboración propia.....	19
Figura 31 Estado actual de la capa de rodadura sin reparar. Fuente: elaboración propia.....	19
Figura 32 Estado actual de la vía de servicio por falta de mantenimiento. Fuente: elaboración propia.....	19
Figura 33 Profundidad de las grietas en el paquete de firmes. Fuente: elaboración propia.....	19
Figura 34 Estado actual de la obra de emergencia. Fuente: elaboración propia.....	20
Figura 35 Antes y después del mantenimiento del P.K. 432+850 - 433+100 Fuente: Google Earth.....	20
Figura 36 Antes y después del mantenimiento del P.K. 435+145 - 435+180 Fuente: Google Earth.....	21
Figura 37 Antes y después del mantenimiento del P.K. 435+160 - 435+280 Fuente: Google Earth.....	21
Figura 38 Situación previa al mantenimiento del tramo entre los P.K.s 435+220-435+350 Fuente: Google Earth.....	21
Figura 39 Situación posterior al mantenimiento del tramo entre los P.K.s 435+220-435+350 Fuente: Google Earth.....	21
Figura 40 Muro de contención en el P.K. 436+000 Fuente: Google Earth.....	22
Figura 41 Resumen de los ensayos de laboratorio (campaña geotécnica).....	24
Figura 42 Composición granulométrica de la muestra representativa Fuente: elaboración propia.....	24
Figura 43 Preparación del ensayo por el método de la cuchara de Casagrande Fuente: elaboración propia.....	26
Figura 44 Preparación y material necesario para determinar el contenido de carbonatos Fuente: departamento ingeniería del terreno.....	27
Figura 45 Clasificación del suelo mediante la Carta de Plasticidad de Casagrande Fuente: Ingeniería Elemental.....	28
Figura 46 Clasificación del suelo mediante la Carta de Plasticidad de Casagrande Fuente: Ingeniería Elemental.....	31
Figura 47 Rotura típica con forma cilíndrica Fuente: Manual de Taludes (IGME).....	33
Figura 48 Morfología del deslizamiento rotacional de un talud Fuente: PDF teoría de roturas.....	34
Figura 49 Métodos de rebanadas Fuente: Olalla, C. (1999).....	34
Figura 50 Situación de inestabilidad más existencia de nivel freático Fuente: Slide 2.....	36
Figura 51 Situación de inestabilidad del talud a corto plazo con presencia del NF Fuente: Slide 2.....	36



Figura 52 Situación de mejora del terreno inestable con existencia de nivel freático Fuente: Slide 2.....	37	Figura 71 Señalización de obra fija Fuente: Manual de ejemplos de señalización de obras fijas (Dirección General de Carreteras).....	58
Figura 53 Situación de mejora del terreno a corto plazo con existencia de nivel freático Fuente: Slide 2 .....	38	Figura 72 Desbroce y regularización del terreno Fuente: Elaboración propia.....	58
Figura 54 Situación más desfavorable en el análisis de sensibilidad Fuente: Slide 2 .....	39	Figura 73 Almacenamiento y descarga de la escollera Fuente: Elaboración propia.....	58
Figura 55 Croquis general de un muro de contención Fuente: <a href="https://victoryepes.blogs.upv.es">https://victoryepes.blogs.upv.es</a> .....	42	Figura 74 Cimiento del manto de escollera Fuente: Elaboración propia.....	59
Figura 56 Construcción de un muro pantalla de micropilotes Fuente: <a href="https://victoryepes.blogs.upv.es">https://victoryepes.blogs.upv.es</a> .....	42	Figura 75 Operario auxiliar y gruista Fuente: Elaboración propia.....	59
Figura 57 Proceso de revestimiento de la técnica Soil Nailing Fuente: <a href="https://victoryepes.blogs.upv.es">https://victoryepes.blogs.upv.es</a> .....	42	Figura 76 Evolución de los batches a lo largo del tramo Fuente: Elaboración propia.....	60
Figura 58 Muro verde Fuente: <a href="https://victoryepes.blogs.upv.es">https://victoryepes.blogs.upv.es</a> .....	43	Figura 77 Finalización del manto de escollera con recebado en la parte inferior Fuente: Elaboración propia.....	60
Figura 59 Construcción de muro de tierra armada Fuente: elaboración propia.....	43	Figura 78 Maquinaria utilizada en la obra de emrgencia Fuente: Elaboración propia.....	61
Figura 60 Muro de gaviones Fuente: <a href="https://victoryepes.blogs.upv.es">https://victoryepes.blogs.upv.es</a> .....	43	Figura 23 Ejemplo de estructura jerárquica AHP. Fuente: <a href="https://victoryepes.blogs.upv.es">https://victoryepes.blogs.upv.es</a> .....	100
Figura 61 Manto de escollera Fuente: elaboración propia.....	44	Figura 24 Escala de comparación por pares, Saaty. Fuente: <a href="https://victoryepes.blogs.upv.es">https://victoryepes.blogs.upv.es</a> .....	100
Figura 62 Muro de mampostería Fuente: <a href="https://victoryepes.blogs.upv.es">https://victoryepes.blogs.upv.es</a> .....	44	Figura 25 Índice aleatorio RI, para el cálculo de la consistencia. Fuente: <a href="https://victoryepes.blogs.upv.es">https://victoryepes.blogs.upv.es</a> ..	101
Figura 63 Esquema de la estructura jerárquica AHP objeto de estudio Fuente: elaboración propia.....	46	Figura 26 Porcentajes máximos de consistencia. Fuente: <a href="https://victoryepes.blogs.upv.es">https://victoryepes.blogs.upv.es</a> .....	101
Figura 65 Manzanilla.Fuente: Ordenación Ecológica, Estética y Paisajística.....	52		
Figura 64 Localización de ambas estaciones respecto de la zona objeto de estudio Fuente:visor del Ministerio de Transporte.....	52		
Figura 65 Manzanilla.....	54		
Fuente: Ordenación Ecológica, Estética y Paisajística.....	54		
Figura 66 Cebada.....	55		
Fuente: Ordenación Ecológica, Estética y Paisajística.....	55		
Figura 67 Uña de gato.....	55		
Fuente: Ordenación Ecológica, Estética y Paisajística.....	55		
Figura 68 Pino carrasco.....	56		
Fuente: Ordenación Ecológica, Estética y Paisajística.....	56		
Figura 69 Chaparro.....	56		
Fuente: Ordenación Ecológica, Estética y Paisajística.....	56		
Figura 70 Chaparro.....	56		
Fuente: Ordenación Ecológica, Estética y Paisajística.....	56		



**ÍNDICE DE TABLAS:**

Tabla 1 Ensayos de identificación..... 27

Tabla 2 Ensayos químicos..... 28

Tabla 3 Ensayos de resistencia y compactación. .... 29

Tabla 4 Otros ensayos..... 29

Tabla 5 Resultados del análisis granulométrico..... 29

Tabla 6 Resultados de las tres muestras por el método de la cuchara de Casagrande. .... 30

Tabla 7 Resultados del límite plástico. .... 30

Tabla 8 Contenido de carbonatos. .... 31

Tabla 9 Cohesión constante y ángulo de rozamiento variable ..... 38

Tabla 10 Ángulo de rozamiento constante y cohesión variable..... 39

Tabla 11 Matriz de decisión de los criterios ..... 46

Tabla 12 Pesos de las variables o criterios. .... 46

Tabla 13 Pesos de las variables o criterios. .... 47

Tabla 14 Subcriterios del C1, Impacto ambiental. .... 47

Tabla 15 Matriz de decisión respecto de C1, Impacto ambiental. .... 47

Tabla 16 Pesos de las alternativas respecto a la variable de impacto ambiental..... 47

Tabla 17 Subcriterios del C2, Social..... 48

Tabla 18 Matriz de decisión respecto de C2, Social..... 48

Tabla 19 Pesos de las alternativas respecto a la variable social. .... 48

Tabla 20 Subcriterios del C3, Constructivo..... 48

Tabla 21 Matriz de decisión respecto de C3, Constructivo..... 49

Tabla 22 Pesos de las alternativas respecto a la variable constructiva. .... 49

Tabla 23 Subcriterios del C4, Económico..... 49

Tabla 24 Matriz de decisión respecto de C4, Económico..... 49

Tabla 25 Pesos de las alternativas respecto a la variable económica. .... 50

Tabla 26 Matriz de decisión de los criterios tras el análisis de sensibilidad..... 50

Tabla 27 Pesos de las variables o criterios. .... 51

Tabla 28 Valor de la IMD en ambas estaciones. .... 52



## ÍNDICE DE GRÁFICAS:

Gráfica 1 Curva granulométrica de la muestra representativa Fuente: elaboración propia. ....	25
Gráfica 2 Curva granulométrica por sedimentación Fuente: elaboración propia. ....	25
Gráfica 3 Obtención del WL a partir de tres resultados de muestras diferentes Fuente: elaboración propia. ....	26
Gráfica 4 Composición de la unidad Tap Fuente: elaboración propia.....	32

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

La zona de estudio (Figura 1) está ubicada en el trazado de la carretera A-7, más concretamente, al norte de la población Muro de Alcoy, una localidad situada en la comarca del Comtat, en la provincia de Alicante, España. Donde a inicios del año 2017 tuvieron lugar varios desprendimientos de tierras entre el Puerto de Albaida y Cocentaina. El tramo más afectado, objeto de estudio, se sitúa a partir del P.K. 433+600 hasta el P.K. 434+000. Este se produjo a raíz de las lluvias ocurridas en los meses de diciembre de 2016 y enero de 2017, afectando al drenaje de la plataforma y obligando al corte parcial de la calzada.



Figura 1 Imagen satélite de la zona de estudio. Fuente: Google Earth.

Este tramo de 400m situado al pie de la Serra de Mariola, pertenece a la Red de Carreteras del Estado. A lo largo de su recorrido puede observarse (Figura 2) la existencia de una vía de doble sentido de circulación con dos carriles para cada calzada, los cuales poseen una anchura de 3,5 m, que junto con la de mediana, conformada por unas barreras de protección tipo new jersey de hormigón, los arcones interiores y exteriores triangulares y las cunetas, hacen que la sección total sea de unos 27,5 m aproximadamente. Además, en dicha zona de estudio se aprecian las señalizaciones verticales que indican el tipo de carretera y la velocidad máxima de circulación de esta (120 km/h). También puede advertirse señales que orientan e informan a los usuarios de posibles desvíos para acceder a las poblaciones cercanas, ya comentadas anteriormente.



Figura 2 Imagen aérea de la calzada. Fuente: Elaboración propia.

Por un lado, en cuanto a la configuración en planta de la carretera, predomina un trazado que a simple vista podría parecer rectilíneo, no obstante, este es fruto de una concatenación que alterna múltiples curvas de transición con sus correspondientes curvas circulares de amplio radio que permiten una gran visibilidad. Por otro lado, en cuanto al alzado se refiere, al transcurrir cerca de una cadena montañosa la pendiente es negativa y uniforme en dirección a Alicante, con una inclinación menor al 4%, salvando así un desnivel de 15 m.

En cuanto a la zona de desprendimiento (Figura 3) el estado de la carretera, pese a no ser catastrófico, suponía un peligro severo para la segura circulación de los usuarios, puesto que se produjo la obstrucción y colmatación de la cuneta entre los P.K. 433+700 y 433+730 y la obstrucción parcial de la cuneta a lo largo de 30 metros desde el P.K. 433+760. Por tanto, para evitar que la afección a los usuarios se prolongase de forma indefinida e incluso que el desprendimiento se amplificara y/o extendiera, se optó por realizar un proyecto de emergencia. Proyecto que fue impulsado por la Demarcación de Carreteras del Estado de la Comunidad Valenciana y que consistía en la construcción del murete a pie de talud y en el revestimiento de 2/3 de la altura total de la ladera mediante un manto de escollera, protegiendo a los conductores de futuros desprendimientos y asegurando el correcto funcionamiento de los elementos de desagüe.

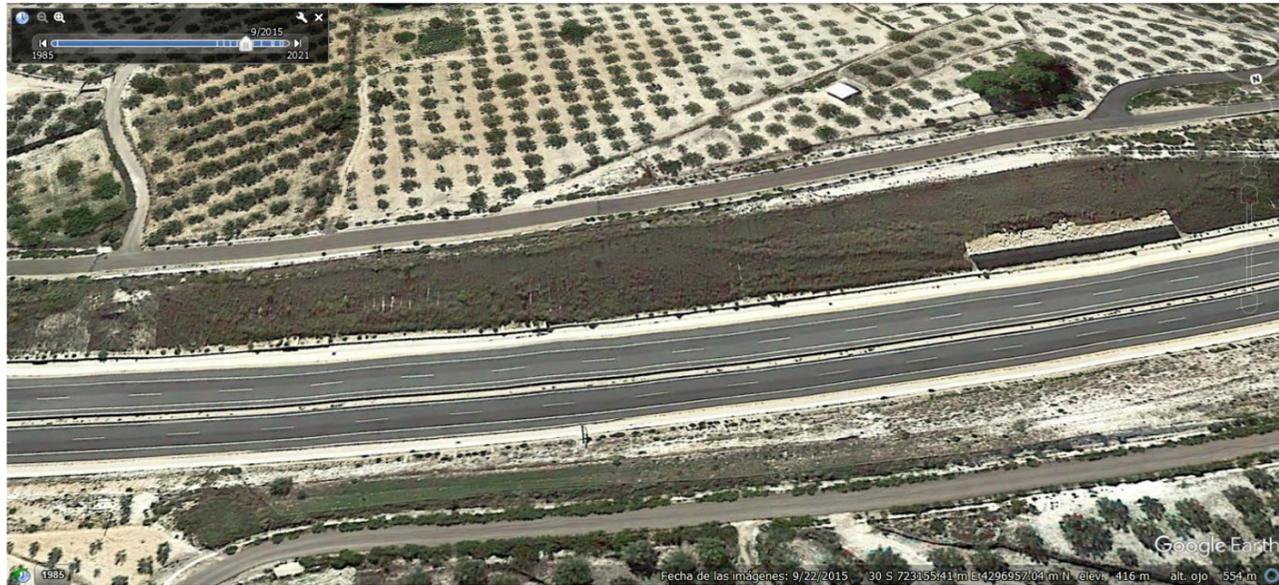


Figura 3 Situación previa al desprendimiento. Fuente: Google Earth.

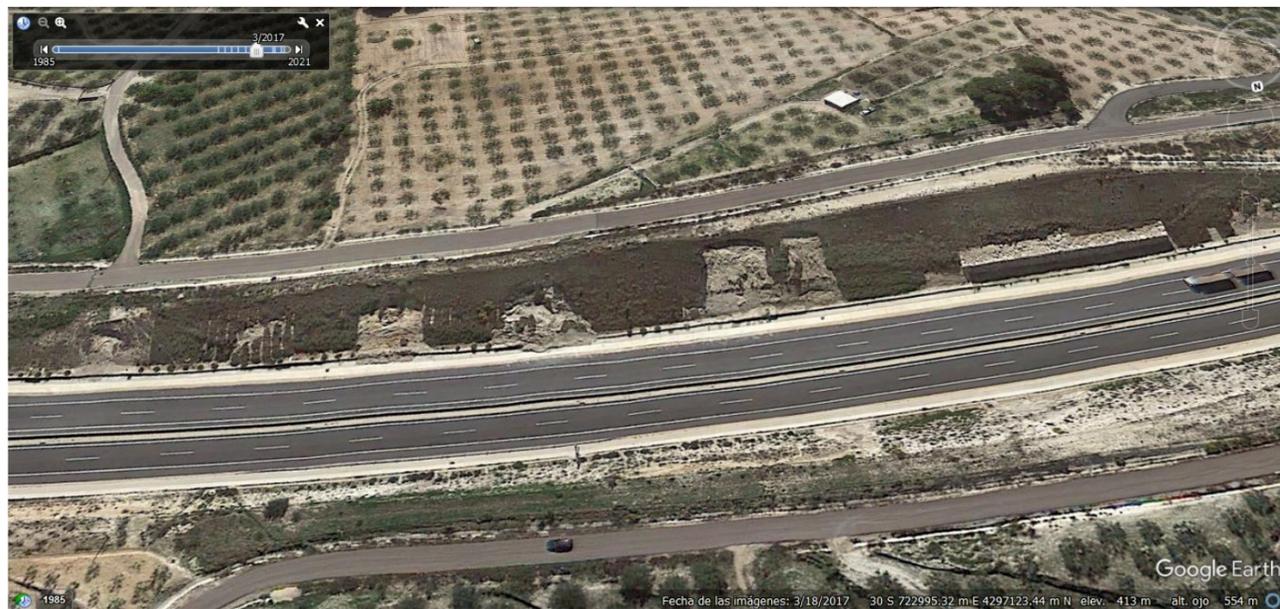


Figura 4 Situación posterior al desprendimiento. Fuente: Google Earth.

Debido a la complejidad geológico-geotécnica de la zona de estudio, cabe destacar que para definir la solución, con la que se obtuviese el máximo grado de seguridad, fue necesaria la elaboración de una Nota Técnica, fruto de una

inspección técnica, en la que se tuvo en cuenta los siguientes aspectos: evaluación de las condiciones geológico-técnicas de los taludes, peligro que suponían las inestabilidades observadas y su posible evolución e incidencia en la seguridad vial; comportamiento de los tratamientos y medidas correctoras previas, realizadas durante la construcción de la autovía y durante su conservación, para la estabilización de los taludes y finalmente, se realizaba una propuesta de nuevas medidas de corrección sobre los taludes de desmonte afectados. Los trabajos de reconocimiento del terreno comenzaron entre el 22 y 23 de febrero de 2017 y finalizaron el 2 de marzo de ese mismo año.

Una vez finalizado los análisis, evaluaciones y medidas correctoras necesarias, se optó por la retirada de un geotextil, que recubría inicialmente la ladera, y por el levantamiento de un muro de escollera de recubrimiento, de 2-4 m, el cual permitiría un retaluzado 2H:1V en el desmonte, sobre el cual apoyaría el manto de escollera. Manto para el cual fue necesario inhabilitar parcialmente la calzada, para la construcción de una banqueta auxiliar, que facilitase la correcta colocación de los fragmentos de roca, y para el acopio previo de dicho material. Todo ello teniendo en cuenta la seguridad de los usuarios de la propia carretera y de los trabajadores durante la construcción, para lo cual se empleó la oportuna y balizamiento (paneles de dirección provisionales, barreras laterales, luces amarillas intermitentes...).

En paralelo a esta actuación, en el mismo proyecto de emergencia se realizaron varias operaciones de estabilización de ladera a lo largo de la A-7, como en el caso de los PP.KK.s: 435+280 a 435+350 y 438+935 a 439+000 con el fin de garantizar una mejora notable en la seguridad del conjunto de la infraestructura viaria durante el periodo de explotación de su vida útil.

En definitiva, el proyecto de emergencia supuso una inversión final de 950.000€ aproximadamente y finalizó en agosto de 2017 consiguiendo una circulación con las máximas garantías de seguridad en los tramos afectados por los desprendimientos de ladera de la A-7.

## 1.2 Objeto del estudio

Mediante este trabajo, con el cual se finalizará los estudios de Grado en Ingeniería Civil se pretende analizar la situación actual del desmonte situado en la carretera A-7, PP.KK. 433+600 a 434+000 y la evolución que este ha sufrido desde los inicios de la vida útil de la infraestructura. Asimismo, teniendo en cuenta la integración paisajística, climatología, orografía y el tipo de terreno que hay en la zona, se evaluarán diversas alternativas en las que se incluyan las diferentes técnicas para la estabilización de la ladera. También se estudiará la afección socioeconómica

que el desprendimiento ocasionó en las proximidades de la zona de estudio con el fin de comparar las diferentes alternativas que podrían haberse llevado a cabo. Para finalizar el Trabajo Fin de Grado (TFG) se tendrán que aplicar múltiples conocimientos adquiridos a lo largo de las diferentes asignaturas del Grado en Ingeniería Civil.

### 1.3 Metodología de trabajo

El proceso que se ha llevado a cabo para la realización de este Trabajo de Fin de Grado se descompone en 4 fases.

#### Fase 0:

En primer lugar, se procederá a la recopilación de toda la información disponible (trabajos de orientación investigadora, estudios geotécnicos, documentos técnicos...), para una mejor comprensión del problema que ha acontecido en el desmonte objeto de estudio y de la solución aplicada, con el fin de realizar un análisis pormenorizado de la situación.

#### Fase 1:

Para efectuar un mejor análisis de la geología local y familiarizarse con el entorno, observando de primera mano los problemas existentes y la solución adoptada, se llevará a cabo una visita de campo a lo largo de la zona de interés. De este modo, se podrá observar el estado actual de la misma, recogiendo así material visual útil para el estudio y se aprovechará para realizar un estudio de tráfico. En esta visita se tomó una muestra del terreno para su posterior ensayo en laboratorio.

#### Fase 2:

Seguidamente, se procederá al desarrollo de la solución más adecuada, a partir del estudio de alternativas, en el que se evaluará su viabilidad en cuanto a coste de construcción, mantenimiento, tiempo de integración paisajística y tiempo de construcción.

#### Fase 3:

Para esta última fase se procederá con el desarrollo de la afección socioeconómica generada a partir de la catástrofe, en el cual se incluirá el estudio del tráfico. Finalmente se comprobará la posibilidad de haber prevenido el incidente concluyendo así el estudio.

## 2. TRABAJOS PREVIOS

Para poder comprender de forma clara y precisa el funcionamiento de la zona en la cual se está llevando a cabo el estudio de estabilización de ladera, Muro de Alcoy, se pretende reunir la mayor cantidad de datos sobre la climatología, sismicidad, geomorfología e hidrología.

### 2.1 Climatología

Uno de los factores de mayor relevancia en la estabilidad de una ladera es la climatología del entorno, especialmente en lo que se refiere a la frecuencia y el volumen de las precipitaciones, es por esta razón que se estudiarán las condiciones meteorológicas para una mayor comprensión del comportamiento del tramo objeto de estudio y de la solución adoptada, para conseguir una mayor firmeza en el desmonte.

Tanto la población más cercana, Muro de Alcoy, como la ladera en cuestión, se encuentran a una altura sobre el nivel del mar de aproximadamente 400 m. A continuación, puede observarse (Figura 5) una gráfica en la que se representan los datos más relevantes de las temperaturas medias y precipitaciones a lo largo de un lapso de 3 décadas en dicha localidad.

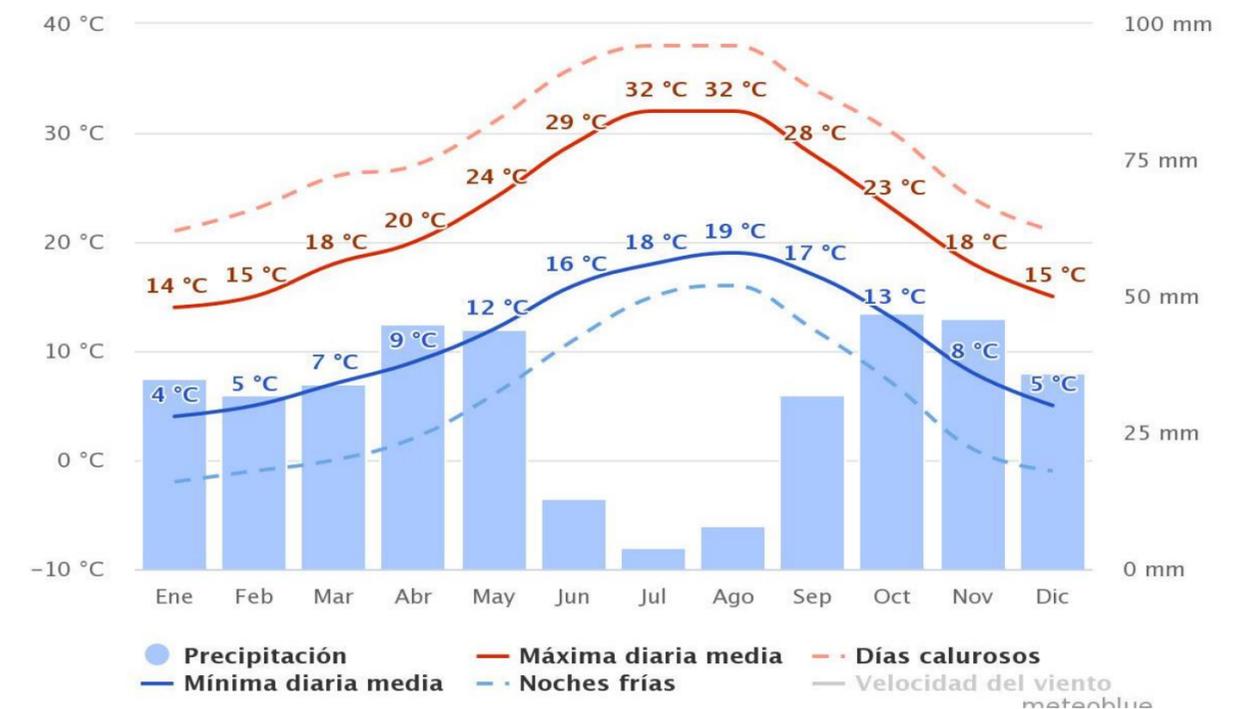


Figura 5 Temperaturas medias y precipitaciones. Fuente: Meteoblue.

El **clima** en esta zona es regularmente **cálido y templado**. No obstante, a pesar de tener precipitaciones a lo largo de todo el año, incluso en el mes más seco (julio) no se considera un clima húmedo. En la ilustración se observa de forma clara la ventana operativa a la hora de realizar tareas de mantenimiento y de mejora en la estabilidad en los taludes. Periodo de tiempo que abarca desde finales de mayo hasta principios de octubre.

Las temperaturas visibles en el diagrama de temperaturas máximas en Muro de Alcoy (Figura 6) evidencian las características de un clima cálido. Las temperaturas máximas sobrepasan los 30°C en verano, mientras que en los meses más fríos las mínimas rondan los 5°C. Además, es importante tener en cuenta los días en los que se producen heladas, puesto que el comportamiento del suelo varía y por ende el método que se empleó para su mantenimiento también.

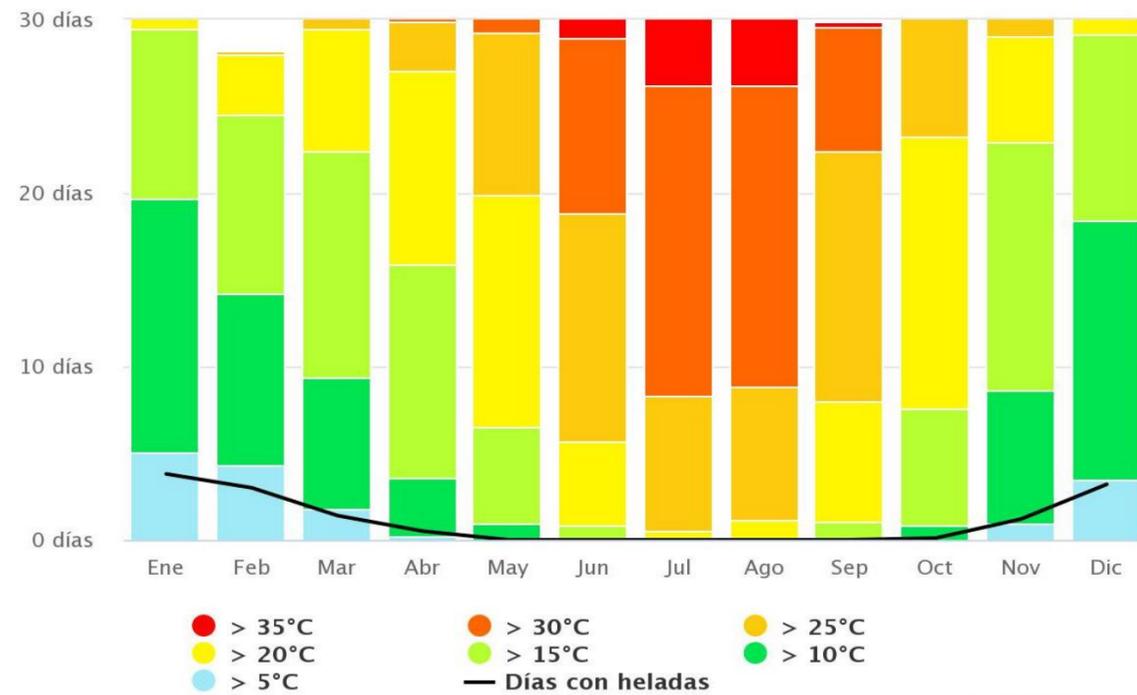


Figura 6 Temperaturas máximas. Fuente: Meteoblue.

## 2.2 Sismicidad

Con la ayuda de la “Norma de Construcción Sismorresistente Española NCSE- 02” (Real Decreto 997/2002 del 27 de septiembre) se ha obtenido el mapa de peligrosidad sísmica, (Figura 7) junto con los valores del coeficiente de contribución K.

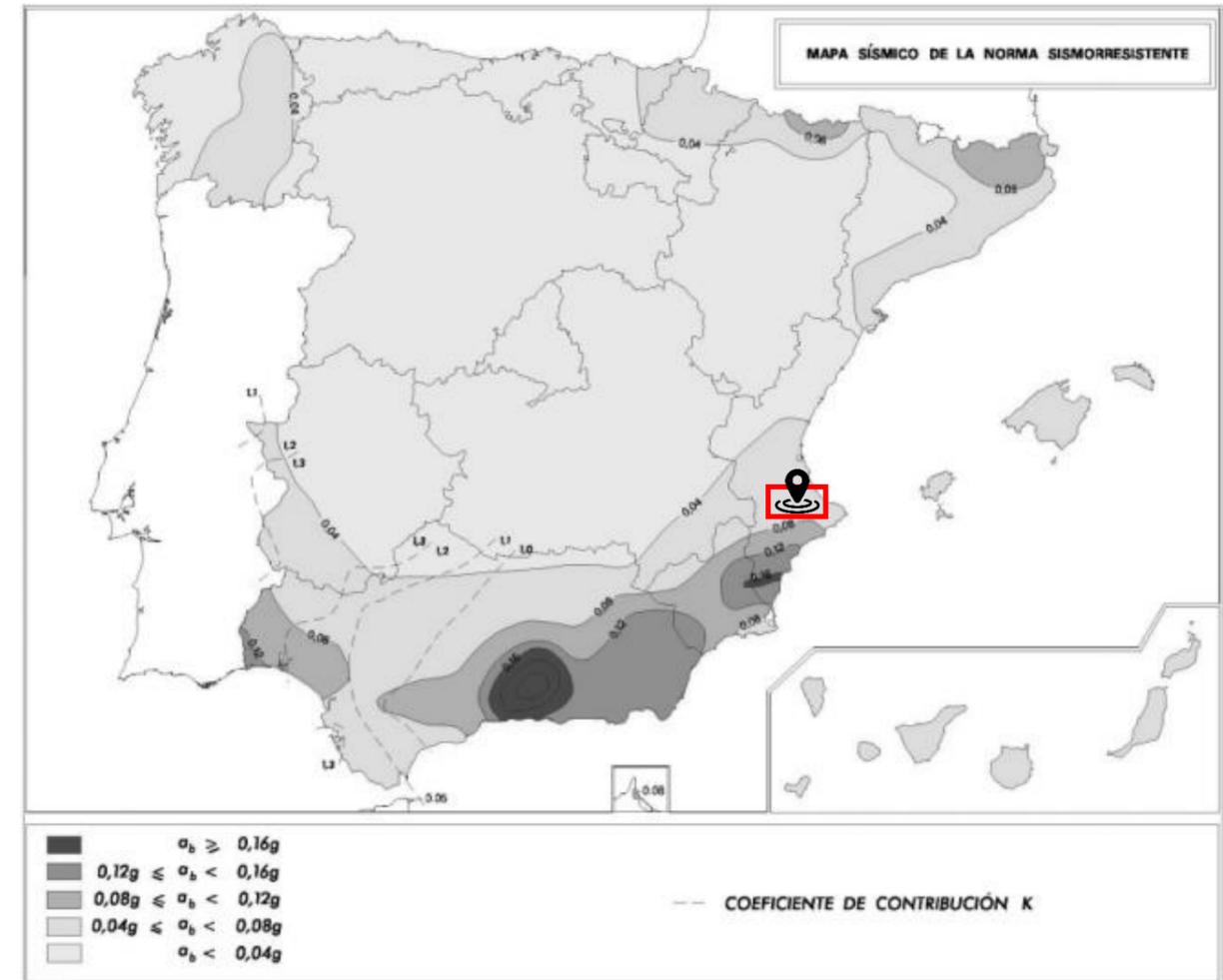


Figura 7 Mapa sísmico de España señalado el área de estudio. Fuente: Norma Sismorresistente NCSE-02.

Se ha constatado que el tramo objeto de estudio de la A-7, cercano al municipio de Muro de Alcoy, se sitúa en una franja en la cual la aceleración sísmica básica (ab) oscila entre los valores 0.04g – 0.08g, por consiguiente, la norma mencionada es de obligado cumplimiento.

Para lograr la máxima eficacia en las actuaciones realizadas, fruto de movimientos sísmicos, se ha desarrollado el Plan Especial frente al riesgo sísmico en la Comunidad Valenciana. En el cual, se establecen los procedimientos de actuación (servicios y recursos públicos y privados) y la organización necesaria, con el fin de hacer frente a las emergencias ocasionadas por los terremotos.

### 2.3 Geomorfología

El tramo de desmonte objeto de estudio de la A-7, se sitúa en las proximidades del municipio de Muro de Alcoy, perteneciente a la comarca del Condado de Cocentaina, donde se encuentra la depresión principal de los valles prebéticos de Alcoy. No obstante, como puede advertirse en la Figura 8, el relieve muestra una pendiente media del 3,7% en el trazado de la carretera.

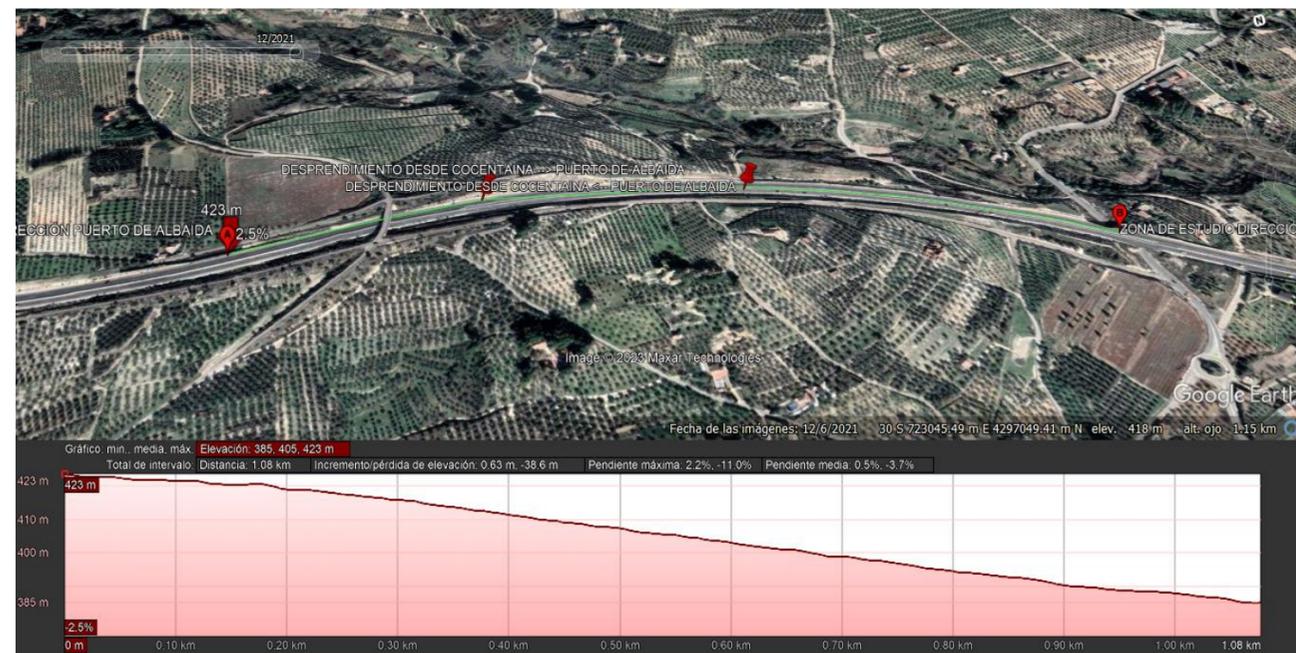


Figura 8 Geomorfología actual de la zona. Fuente: Google Earth.

La gran cantidad de valles y barrancos también son los causantes de las grandes pendientes que se han de adoptar en los taludes de la carretera. Con el fin de rebajar el trazado para conseguir el plano adecuado sobre el que apoyar la obra lineal, los desmontes de la zona alcanzan hasta una altura de 10 m con respecto de la calzada.

### 2.4 Hidrología

Para poder comprender mejor la hidrología de esta zona, es menester tener en cuenta la Sierra Mariola. Se trata de uno de los principales accidentes geográficos de la provincia de Alicante, que está compuesto de materiales carbonatados fuertemente tectonizados, y que a su vez configura un grupo de 18 acuíferos de gran interés, tanto por ser origen de los ríos Vinalopó y Serpis como por el abastecimiento que supone para numerosas poblaciones de las provincias de Alicante y Valencia.

En cuanto a la hidrología subterránea, el acuífero de Muro de Alcoy se compone de dos sectores: Cuaternario de Muro de Alcoy y Margen izquierda del río Serpis. En esta zona con una precipitación media de 590 mm/año de media, de la cual un 15% se infiltra, consiguiendo una aportación de 1,69 hm<sup>3</sup>/año. A pesar de la existencia de una hidrogeología subterránea bastante importante, en ningún punto de interés se ha detectado indicios del nivel freático.

Por último, en cuanto a la hidrología superficial cabe destacar los numerosos barrancos (Barranc de Turballos, Barranc la Perla, Barranc Blanc) que pese a haberse encontrado agua durante la campaña de investigación, se tratan de cursos fluviales de carácter torrencial y el río Agres, que desemboca en el río Serpis y cuyo caudal no es muy elevado, pero constante a lo largo del año.



Figura 9 Barrancos próximos a la zona de estudio. Fuente: Google Maps.

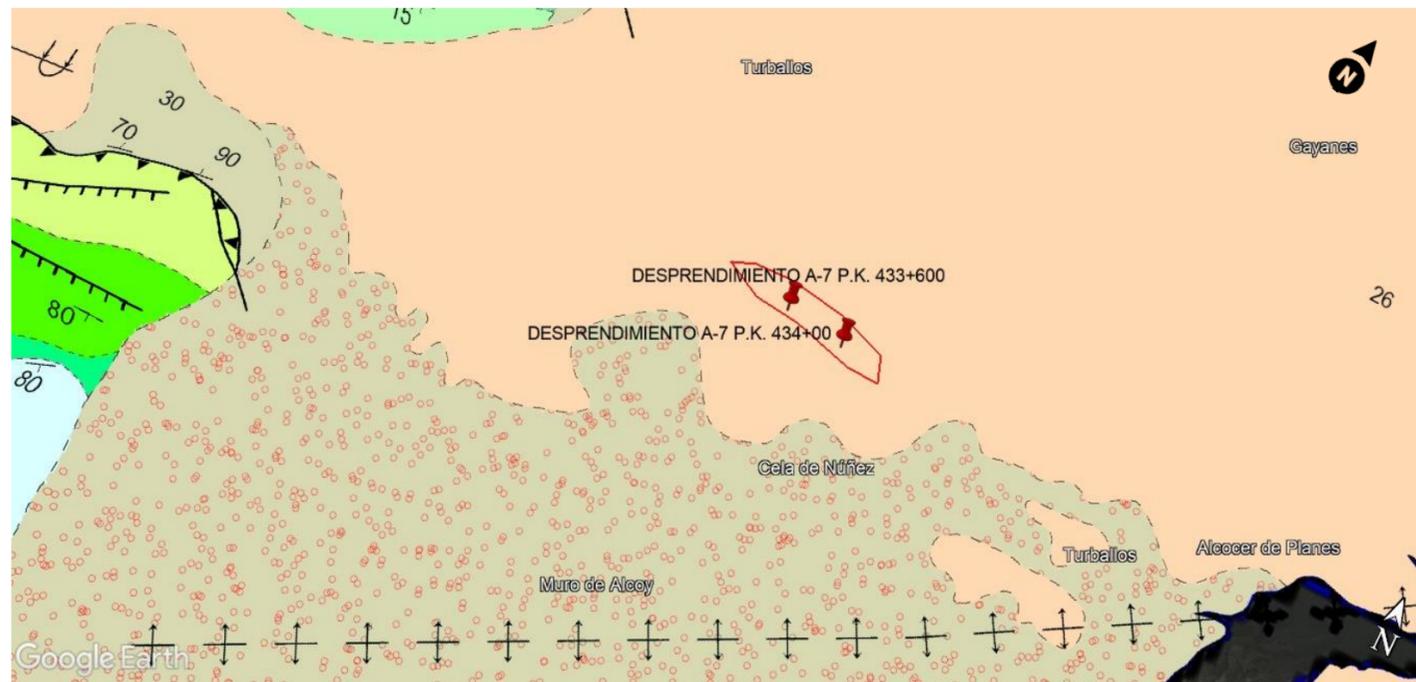
En definitiva, la hidrología de la zona es de gran relevancia, puesto que su influencia en el comportamiento del terreno es directa.

### 3.GEOLOGÍA

Para obtener la información en este apartado, se ha dividido el proceso de búsqueda en: una geología regional (escala 1:50.000), para la obtención de una idea general de los materiales aflorantes y una geología local para corroborar de forma más detallada la información obtenida con anterioridad.

#### 3.1 Geología regional

Para recabar la información de la geología regional de la zona de estudio se recurre a la Hoja 821 del IGME (Instituto Geológico y Minero de España), donde se obtiene una idea general de los materiales aflorantes en el municipio de Muro de Alcoy (Alicante). Para una mejor ubicación del terreno, también se utiliza la herramienta de Google Earth Pro para superponer el mapa geológico que proporciona el IGME (Figura 10) a la imagen satélite.



#### LEYENDA

- |  |  |  |              |
|--|--|--|--------------|
|  | 26. Mioceno indiferenciado predominantemente margoso |  | 28. Terrazas |
|--|--|--|--------------|

Figura 10 Fragmento de la hoja geológica nº 821 denominada "Alcoy" (1:50000) Fuente: IGME sobre imagen satélite de Google Earth.

En esta zona afloran las siguientes formaciones geológicas:

- **Mioceno indiferenciado**

Está representado por potentes conjuntos, generalmente margosos, que se encuentran abundantemente a lo largo del territorio próximo a la zona de estudio.

La falta de niveles guía y la ausencia de buzamientos en la monótona serie margosa que colmata las áreas sinclinales hace muy difícil su expresión cartográfica. No obstante, las unidades geológicas en el área de interés son TM y TM2 que se agrupan en la unidad geotécnica denominada Tap. Se trata de una unidad geotécnica compuesta de arcillas margosas y biodetríticas que en ocasiones puede contener una cantidad variable, pero reducida de limo y arenas. Además, suelen presentar nódulos carbonatados, probablemente oncolíticos, correspondiente a un medio de sedimentación lacustre.

Dentro del Mioceno se pueden diferenciar tres niveles: el inferior, que hace referencia a su base y se compone de calizas pararrecifales blancas; el medio, dentro del cual se puede diferenciar entre el Tap langhiense y al serravaliense y por último el superior o margas tortonienses.

- **Terciario Neogeno Mioceno medio**

Etapa en la que aparecen los pliegues más significativos de la zona, entre ellos el pliegue sinclinal que abarca la zona de estudio. Se caracteriza por su contenido de calizas biodetríticas, pese a su escasa potencia.

- **Terciario Neogeno Mioceno superior**

Antes de este periodo, durante el Tortoniense inferior la región de Alcoy se encontraba sumergida por el mar, no obstante, en el Mioceno superior se produce toda la retirada del mar, aflorando así todos los sedimentos marinos que se componen de facies molásica de areniscas blancas muy finas con cemento calizo entre las cuales aparecen pequeños interbancos margosos.

## LEYENDA

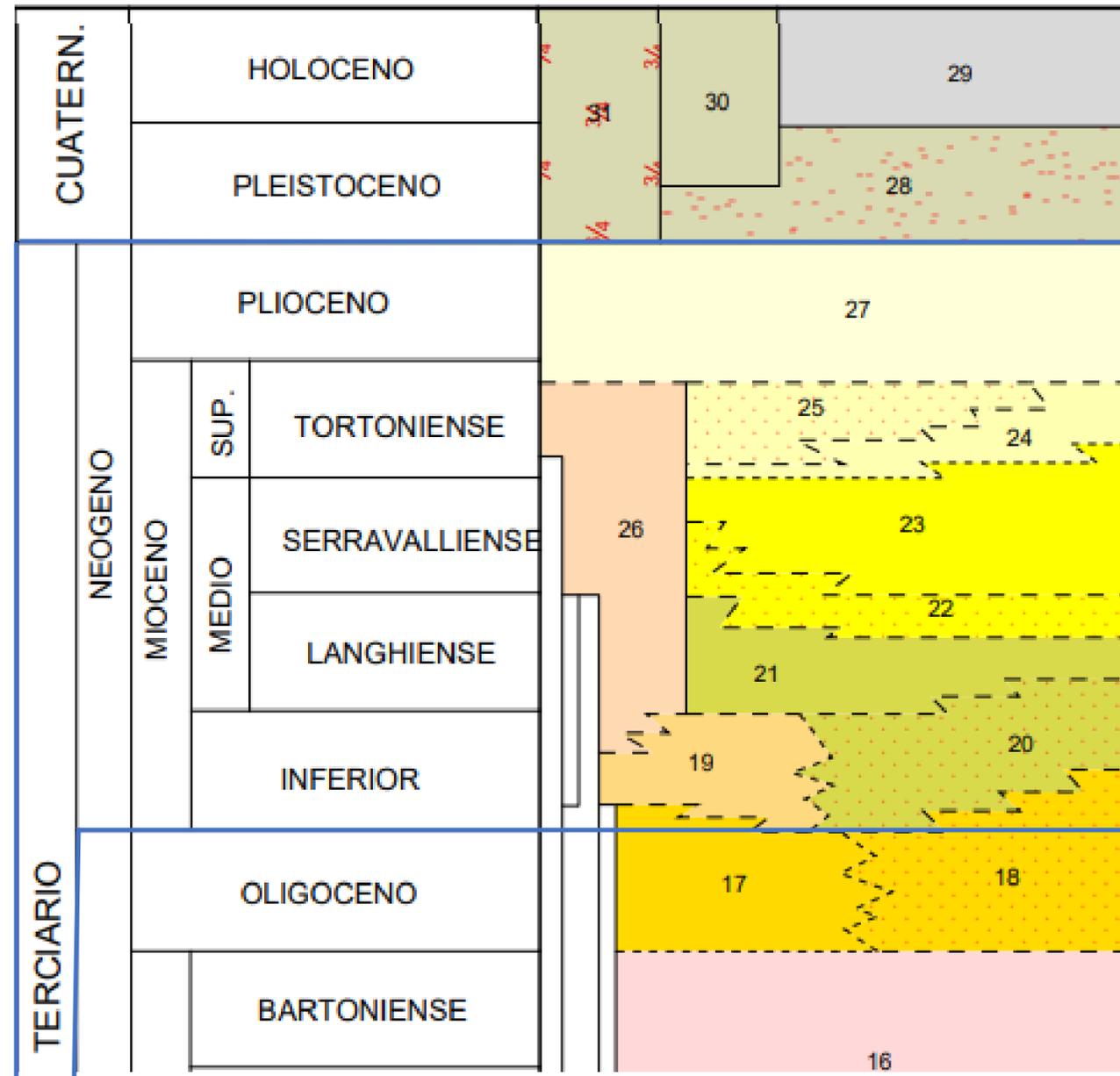


Figura 11 Leyenda geológica. Fuente: IGME

### 3.2 Geología local

Como resultado a la búsqueda de un mayor grado de detalle en los rasgos geológicos de la zona se han realizado varias visitas de campo a la zona de estudio, para poder comprobar lo que realmente hay en la zona.

En dicha zona cercada por formaciones abruptas del terreno con un elevado índice de carbonatos existe una encajada red de drenaje que recoge tanto la escorrentía, como las infiltraciones que fluyen a través de los materiales impermeables del terreno. El uso del suelo predominante en esta zona se encuentra destinado a la agricultura de secano (aceitunas, almendros, vid), hecho que provoca que en el paisaje destaquen los rasgos geológicos, debido a la poca vegetación.

En el terreno cabe destacar la ausencia de niveles guía, propia de la geología general del Mioceno indiferenciado ya comentada, que imposibilitan adivinar la orientación de los estratos. También se aprecian intercalaciones de bancos arcilloso y margosos, que poseen un color más rojizo, debido al contenido de hierro, frente al estrato predominante de limos arenosos de apariencia más blanquecina (Figura 12).



Figura 12. Talud de limos y arcillas. Fuente: elaboración propia.

La información obtenida gracias a la inspección visual del tramo de carretera coincide con la información proporcionada por el IGME, es decir, se ha observado una unidad geotécnica con los rasgos propios del Tap (margas beige, arcillas pardas, limos blancos y lignito, Figura 13).



Figura 13 Talud del P.K. 433+600 (zona de estudio). Fuente: elaboración propia

## 4. TRABAJO DE CAMPO

El 25 de enero de 2023, se lleva a cabo una visita de campo en la zona de estudio, con el objeto de determinar varios interrogantes: principalmente de inspeccionar el estado actual del desmorte a lo largo de todo el tramo y evaluar la efectividad y evolución de la solución adoptada en la obra de emergencia y realizar un aforo manual del tráfico actual de la autovía A-7, contrastar la geología local y tomar muestras suficientes para caracterizar de forma más precisa el terreno y con el objetivo de investigar la causa del colapso parcial del terreno.

El acceso más directo para visualizar la ladera objeto de estudio es tomando la autovía A-7 desde Valencia con dirección Alicante. No obstante, para poder detenerse y examinar con mayor grado de detalle el talud en cuestión, se ha de tomar el desvío 432 dirección Muro de Alcoy y hacer uso de las vías auxiliares paralelas en ambos márgenes de la autovía.

En primer lugar, se lleva a cabo un recorrido general de toda la ladera por la A-7, para más adelante coger los desvíos de ambas carreteras locales colindantes a la autovía (Figura 14) y que se encuentran a una mayor cota que la calzada principal, echo que permite la visualización de los puntos más singulares del talud.

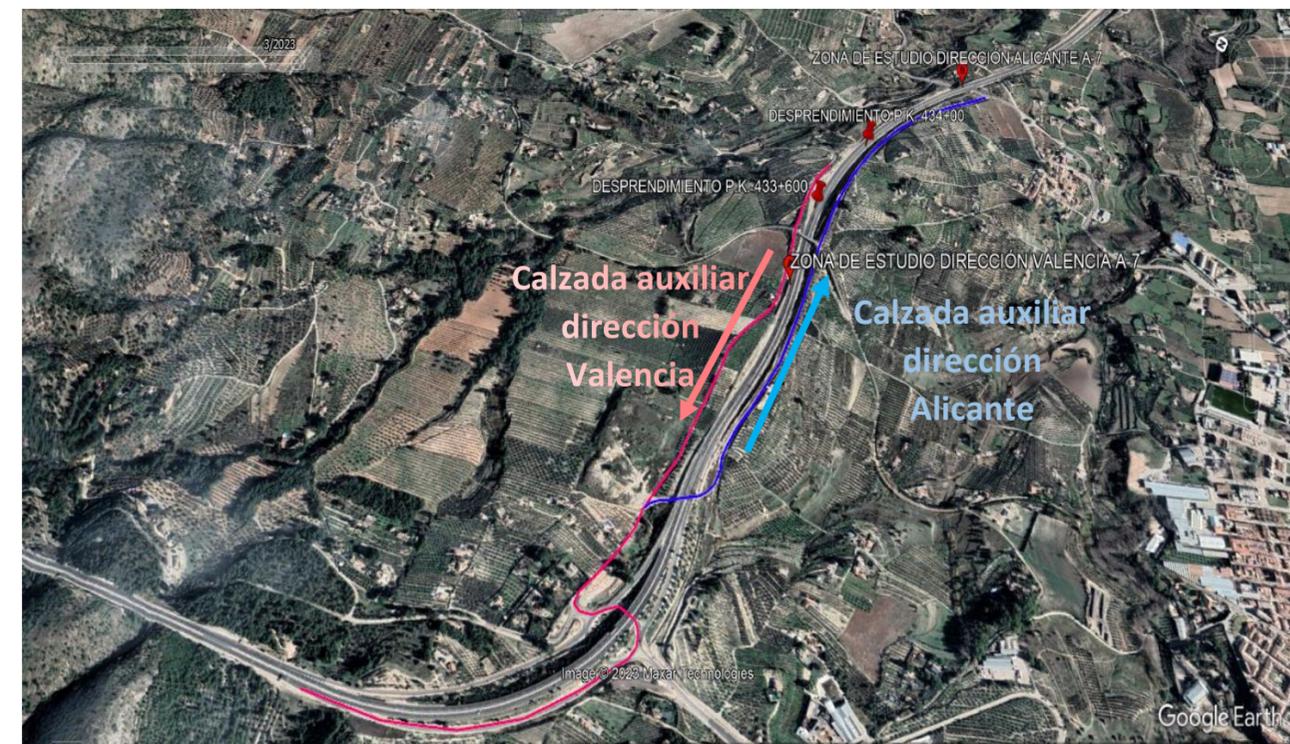


Figura 14 Vías secundarias de acceso a la A-7. Fuente: Google Earth.

A partir del P.K. 433+600 en adelante, se pueden apreciar soluciones parecidas, cuya finalidad es la de estabilizar/contener/sostener un volumen de tierras determinado del desmonte.



Figura 15 Cartel informativo de localidad cercana (dirección Valencia). Fuente: Google Earth.

En la Figura 16, se muestra el terreno donde se toma la muestra representativa para analizar en el laboratorio posteriormente. Para la extracción de las margas limosas, se elimina la capa superficial, en la que se encuentra el material alterado para que los fragmentos extraídos posean unas características lo menos alteradas posibles, para someterlos a ensayos. Como se observa en la imagen, la parte superficial presenta un color beige oscuro, fruto de la alteración a la que está sometida la ladera, no obstante, las muestras tomadas son de un color beige grisáceo más claro, natural de este tipo de suelos.



Figura 16 Obtención de muestra para realizar ensayos. Fuente: elaboración propia

#### 4.1 Arcenes y cunetas

A lo largo del trazado de la A-7 se pueden observar todos los elementos principales de una sección transversal completa. Empezando de fuera hacia dentro cabe destacar:

- Cunetas de guarda, situada en la coronación de los desmontes en ambos márgenes (Figuras 17 y 18) derecho dirección Alicante, cuya finalidad es reducir la erosión en el propio talud de desmonte. En muchas zonas se encuentra invadida por los residuos y sedimentos de distinta naturaleza que arrastran las lluvias.



Figura 17 Cuneta de guarda en el margen derecho (dirección Alicante). Fuente: elaboración propia.



Figura 18 Cuneta de guarda en el margen derecho (dirección Valencia). Fuente: elaboración propia.

- Cuneta de berma próxima a la zona del talud objeto de estudio. La cual está revestida, como el resto de los desagüeros, para evitar las infiltraciones y erosión debido a que la pendiente longitudinal supera el 3% en gran parte del recorrido (Figura 19).



Figura 19 Cuneta de berma en el margen derecho (dirección Alicante). Fuente: elaboración propia.

- Bajantes que, junto con los bordillos que se unen a la cabeza del drenaje longitudinal, transportan el agua que se acumula en la calzada de los caminos de servicio que hay en ambos de la calzada central y la dirigen a la cuneta de berma o de pie de talud para minimizar la formación de cárcavas (Figura 21).



Figura 21 Obra de drenaje transversal (ODT). Fuente: elaboración propia.

- Amplias cunetas de pie de desmonte revestidas, que son elementos lineales, superficiales, con sección transversal triangular, cuya finalidad es captar la escorrentía de los taludes de desmonte y de la propia plataforma y al mismo tiempo realizar la función de una cuneta de seguridad (Figura 20).



Figura 20 Cuneta de pie de desmonte revestida. Fuente: elaboración propia.

- Pequeñas bermas sin revestir que unen los arcones con las cunetas, en las cuales se colocan las barreras de protección y las balizas reflectantes de seguridad (Figura 22).



Figura 22 Berma. Fuente: elaboración propia.

- Arcenes exteriores pavimentados, que a diferencia de los interiores poseen una anchura del doble aproximadamente, es decir 2m arcén exterior y 1m arcén interior.



Figura 23 Arcenes exteriores e interiores más caz. Fuente: elaboración propia.

En el arcén interior del margen izquierdo, fruto del peralte de la curva, también se puede observar la existencia de un caz de rendija para drenar el agua de la calzada (Figura 23).

#### 4.2 Drenaje transversal

Se comprueba que a lo largo de la autovía existen varias obras de drenaje transversal de hormigón que, en los puntos más conflictivos, es decir, curvas peraltadas con desmontes a ambos lados donde se puede acumular el agua, distan entre si unos 30 m para que no se produzcan problemas en la explotación de la carretera fruto de inundaciones. Ya que estas sirven para evacuar de forma transversal a la carretera toda el agua recogida por las cuentas, caces y demás obras de drenaje longitudinal (Figura 24 y 25).



Figura 24 Estado del desagüe de la ODT de la cuneta de guarda. Fuente: elaboración propia.



Figura 25 Estado de la bajante margen derecho dirección Alicante. Fuente: elaboración propia.



Figura 26 ODT de la A-7. Fuente: Google Earth.

Todas las obras de drenaje transversal (en adelante ODT) se realizaron al mismo tiempo que la construcción de la propia A-7 y se han ido conservando mediante unas revisiones periódicas en las que se ha comprobado el buen funcionamiento de estas y en caso de ser necesario se ha repuesto algún elemento (tapas, embocadura de entrada o de salida, conexiones) o realizado una limpieza de la vegetación que puede obstruir la evacuación del agua. Por eso, todas las que se localizan en el entorno de la zona objeto de estudio se encuentran en unas condiciones muy buenas, a diferencia de las ODT existentes en ambas vías de servicio paralelas a la autovía. Las cuales precisan de una limpieza profunda y una revisión del estado del hormigón, para comprobar la existencia de posibles fisuras que favorezcan infiltraciones que podrían perjudicar la estabilidad de los taludes.



Figura 27 Equipo de conservación realizando una inspección visual. Fuente: elaboración propia.

### 4.3 Patologías

En este tramo se han hecho tareas de mantenimiento, así como en las obras de drenaje, también se ha mejorado el propio trazado añadiendo una nueva capa de rodadura, lo que puede deducirse por el color oscuro del propio asfalto se advierte su reciente extendido (Figura 28). Además, se ha rellenado, con lechada asfáltica, alguna pequeña grieta longitudinal producida en el exterior de la calzada.



Figura 28 Estado actual de la capa de rodadura. Fuente: elaboración propia.

Pese a algún desperfecto en la traza principal fruto del desgaste, no se encuentran patologías mayores, como: baches, fruto de asentamientos diferenciales o piel de cocodrilo, fruto del deterioro del firme. No obstante, debido al efecto del hinchamiento de las margas se pueden observar diferentes patologías por solucionar, como en la bajante que se visualiza en la Figura 29 y en las carreteras auxiliares paralelas a la autovía sí que se visualizan múltiples anomalías alarmantes, causa de la misma patología que genera grietas longitudinales de una profundidad y longitud considerable, es decir fruto de la tracción del terreno.



Figura 29 Estado de la bajante margen derecho dirección Valencia. Fuente: Google Earth.

Por un lado, en el margen derecho, dirección Alicante se puede observar una reparación exhaustiva de la calzada, parcheando todas las oquedades generadas por las grietas de tracción (Figura 30).



Figura 30 Estado actual de la capa de rodadura reparada. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, en el margen izquierdo se aprecia la misma situación, pero sin haber sido reparado el firme. Lugar donde se ha procedido a medir la gravedad de la patología tomando referencia de las dimensiones como puede observarse en las Figuras 31, 32 y 33.



Figura 31 Estado actual de la capa de rodadura sin reparar. Fuente: elaboración propia



Figura 32 Estado actual de la vía de servicio por falta de mantenimiento. Fuente: elaboración propia



Figura 33 Profundidad de las grietas en el paquete de firmes. Fuente: elaboración propia

#### 4.4 Obra de emergencia

Entre el P.K. 433+600 y el P.K. 434+000 de esta autovía, se localiza la solución llevada a cabo en la obra emergencia del año 2017 para estabilizar la zona afectada del talud derecho (dirección Alicante). En este tramo se dispuso un manto de escollera a lo largo de los 400 m del tramo (Figura 34) con el fin de colocar una capa más resistente en el terreno que proporcionase una mayor estabilidad mediante la aplicación del peso.



Figura 34 Estado actual de la obra de emergencia. Fuente: elaboración propia.

El recubrimiento de escollera posee una altura que cubre en todo momento  $2/3$  de la altura total del talud, llegando a alcanzar una cota de 10 m sobre la rasante de la calzada. Al pie del manto se aprecia un muro de 2-4 m de escollera encajadas entre sí, sin cimentarse bajo la superficie del terreno. Asimismo, puede apreciarse el retaluzado del resto del desmonte con una pendiente 2H:1V, frente a la inclinación original 3H:2V, y la colocación de malla de geosintético, antierosión y revegetación. Cabe destacar también, como la magnitud considerable de las grietas de tracción que se producen en la coronación del desmonte (fruto de un posible colapso) y que afectan al estado de la calzada auxiliar existente, una vez realizada la operación de sellado de las grietas con lechada y la construcción de la obra de estabilización del desmonte no se han vuelto a producir más fisuras longitudinales. Este hecho evidencia la función consolidadora de la solución adoptada en la obra de emergencia y a su vez deja entrever la inestabilidad en las proximidades de la zona afectada, dando pie a la realización de un nuevo análisis de la situación de la ladera.

#### 4.5 Otras medidas de estabilización de ladera

Fruto de la inestabilidad del terreno existente en las proximidades de la zona objeto de estudio, a lo largo del trazado se han realizado múltiples tareas preventivas y de conservación, para conseguir una estabilidad óptima y evitar futuros desprendimientos como la colocación de geomallas o el uso de mantos de escollera e incluso de muros para sujetar zonas donde la erosión diferencial es notable.

- En el talud previo a la zona objeto de estudio, entre los PP.KK. 432+850 y 433+100, (Figura 35) de altura variable de 5 a 10 m, pese a la manta y red de coco existente se colocó un murete de 1-2 m de altura y se realizó un retaluzado del resto del talud con pendiente 2H:1V.



Figura 35 Antes y después del mantenimiento del P.K. 432+850 - 433+100 Fuente: Google Earth.

- En el P.K. 435+145 - 435+180, (Figura 36) zona previa al estribo de un paso superior, fruto de las roturas superficiales se construyó un manto de escollera de 2-3 m para evitar el aumento de las cárcavas, a consecuencia de la erosión.



Figura 36 Antes y después del mantenimiento del P.K. 435+145 - 435+180 Fuente: Google Earth.

- En el P.K. 435+160 - 435+280, (Figura 37) margen derecho dirección Alicante, se retaluzó el desmorte con una pendiente similar a la comentada en el primer caso y se dispuso una malla geosintética antierosiva y de revegetación para evitar que las roturas superficiales colmatasen la capacidad de la cuneta.



Figura 37 Antes y después del mantenimiento del P.K. 435+160 - 435+280 Fuente: Google Earth.

- En el margen izquierdo, dirección Alicante, entre los P.K. 435+220-435+350, (Figura 38 y 39) se continuó el manto de escollera ya existente para aumentar la seguridad y estabilidad de la ladera.



Figura 38 Situación previa al mantenimiento del tramo entre los P.K.s 435+220-435+350 Fuente: Google Earth.



Figura 39 Situación posterior al mantenimiento del tramo entre los P.K.s 435+220-435+350 Fuente: Google Earth.

Otra solución observada en la zona, que no ha sido comentada, es el muro de escollera situado en el margen izquierdo, próximo al P.K. 436+000 (Figura 40). Del cual cabe destacar su envergadura, con 8 m de altura y una longitud de 40 m, y la ejecución completamente vertical de esta tipología de muros, puesto que lo más habitual es proporcionarle una forma escalonada para una mayor eficiencia, obteniendo así, una base de mayor superficie que en la coronación de la pared rocosa.



Figura 40 Muro de contención en el P.K. 436+000 Fuente: Google Earth.

#### 4.6 Conclusiones y recomendaciones

Gracias a la visita de campo realizada el 25 de enero de 2023 en el tramo comprendido entre los PP.KK. 433+600 y 434+000 de la autovía A-7 se ha contrastado la información geológicamente proporcionada por el Instituto Geológico y Minero de España, frente a lo que realmente hay en la zona, mediante un estudio pormenorizado a escala local. Asimismo, se ha podido comprobar el estado real de zona de estudio y los problemas que existen en la actualidad.

Una vez completada la visita de campo cabe clarificar y destacar los siguientes aspectos:

1. En la zona hay un claro afloramiento de materiales conocidos como Margas del Tap, información que concuerda con los datos del IGME.
2. La ausencia de niveles guía en la parte superficial de los desmontes, imposibilita adivinar la orientación de los estratos.

3. En la zona objeto de estudio no existen señales que evidencien la posibilidad de que el nivel freático se encuentra próximo a la superficie.
4. El estado general de las cunetas y de las ODT (obras de drenaje transversal) es adecuado para el correcto funcionamiento de la evacuación del agua, pese en los puntos bajos de las cunetas de guarda y en algunas embocaduras de las ODT donde se acumula materia orgánica. Por ello, se recomienda la limpieza de los tramos conflictivos.
5. Las diferentes soluciones de estabilización cumplen adecuadamente su cometido, tanto las mallas de hidrosiembra, como los recubrimientos de escollera. No obstante, habría que revisar el estado del terreno que se encuentra debajo del manto de escollera, para comprobar la evolución de la erosión.
6. El estado del firme de la A-7, que ha sufrido un mantenimiento reciente, presenta muy buenas condiciones a diferencia de la carretera secundarias en el margen izquierdo dirección Alicante, la cual presenta múltiples grietas de tracción, fruto del posible deslizamiento parcial del talud. Se recomienda un estudio exhaustivo de las causas, para su futura reparación.
7. La técnica que más comúnmente se ha utilizado para la estabilización de la ladera es la construcción de mantos de escollera. Solución que al funcionar como una “costra” protectora del terreno, al poseer un bajo impacto medioambiental y coste económico con respecto de otros métodos de estabilización (anclajes, bulones, muros, etc) y al no necesitar de mantenimiento, se convierte en la resolución más eficaz y eficiente posible.

## 5. CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL TERRENO

A continuación, se describen las características del terreno que se encuentran en la zona de estudio a través de dos fuentes diferentes de información: el estudio geotécnico, realizado el 18 de Julio de 2005 y plasmado en el Anejo Nº 6 del Proyecto de Construcción Autovía del Mediterráneo y los diferentes ensayos a los que se ha sometido una muestra representativa que fue extraída del terreno en la visita a la zona que hizo el alumno. Todos los ensayos se han llevado a cabo siguiendo de forma minuciosa la normativa vigente y proporcionan una información referente a la clasificación, estabilidad o geotecnia del suelo. Información que puede ser contrastada entre ambos análisis del terreno.

### 5.1 Enumeración de trabajos de campo y laboratorio

En cuanto a la campaña de investigación, realizada para el mencionado proyecto con el fin de caracterizar los materiales, los trabajos de campo realizados son:

- Calicatas.
- Ensayos presiométricos.
- Ensayos de penetración dinámica.
- Sondeos mecánicos con recuperación continua de testigos.

Dichos trabajos realizados sobre muestras alteradas e inalteradas proporcionan una gran cantidad de información relevante, a partir de la cual, se puede elaborar un perfil geotécnico, valorar los diferentes materiales, estudiar los desmontes y rellenos, la ripabilidad del terreno y los posibles tratamientos geotécnicos y recomendaciones.

Tras las inspecciones visuales y la toma de una muestra representativa durante la visita de campo, se inicia el proceso mediante el cual, la muestra margosa se somete a los diferentes ensayos. Cabe destacar, la dificultad para extraer una muestra representativa del desmonte objeto de estudio cuando la vía se encuentra en servicio, no obstante, gracias a la gran homogeneidad del terreno se facilita sustancialmente dicha labor.

Otro dato para tener en cuenta es que las margas, pese a poseer el aspecto propio de una roca en condiciones normales, cuando entra en contacto con el agua sus propiedades mecánicas disminuyen considerablemente tomando valores propios de un suelo. Por ello, este material posee un comportamiento mecánico intermedio entre un suelo y una roca, fruto de la marcada cementación de las arcillas que la componen. Además, este material se ensaya con

gran facilidad, tal y como se extrae de la ladera, ya que en los ensayos realizados no es necesario la fabricación de probetas.

Para completar los datos obtenidos en los ensayos realizados durante la campaña geotécnica del año 2005, previa a la construcción de la autovía A-7, y poder contrastar la veracidad de los mismos, en el laboratorio se determinó necesario la realización de los siguientes ensayos:

- Análisis granulométrico de suelos por tamizado.
- Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación (método del densímetro).
- Determinación del límite líquido (método Casagrande) y del límite plástico de un suelo.
- Determinación del contenido de carbonatos en los suelos (método del calcímetro de Bernard).

A continuación, se detallan los procedimientos de los ensayos y seguidamente se comentan y contrastan los resultados obtenidos frente a los ya existentes plasmados en el Anejo 6 (Geotécnico).

### 5.2 Ensayos realizados

#### 5.2.1 Proyecto de Autovía del mediterráneo.

##### SONDEOS

Durante la perforación se realizaron ensayos de penetración estándar (SPT) y varias extracciones de muestras inalteradas mediante tomamuestras en las diferentes zonas del corredor: desmontes, terraplenes y en zonas de estructuras. Muestras adecuadamente tratadas, almacenadas y referenciadas, extraídas mediante sondas de accionamiento hidráulico, tipo Rolatec RL 46, montada sobre orugas. De todos los sondeos para la redacción del Proyecto de Construcción Autovía del Mediterráneo, solo uno de ellos se localiza en un punto cercano a la zona de estudio, el denominado SD-8 en el PP.KK. 433+900.

##### CALICATAS

Con el fin de completar la caracterización litoestratigráfica de los materiales también se llevaron a cabo un elevado número de calicatas, para las cuales fue necesario el uso de maquinaria estándar, como es una retroexcavadora. Al igual que en los sondeos se realizaron calicatas tanto en desmonte y terraplenes como en zonas próximas a estructuras. De todas ellas se ha obtenido información de las denominadas: CD-16, CD-18, CT 6 y CT-8.

A pesar de que durante la mencionada campaña geotécnica se realizaron ensayos de penetración dinámica y ensayos presiométricos, ninguno de estos se ha utilizado en este trabajo porque la información que proporcionan se refiere a tipos de terreno que no afloran en la zona en estudio

#### ENSAYOS DE LABORATORIO

A continuación, se muestra una lista de ensayos procedente de la campaña geotécnica realizada para el proyecto de construcción de la Autopista del mediterráneo:

ENSAYO		Nº	OBSERVACIONES	
Identificación	Granulometría por tamizado	192		
	Límites de Atterberg	192		
	Densidad aparente	106		
	Humedad natural	106		
Químicos	Materia Orgánica	22		
	Sales Solubles	17		
	Sulfatos	22		
	Contenido en yeso	18		
	Análisis completo de agua	25		
Compactación	Proctor Modificado	14		
	CBR	16		
Resistencia	Compresión simple	105		
	Corte directo tipo CD	Inalterada	23	
		Remoldeada	2	
Corte directo tipo UU	2			
Hinchamiento	Hinchamiento libre (Inalterada)	1		
	Presión de hinchamiento	Inalterada	1	
		Remoldeada	6	
Otros	Colapso en edómetro	Inalterada	1	
		Remoldeada	8	
	Ensayo edométrico	8		

Figura 41 Resumen de los ensayos de laboratorio (campaña geotécnica).

#### 5.2.2 Ensayos Laboratorio de Geotecnia de la UPV.

Con el fin de completar y contrastar los resultados de los ensayos proporcionados por la mencionada campaña geotécnica se realizan los siguientes ensayos en el Laboratorio de geotécnica de la UPV:

#### ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO

En primer lugar, se lleva a cabo el análisis granulométrico para obtener, de la muestra representativa, los porcentajes de fracción gruesa, fina y del contenido en finos del suelo (Figura 42) y una gráfica en la que se traza la curva granulométrica propia del suelo (Gráfica 1). Este estudio permite, junto con los límites de Atterberg, una identificación ajustada del suelo estudiado.

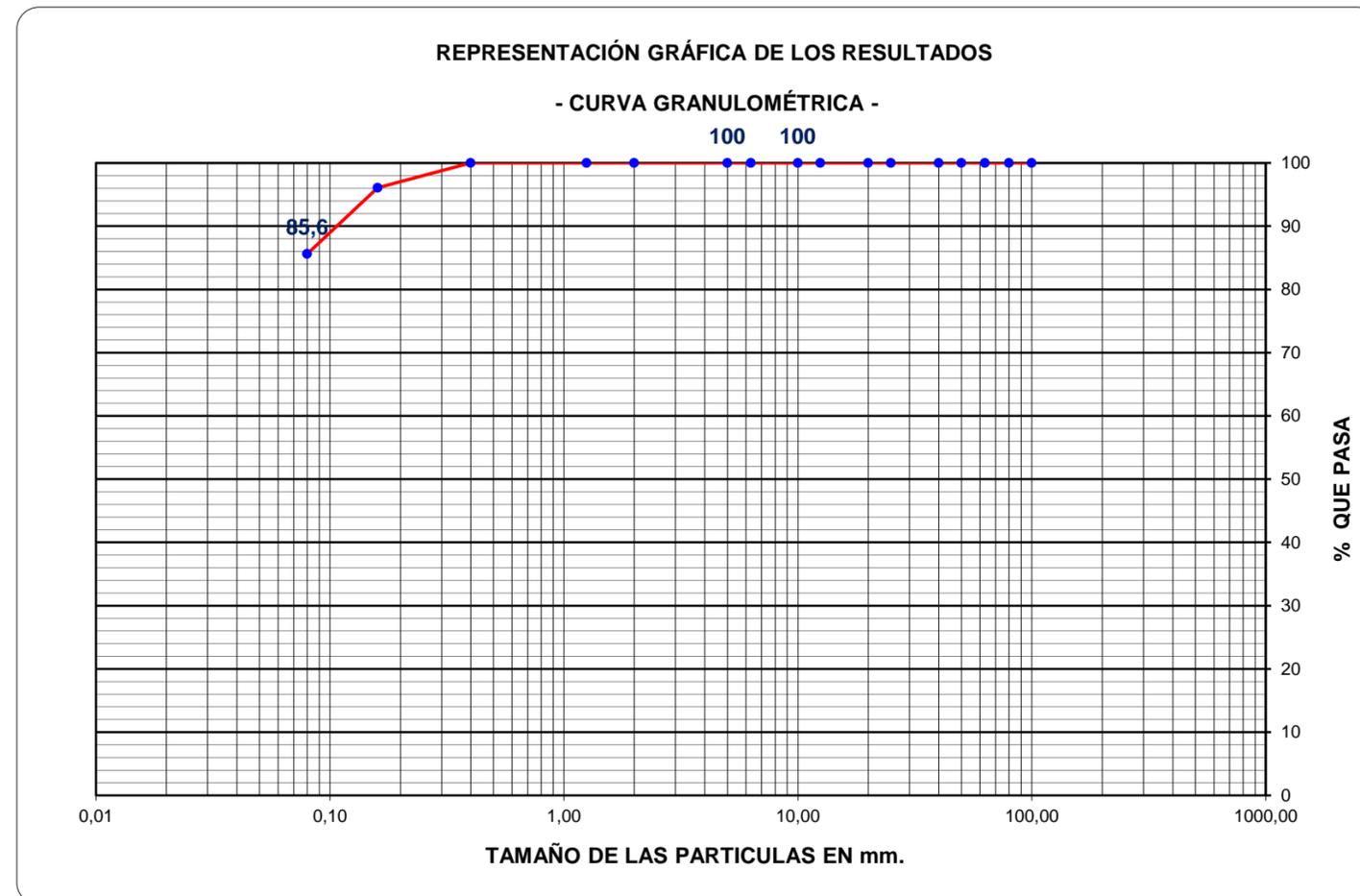
Puesto que la muestra ensayada no es estrictamente un suelo se hace necesario adaptar el procedimiento normalizado de manera que para la ejecución de este ensayo se ha procedido de la siguiente forma:

1. Se toma una cantidad representativa de la muestra, se seca durante 24 h en estufa, se disgrega mediante una maza y se pesa el conjunto, obteniendo un valor de 50,02 g.
2. Seguidamente, se disponen, de mayor a menor abertura, los diferentes tamices para la granulometría de suelos y se hace pasar la muestra por medio de un proceso de agitación.
3. Conociendo el peso seco total de la muestra, se pesa el material retenido en cada tamiz, obteniendo así los porcentajes. Para saber los diferentes porcentajes se ha de tener en cuenta que el material que queda retenido en el tamiz 5 mm forma parte de la fracción gruesa (gravas) y el restante conforma la fracción fina, en la cual existen dos clasificaciones más, partículas tamaño arena, que corresponde al material del suelo entre los 5 – 0.08 mm y partículas tamaño arcillas y limos que están por debajo de los 0,08 mm y reciben el nombre de finos.

COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA ( Clasificación S.U.C.S. )			
GRAVAS (RETIENE 5 mm)		0,0	%
ARENAS (PASA 5 Y RET 0,08 mm)		14,4	%
ARCILLAS Y LIMOS (PASA 0,08 mm)		85,6	%

Figura 42 Composición granulométrica de la muestra representativa Fuente: elaboración propia.

Una vez concluido el proceso, a partir de estos datos se confecciona la curva granulométrica tal y como se observa en la siguiente figura.



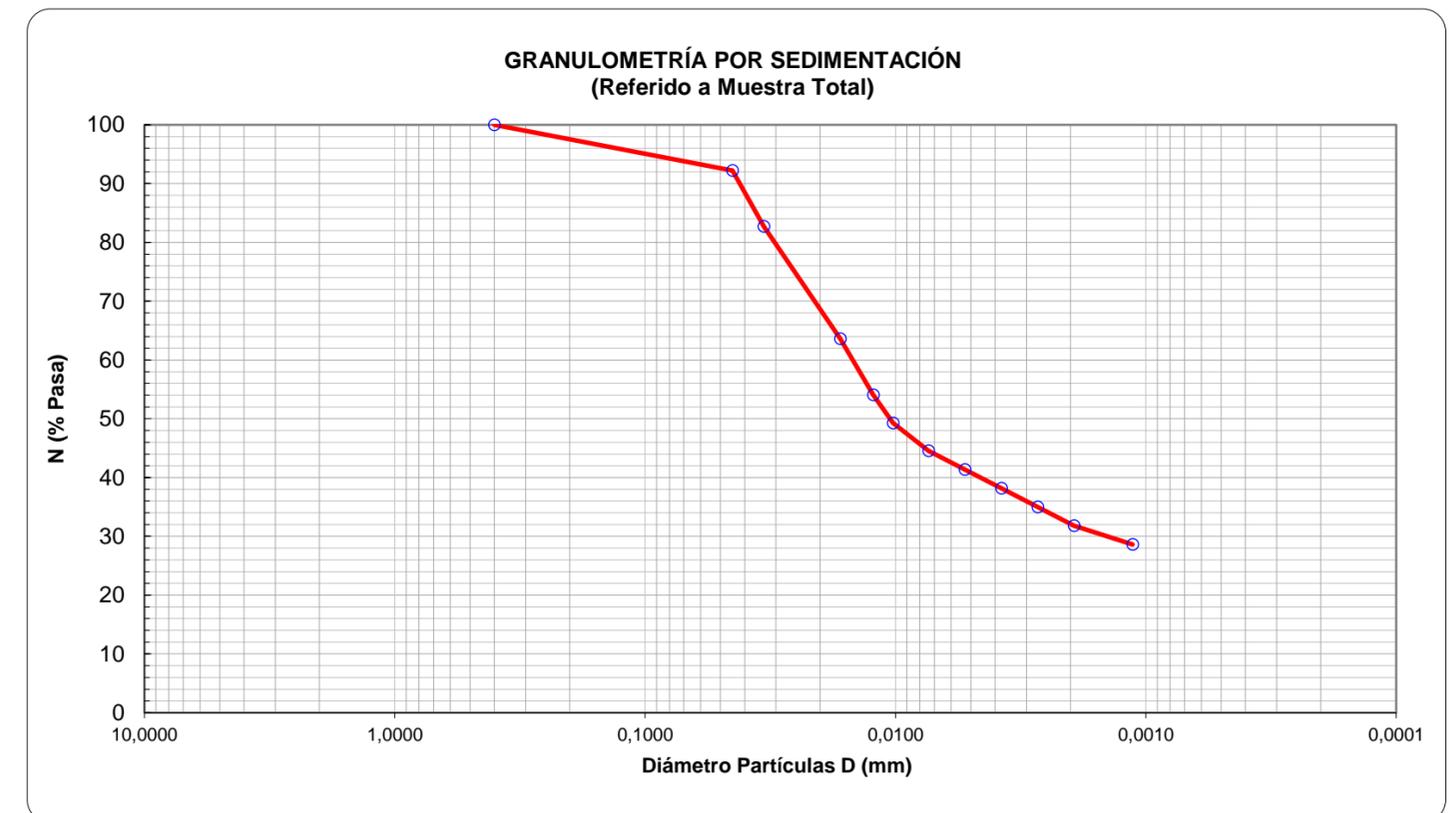
Gráfica 1 Curva granulométrica de la muestra representativa Fuente: elaboración propia.

### ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS FINOS POR SEDIMENTACIÓN

Con motivo de una comprobación más exhaustiva de la granulometría del suelo obtenido en la visita de campo, se emplea el método de granulometría por sedimentación mediante el método del densímetro (o higrómetro). Este ensayo es menos común que el anterior y normalmente se emplea para tamaños de partículas inferiores en casos muy específicos, es decir, donde es necesario determinar el porcentaje de partículas finas.

La ejecución del ensayo consta de varias fases:

1. Preparación inicial de la muestra, puesto que solamente se ensaya la fracción de suelo que pasa por el tamiz UNE 2 mm. Por ello, es necesario tomar una muestra representativa del suelo (50-100 g) tras haber cuarteado la misma, para iniciar el proceso de secado en la estufa.
2. Se pesa una parte de la muestra y se mezcla con una disolución de hexametáfosfato sódico al 4% con agua destilada y se deja reposar la disolución.
3. Una vez esperado el tiempo mínimo marcado por la norma (18 h) se introduce en una probeta graduada y se completa con agua destilada hasta 1000 ml, para después agitar la probeta durante 1 min y colocarla en posición vertical, iniciando así el cronómetro.
4. Para completar el ensayo, se toman varias lecturas, de las densidades ( $R_h$ ), con la siguiente secuencia de tiempos: 0,5, 1, 2, 5, 15, 30, 60, 120, 240, y 1440 min. Finalmente, teniendo en cuenta las condiciones ambiente del laboratorio (temperatura y humedad) y realizando los ajustes necesarios (correcciones por temperatura, dispersante y menisco) se obtiene la gráfica de la curva granulométrica por sedimentación.



Gráfica 2 Curva granulométrica por sedimentación Fuente: elaboración propia.

### LÍMITES DE ATTENBERG

Por medio de este ensayo se puede tanto clasificar el suelo, mediante la Carta de Plasticidad de Casagrande, como definir los límites de los contenidos de agua en los cuales un suelo de grano fino pasa de un estado a otro de consistencia. Cabe destacar que la consistencia de la muestra puede ser: estado sólido, estado semisólido, estado plástico y viscoso y que los límites con mayor relevancia son: límite líquido, entre el estado viscoso y plástico y el límite plástico, entre el estado plástico y el semisólido.

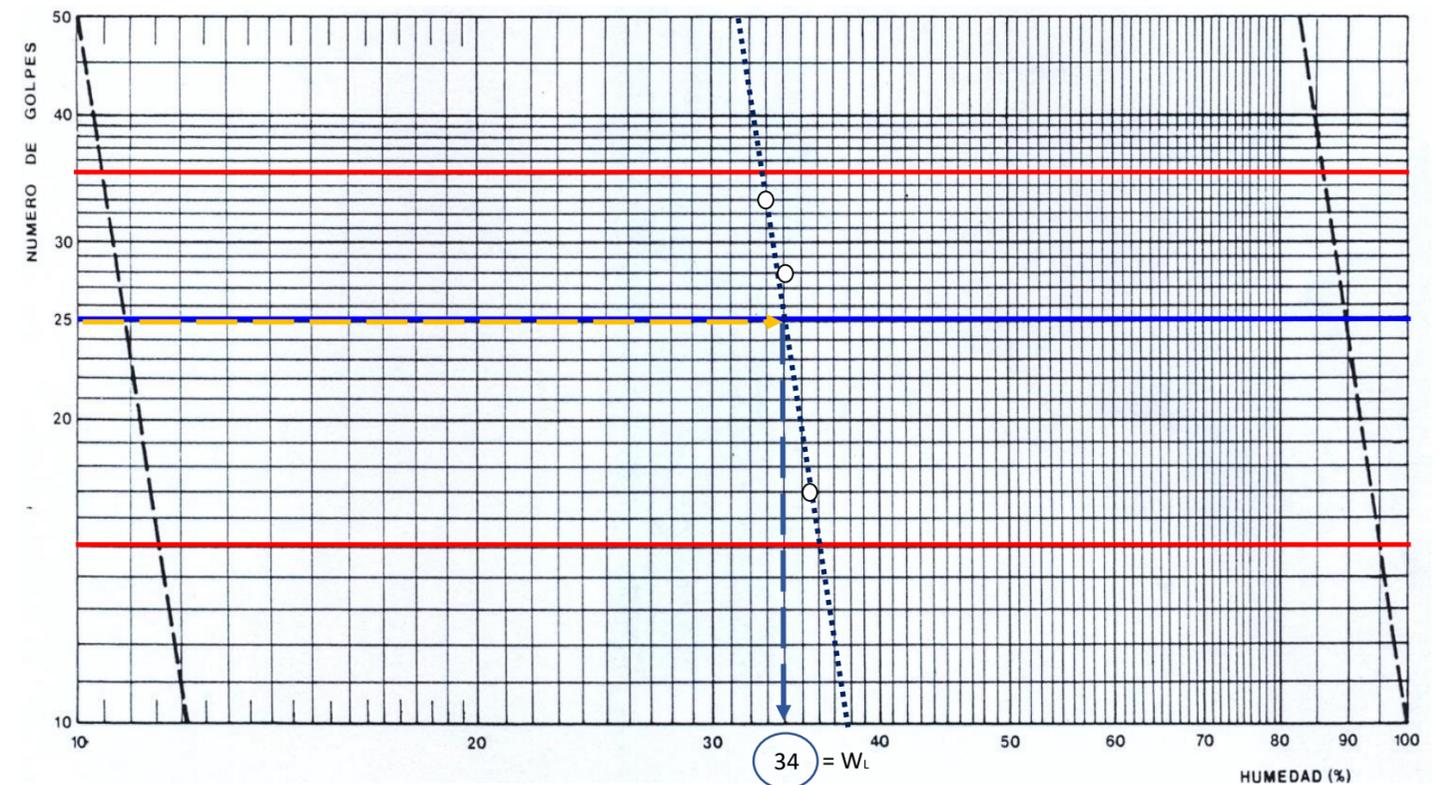
Para la obtención del límite líquido se determina de forma estandarizada mediante el método la **cuchara de Casagrande** (Figura 43), para ello:

- 1) Para la preparación de la muestra se toman 100 g de muestra que ha pasado por el tamiz 0.4 mm (UNE) y se mezcla con agua destilada.
- 2) Seguidamente, se calibra la altura de caída de la cuchara a 1 cm y se coloca dentro de esta una porción de la muestra con una altura de 1 cm también.
- 3) Posteriormente, con el acanalador se lleva a cabo un surco en el centro de la muestra, dejando el fondo limpio y se levante y deja caer la cuchara a razón de dos golpes por segundo hasta que el surco se cierra una distancia de 13 mm.



Figura 43 Preparación del ensayo por el método de la cuchara de Casagrande Fuente: elaboración propia.

- 4) Finalmente, si el intervalo de golpes está comprendido entre los 25-35 golpes se anota el número de golpes y se toma una porción de la muestra para obtener su humedad. En caso de no conseguirse, se ha de repetir para obtener varios resultados que cumplan con lo establecido y poderlos representar en un gráfico para obtener el valor del  $W_L$ , que equivale a la humedad correspondiente a 25 golpes.



Gráfica 3 Obtención del  $W_L$  a partir de tres resultados de muestras diferentes Fuente: elaboración propia.

No obstante, pese a que el límite plástico ( $W_P$ ) también se ha de preparar de una muestra de terreno inferior al tamiz 0,4 UNE, su determinación es de mayor sencillez. Solamente se han de formar varios pequeños cilindros, de 3 mm de diámetro y con una longitud aproximada de 25-30 mm, utilizando la palma de la mano sobre una superficie lisa y sacar la humedad de estos, por diferencia de peso entre la muestra humedecida y la desecada en estufa. Para concluir se ha de sacar la media aritmética de los diferentes cilindros para obtener el  $W_P$ .

### DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONATOS EN EL SUELO

Como su nombre indica, en este último ensayo se analizará la cantidad de carbonato del suelo mediante el método del calcímetro de Bernard, en el cual se produce una reacción química que desprende, según el porcentaje de carbonatos, un mayor o menor volumen de anhídrido carbónico.

Para la preparación de la muestra se ha de tomar 10 g de muestra previamente secada en estufa y que pase por el tamiz UNE 0,25 mm. Una vez estén preparados todos los aparatos y material necesario se procede con el método operativo:

1. Para comenzar, se llena el tubo de nivel y la bureta con la disolución de cloruro sódico (Figura 44).
2. Seguidamente, se toman 0,2 g de carbonato cálcico puro y se introducen en el matraz Erlenmeyer.
3. Introducir la disolución del ácido clorhídrico en el matraz sin que entre en contacto con el carbonato cálcico.
4. A continuación, enrasar el nivel del tubo en la división cero, entre la disolución y la bureta. Cerrar el matraz y repetir el proceso de enrasado, para ajustar mejor la medida.
5. Posteriormente, se agitará suavemente el matraz Erlenmeyer para que toda la muestra entre en contacto con el ácido y se genere el desplazamiento del líquido por el aumento de volumen.
6. Para terminar el ensayo se desplaza el tubo de nivel lo necesario para conseguir la lectura del último enrase una vez pasados un par de minutos.



Figura 44 Preparación y material necesario para determinar el contenido de carbonatos Fuente: departamento ingeniería del terreno.

### **5.3 Parametrización del terreno**

Una vez explicados los procedimientos que se han seguido para cada uno de los ensayos realizados, se procede a exponer los resultados obtenidos en los mismos y a contrastarlos con la información de partida obtenida en el Anejo N° 6, Estudio Geotécnico del Corredor (A-7). Información procedente de los múltiples reconocimientos de campo que se realizaron previos a la construcción de la autovía.

#### **5.3.1 Resultados del anejo geotécnico.**

La amplia campaña de investigación geotécnica supera un total de 600 ensayos realizados a las diferentes muestras de terreno obtenido, no obstante, la mayoría de estos no son relevantes en la futura parametrización del suelo, puesto que se encuentran a una distancia notable del desmonte objeto de estudio, pero su influencia en el análisis geotécnico de las distintas unidades es notable.

Con el fin de facilitar el manejo de datos geotécnicos, se unifican las características de cada grupo geotécnico, es decir, se produce una simplificación que implica la inclusión, en un mismo grupo, de materiales no siempre homogéneos. La unidad geotécnica de interés es la unidad Tap (margas y arcillas) y el número de muestras ensayadas es de 132, a partir de la cual se obtienen los siguientes parámetros medios (Tabla 5):

#### ENSAYOS DE IDENTIFICACIÓN

ENSAYOS DE IDENTIFICACIÓN Y COMPACTACIÓN		
ENSAYO	VALOR	UD
MATERIAL QUE PASA POR EL TAMIZ UNE 0.08 mm	95,9	%
LÍMITE LÍQUIDO (WL)	42,62	%
LÍMITE PLÁSTICO (WP)	22,05	%
ÍNDICE DE PLASTICIDAD (IP)	20,62	%
DENSIDAD SECA DEL PROCTOR MODIFICADO	1,708	g/cm <sup>3</sup>
HUMEDAD ÓPTIMA DEL PROCTOR MODIFICADO	19,79	%
CBR <sub>95%</sub>	7.68	-
CBR <sub>100%</sub>	12.7	-

Tabla 1 Ensayos de identificación.

Por orden descendente, cabe destacar el alto contenido de partículas de tamaño finos, a partir del puede deducirse la elevada plasticidad del material, con valores medios muy próximos a 50, en cuanto al límite líquido se refiere. El índice de plasticidad presenta un valor medio de 22, aunque según datos del Anejo Nº 6 los valores extremos que llega a alcanzar son 40 de máxima y 14 de mínima.

Como puede observarse en la siguiente figura (Figura 45), los materiales principales de esta unidad se clasifican principalmente como arcillas tipo CL (64 %) y tipo CH (23 %).

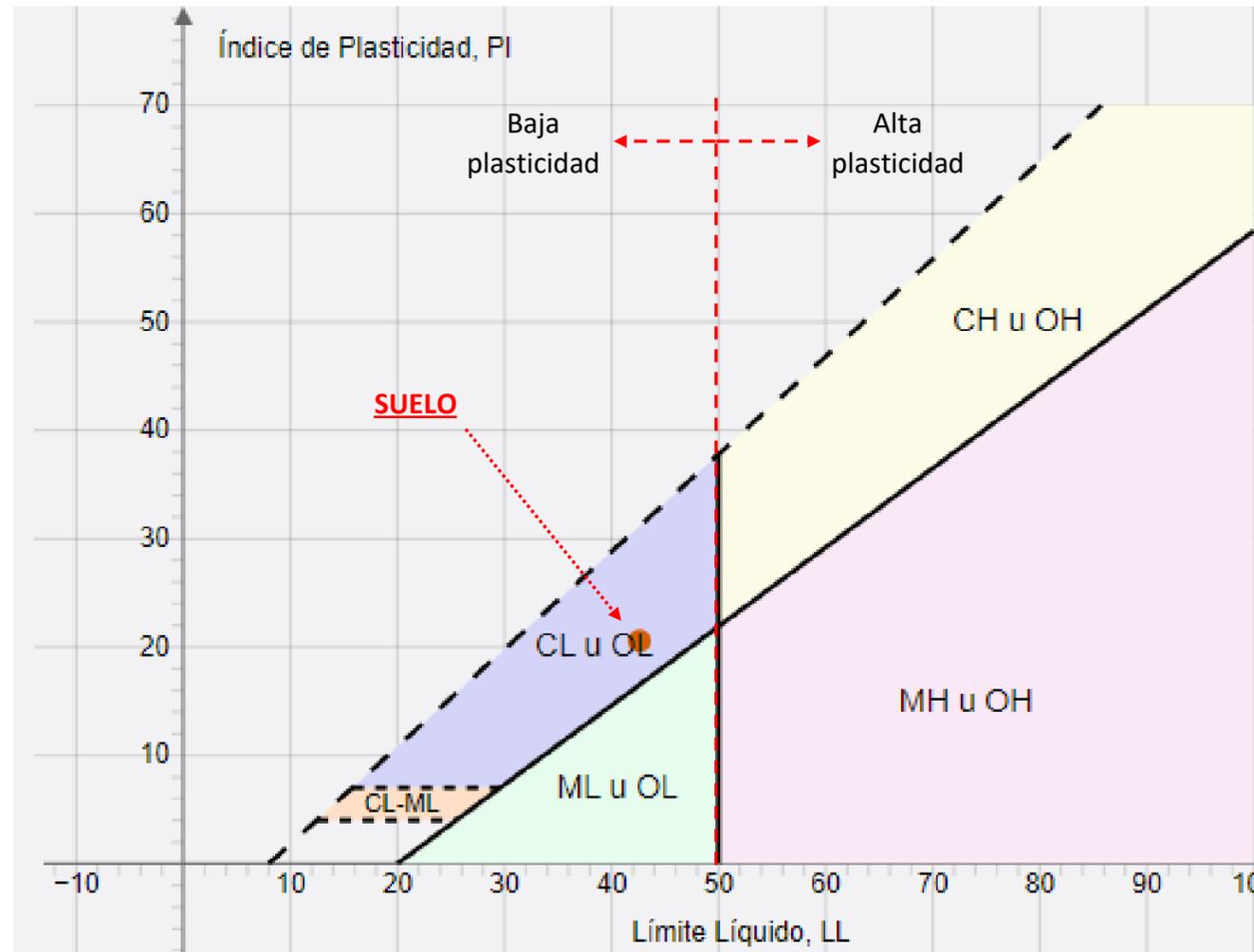


Figura 45 Clasificación del suelo mediante la Carta de Plasticidad de Casagrande Fuente: Ingeniería Elemental.

Mediante el Proctor modificado (ensayo de compactación) se consigue el valor de la humedad óptima de compactación del suelo, es decir, se obtiene el valor de humedad para el cual la densidad del suelo es máxima. Dicha densidad máxima, presenta cierta variabilidad entre 14,2 – 20,8 kN/m<sup>3</sup>, pero el promedio de esta es de 17,0 kN/m<sup>3</sup>. La diferencia mencionada está relacionada con la plasticidad de este material. Cuanto mayor es el porcentaje de arcilla y mayor su plasticidad, menor es su densidad máxima.

Por último, la relación de peso entre la parte líquida (agua) y la sólida (partículas del terreno) es elevada, con un valor muy próximo al límite de plasticidad, luego en condiciones normales la marga se encuentra en estado de consistencia semisólido pero un aporte de agua, procedente de la lluvia por ejemplo, puede hacerle pasar al estado de consistencia plástico incluso fluido o viscoso lo que favorecería la presencia de inestabilidades como los deslizamientos rotacionales parciales que se han observado en distintos puntos de los taludes en estudio..

**ENSAYOS QUÍMICOS**

En cuanto a los químicos, ha resultado que los materiales ensayados se clasifican como no agresivos ni con un elevado contenido en materia orgánica, teniendo un porcentaje medio de 0,27 % (Tabla 6).

ENSAYOS QUÍMICOS		
ENSAYO	VALOR	UD
CONTENIDO DE YESOS	0.07	%
CONTENIDO EN SALES SOLUBLES	0.09	%
CONTENIDO EN SULFATOS	0.03	%
CONTENIDO EN MATERIA ORGÁNICA	0.27	%

Tabla 2 Ensayos químicos.

**ENSAYOS DE RESISTENCIA E HINCHAMIENTO**

ENSAYOS DE RESISTENCIA E HINCHAMIENTO			
ENSAYO		VALOR	UD
COMPRESIÓN SIMPLE		3,67	Kp/cm <sup>2</sup>
CORTE DIRECTO TIPO CD	INALTERADA	COHESIÓN	0,59
		ÁNGULO FRICCIÓN	29,7
	REMOLDEADA	COHESIÓN	1,48
		ÁNGULO FRICCIÓN	30,04
PRESIÓN DE HINCHAMIENTO	INALTERADA		0,98
	REMOLDEADA		0,88

Tabla 3 Ensayos de resistencia y compactación.

En cuanto a la resistencia a compresión simple, se obtienen resultados muy diversos, posiblemente por lo sensibles que son las muestras inalteradas a la extracción y conservación antes del ensayo, Pese a que su valor medio es de 3,67 kp/cm<sup>2</sup> se obtienen valores extremos entre 11,45 y 0,06 kp/cm<sup>2</sup>, valor extremadamente bajo que puede considerarse anómalo.

En los ensayos de corte directo tipo CD, cabe destacar el elevado valor del ángulo de fricción (29,7 °) para el tipo de suelo del que se trata. Valor que puede verse beneficiado debido a la existencia de pequeñas concreciones carbonatadas dentro de las margas.

Por último, cabe destacar el leve hinchamiento producido en las muestras compactadas, a pesar de tener una presión de hinchamiento elevada de 0,98 kg/cm<sup>2</sup>.

**OTROS ENSAYOS**

Los datos plasmados (Tabla 8) dejan entrever cierto colapso, aunque no tiene gran relevancia.

OTROS ENSAYOS			
ENSAYO		VALOR	UD
COLAPSO EN EDÓMETRO	INALTERADA	0.36	%
	REMOLDEADA	0.04	%

Tabla 4 Otros ensayos.

**5.3.2 Resultados de los ensayos en laboratorio.**

**GRANULOMETRÍA**

De ambos análisis (por tamizado y por sedimentación) se han obtenido unos porcentajes idénticos (Tabla 1) de partículas tamaño arena con un 14,4 % y de partículas tamaño finos con un 85,6 %, del cual, la mayor parte corresponden a partículas tamaño limos con un 53,8 % y el 31,8 % restante a partículas de tamaño arcillas.

COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA (REFERIDO A LA MUESTRA TOTAL)			
	PORCENTAJE	TOTAL	Ud.
GRAVAS (G > 2 mm)	0	0	%
ARENA (0.05 < S < 2 mm)	14,4	14,4	%
LIMO (0.002 < M < 0.05 mm)	53,8	85,6	%
ARCILLA (C < 0.002 mm)	31,8		%

Tabla 5 Resultados del análisis granulométrico.

Esta idéntica similitud deja entrever la veracidad de los datos obtenidos y demuestra la correcta utilización de las normas UNE a la hora de realizar los diferentes pasos en ambos ensayos. Además, cabe resaltar que el porcentaje de partículas tamaño arena son nódulos calcáreos, los cuales son muy típicos en margas (roca blanda) y que las partículas tamaño arcilla corresponden al material arcilloso, puesto que no hay granos más finos que los de este material en un suelo.

#### LÍMITES DE ATTENBERG

Como puede observarse la Gráfica 3, para la obtención del WL es necesario la preparación de tres ensayos de la misma muestra representativa con diferentes humedades, a partir de los cuales se obtienen el número de golpes, que, a su vez, son los tres puntos que definen la recta representada en dicha gráfica, la cual muestra que  $WL = 34$  (Tabla 2):

LÍMITE LÍQUIDO - WL -					
PUNTO Nº		1	2	3	
REF. TARA	R	1	2	3	
TARA	T	6,29	9,32	5,72	
TARA+SUELO+AGUA	(1)	T+S+A	11,98	17,95	16,03
TARA+SUELO	(2)	T+S	10,49	15,76	13,46
AGUA	A	(1)-(2)	1,490	2,190	2,57
SUELO	S	(2)-T	4,200	6,440	7,74
HUMEDAD	W	(A/S)*100	<b>35,5</b>	<b>34,0</b>	<b>33,2</b>
Nº GOLPES	G		<b>17</b>	<b>28</b>	<b>33</b>

Tabla 6 Resultados de las tres muestras por el método de la cuchara de Casagrande.

Del mismo modo se procede también con la obtención del valor medio del índice de plasticidad, es decir, se realizan tres muestras siguiendo el proceso establecido en la norma, ya comentado (Tabla 3).

LÍMITE PLÁSTICO - WP -					
PUNTO Nº		1	2	3	
REF. TARA	R		4	5	6
TARA	T		5,20	6,73	6,31
TARA+SUELO+AGUA	(1)	T+S+A	7,69	8,66	8,85
TARA+SUELO	(2)	T+S	7,12	8,23	8,27
AGUA	A	(1)-(2)	0,57	0,43	0,58
SUELO	S	(2)-T	1,92	1,50	1,96
HUMEDAD	W	(A/S)*100	<b>29,7</b>	<b>28,7</b>	<b>29,6</b>
Nº GOLPES	G		<b>VALOR MEDIO (WP):</b>		<b>29,3</b>

Tabla 7 Resultados del límite plástico.

Gracias a estos datos se puede sacar el índice de plasticidad ( $I_P$ ) como diferencia entre ambos límites:

- $I_P = W_L - W_P = 34 - 29,3 = 4,7$

Con todo ello, mediante la Carta de Plasticidad de Casagrande se puede obtener la clasificación de nuestro suelo objeto, llegando a la conclusión de que el tipo de muestra es una Marga limosa (ML o OL) como puede apreciarse en la Figura 46.

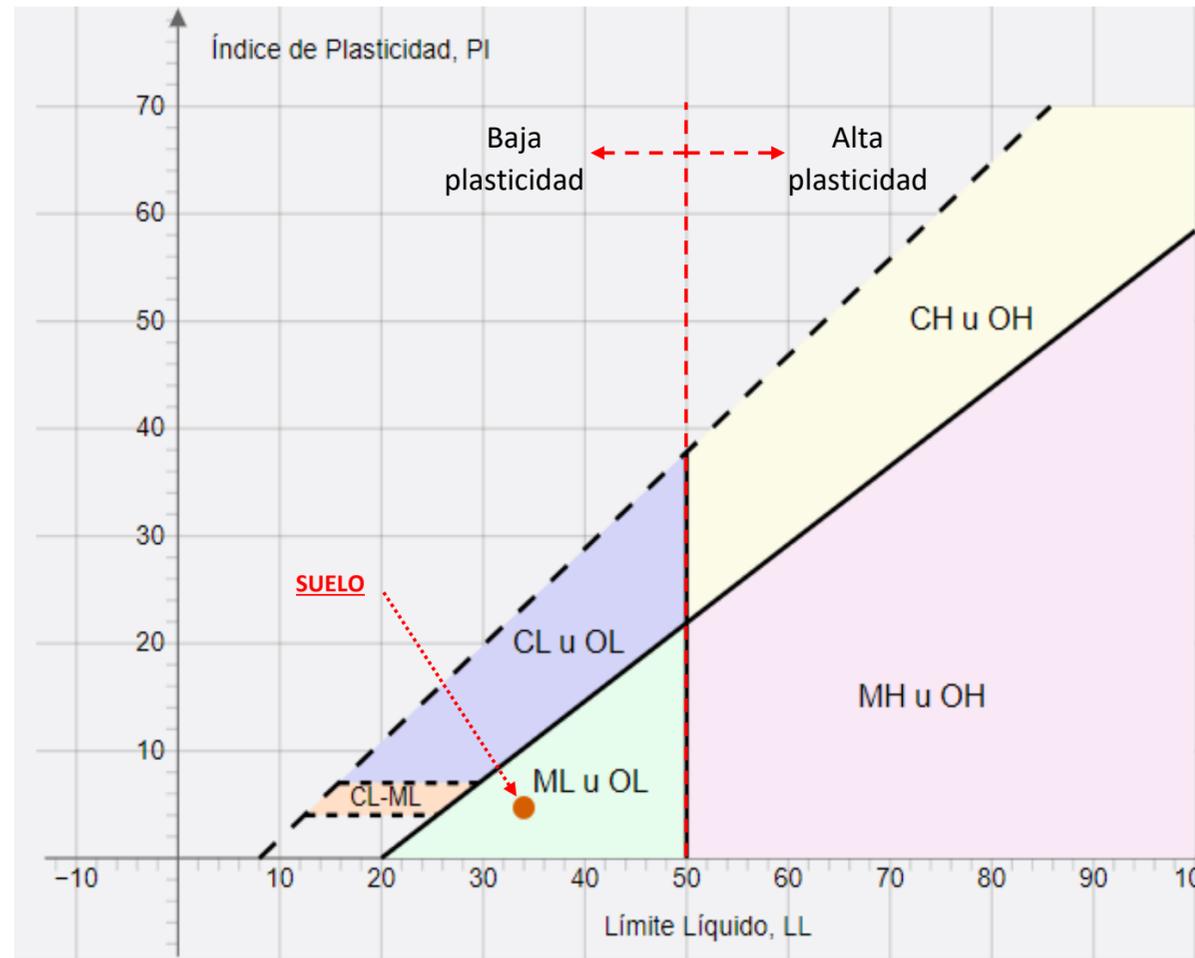


Figura 46 Clasificación del suelo mediante la Carta de Plasticidad de Casagrande Fuente: Ingeniería Elemental.

Existen dos posibles alternativas de clasificación del suelo dentro de la región de interés: limos de baja plasticidad y suelos orgánicos de baja plasticidad. No obstante, mediante un primer análisis visual de la muestra obtenida en la visita de campo, se aprecia un tono amarillento grisáceo más propio de los limos que de la materia orgánica, el cual suele presentar tonalidades más oscuras. Asimismo, la granulometría del suelo es un factor relevante en la distinción entre ambos tipos de material y como ya se ha comentado los nódulos calcáreos son una prueba irrefutable de ello.

### CONTENIDO DE CARBONATOS EN EL SUELO

Para finalizar con los resultados de los ensayos, a continuación, se señalan las dos muestras ensayadas y el resultado final de la media aritmética de ambos valores (Tabla 4):

ENSAYO CON MUESTRA	MUESTRA Nº 1	MUESTRA Nº 2	MEDIA
MUESTRA + TARA (g)	0,200	0,360	
TARA (g)	0,000	0,000	
MUESTRA (g)	0,200	0,360	<b>0,280</b>
LECTURA CO <sub>2</sub> INICIAL (cm <sup>3</sup> )	2,6	3,0	
LECTURA CO <sub>2</sub> FINAL (cm <sup>3</sup> )	37,2	63,5	
VOLUMEN CO <sub>2</sub> " v " (cm <sup>3</sup> )	34,6	60,5	<b>47,6</b>
% Ca CO <sub>3</sub> (a) = (G·v)/(g·V) · 100	<b>74,7</b>	<b>70,2</b>	<b>72,5</b>
% CO <sub>2</sub> ' = a · 0,44	<b>32,9</b>	<b>30,9</b>	<b>31,9</b>

Tabla 8 Contenido de carbonatos.

Tal y como ya se corroborado, la muestra es una margas limosa y su composición se caracteriza principalmente por las proporciones casi iguales de carbonato cálcico y de arcilla. En este caso el porcentaje de arcilla es algo inferior al del carbonato, siendo este un 31,8 %, frente a un 72,5 %, el cual equivale a la suma de las fracciones de partículas de tamaño tipo arenas y limos.

- Contenido de carbonatos (según granulometría) = 14,4 + 53,8 = 68,2 %

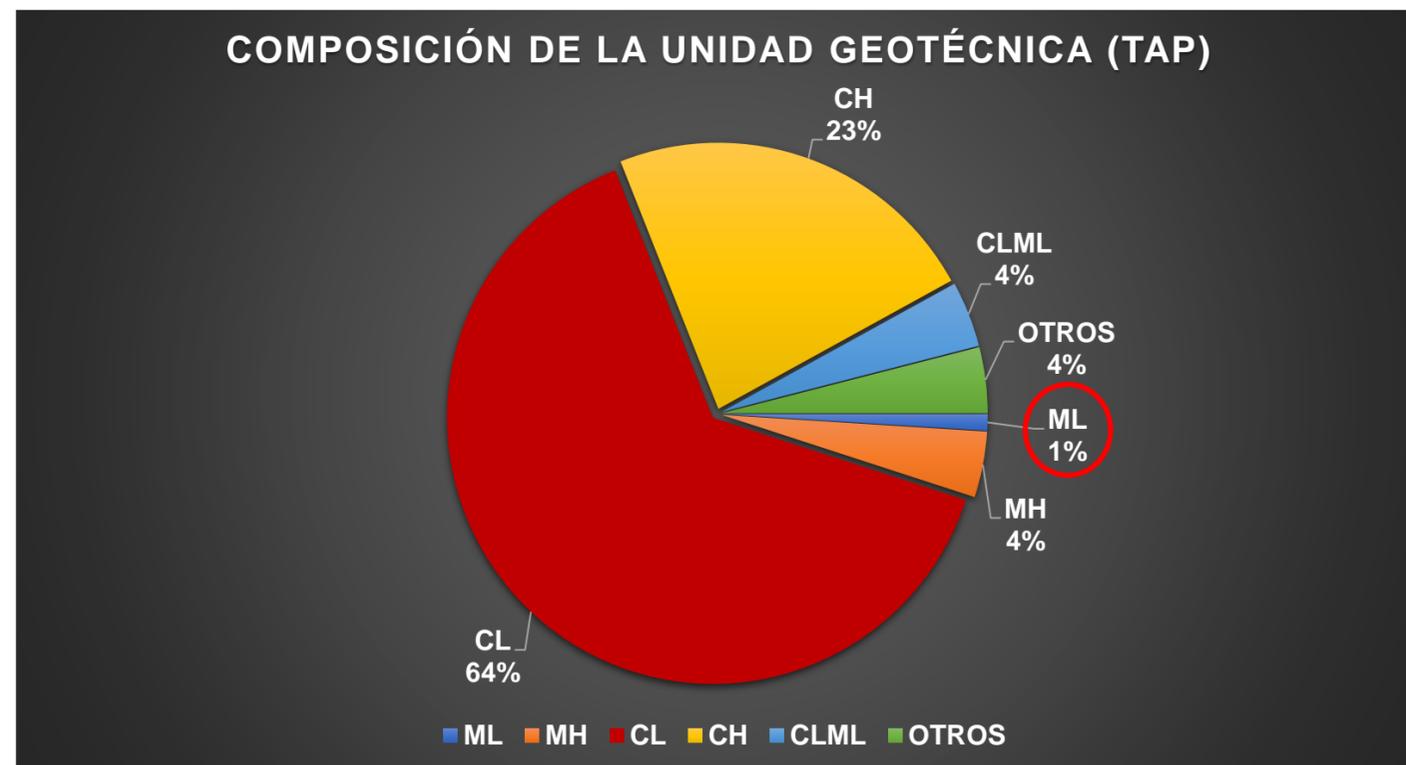
Respecto del 72,5 % difiere en menos de un 5 %, por lo que es un error asumible fruto de la variabilidad del ensayo. Dato que nos solo corrobora la correlación entre la granulometría y el contenido de carbonatos, sino que justifica a su vez el carácter de baja plasticidad de la muestra obtenida en la clasificación mediante la Carta de Plasticidad de Casagrande. Ya que a mayor cantidad de arcilla el material posee una mayor plasticidad y en este caso particular ocurre lo contrario.

### 5.3.3 Análisis de la información obtenida.

Para concluir el apartado referido a la caracterización geomecánica cabe contrastar los diferentes resultados obtenidos de las diferentes de información. Por un lado, de la campaña geotécnica de investigación previa a la construcción de la A -7 en el año 2005 y, por otro lado, información de primera mano, sacada de los ensayos de laboratorio a partir de una muestra de la zona objeto de estudio.

En primer lugar, es necesario destacar que el terreno de la zona pertenece a la unidad geotécnica del Tap, ya que este se compone de unas margas limosas con presencia de nódulos, no obstante, fruto de dicha simplificación los resultados expuestos anteriormente no son del todo similares.

Esta primera diferencia como puede observarse en la siguiente gráfica, es debido a que el porcentaje de ML, es decir, margas limosas de baja plasticidad solamente forman el 1% de la unidad que les corresponde.



Gráfica 4 Composición de la unidad Tap Fuente: elaboración propia.

Esto explica las diferencias en los resultados de los ensayos de identificación que se comentarán a continuación:

- A primera vista, la diferencia más notable se aprecia en la granulometría del suelo, puesto que el porcentaje de partículas tamaño finos que pasan por el tamiz UNE 0,08 mm es menor en los ensayos obtenidos a partir de la muestra, que en la campaña geotécnica. Fruto de la simplificación excesiva de los resultados obtenidos para diferentes tipos de terrenos cuyo comportamiento es parecido hace que el valor medio difiera de forma que tenga un mayor porcentaje de partículas tamaño finos. Hecho que puede implicar un posible aumento de plasticidad.
- Contrastando los valores obtenidos de los límites de Attenberg se corrobora una mayor plasticidad de la unidad geotécnica Tap del proyecto de la autovía en comparación con los resultados de los ensayos realizados para la elaboración de este trabajo. Por un lado, el  $W_L$  es algo mayor y, por otro lado, el  $W_P$  posee un valor menor, dando como resultado un índice de plasticidad ( $I_P$ ) más elevado, propio de las arcillas de baja plasticidad (CL).
- Hay que destacar que, pese a las diferencias que se producirían en el resto de los ensayos de resistencia, compactación, hinchamiento, químicos... Ambos materiales son aptos, según la clasificación de suelos PG3, para posibles rellenos, ya que ambos materiales se clasifican como Tolerables.
- Por último, pese a la clara disparidad en los resultados obtenidos y comentados los primeros puntos, es preciso clarificar que el material sometido a las diferentes pruebas en laboratorio es el mismo. Es decir, el suelo es una margas, que se compone de arcilla y carbonatos, los cuales son responsables de los diferentes resultados obtenidos tanto en la granulometría como en los límites de Attenberg, puesto que según la intensidad del proceso de machaqueo del material puede hacer que el porcentaje de partículas de tamaño tipo arcillas sea superior o inferior. En el caso de los ensayos de laboratorio, fruto de un proceso de disgregación manual se obtiene un elevado porcentaje de partículas tamaño limo, no obstante, en los resultados del anejo el tamaño de partículas tipo arcilla es superior. Echo que corrobora esta hipótesis es la baja plasticidad del material ensayado pese a tener un mayor porcentaje de partículas tamaño arcillas, ya que dentro de este porcentaje se encuentran carbonatos desintegrados.

Por consiguiente, la diferencia entre los datos extraídos de los ensayos de laboratorio y del estudio geotécnico existente, es relevante y puede derivarse de la rigurosidad de aplicación de los procedimientos de ensayo. Pero son de gran utilidad puesto que son del mismo orden de magnitud.

## 6. ESTABILIDAD GLOBAL DE LA LADERA

Para el correcto diseño de las medidas de corrección de un talud se deben realizar suficientes, en número y en calidad, investigaciones de campo “in situ” y ensayos de laboratorio para poder caracterizar completamente el terreno y analizar correctamente los posibles mecanismos de rotura. Dicho conocimiento repercute de forma notable y directa en la seguridad y los costes de una obra civil, tanto a corto, como a largo plazo.

Los datos geomecánicos más relevantes para determinar en la zona objeto de estudio son: la resistencia a compresión simple, la cohesión efectiva del terreno y el ángulo de rozamiento. No obstante, su determinación es compleja debido a la heterogeneidad del terreno, por ello la solución de compromiso entre un ensayo de laboratorio de la muestra, el cual no representa correctamente el comportamiento del suelo, y un ensayo “in situ” a gran escala, el cual es inviable, se corresponde con una cantidad, de ambos ensayos, proporcional a la envergadura del proyecto constructivo para complementar/contrastar la información.

En cuanto a la tipología de inestabilidades posible en el caso de estudio, a diferencia de los macizos rocosos que presentan discontinuidades en su propia estructura y pueden sufrir rotura planar, en cuña, por vuelco o global, la rotura por excelencia del talud objeto de estudio, es decir, formado por un suelo se debe a deslizamientos rotacionales de una masa del mismo, que pueden ser parciales o globales. Por ello, para el análisis de esta inestabilidad se utilizará el método de las rebanadas empleando la herramienta informática conocida como “Slide 2” de la casa comercial Rocsciences, que permite realizar de una forma sencilla una doble comprobación empleando el criterio de rotura de Mohr-Coulomb:

- A partir de la resistencia a compresión simple: comprobación a corto plazo.
- A partir de los valores de cohesión y ángulo de rozamiento efectivos: comprobación a largo plazo.

La modelización de estabilidad del talud se aplicará en las siguientes situaciones: al inicio de su vida útil, es decir, con la puesta en servicio de la autovía A-7 y en su situación actual, una vez realizada la obra de emergencia. Asimismo, se planteó la hipótesis inicial de tomar el suelo como material de tránsito (600 – 2000 kPa) y aplicar el criterio de Hoek – Brown, propio de suelos duros/rocas blandas. No obstante, como el valor medio de la resistencia a compresión simple, obtenido a partir del anejo geotécnico del Proyecto del Corredor Mediterráneo es de 360 kPa, menor que el valor mínimo para considerar el suelo como material de tránsito, se desprecia esa opción simplificando el proceso.

### 6.1 Revisión teórica previa

En el caso de suelos o rocas de muy baja calidad altamente fracturadas, la rotura se produce a través de la masa siguiendo la línea de menor resistencia. Esta rotura se denomina **rotura global** y es muy común en taludes de explotaciones de arcillas o arenas, en laderas naturales y en taludes de carretera en los que el tamaño de las partículas del suelo posee un tamaño muy pequeño en comparación con la magnitud del talud.

Se puede demostrar que, en suelos homogéneos, como el caso objeto de estudio, la superficie de deslizamiento interno se aproxima a un círculo y el movimiento de esta posee una naturaleza rotacional alrededor de un eje (Figura 47). Además, los círculos de rotura suelen pasar por el pie del talud, pero no ocurre así en el talud que se está analizando, debido a las características resistentes del material, la altura y la inclinación del talud.

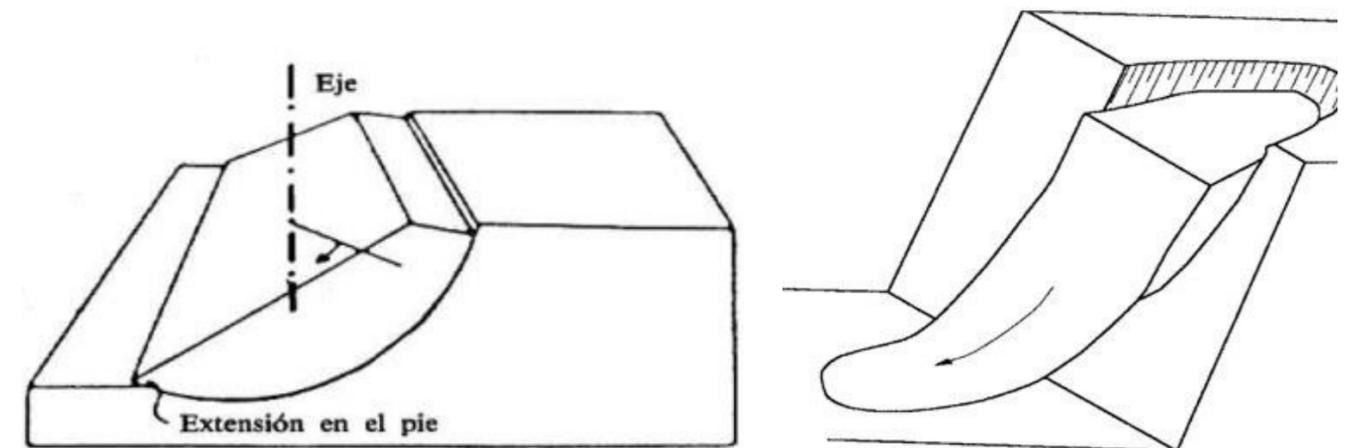


Figura 47 Rotura típica con forma cilíndrica Fuente: Manual de Taludes (IGME).

Fue Vernes (1974) quien describió detalladamente la morfología característica de este tipo de movimientos del terreno, en el cual conta de una zona de reducción del terreno, fruto de su desprendimiento y una zona de acumulación de este, en el que aumenta su cota (Figura 48).

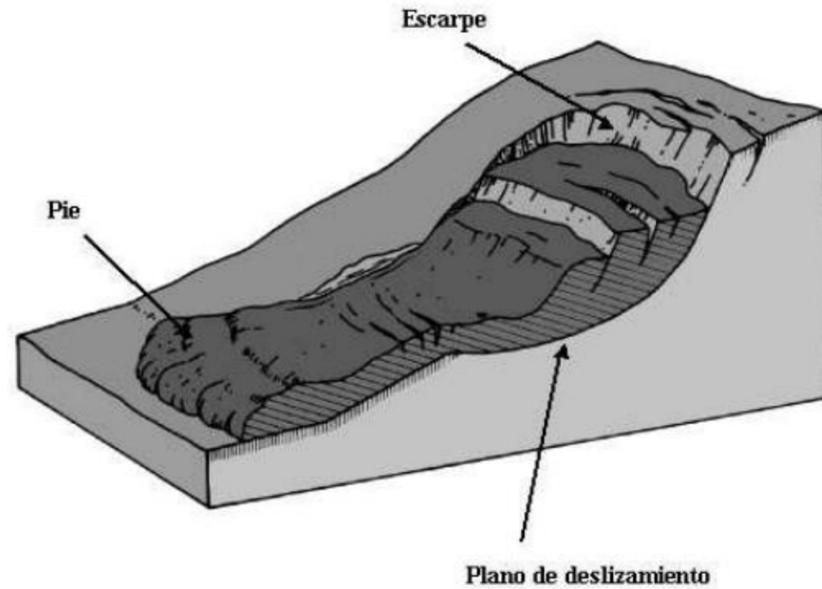


Figura 48 Morfología del deslizamiento rotacional de un talud Fuente: PDF teoría de roturas.

Por último, cabe destacar que este tipo de inestabilidad se produce fruto de una alteración en la consistencia del terreno ocasionada generalmente por la meteorización y que da lugar a posibles roturas parciales y/o globales de los taludes. La alterabilidad del suelo puede ser tal, que produzca hinchamientos en zonas con un mayor contenido de arcillas que favorezcan los desprendimientos locales.

### 6.2 Estudio previo de inestabilidades

La estabilidad global del talud objeto de estudio solo depende de su inclinación y sus parámetros de resistencia a largo y corto plazo:  $c'$ ,  $\Phi'$  y  $R_u$ . Para analizar la posible inestabilidad del terreno, en el siguiente apartado, se detallarán los diferentes métodos de cálculo empleados.

Desde el punto de vista de las acciones, existen dos grupos diferenciados: los métodos de cálculo en deformaciones, cuya aplicación práctica es de gran complejidad y los métodos de equilibrio límite, los cuales se basan exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno sin tener en cuenta las deformaciones. Este último método será el desarrollado en este capítulo.

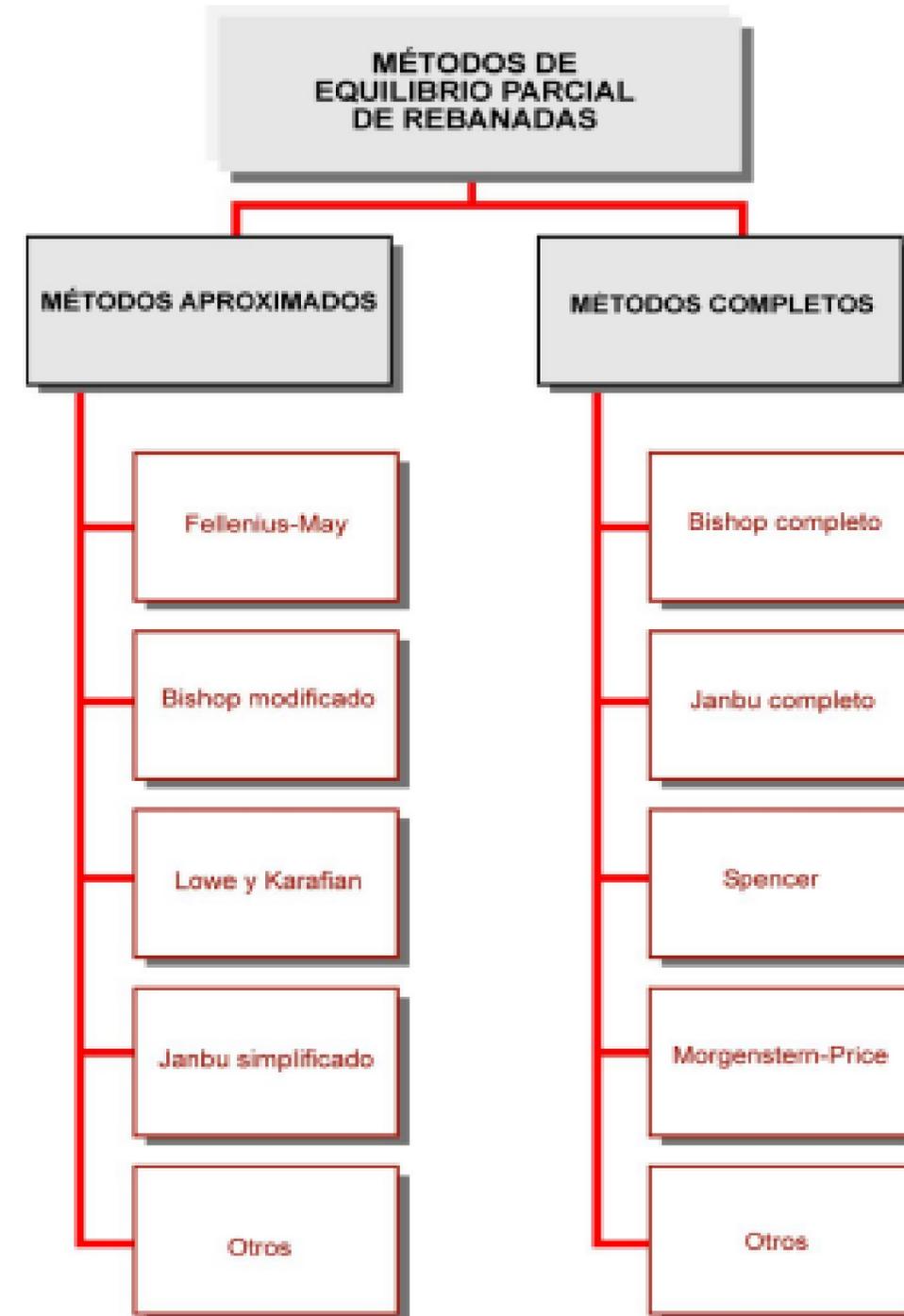


Figura 49 Métodos de rebanadas Fuente: Olalla, C. (1999)

Dentro del último grupo comentado, el método más utilizado para resolver el cálculo de estabilidad por rotura circular es el de las dovelas, conocido como la Teoría de las rebanadas, el cual se desarrolla mediante diferentes aplicaciones informáticas, debido a su complejidad y laboriosidad. Se pueden clasificar en dos diferentes grupos ya mostrados (Figura 49).

Los métodos aproximados son aquellos que no llegan a satisfacer todas las ecuaciones de equilibrio, debido al número de hipótesis realizadas. Los más relevantes y utilizados en este estudio son: Bishop simplified y Janbu simplified.

Los métodos completos o rigurosos cumplen todas las ecuaciones de la estática, lo que les permite considerar cualquier forma en la superficie de rotura. Uno de los más conocidos y empleado es el método de Morgenstern & Price.

Seguidamente, se enunciarán brevemente los principios más relevantes de los métodos contrastados y utilizados en la práctica.

- Método de Bishop. Considera que las interacciones entre rebanadas son nulas y originalmente fue desarrollado para roturas circulares. El cálculo se lleva a cabo buscando el equilibrio de momentos respecto al centro del arco circular, aunque en la versión posterior del método se puede aplicar a superficies no curvas definiendo centros ficticios.
- Método de Janbu. Pese a que la interacción entre rebanadas es nula, este método busca el equilibrio de fuerzas y no de momentos y está diseñado para superficies no necesariamente circulares. Además, introduce un factor de corrección empírico aplicable al factor de seguridad, ya que la interacción nula en el caso del equilibrio de fuerzas era demasiado restrictiva.
- Método de Morgenstern & Price. Es un método general de cortes realizados en la base del equilibrio límite. Debe satisfacer el equilibrio de fuerzas y momentos actuando en bloques individuales, los cuales son creados sobre la superficie terrestre dividiendo planos.

En conclusión, los métodos citados son los más utilizados en la práctica del cálculo de estabilidad de suelos, pero son complementarios entre sí, puesto que cada uno de ellos consideran esfuerzos o hipótesis distintas al plantear el equilibrio de las rebanadas. Diferencia que ofrece siempre un abanico diverso de posibilidades, a partir del cual se cogerá siempre el valor más desfavorable representado por el coeficiente de seguridad mínimo obtenido para estar del lado de la seguridad.

### 6.3 Análisis del tramo de estudio

Como se ha comentado anteriormente, para analizar la estabilidad de la ladera objeto de estudio en el P.K. 433+600 de la autovía A-7 se han supuesto dos fases: la estabilidad de la ladera a corto plazo y la estabilidad de la misma a largo plazo. En los siguientes apartados se pretende justificar las hipótesis de partida, en base al trabajo de campo, en el *capítulo 5* de este estudio:

- Es probable la rotura global generalizada.
- No es probable una rotura por cuña, por vuelco o por rotura plana, debido a la naturaleza del terreno.
- Pueden producirse roturas parciales en el talud, fruto del cambio de consistencia del terreno.

En pocas palabras, el procedimiento general consiste en determinar el coeficiente de seguridad del desmonte, considerando la interacción de las acciones estabilizadoras y estabilizadoras del sistema. Para ello se ha de determinar un área concreta de posibles centros de círculos de roturas, por tanto, el primer paso es definir la geometría del desmonte en cuestión antes (13 m de altura y 5H:3V de inclinación) y después de producirse la inestabilidad (manto de 1 m de espesor en el terreno y excavación al pie del talud de sección trapezoidal).

Asimismo, se han de determinar las propiedades del terreno, es decir, el peso específico seco y saturado y los parámetros de resistencia adecuados según el criterio de rotura elegido y por último, en caso de ser necesario, introducir la capa del nivel freático.

Se ha decidido emplear los 3 métodos, tanto aproximados como completos, comentados en el apartado anterior: **Bishop simplificado**, el **Janbu simplificado** y el **Método de Morgenstern & Price**.

Por un lado, el **criterio de rotura** más desarrollado y que mejor representa la competencia del suelo **a largo plazo** es el de Mohr-Coulomb (1776). Criterio que relaciona la máxima resistencia de corte con las tensiones normales en suelos cohesivos.

Por otro lado, el **criterio de rotura** más desarrollado y que mejor representa la competencia del suelo **a corto plazo** se basa en el resultado del ensayo de resistencia a compresión simple ( $\phi=0$ ). La aplicación de este criterio en principio solo debe aplicarse en suelos cohesivos, pero como ya se ha comentado, las margas del TAP poseen unas características propias de un *material de tránsito*, es decir, se comporta como un suelo muy duro o una roca muy blanda, pero en presencia de agua o sujeto a procesos de meteorización se degrada (alteración producida por agentes medioambientales: lluvia, viento, hielo, nieve) hasta convertirse en suelo

La primera comprobación más desfavorable consiste en analizar la estabilidad del desmonte con su geometría inicial en ambas fases, es decir, a largo y corto plazo, en condiciones de lluvia extrema (Figura 50 y 51). Situación que en ambos casos de la estabilidad a produce una alteración en la cohesión del terreno margoso.

SITUACIÓN LARGO PLAZO → TALUD INESTABLE + NF

- Margas.
  - Peso específico = 20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Peso específico saturado = 20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 8 kPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 29.7°.
  - Con presencia de nivel freático en la superficie del suelo.

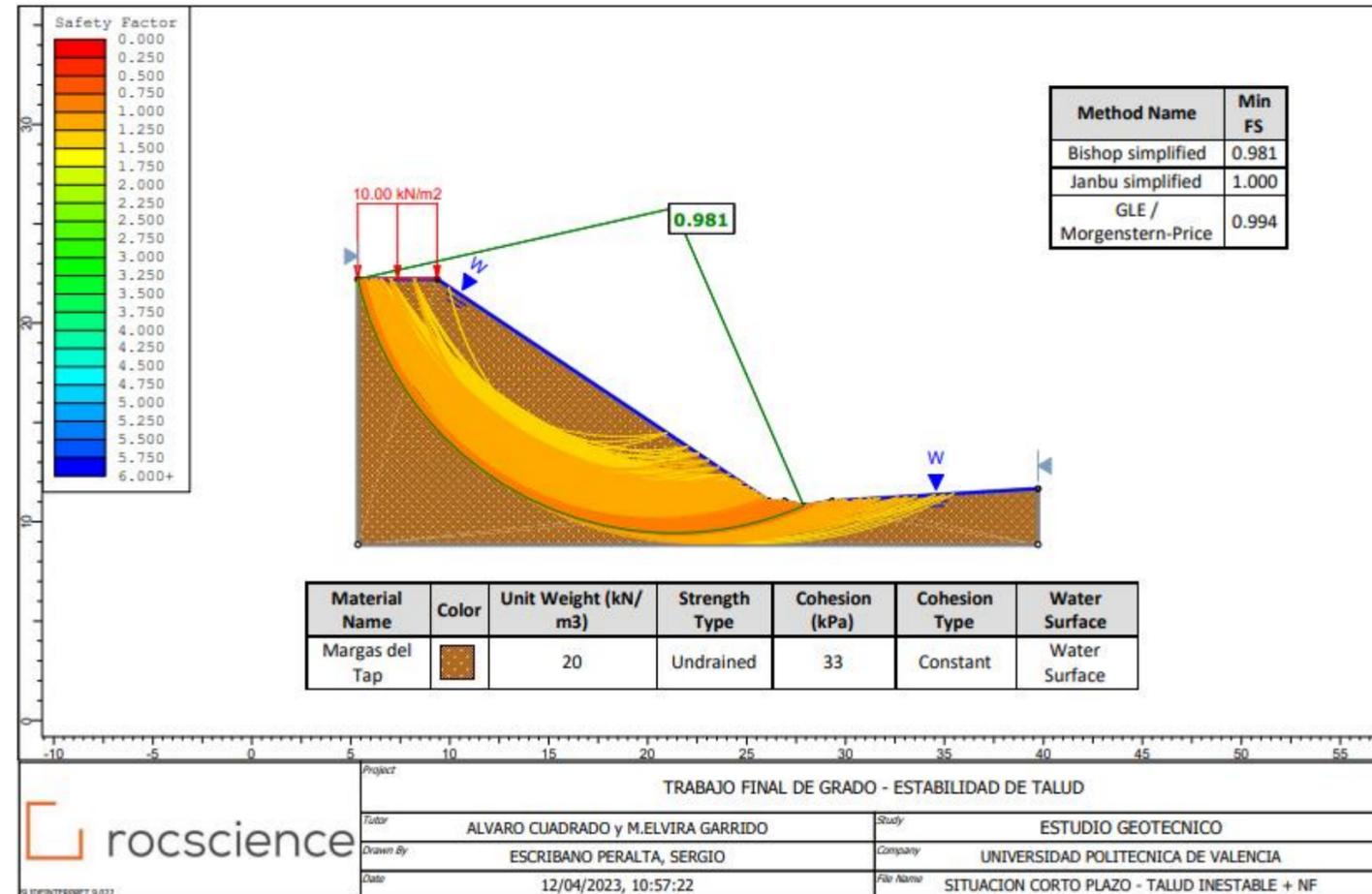


Figura 50 Situación de inestabilidad más existencia de nivel freático Fuente: Slide 2.

➤ SITUACIÓN A CORTO PLAZO → TALUD INESTABLE + NF

- Margas.
  - Peso específico = 20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 33 kPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 0°.
  - Con presencia de nivel freático.

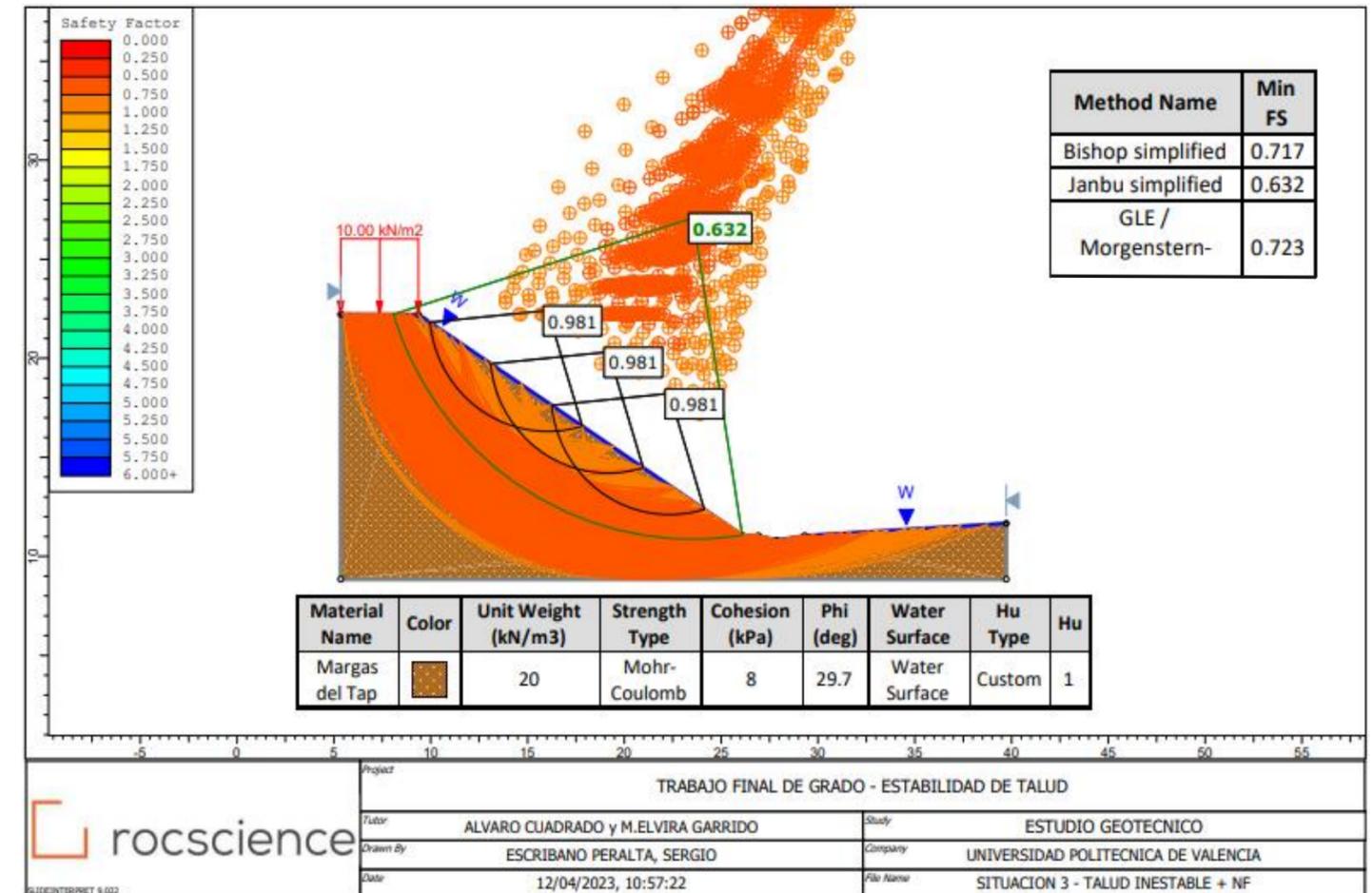


Figura 51 Situación de inestabilidad del talud a corto plazo con presencia del NF Fuente: Slide 2

En ambos casos se observa que en condiciones de lluvia extremas que alteran las características resistentes del terreno y con la inclinación natural del terreno, la ladera no cumple con el valor mínimo del coeficiente de seguridad, para la reconstrucción de taludes, de 1,3 exigido por el *Manual de taludes del IGME* (el valor de 1,5 es el coeficiente

de seguridad necesario para taludes de nueva construcción). Es más, los coeficientes resultantes de ambas situaciones **0,981** y **0,632** respectivamente están por debajo de la unidad, lo cual refleja la elevada probabilidad de colapso del talud con esta geometría y dimensiones. También cabe destacar la forma parcial de los círculos de rotura que se producen en la situación de corto plazo, ya que son muy similares a las observadas en el desmonte objeto de estudio en 2017.

A continuación, se comprueba la interacción producida entre la ladera y el manto de escollera, cuya geometría corresponde con la observada en la visita de campo.

Se plantea una situación similar a la comentada anteriormente, es decir, con presencia de agua, siendo esta tan desfavorable según se aclara en el *Anejo I* donde se realiza un análisis con más detalle y con diversas situaciones de estabilidad.

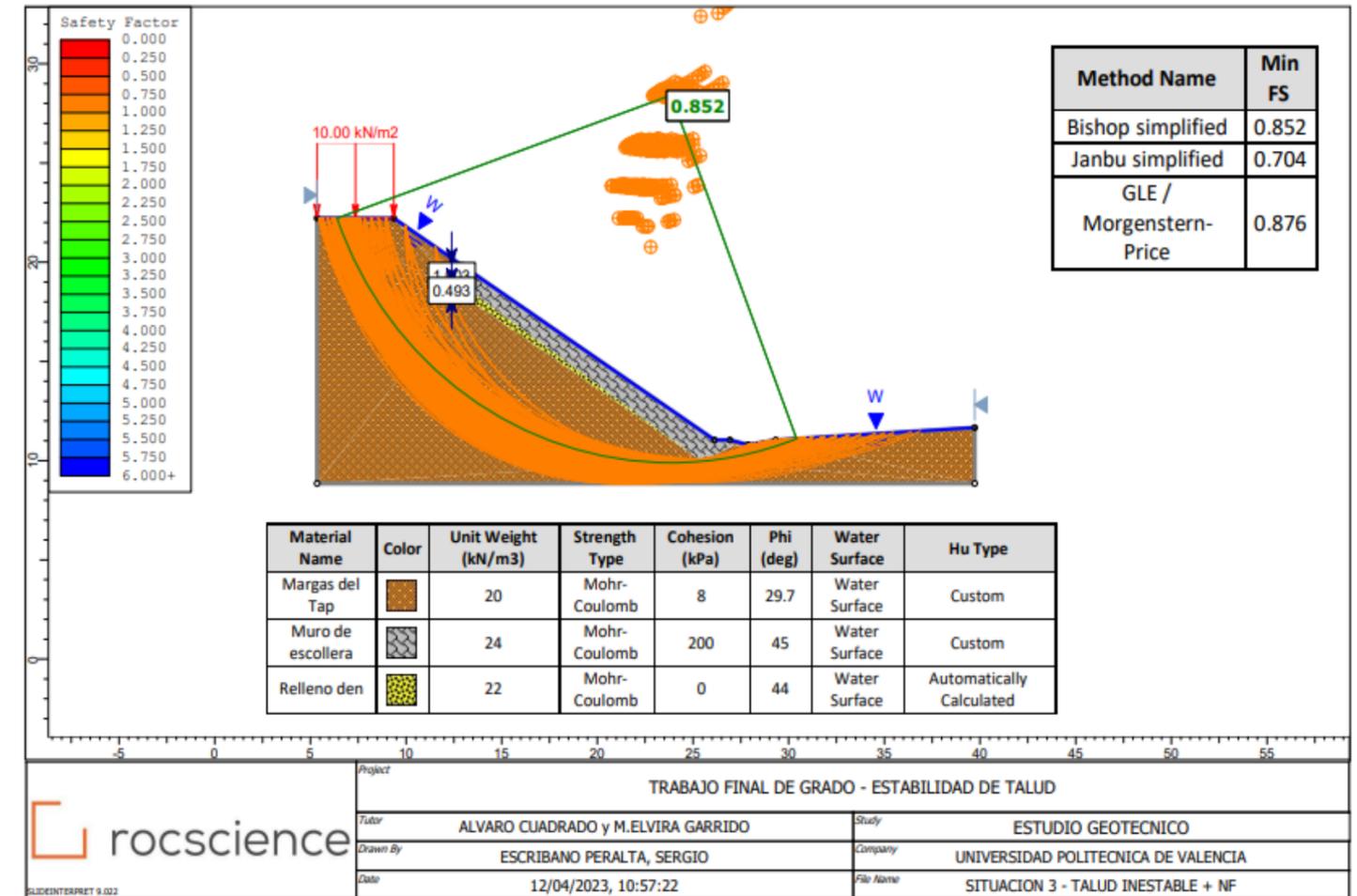


Figura 52 Situación de mejora del terreno inestable con existencia de nivel freático Fuente: Slide 2.

➤ SITUACIÓN LARGO PLAZO → TALUD INESTABLE + MURO DE ESCOLLERA + NF

- Margas.
  - Peso específico = 20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Peso específico saturado = 20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 8 kPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 29,7°.
  - Con presencia de nivel freático.
- Escollera.
  - Peso específico = 24 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 200 KPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 45°.

Para la situación en la que se desprecia la carga en coronación del talud cabe destacar que se producen mayores círculos de rotura desde la parte superior del terreno, lo cual deja entrever que la aplicación de dicha carga genera cierta estabilidad fruto de la compresión que aporta al terreno, lo cual hace que se concentren en una zona determinada los círculos de rotura.

➤ SITUACIÓN CORTO PLAZO → TALUD + MURO DE ESCOLLERA + NF

- Margas.
  - Peso específico = 20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 33 kPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 0°.
  - Con presencia de nivel freático.

- Escollera.
  - Peso específico = 24 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 1 KPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 38 °

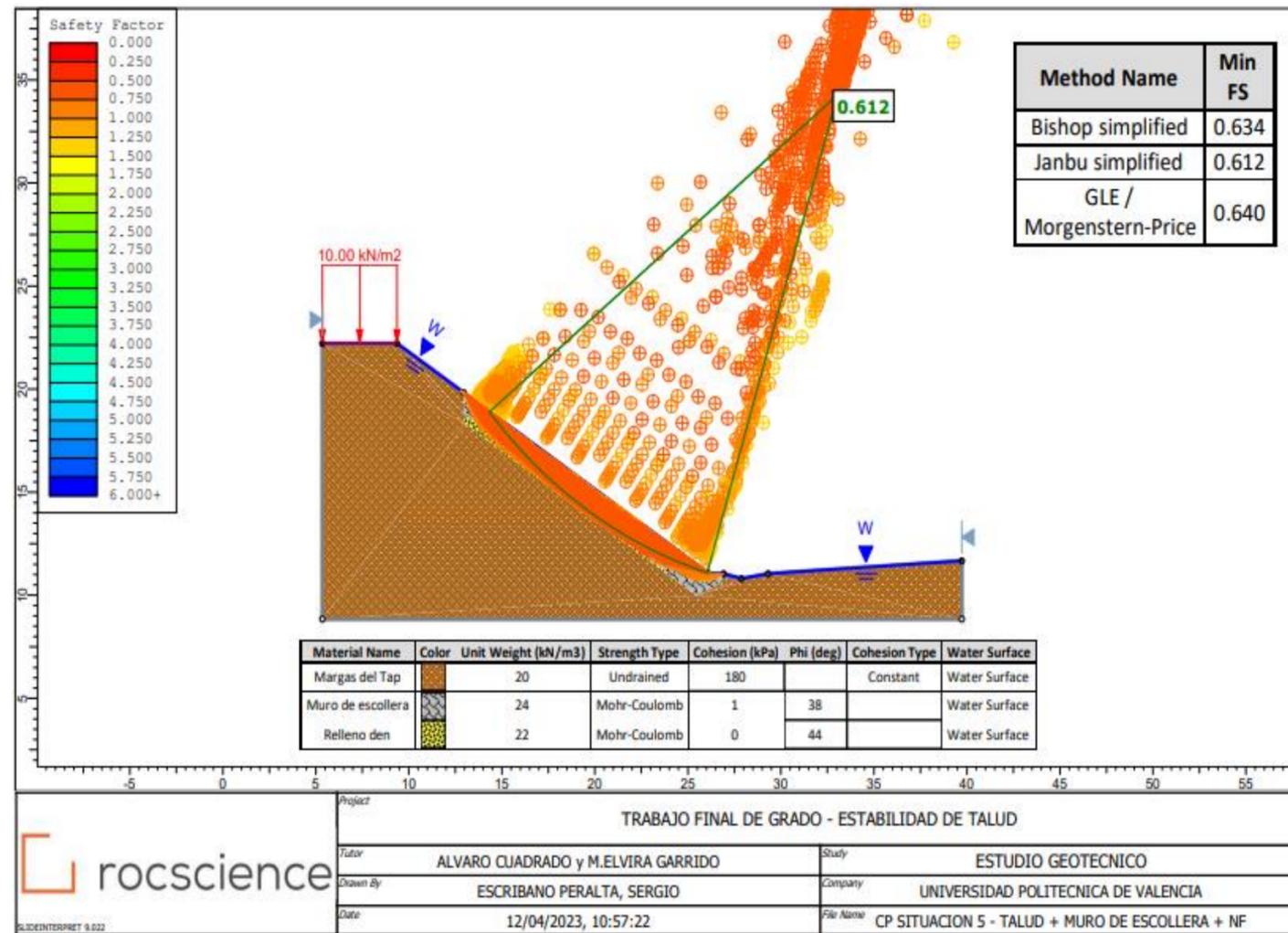


Figura 53 Situación de mejora del terreno a corto plazo con existencia de nivel freático Fuente: Slide 2

A la vista de los resultados de la Figura 52 y 53 la ladera con la solución correspondiente a la obra de emergencia no aumenta el coeficiente de seguridad e incluso parece penalizar más al terreno debido al aumento de peso generado

por la escollera. Penalización que se hace patente sobre todo en la situación de corto plazo (Ilustración 54), ya que los círculos de rotura se generan bajo la escollera.

Debido a la controversia que genera el manto de escollera en el terreno en la situación de corto plazo, también se ha realizado un análisis de sensibilidad de los parámetros del terreno en las que se han analizado diferentes situaciones en la que tanto la cohesión como el ángulo de rozamiento tomaban diferentes, para comprobar su comportamiento

### 6.4 Análisis de sensibilidad

Para un análisis más profundo del comportamiento del manto de escollera frente a las diferentes situaciones analizadas y para estudiar la interacción del método de estabilización con el terreno del desmonte se han contemplado dos situaciones diferentes con la finalidad de comprobar a partir de que valores del manto de escollera se puede llegar a alcanzar un coeficiente de seguridad mayor a 1,3 que asegure la estabilidad.

En primer lugar, se toma un valor constante de la cohesión, para el cual, se examina la variabilidad entre las diferentes situaciones para ángulos de rozamiento variables (Tabla 9):

SITUACIÓN NORMAL (SIN AGUA)	C' (kPa)	$\Phi'$ (°)	COEFICIENTE DE SEGURIDAD
SITUACIÓN 1	3	35	1.437
SITUACIÓN 2	3	36	1.449
SITUACIÓN 3	3	37	1.491
SITUACIÓN 4	3	38	1.533
SITUACIÓN 5	3	39	1.560
SITUACIÓN 6	3	40	1.584

Tabla 9 Cohesión constante y ángulo de rozamiento variable

En segundo lugar, se toma el valor constante de  $38^\circ$  para el ángulo de rozamiento (valor medio), para el cual, se examina la variabilidad entre las diferentes situaciones de cohesión variable (Tabla 10):

SITUACIÓN NORMAL (SIN AGUA)	C' (kPa)	$\Phi'$ (°)	COEFICIENTE DE SEGURIDAD
SITUACIÓN 1	0	38	1.173
SITUACIÓN 2	2	38	1.423
SITUACIÓN 3	4	38	1.647
SITUACIÓN 4	6	38	1.769
SITUACIÓN 5	8	38	1.898

Tabla 10 Ángulo de rozamiento constante y cohesión variable

Fruto de la comparación entre la Tabla 9 y Tabla 10, se observa el factor relevante que posee la cohesión, frente al ángulo de rozamiento, ya que la variación del coeficiente en la primera tabla es próxima a la décima y en el segundo caso, la variación de la cohesión supone un aumento en el coeficiente de seguridad más significativo.

Por una parte, para una cohesión próxima a cero constante, como es el caso de la Tabla 9, pese a que el ángulo de rozamiento del material pedregoso tome valores dispares, no parece afectarle en gran medida a la estabilidad del propio manto, obteniendo en todo momento valores por encima del mínimo exigido (1,3) en taludes que no son de nueva construcción. Por otro lado, como se puede observar en el *Anejo I. Análisis de estabilidad*, el coeficiente de seguridad disminuye exponencialmente a medida que el terreno va perdiendo cierta cohesión. Asimismo, en las diferentes situaciones analizadas, cabe destacar la rotura parcial cuando el terreno carece de cohesión.

Por último, (Figura 54) se ha analizado la situación más desfavorable de la interacción manto de escollera – terreno en situaciones normales (sin presencia de agua), la cual es improbable que se produzca

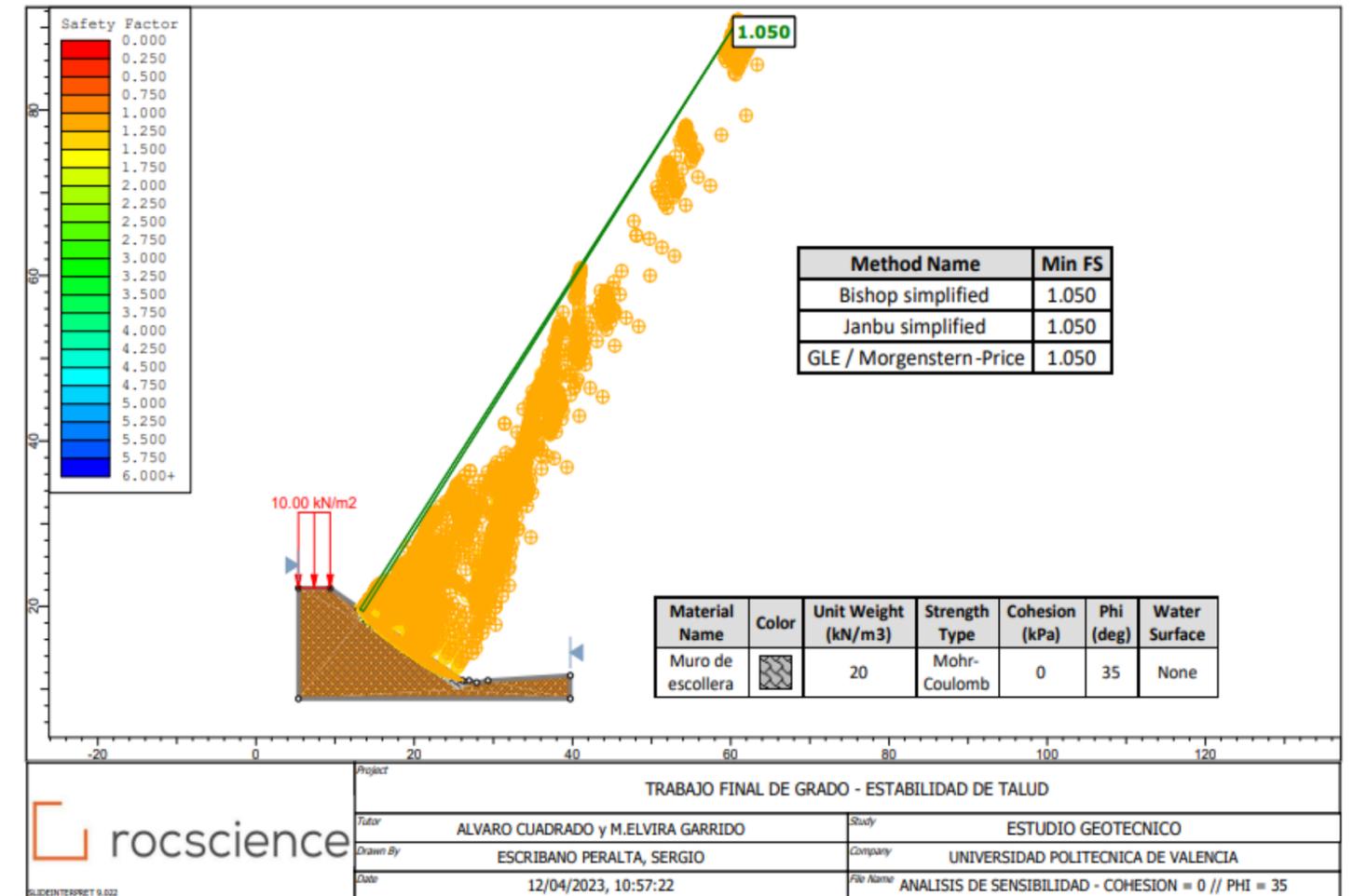


Figura 54 Situación más desfavorable en el análisis de sensibilidad Fuente: Slide 2

Pese a tener los mínimos valores posibles en el material de escollera tanto en la cohesión,  $c' = 0$  kPa, como en el ángulo de rozamiento,  $\Phi' = 35^\circ$ , el coeficiente de seguridad supera la unidad, demostrando así la estabilidad que mantendría pese a no cumplir los mínimos exigidos por la norma y presentando un tipo de rotura sería parcial casi puntual

## 6.5 Interpretación de resultados

A la vista de los resultados obtenidos se pueden obtener varias conclusiones referentes a la solución actual. A continuación, se expondrán brevemente las consecuencias referentes a la estabilidad global del talud objeto de estudio y se contrastarán con la información obtenida en la visita de campo.

- 1) En condiciones normales, es decir, sin presencia de agua, la ladera es estable, tanto con la pendiente natural sin ningún método extra de estabilización, como con el manto de escollera protegiendo la superficie del terreno.
- 2) En las situaciones, tanto de largo, como de corto plazo, se puede observar como la curva de rotura empieza en coronación de talud. Rotura que se corresponde con la realidad, puesto que, en la visita de campo, se podían observar a lo largo de la calzada, de ambas vías de servicio, las grietas de tracción que denotan que el inicio de los círculos de rotura se origina en coronación.
- 3) En el escenario más desfavorable del talud inestable con presencia de agua (condiciones de lluvia intensa) la solución correspondiente a la obra de emergencia es inestable, ya que se obtiene un coeficiente de seguridad algo inferior a 1, es decir, el cociente entre la fuerza que resiste la rotura partido por las fuerzas que provocan la rotura, como el peso del terreno y el peso del manto de escollera no cumple el mínimo de 1,3 exigido por la normativa.
- 4) La construcción de un muro de revestimiento pesado como es el manto de escollera, cuando se produce una rotura del terreno convencional, empeora la situación como puede observarse en las situaciones de largo y corto plazo, ya que lo que está generando es un incremento de carga sobre el terreno. Peso que da lugar/favorece la rotura del propio talud más que a su estabilidad.
- 5) Desde la reparación de la vía de servicio en la coronación del talud mostrada en la Figura 31 la obra de emergencia formada por el manto de escollera mostrada en el *Capítulo 4. Obra de emergencia* (Figura 35) ha alcanzado una situación de equilibrio y no ha vuelto a presentar indicios de nuevas grietas de tracción en coronación. Luego se puede considerar que en condiciones normales este talud es estable.
- 6) Según los resultados derivados del análisis mediante la herramienta informática Slide, en las situaciones de corto y largo plazo, no se produce un problema de estabilidad global, sino que la inestabilidad más probable corresponde a una rotura parcial.
- 7) La situación de inestabilidad parcial se produce para un valor de cohesión muy pequeña, casi nula, denota que la rotura se dé en la situación de estado crítico, la cual solo se produce en suelos que ya se han roto previamente o bien cuando se someten a un cambio de consistencia derivada, por ejemplo, de una aportación importante de agua.

Una vez comprobado que la situación del talud es inestable a largo plazo, puesto que es inevitable la meteorización de la superficie de terreno expuesta, se inicia el estudio de diferentes actuaciones para corregir de forma más eficiente la problemática de estabilidad. Dicho análisis se llevará a cabo mediante un estudio de distintas soluciones/alternativas posibles.

## 7. ESTUDIO DE SOLUCIONES DE CORRECCIÓN Y/O ESTABILIZACIÓN

En este capítulo se desarrollan diferentes apartados con la finalidad de determinar la solución más eficiente para el problema de estabilidad de ladera planteado. Para ello, se introduce en primer lugar un breve marco teórico donde se explican los diferentes métodos de estabilización de ladera. Seguidamente, se preseleccionan las alternativas más recomendables, sobre las cuales se realizará un análisis multicriterio, y finalmente se estudiarán las alternativas más adecuadas.

### 7.1 Medidas de estabilización

Seguidamente, se expondrán los posibles métodos aptos para estabilizar la ladera objeto de estudio y más adelante se escogerán aquellos procedimientos de corrección que por las características particulares del desmonte se podrían haber llevado a cabo con éxito, teniendo en cuenta los diferentes criterios: coste, integración paisajística, impacto en el medio ambiente... Para alcanzar la solución óptima, incluyendo como una posibilidad, una solución de compromiso.

En el proceso de elección y análisis de alternativas se han de tener en cuenta tres aspectos muy relevantes que se han ido tratando en los capítulos previos del trabajo de fin de grado:

- I. Las propiedades geomecánicas del terreno y el comportamiento de este.
- II. Los mecanismos y topologías de rotura, la velocidad, la dirección del movimiento y la geometría que presente la rotura.
- III. Los factores externos que puedan influir en la estabilidad del mismo: geológicos, hidrogeológicos, climáticos e incluso sísmicos.

Estos ítems son importantes, ya que es necesario realizar diferentes medidas de estabilización para reducir el riesgo de inestabilidad del talud. Medidas cuyo objetivo supone un aumento del factor de seguridad mediante el aumento de las fuerzas estabilizadoras y la disminución de las fuerzas desestabilizadoras. Asimismo, para completar los ensayos geotécnicos de laboratorio se deben definir las propiedades y parámetros geotécnicos de los materiales mediante estudios geológicos, hidrogeológicos o reconocimientos in situ.

Algunos de los métodos más empleados en la estabilización de taludes son:

1. Modificación de la geometría del talud.
2. Medidas de drenaje.
3. Elementos estructurales resistentes.
4. Muros u otros elementos de contención.
5. Medidas de protección superficial.

Seguidamente, se estudiará la viabilidad de cada una de las medidas posibles para solucionar el problema particular de la estabilidad.

#### 1. Modificación de la geometría

Esta opción basada en la inclinación de la ladera no es factible, puesto que supondría un retranqueo en la coronación del talud y debido a la existencia de una vía de servicio no se dispone del espacio suficiente para realizar cambios de pendiente.

#### 2. Medidas de drenaje.

Inicialmente podría ser una alternativa factible, no obstante, se está actuando sobre un terreno constituido por margas del Tap, es decir, una "roca" muy sensible frente a la presencia de agua. Como ya se ha comprobado en Capítulo 6. Estabilidad global de la ladera uno de los problemas principales de las margas es la facilidad de alteración y cambio de consistencia en presencia de agua. Por tanto, esta medida constructiva debería de ser una medida complementaria, pero no única y definitiva.

#### 3. Elementos estructurales resistentes.

Suelen construirse al pie de los taludes, evitando la erosión y la inestabilidad en las zonas más vulnerables. Además, los muros y estructuras de contención son las opciones más comunes para contener y reforzar zonas inestables, ya que consiguen un aumento de la resistencia al corte del terreno mediante el uso de:

- Elementos que incrementan la resistencia del terreno en la superficie de rotura (pilotes o micropilotes).
- Elementos que incrementan las fuerzas tangenciales de rozamiento en la superficie de rotura (anclajes y muros anclados).

#### 4. Muros u otros elementos de contención.

Las estructuras de contención sirven para acrecentar la estabilidad del pie del talud, que es la zona más desfavorable, y para evitar también la erosión superficial. Algunos de los elementos más comunes son:

- **Muros de contención:** esta es la solución se ha llevado a cabo de forma puntual en un punto del trazado, visible en la (Figura 40) y se trata de un elemento estructural diseñado para la contención de tierras que proporciona un apoyo lateral en taludes verticales o semiverticales, cuya estabilidad reside en el peso que transmite la propia estructura al terreno. En términos técnicos sí es viable (Figura 55).

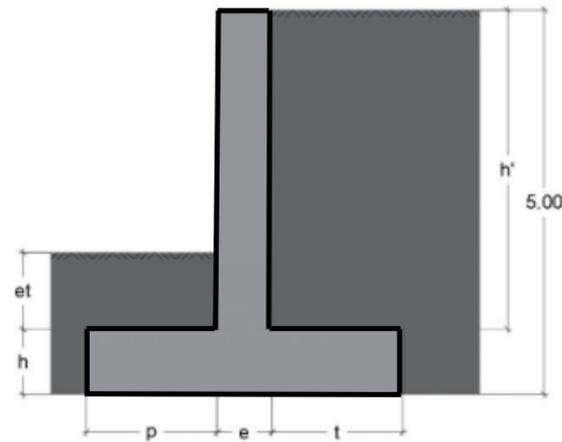


Figura 55 Croquis general de un muro de contención Fuente: <https://victoryepes.blogs.upv.es>.

- **Muro pantalla de pilotes:** consiste en la perforación de varios pilotes dispuestos en una línea continua, formando así una pantalla que reduce las deformaciones y asentamientos en el trasdós del terreno (Figura 56). Pese a su viabilidad por la integración paisajística, la zona de operación, una vez puesta la autovía en servicio, es reducida y podría conllevar una complicación extra en el proceso constructivo aumentando el coste económico debido al transporte de maquinaria especializada.

- **Muro pantalla de micropilotes:** esta alternativa es similar a la anterior. La única diferencia es el alcance del pilote, frente a la del micropilote, ya que este llega como máximo a profundidades entre los 4 – 6 m.



Figura 56 Construcción de un muro pantalla de micropilotes Fuente: <https://victoryepes.blogs.upv.es>.

- **Emplear bulones y hormigón proyectado:** solución controvertida debido al gran impacto medioambiental que genera y a su mala integración paisajística, pero que al mismo tiempo conlleva bajo coste y una gran facilidad constructiva y de mantenimiento (Figura 57). Para procurar una mejor integración en el paisaje se puede añadir aditivos al hormigón para que así sea de un tono más acorde al paisaje o añadir una capa de tierra vegetal sobre la capa de hormigón.



Figura 57 Proceso de revestimiento de la técnica Soil Nailing Fuente: Blog del Prof. <https://victoryepes.blogs.upv.es>.

- **Muro verde:** es una alternativa propia de espacios urbanos que consiste en combinar material vegetal vivo con materiales inertes tales como el acero, la madera, o geomallas de HPED, logrando una resistencia al unir las raíces con el atrial inerte (Figura 58). Pese a la reducción del impacto ambiental y el aumento de la integración paisajística el clima cálido de la zona no es el más propicio para ello, así que se descarta esta opción.



Figura 58 Muro verde Fuente: <https://victoryepes.blogs.upv.es>.

- **Muros de tierra armada:** podría ser una solución factible, ya que se integraría en el paisaje adecuadamente, la construcción y su mantenimiento es sencillo, rápido y económico. No obstante, presenta un inconveniente, la necesidad de poder acceder al trasdós del terreno, cosa que no es posible en el caso objeto de estudio, por lo tanto, también se elimina esta opción (Figura 59).



Figura 59 Construcción de muro de tierra armada Fuente: elaboración propia.

- **Muros anclados:** es un método constructivo, propio de excavaciones profundas en zonas urbanas, que permite excavar de forma segura grandes profundidades controlando la deformación del suelo. Se descarta esta tecnología, pues esta solución es más recomendable cuando aún no se ha producido la rotura.
- **Muros de gaviones:** tanto en lo referido a la integración paisajística y al aspecto económico sería una buena solución (Figura 60). Además, la geometría de la ladera permite esta disposición (5H:3V) ya que esta tipología de muros la norma general es que nunca se dispongan con un ángulo hacia adentro del talud.



Figura 60 Muro de gaviones Fuente: <https://victoryepes.blogs.upv.es>.

- **Muro de escollera<sup>(\*)</sup>:** debido a la altura del muro, al elevado peso y al tamaño del elemento de contención se descarta. Las dimensiones del muro necesario para contener las tierras del talud son muy elevadas, por lo que se le añade un peso al talud que podrían generarse inestabilidades en otras zonas de la ladera o que hubiera desprendimientos.

La escollera compactada<sup>(\*)</sup>, es un método de puesta en obra, para evitar el problema fundamental del colapso, muy utilizado para la construcción de mantos drenantes y que a diferencia de un muro de escollera se actúa superficialmente y no ejerce una gran carga en el terreno. Consiste en cubrir, como si de una costra se tratase, el terreno protegiéndolo de fenómenos erosivos y facilitando la adaptación de movimientos diferenciales en el terreno, el drenaje del talud y su integración paisajística (Figura 61). Características que hace que esta solución estabilizadora sea la más utilizada a lo largo del tramo y en el propio talud objeto de estudio.



Figura 61 Manto de escollera Fuente: elaboración propia.

- **Muro de mampostería:** esta tipología de muros se caracteriza por tener una alta rigidez y muy buena resistencia. Además, la integración paisajística de estos muros es bastante buena, sin embargo, tienen una problemática similar a los muros de escollera: masividad, inestabilidad en la zona de apoyo del muro.
- **Muro de mampostería con micropilotes autoperforantes:** pese al coste económico, la rápida instalación y gran estabilidad que aportan al talud consiguiendo al mismo tiempo una buena integración paisajística, hacen de este método, una posibilidad a tener en cuenta (Figura 62).



Figura 62 Muro de mampostería Fuente: <https://victorypes.blogs.upv.es>.

## 5. Medidas de protección superficial.

Las medidas de corrección superficial de un talud se aplican en la superficie del mismo, como su nombre indica. Tienen una acción que afecta sólo a las capas más exteriores del terreno con el fin de: evitar la erosión y meteorización, evitar problemas de desprendimientos en taludes rocosos y aumentar la seguridad frente a pequeñas roturas superficiales, hecho que en el desmonte objeto de estudio es de gran importancia por las roturas parciales originadas a lo largo de su vida útil. Además, suelen utilizarse a modo complementario con las medidas comentadas anteriormente, las cuales poseen un carácter más estructural.

- **Malla de guiado de piedras:** consiste en un alambre metálico que cubre la superficie de taludes rocosos muy fragmentados, cuyo objetivo es retener los fragmentos que posean un tamaño superior a los huecos de la malla. Como el talud objeto de estudio se trata de un suelo compuesto por margas es una solución inútil.
- **Siembra vegetal:** consiste en mantener una cubierta vegetal en el talud, similar al muro verde, evitando la erosión superficial, consiguiendo una absorción del agua por medio de las raíces y un aumento en la resistencia esfuerzo en la zona que ocupen (efecto atado). Para la siembra de los taludes es recomendable hacerlo por etapas, para una adaptación progresiva de las especies vegetales en su entorno. Pese a que todo parecen ventajas, para evitar la acumulación de humedad en el desmonte, ya que tiene una pendiente mayor que la recomendada 3H:1 habría que arar de forma cíclica el talud, lo cual conlleva un tedioso mantenimiento.
- **Hormigón proyectado:** consiste, como ya se ha comentado en rociar una capa de hormigón sobre la superficie rocosa del talud para evitar la meteorización y el deterioro progresivo. También proporciona cierta resistencia frente a inestabilidades por deslizamiento gracias a su adherencia hormigón-roca, no obstante, el terreno margoso no posee las características idóneas para esta alternativa de estabilización.

## 7.2 Revisión de alternativas factibles

En este apartado se realizará el estudio de tres alternativas inicialmente viables, además de la alternativa ya ejecutada durante la obra de emergencia para reparar la situación de inestabilidad del talud objeto de estudio.

Resumiendo, los métodos factibles más empleados, anteriormente explicados, se contemplan diferentes alternativas, las cuales cabe destacar que poseen mecanismos de funcionamiento diferentes. Por ello, entre las alternativas de un muro pantalla con pilotes o micropilotes, se descarta una de las dos alternativas debido a la gran similitud y en caso de que la alternativa con más peso fuese el muro pantalla con micropilotes, se llevaría a cabo un análisis más exhaustivo para comparar ambas alternativas y escoger la más conveniente.

En definitiva, al descartar la posibilidad de una modificación geométrica del talud debido al encorsetamiento de la propia autovía y teniendo en cuenta que las medidas de drenaje y de protección superficial son medidas complementarias a los elementos estructurales resistentes, se contemplarán las siguientes alternativas:

1. Muro de gaviones = A1.
2. Muro de contención = A2.
3. Muro pantalla de micropilotes =A3.
4. Muro de escollera (alternativa ya ejecutada) = A4.

Para la elección de la solución óptima se utilizará un análisis multicriterio, una herramienta empleada en situaciones similares en diferentes campos. Para ello, se han de establecer unas normas, es decir, se necesita de varios criterios de elección, en este caso cuatro, que a su vez se componen de varios subcriterios más específicos para realizar un análisis más completo de cada una de las posibilidades contempladas.

A la hora de definir la solución estabilizadora más conveniente, tanto los criterios, como los subcriterios tienen un peso que en función de su valor numérico representan su mayor o menor importancia. Es necesario puntualizar que previamente se ha realizado una selección de los métodos factibles que van a cumplir el objetivo de estabilizar la ladera, por ello criterios como el de funcionalidad se descartan.

Los criterios elegidos con sus respectivos subcriterios son:

- **Sociales:** en este criterio se valora la afección, durante la fase de construcción, a los usuarios que utilizan regularmente este tramo de conexión próximo a la población de Muro de Alcoy.
  - Visualización sensación de seguridad de la obra terminada
  - Afección a la fluidez del tramo
  - Duración de las obras

- **Constructivos:** valora la correcta adecuación de la alternativa a su entorno, dentro del marco constructivo, así como posibles dificultades que puedan darse en la fase de construcción. Teniendo en cuenta también el transporte de la maquinaria que requiere cada alternativa.
  - Facilidad constructiva
  - Duración de las obras
  - Adecuación constructiva
  - Transporte de la maquinaria o material necesario para realizar las operaciones (accesos)
- **Económicos:** tiene en cuenta el valor global del proyecto, es decir, el coste a lo largo del proceso proyecto-construcción-mantenimiento. A estos criterios se les adjudica un peso total del X%, posicionándolo como el segundo criterio más importante del proyecto.
  - Coste de construcción
  - Coste de reparaciones
  - Coste de los materiales
  - Coste de mantenimiento
  - Coste del transporte (maquinaria y materiales)
- **Impacto ambiental:** es el criterio más relevante con un peso de X%, ya que la actuación tiene lugar en uno de los tramos de la A-7 donde la envergadura del talud genera un impacto visual muy elevado, por lo tanto, se busca conseguir una alternativa que se adapte de una forma adecuada al entorno durante su vida útil.
  - Sostenibilidad
  - Duración de las obras
  - Integración paisajística

A partir de este desglose se realizarán los cálculos pertinentes para obtener el peso de cada subcriterio y obtener la alternativa más eficiente de las cuatro propuestas contempladas.

### 7.3 Estudio de soluciones

Para el análisis multicriterio se utilizará el método denominado **Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP)** explicado en el Anejo II. *Proceso Analítico Jerárquico*, que consta del siguiente esquema a desarrollar (Figura 63):

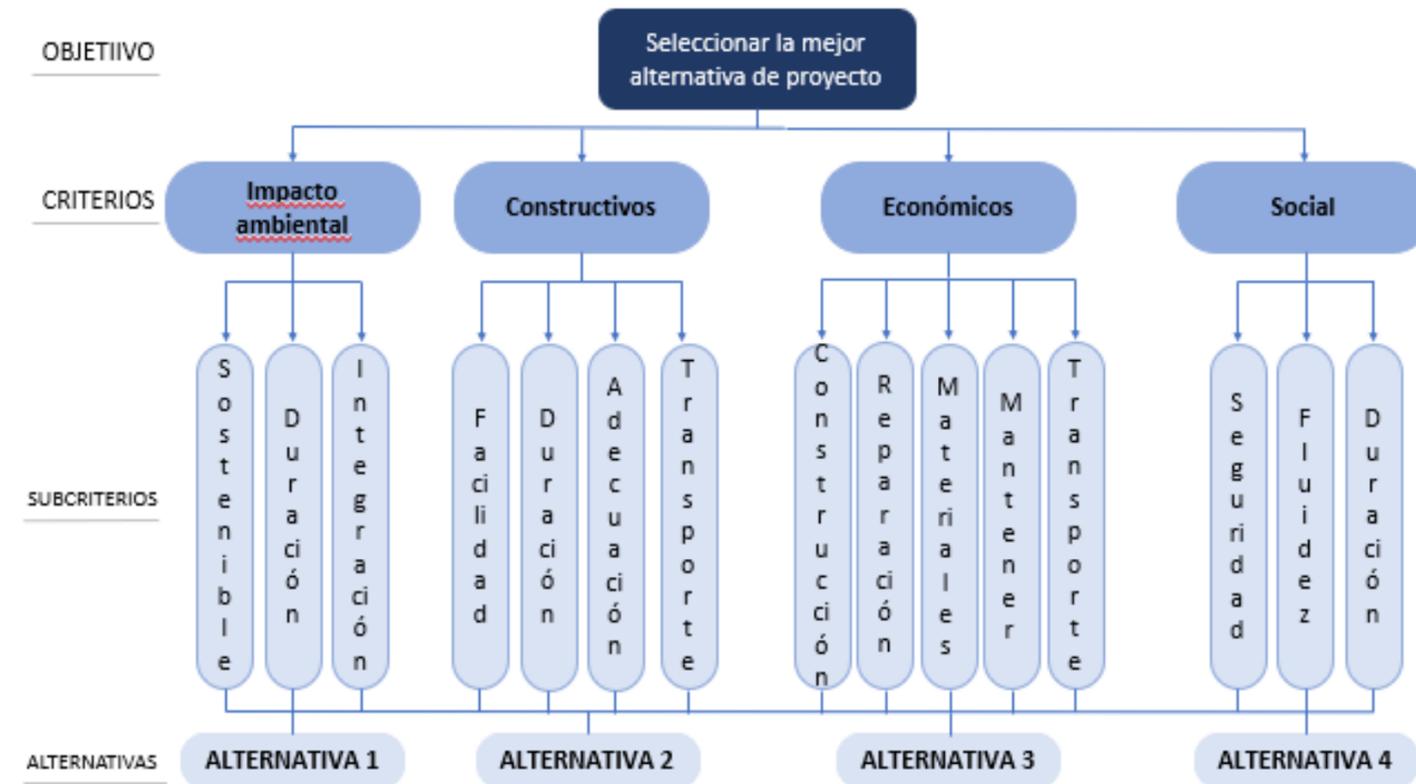


Figura 63 Esquema de la estructura jerárquica AHP objeto de estudio Fuente: elaboración propia.

A continuación, se detallarán, con ayuda de varias tablas, los pasos clave llevados a cabo en el proceso de análisis de las diferentes alternativas. Análisis cuyo objetivo es, como se muestra en *Ilustración 64*, el de seleccionar la solución óptima, es decir, la más eficaz y eficiente según los criterios y subcriterios propuestos.

- 1) En primer lugar, se definen los criterios que se van a estudiar y se aplica la matriz de decisión de las cuatro variables (Tabla 11).

	IMPACTO AMBIENTAL	SOCIAL	CONSTRUCTIVO	ECONÓMICO
IMPACTO AMBIENTAL	1,00	2,00	3,00	2,00
SOCIAL	0,5	1,00	2,00	0,33
CONSTRUCTIVO	0,33	0,50	1,00	0,5
ECONÓMICO	0,50	3,00	2,00	1,00

Tabla 11 Matriz de decisión de los criterios.

- 2) En el análisis se obtienen unos pesos para cada variable (Tabla 12) y al mismo tiempo se verifica que el ratio de consistencia es válido para el tamaño de la matriz ( $n = 4$ ,  $CR < 9\%$ ).

		PESOS
C1	IMPACTO AMBIENTAL	0,4
C2	SOCIAL	0,17
C3	CONSTRUCTIVO	0,12
C4	ECONÓMICO	0,3
<b>ΣTOTAL</b>		<b>1</b>

Tabla 12 Pesos de las variables o criterios.

CR 6,15% CUMPLE

Cabe destacar que el criterio C1, que hace referencia al impacto ambiental, es el más relevante con diferencia, por lo cual va a tener una capacidad de decisión mayor respecto al resto. La importancia de esta variable se debe al elevado impacto visual que genera una ladera de dichas características, con una localización próxima a un núcleo urbano (Muro de Alcoy) y cuya integración es fundamental debido a que en el entorno de la autovía existe un tráfico elevado.

Seguidamente, el criterio C4 precede en importancia al ambiental, lo cual denota la relevancia del coste en la ejecución de todo lo relacionado con la fase de construcción y mantenimiento. Finalmente, se encuentran el criterio social, C2 y el constructivo, C3, los cuales tienen una importancia menor, pero muy parecida, ya que al haber un flujo de vehículos constante circulando en las proximidades del área afectada se han de tener en cuenta.

En definitiva, con estos 4 criterios se ha de encontrar cuál es la solución de compromiso más eficiente y eficaz, teniendo en cuenta que los criterios predominantes son el medioambiental y el económico, frente al social y constructivo.

- Se procede al análisis y justificación de las alternativas propuestas respecto a cada criterio. Para ello, se ha empleado una herramienta más visual, una escala de colores (Tabla 13), la cual es orientativa y se usa en todos los análisis de los diferentes criterios, con el fin de poder evaluar la buena adaptación de las diferentes opciones a cada una de las variables.

MUY BUENA	
BUENA	
MEDIA	
MALA	
MUY MALA	

Tabla 13 Pesos de las variables o criterios.

3.1) **Impacto ambiental.** En primer lugar, se analiza el impacto ambiental, el cual se desglosa en 3 subcriterios más, mediante los cuales se pondera de forma más precisa cada una de las 4 posibilidades comentadas anteriormente.

Con el análisis de los subcriterios se obtiene la siguiente matriz (Tabla 14 y 15):

	IMPACTO AMBIENTAL			
	A1	A2	A3	A4
INTEGRACIÓN PAISAJÍSTICA				
DURACIÓN DE LAS OBRAS				
SOSTENIBILIDAD				

Tabla 14 Subcriterios del C1, Impacto ambiental.

C1: IMPACTO AMBIENTAL				
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	3,00	5,00	0,50
A2	0,33	1,00	2,00	0,25
A3	0,20	0,50	1,00	0,20
A4	2,00	4,00	5,00	1,00

Tabla 15 Matriz de decisión respecto de C1, Impacto ambiental.

A continuación, en la Tabla 16, se puede ver el que el resultado del análisis es favorable y que el valor que ha tomado cada alternativa teniendo en cuenta el impacto ambiental.

		PESOS
A1	MURO DE GAVIONES	0,32
A2	MURO DE CONTENCIÓN	0,12
A3	MURO PANTALLA DE MICROPILOTES	0,07
A4	MANTO DE ESCOLLERA COMPACTADA	0,49
<b>ΣTOTAL</b>		<b>1</b>

Tabla 16 Pesos de las alternativas respecto a la variable de impacto ambiental.

**CR 2,1% CUMPLE**

Los resultados obtenidos dejan en clara evidencia que las A1 y la A4, con las alternativas generan menor impacto ambiental y que la A3, a pesar de que a nivel funcional sea igual o más válida que el resto, posee un mayor impacto ambiental.

3.2) **Social.** Para la siguiente variable se han usado también 3 criterios que aparecen en la Tabla 17, en la cual también aparece reflejada la escala de colores.

	SOCIAL			
	A1	A2	A3	A4
SENSACIÓN DE SEGURIDAD	Yellow	Green	Green	Green
DURACIÓN DE LAS OBRAS	Green	Yellow	Orange	Green
AFECCIÓN A LA FLUIDEZ	Yellow	Green	Green	Yellow

Tabla 17 Subcriterios del C2, Social

C2: SOCIAL				
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	0,50	1,00	0,33
A2	2,00	1,00	2,00	0,50
A3	1,00	0,50	1,00	0,20
A4	3,03	2,00	5,00	1,00

Tabla 18 Matriz de decisión respecto de C2, Social.

El resultado obtenido del análisis es favorable, tal y como se puede observar y los pesos obtenidos para cada una de las siguientes alternativas según el criterio social, son los siguientes:

CR	0,9%	CUMPLE
----	------	--------

		PESOS
A1	MURO DE GAVIONES	0,13
A2	MURO DE CONTENCIÓN	0,25
A3	MURO PANTALLA DE MICROPILOTES	0,12
A4	MANTO DE ESCOLLERA COMPACTADA	0,5
$\Sigma$ TOTAL		1

Tabla 19 Pesos de las alternativas respecto a la variable social.

De este análisis social (Tabla 19) se ha obtenido la posibilidad A4 como la de mayor peso con gran diferencia. Este resultado tan dispar se debe a que la actuación de estabilidad realizada en el talud pasaría desapercibida, puesto que es la solución por la que se ha optado en el resto de las zonas inestables a lo largo de ese mismo tramo, hecho que además conlleva cierta familiarización de los individuos del núcleo urbano, próximo a la zona objeto de estudio, con el proceso y los tiempos necesarios para llevar a cabo dicha labor

3.3) **Constructivo.** El tercer criterio tiene como objeto valorar la adecuación y la facilidad del proceso proyecto construcción. Las matrices obtenidas son las siguientes (Tabla 20 y 21):

	CONSTRUCTIVO			
	A1	A2	A3	A4
FACILIDAD CONSTRUCTIVA	Green	Green	Red	Green
DURACIÓN DE LAS OBRAS	Green	Orange	Yellow	Green
ADECUACIÓN CONSTRUCTIVA	Green	Green	Green	Green
TRANSPORTE NECESARIO	Green	Yellow	Orange	Green

Tabla 20 Subcriterios del C3, Constructivo.

C3: CONSTRUCTIVO				
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	5,00	7,00	1,00
A2	0,20	1,00	2,00	0,20
A3	0,14	0,50	1,00	0,14
A4	1,00	5,00	7,14	1,00

Tabla 21 Matriz de decisión respecto de C3, Constructivo.

El resultado del análisis es favorable y muestra los siguientes pesos de las alternativas estudiadas (Tabla 22):

		PESOS
A1	MURO DE GAVIONES	0,425
A2	MURO DE CONTENCIÓN	0,09
A3	MURO PANTALLA DE MICROPILOTES	0,06
A4	MANTO DE ESCOLLERA COMPACTADA	0,425
<b>ΣTOTAL</b>		1

Tabla 22 Pesos de las alternativas respecto a la variable constructiva.

CR	0,6%	CUMPLE
----	------	--------

Las dos alternativas más interesantes son la A1 y la A4, ya que en ambas se trabaja con un material parecido, solo que con tamaños diferentes y lo que en una se ahorra preparación previa para las jaulas en las que se va a albergar el material rocoso, en la otra se ahorra un menor transporte de material, ya que la escollera ocupa grandes volúmenes.

En cuanto al muro pantalla, requiere de un transporte, no solo de hormigón y ferralla (material), sino también de maquinaria más especializada para llevar a cabo los micropilotes. Método que, a diferencia de las alternativas con mayor peso, solo requieren de alguna bañera en la que se transporte el material y una retroexcavadora, que es la maquinaria más común en el sector de la construcción. Por último, la posibilidad A2 al necesitar de una gran superficie de paneles para encofrar y de la especialización que requiere dicho trabajo, hacen que su peso también sea muy bajo.

3.4) **Económico.** El último criterio para estudiar es el económico, donde se estudian primero los subcriterios, como ya se ha hecho anteriormente (Tabla 23).

	ECONÓMICO			
	A1	A2	A3	A4
COSTE DE CONSTRUCCIÓN				
COSTE DE REPARACIONES				
COSTE DE LOS MATERIALES				
COSTE DE MANTENIMIENTO				
COSTE DE REPARACIONES				

Tabla 23 Subcriterios del C4, Económico.

Se obtiene la siguiente matriz de decisión (Tabla 24):

C4: ECONÓMICO				
	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	4,00	6,00	0,33
A2	0,25	1,00	3,00	0,20
A3	0,17	0,33	1,00	0,14
A4	3,03	5,00	7,14	1,00

Tabla 24 Matriz de decisión respecto de C4, Económico.

Con su correspondiente favorable y los pesos de cada alternativa (Tabla 25):

		PESOS
A1	MURO DE GAVIONES	0,29
A2	MURO DE CONTENCIÓN	0,11
A3	MURO PANTALLA DE MICROPILOTES	0,05
A4	MANTO DE ESCOLLERA COMPACTADA	0,55
	$\Sigma$ TOTAL	1

Tabla 25 Pesos de las alternativas respecto a la variable económica.

CR 6,5% CUMPLE

Una vez finalizado el análisis económico, se obtiene que la opción más viable según el criterio económico es la actual, debido a su gran versatilidad y capacidad de adaptación a los cambios constantes del terreno. El muro de gaviones al comportar cierta flexibilidad y facilidad constructiva también tiene un peso importante, pese a que está expuesto a la acción del vandalismo, motivo por el cual no son la mejor opción y hay que ir revisando su integridad completa. Las alternativas A2 y A3 van de mayor a menor peso respectivamente, siendo el coste del material la diferencia más destacable, ya que la necesidad de ferrallar la estructura de contención encarece la obra.

- 4) Finalmente, con todos los pesos obtenidos se construye una matriz con los pesos de las alternativas de 4 columnas, que equivalen al resultado de cada alternativa por cada criterio estudiado. Matriz que se multiplica por otra de una sola columna, cuyo valor es de los pesos de cada criterio que se ha obtenido en el paso 1) al principio del análisis. El resultado de dicha matriz proporciona la alternativa más viable y conveniente.

$$\begin{pmatrix} 0,32 & 0,13 & 0,425 & 0,29 \\ 0,12 & 0,25 & 0,09 & 0,11 \\ 0,07 & 0,12 & 0,06 & 0,05 \\ 0,49 & 0,50 & 0,425 & 0,55 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0,40 \\ 0,17 \\ 0,12 \\ 0,30 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,3 \\ 0,13 \\ 0,07 \\ 0,5 \end{pmatrix}$$

El resultado del análisis multicriterio indica que la solución óptima, teniendo en cuenta los 4 criterios elegidos, es construir un manto de escollera. En segundo lugar, queda la opción de colocar un muro de gaviones, por lo que al ser estas dos las de mayor peso y teniendo en cuenta que la primera alternativa es la que más presencia tiene en el tramo de autovía, se toma dicha opción como la más eficaz y eficiente del tramo. Además, el hecho de utilizarse dicha solución a lo largo del tramo de carretera, en otros taludes con una composición similar del suelo, constata la fiabilidad y funcionalidad de esta alternativa

### 7.4 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es una herramienta cuyo objetivo de determinar la estabilidad de la alternativa adoptadas. Para ello se realizan unas modificaciones en los pesos iniciales de los criterios, es decir, si en el análisis anterior se ha determinado que el criterio ambiental y el económico eran los que más peso tenían en el proceso comparativa, en este apartado se producirán ciertas variaciones (Tabla 26).

	IMPACTO AMBIENTAL	SOCIAL	CONSTRUCTIVO	ECONÓMICO
IMPACTO AMBIENTAL	1,00	1,00	2,00	2,00
SOCIAL	1,00	1,00	2,00	0,5
CONSTRUCTIVO	0,50	0,50	1,00	1,00
ECONÓMICO	0,50	2,00	1,00	1,00

Tabla 26 Matriz de decisión de los criterios tras el análisis de sensibilidad.

Siendo favorable el resultado del análisis, los pesos finales obtenidos son los siguientes:

CR 6,9 % CUMPLE

		PESOS
C1	IMPACTO AMBIENTAL	0,34
C2	SOCIAL	0,24
C3	CONSTRUCTIVO	0,13
C4	ECONÓMICO	0,29
	<b>ΣTOTAL</b>	<b>1</b>

Tabla 27 Pesos de las variables o criterios.

La importancia de cada criterio ha sufrido cierta variación, no obstante, el orden de importancia se ha mantenido (Tabla 27). Manteniéndose de igual forma el orden de las alternativas, por tanto, la alternativa más adecuada sigue siendo la misma, el manto de escollera.

## 8. ESTUDIO DE TRÁFICO

En el siguiente apartado queda reflejado la elevada responsabilidad e influencia de la ingeniería civil en la sociedad, ya que la actuación de emergencia para el reacondicionamiento del talud objeto de estudio en la A-7 genera un impacto económico y social reflejado en la disminución del nivel de servicio de la infraestructura viaria.

Con el fin de examinar el impacto social generado en los usuarios en el año 2017 se pretende, mediante un estudio de tráfico simplificado, cuantificar el volumen de vehículos y analizar la evolución del nivel de servicio de la propia carretera. Para conseguir un buen resultado del estudio, en primer lugar, se recogen los datos de las estaciones más cercanas al tramo y a continuación, se comparan los resultados y se observa si el crecimiento ha sido favorable o desfavorable para comprobar su variación.

### 8.1 Datos de partida

La autovía A-7 es una vía de dominio y uso público cuya clasificación según la Administración a la que pertenece es Estatal, por tanto, para obtener los datos correspondientes se ha recurrido a la base de datos del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.

Para poder estimar la Intensidad Media Diaria (IMD) es necesario establecer una estación a fin, es decir, una estación cuyo comportamiento sea similar al tramo estudiado.

Además de los datos obtenidos en el aforo manual, se han determinado dos estaciones afines (A-231-2 y V-449-0) y próximas a la zona de estudio (Figura 64). Ambas recogen los vehículos que bajan desde Valencia hasta Alicante, no obstante, entre medias de las estaciones existen varios desvíos a núcleos urbanos importantes, como es el caso de la N-340 o la CV-700, hecho que genera una diferencia en los resultados de ambas estaciones. A falta de datos más precisos sobre las salidas e incorporaciones de la autovía y teniendo en cuenta que el conteo manual realizado en la visita de campo era un día de lluvia y malas condiciones meteorológicas, se ha escogido el valor de la IMD más alto para estar del lado de la seguridad.



Figura 64 Localización de ambas estaciones respecto de la zona objeto de estudio Fuente:visor del Ministerio de Transporte.

A continuación, se resume la información más relevante sobre la localización y volumen de vehículos en cada una de las estaciones en el año 2017, haciendo también distinción entre vehículos ligeros y pesados (Tabla 28):

ESTACIÓN	PP.KK.	IMD <sub>2017</sub>	Veh. Ligeros	Veh. Pesados	%PESADOS
A-231-2	426+800	20.171	17.992	2.179	10,8
V-449-0	438+300	18.475	16.394	2.081	11.3

Tabla 28 Valor de la IMD en ambas estaciones.

Por tanto, se cogerá el dato de la estación A-231-2 como el valor de referencia de la Intensidad Media Diaria a partir del cual se obtendrá el nivel de servicio de la calzada.

## 8.2 Metodología

Para conseguir un resultado fiable que refleje el nivel de servicio tanto antes, como durante la ejecución de la obra de emergencia, se utiliza el "Manual de Capacidad de 2016". En este artículo se presentan los diferentes niveles de servicio que caracterizan la fluidez del tráfico de un elemento viario y el concepto de capacidad de la misma.

A continuación, se procederá a desarrollar la metodología que propone dicho manual:

1. En primer lugar, se ha de obtener el flujo de vehículos que circulan por el sentido en el que se produce el deslizamiento parcial de la ladera, es decir, rumbo Alicante. Como la pendiente en esta dirección es descendente con un valor de 3,7% se supone que la IMD se reparte de forma equitativa en ambos sentidos, es decir, la Intensidad Media Diaria dirección Alicante equivale al 50% de la IMD<sub>426+800</sub> (Estación A-231-2).

$$IMD_{426+800}^{DESCENDENTE} = IMD_{426+800} * 0,5 = 10.086 \text{ veh/d}$$

2. Una vez se tiene la cantidad de vehículos que circulan durante un día por el tramo objeto de estudio en el sentido descendente se obtiene la Intensidad Horaria en Proyecto (IHP), la cual, como su nombre indica es la intensidad horaria utilizada para el diseño de la infraestructura viaria y se calcula como el 10% de la IMD.

$$IHP = IMD_{426+800}^{DESCENDENTE} * 0,1 = 1.009 \text{ veh/h}$$

3. Seguidamente, teniendo en cuenta que la capacidad no es un máximo absoluto ni único, sino un máximo relativo a las características de la vía y de la circulación e incluso puede depender de las condiciones meteorológicas, se obtiene que para la autovía A-7, cuya velocidad libre es de 110 km/h, su capacidad máxima es de 2.350 vh.lg./h/carril.
4. Por último, se obtienen los Niveles de Servicio de la autovía, los cuales son una medida cualitativa del funcionamiento de un elemento viario. En la situación inicial, se produce un Nivel B, ya que la autovía al tener ambos carriles habilitados para soportar la intensidad del tráfico ya calculada admite una circulación estable a alta velocidad, no obstante, al inhabilitarse uno de los carriles fruto de la estabilización del talud influye en gran medida al nivel de servicio de la A-7, puesto que supone una reducción en la velocidad y en la capacidad de la infraestructura, es por ello que se pasa a un nivel C, en el que la circulación es estable únicamente.



### 8.3 Interpretación de resultados

Como se evidencia en los apartados anteriores la afección social se hace visible en la disminución del Nivel de Servicio debido a la reducción de la capacidad a causa del corte de uno de los carriles y de la reducción de velocidad para poder reducir el riesgo de accidentes en las proximidades de la zona objeto de estudio. Por todo ello, el impacto social se resume en una reducción de velocidad y de fluidez en la infraestructura viaria.

## 9.RESTAURACIÓN DEL PAISAJE

El objetivo principal de este capítulo es desarrollar posibles soluciones de integración paisajística que complementen los criterios constructivos empleados para la estabilización del talud y al mismo tiempo que contribuyan en el proceso de estabilización de este. Para ello, se ha de tener en cuenta el clima, la morfología, la hidrología, la geología y una serie de datos, de la zona objeto de estudio, comentados en el **Capítulo 2. Trabajos previos** que posibiliten una mejor adaptación y por ende un menor mantenimiento a lo largo de su vida útil.

A través de procedimientos obligatorios que permiten identificar, predecir, evaluar y mitigar los impactos que la construcción de un proyecto de ingeniería civil o la propia explotación de una infraestructura puede causar en el medioambiente a corto, mediano y largo plazo, (Estudio de Impacto Ambiental, EIA) la legislación actual obliga a aplicar ciertas medidas correctoras. A falta de normativa concreta se ha tomado como referencia el *Manual de técnicas de estabilización biotécnica en taludes de infraestructuras de obra civil (Universidad de Córdoba, CSIC, 2012-14)*, así como la normativa vigente en cuanto a especies susceptibles de ser utilizadas en restauración de paisajes de la Conselleria de Medi Ambient de la Comunitat Valenciana.

En este punto se ha establecido una serie de medidas medioambientales que aprovechen la morfología existente del talud, tomando para ello los datos del Anejo 15, Ordenación Ecológica, Estética y Paisajística del Proyecto del Corredor Mediterráneo.

### 9.1 Actuaciones básicas

En primer lugar, es necesario recordar las características básicas, ya comentadas en el capítulo 2 de este documento. La zona objeto de estudio presenta un clima lógicamente mediterráneo, con una orografía muy accidentada en las zonas de sierra y amplios valles por los que discurren los ríos Serpis y Agrés. La geología se compone de extensos afloramientos de margas miocenas propias del TAP y la vegetación, compuesta por matorral y pino carrasco, presenta un carácter antrópico, fruto de la degradación, los incendios, el crecimiento de los núcleos urbanos y de los cultivos.

A continuación, se expondrán los dos tipos de actuaciones básicas (la siembra y la plantación) para poder decidir qué tipo de actuación es más conveniente para conseguir los objetivos comentados anteriormente. Cabe destacar que, aunque anteriormente se ha evidenciado la falta de funcionalidad de la hidrosiembra, se tendrá en cuenta, ya que en la visita de campo se observó el crecimiento de una cubierta vegetal entre los huecos de las rocas de escollera.

### SIEMBRA:

El objetivo principal de la siembra es generar una cubierta vegetal que reduzca la erosión y la escorrentía superficial en condiciones susceptibles. Por ello, esta actuación se lleva a cabo fundamentalmente en zonas en las que se producen procesos erosivos importantes, como en la zona objeto de estudio (talud de gran pendiente y superficie), ya que las siembras iniciales tienen como objetivo principal la fijación del sustrato.

Las especies más utilizadas para este proceso de revegetación y estabilización son especies estérter (gramíneas), debido a la capacidad de crear un estrato herbáceo denso en un intervalo de tiempo reducido. Las leguminosas también destacan dentro de estas especies, debido al fácil desarrollo en entornos con sustratos pobres en nutrientes. No obstante, el incremento de la biodiversidad y la plantación de especies autóctonas que promuevan la evolución de los ecosistemas naturales debe ser también el objetivo de la revegetación y, en consecuencia, también de las siembras.

El uso de especies que persisten poco en las zonas sembradas puede generar cubiertas vegetales iniciales importantes sin llegar a limitar el desarrollo de las especies autóctonas.

### **Objetivo**

- Promover la instalación de vegetación espontánea en los microhábitats e irregularidades del manto de escollera, para aumentar la biodiversidad y la integración con el entorno.

### **Acciones a evitar**

- Realizar hidrosiembras en épocas no favorables.

### **Acciones no admisibles**

- Plantar especies exóticas, debido a su carácter invasivo que puede ocasionar el desplazamiento de las especies autóctonas, las cuales se pretenden potenciar (consultar legislación).

### **Proceso**

Los dos tipos de intervención propuestos son:

1. Revegetación activa sobre la superficie del talud:

Aplicación de hidrosiembra localizada a las zonas más favorables del talud, como las grietas entre la escollera que pueden recoger materiales finos o estratos con materiales poco consolidados, favorables para el crecimiento de las plantas.

La hidrosiembra se aplicará en dos fases. En primer lugar, se aplican todos los componentes principales (las semillas, los fertilizantes y el sustrato) y parte del acolchado (mulch), el fijador y el agua. En segundo lugar, se cubren las semillas para favorecer su germinación

2. Revegetación pasiva desde la cabecera:

Si la accesibilidad, las condiciones edáficas y las condiciones morfológicas son favorables, se recomienda hacer siembras con las especies autóctonas.

Fomentar la revegetación del talud mediante semillas dispersadas desde la cabecera. En este caso, las siembras pueden ser manuales. Después de la siembra es necesario cubrir las semillas para facilitar su germinación.

### **Resultados mínimos aconsejables**

Proceso de restauración:

- Presencia de algunas plantas de las especies sembradas y/o espontáneas en las paredes rocosas del manto.

Final de la garantía:

- Cobertura vegetal al final del período de garantía: un 20% de la cobertura media talud pedregoso.
- Presencia en la cabecera de las especies sembradas.

### **Mantenimiento:**

- Resiembras en la cabecera si no se cumplen los resultados mínimos recomendados. •
- Riegos de mantenimiento en la cabecera del desmonte si las condiciones meteorológicas tras las siembras no son favorables.

### **Relación de algunas especies propias de suelos pedregosos y fisurales:**

- Especie: Phagnalon saxatile.
- Nombre común: manzanilla yesquera.
- Botipo: leñosa- sustrato.



Figura 65 Manzanilla.

Fuente: Ordenación Ecológica, Estética y Paisajística.

- Especie: *Brachypodium retusum*.
- Nombre común: patillo, cebada.
- Biotipo: Leñosa- perenne.



Figura 66 Cebada.

Fuente: Ordenación Ecológica, Estética y Paisajística.

- Especie: *Sedum álbum*.
- Nombre común: uña de gato.
- Biotipo: leñosa- perenne.



Figura 67 Uña de gato.

Fuente: Ordenación Ecológica, Estética y Paisajística.

#### PLANTACIONES:

El principal objetivo de las plantaciones, en la restauración ecológica, consiste en acelerar la sucesión creando la composición, la estructura física y la función del ecosistema de referencia, es decir, restaurar el paisaje preexistente, aportándole al mismo las funciones intrínsecas del mismo.

Las plantaciones de referencia propias del clima mediterráneo incluyen especies leñosas, árboles y arbustos, los cuales son de reducidas dimensiones y dejan el suelo al descubierto. La vegetación mediterránea se caracteriza por su crecimiento pausado y de pauta estacional, por ello la colonización de especies leñosas es lenta por falta de semillas, de agentes dispersantes de estas y por la rigurosidad del ambiente, ya sea por su baja calidad o por las condiciones meteorológicas. Dicho proceso de plantación pretende acelerar este proceso para obtener una mejor integración paisajística y ecológica, considerando simultáneamente la introducción de especies locales, puesto que estas ya están adaptadas a las condiciones edáficas, climáticas y también a los agentes bióticos de la zona.

Los criterios para definir la composición y la densidad de las plantaciones se basan en los sistemas de referencia. Ya que, debe favorecerse la diversidad de las especies teniendo en cuenta las respectivas respuestas a las condiciones adversas o a perturbaciones naturales como el fuego sin perder de vista los condicionantes específicos de la zona a restaurar. Por ello, las propuestas de plantación se presentan según diferentes tipos de situaciones.

Los listados de especies son sugerencias para contrastar con las especies recogidas en el programa de restauración aceptado por el organismo competente de la administración y con los ecosistemas de referencia que desean reproducir. El paisaje que pretende conseguirse consta de una barrera natural en la coronación del talud, mediante vegetación arbustiva y especies arbóreas, como el pino carrasco.

#### **Objetivo**

- Promover la instalación de vegetación leñosa introducida o espontánea en la coronación del talud para conseguir una pantalla acústica que además establezca los círculos de rotura generados en la cabeza talud.

#### **Acciones a evitar**

- Realizar las plantaciones fuera de la época de plantación recomendada.

#### **Acciones no admisibles**

- Plantar especies exóticas, debido a su carácter invasivo que puede ocasionar el desplazamiento de las especies autóctonas, las cuales se pretenden potenciar (consultar legislación).

#### **Consideraciones generales**

- La plantación se realizará en la coronación del desmonte con una distribución lineal y regular.
- Se recomienda que las especies leñosas se planten alejadas del manto rocoso de escollera.

#### **Resultados mínimos aconsejables**

Proceso de restauración:

- 70% supervivencia al cabo de 1 año de la plantación para cada una de las especies plantadas.

Final de la garantía:

- Incremento de 1-2 m de altura de los árboles.
- Presencia de 2-3 especies leñosas rebrotadoras con frutos carnosos (arbustos maduros).
- Presencia de nuevas plantas de un 50% de las especies introducidas por siembra y/o plantación.

- Presencia de plantas de 3-4 especies leñosas del sistema de referencia, no introducidas por siembra o plantación.

#### Mantenimiento

- Riegos de mantenimiento durante el primer período seco si las condiciones meteorológicas después de las plantaciones no son favorables.

#### Relación de algunas especies propias de paredes rocosas:

- Especie: *Pinus halepensis*
- Nombre común: Pino carrasco.
- Biotipo: árbol



Figura 68 Pino carrasco.

Fuente: Ordenación Ecológica, Estética y Paisajística

- Especie: *Quercus coccifera*
- Nombre común: Chaparro.
- Biotipo: Arbusto



Figura 69 Chaparro.

Fuente: Ordenación Ecológica, Estética y Paisajística

- Especie: *Olea europea* var. *sylvestris*.
- Nombre común: Olivo.
- Biotipo: Árbol- arbusto.



Figura 70 Chaparro.

Fuente: Ordenación Ecológica, Estética y Paisajística

#### SUBSTRATO

##### Objetivo

- Obtener sustratos adecuados para que crezca la vegetación en el talud margoso.
- Crear sustratos de gran espesor y fértiles no es la aspiración de la restauración desde el punto ecológico, ya que supondría desfavorecer el desarrollo de las especies autóctonas, hecho que influye negativamente en la homogeneidad del propio paisaje. Para ello, es necesario conseguir un sustrato edáfico que tenga las propiedades físicas y la capacidad de proporcionar nutrientes adecuados para las plantas que crezcan en la zona.
- Se añaden pequeñas cantidades de materiales orgánicos residuales (estiércoles, lodos de depuradora) o restos vegetales procedentes de un desbroce reciente para conseguir así unos niveles de fertilidad química y biológica adecuados

##### Acciones a evitar

- Realizar procesos de reposición de sustrato en situación de inestabilidad en la que no existan sistemas de protección y de gestión del agua de escorrentía en el talud.
- Exceder las cantidades de materia orgánica en el terreno, posibilitando la contaminación por lixiviación las aguas superficiales y acuíferos.
- Almacenar enmiendas orgánicas (lodos de depuradora) e zonas no aptas, produciendo problemas ambientales y sanitarios.

##### Materias primas para el sustrato

- Compensación de tierras
- Rechazos de materia orgánica
- Evitar tierras muy limosas o arenosas

## **RIEGOS**

### **Objetivos**

- Definir un sistema de riego para taludes en fase de revegetación.

### **Acciones a evitar**

- Sobredimensionar el riego.
- Ahorrar agua en momentos críticos (temperaturas muy elevadas).
- Generar escorrentía superficial durante el riego.

### **Actuaciones aconsejadas**

- Cuando se realicen siembras, se deben aportar en los 15 días siguientes, de forma natural (lluvia) o de forma asistida, como mínimo el equivalente a una precipitación de 5 l/m<sup>2</sup> (5 mm).
- Si se mantienen las condiciones de sequía deberán repetirse los riegos con una periodicidad semanal o quincenal, según las temperaturas.
- En el caso de plantaciones, es importante regar durante el primer período seco después de la plantación, intentando potenciar solo las especies plantadas (riego por goteo o individualizado).

## **9.2 Elección de actuación**

Teniendo en cuenta los condicionantes del sustrato y del riego necesario para la correcta implantación de las especies autóctonas se ha tomado la plantación como actuación básica de referencia, debido a la mejor adaptación a las condiciones edáficas, climáticas y también a los agentes bióticos de la zona.

Como elemento protector de la erosión, y gracias a la capacidad de proporcionar árboles de cierta talla con grandes raíces que retienen la tierra en condiciones de suelo muy malas, como las que se tienen, se ha optado por la plantación del pino Carrascosa, el cual dentro de la familia de las pináceas es la que mejor resiste el fuego y la sequía. Además, la gran envergadura de estos árboles en e la coronación del talud producirá un mayor efecto barrera del sonido y a su vez una mejor integración de la infraestructura en el medio natural.

Por último, se descarta la siembra, ya que requiere de un mayor mantenimiento, mejora del terreno y aporte de agua para que su crecimiento se produzca de forma constante y permanente. No obstante, aparecen patillos y manzanillas de forma temporal entre los huecos de los bloques de escollera, donde se acumula la humedad tras periodos lluviosos.

## **10. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO**

En este capítulo se definirá de forma detallada el proceso de construcción que se ha de llevar a cabo para materializar la solución de estabilización más eficaz y eficiente en el P.K. 433+600, de la autovía A-7, que une las poblaciones de Muro de Alcoy (Alicante) y de Valencia.

Se ha seguido las disposiciones constructivas detalladas en la *Guía para el proyecto y la ejecución de muros de escollera en obras de carretera*. Con el fin de que no se produzca ninguna inestabilidad general en el muro de escollera, se toman medidas geométricas necesarias, como, por ejemplo, la excavación al pie del talud 1 × 1 m a modo de talón sobre el que se apoya el manto o el empotramiento de cada elemento que conforma el muro de escollera compactado.

El objetivo de esta solución consiste en realizar un manto de escollera en la zona del desprendimiento parcial en el P.K. 433+600 de la A-7 de dimensiones: 1,00 m de ancho, 400 m de largo y 14 m de alto. Consiguiendo dotar a la ladera de un coeficiente de seguridad, frente a la rotura global, mayor de 1,3 para obtener una estabilidad suficiente (Ilustración 13, Anejo I).

En este tramo de autovía se utiliza la construcción de mantos drenantes como la única medida de estabilización por excelencia, ya que pese a carecer de una función estructural, el manto de escollera tiene una función de revestimiento que impide que la meteorización de las margas, ocasionada por la lluvia y el viento, generen un desprendimiento. Asimismo, el peso que ejerce la escollera sobre el terreno contrarresta el gran poder de hinchamiento de la marga cuando esta se moja, de hasta unos 100 kPa, es por ello que un revestimiento ordinario, que es más ligero, como una mampostería o un muro vegetal acabarían rotos fruto del hinchamiento, como ocurre en la Figura 29.

### **ACTUACIONES PREVIAS**

Debido al colapso parcial del talud, el riesgo de que ocurra un deslizamiento en el tramo afectado aumenta exponencialmente a medida que el terreno margoso se vaya degradando como consecuencia de la meteorización. Un nuevo deslizamiento en la zona, que pueda llegar a invadir la plataforma viaria no permite el correcto funcionamiento de la infraestructura, al tiempo que también genera una sensación de inseguridad que puede ocasionar accidentes y alarma social por el estado de la ladera.

En primera instancia, los equipos de conservación de la autovía han de evaluar los daños ocasionados en el terraplén objeto de estudio. Seguidamente, se ha de hacer visible el peligro mediante la señalización con los elementos de balizamiento adecuados.

Tras haber realizado una primera evaluación de la situación y haber hecho visible el peligro para el resto de los usuarios que circulan por la A-7, se delimita un perímetro de seguridad para evitar posibles accidentes entre los usuarios fruto de nuevos desprendimientos de la ladera y para poder reparar el desprendimiento de la ladera.

Teniendo en cuenta que se trata de una autovía (A-7) de calzada con 2 carriles por sentido y mediana entre calzadas, se ha de balizar correctamente el desvío definitivo que reduce a la mitad la capacidad de la propia autovía en la calzada dirección Cocentaina, como se muestra en la Ilustración 71. Se ha de establecer un nuevo límite máximo de velocidad (80 km/h) con el fin de evitar accidentes por alcance o excesivos embotellamientos.

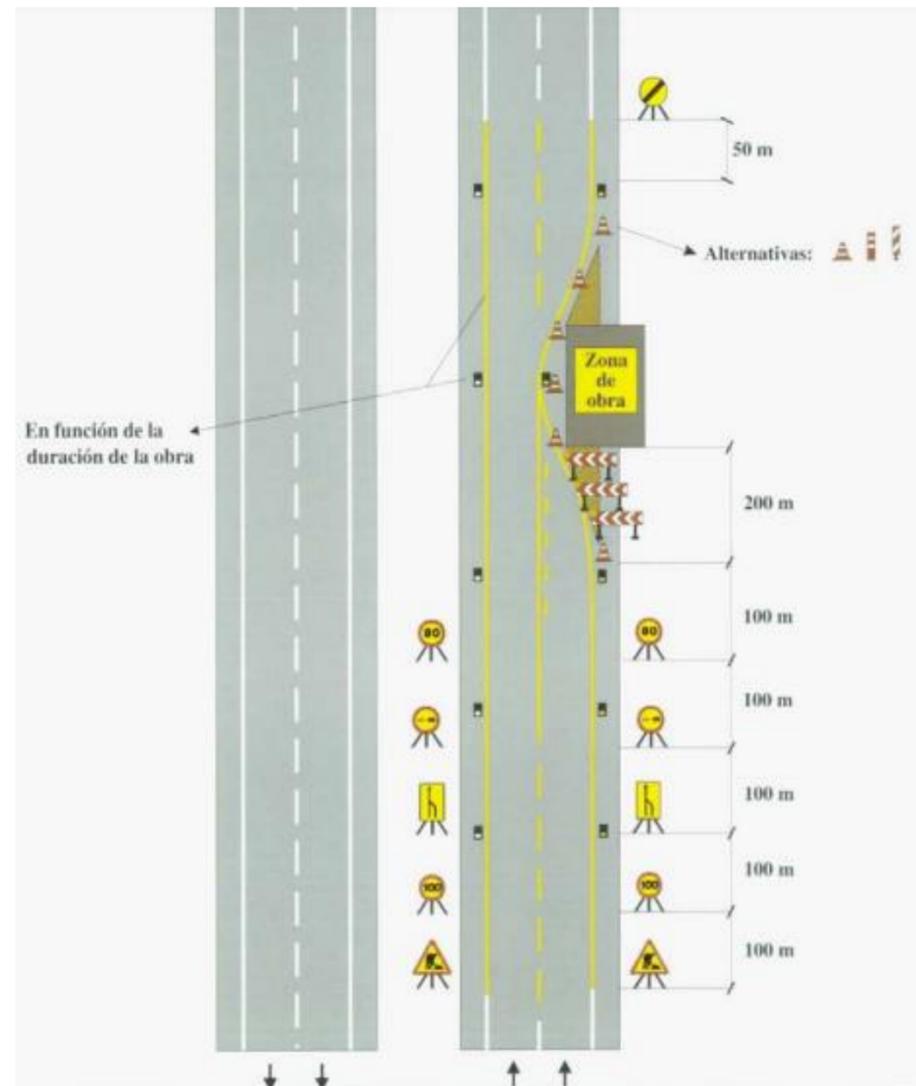


Figura 71 Señalización de obra fija Fuente: Manual de ejemplos de señalización de obras fijas (Dirección General de Carreteras).

Una vez se tenga asegurado el perímetro de actuación, como últimas fases de las actuaciones previas, se transporta la maquinaria necesaria, para la ejecución de la obra, a la zona objeto de estudio y se procede al desbroce del talud. Proceso en el que se retira el material orgánico del talud y se regula la superficie mediante la retirada de los materiales no deseados, como el geotextil existente o el material saliente fruto de la inestabilidad global.



Figura 72 Desbroce y regularización del terreno Fuente: Elaboración propia.

### CIMENTACIÓN

Una vez se tengan las condiciones adecuadas para comenzar con el proceso constructivo, se debe gestionar el transporte de la escollera mediante camiones bañera de 20 toneladas (en este caso) y un espacio apropiado para el almacenamiento de esta, sin que suponga un peligro para los usuarios, ni para el estado de la carretera.



Figura 73 Almacenamiento y descarga de la escollera Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se debe excavar la cimentación hasta la cota definida en proyecto, 1 m (superficie mínima recomendable), ejecutando una contrainclinación (3H:1V) que facilite la colocación del manto.

Posteriormente, para rigidizar el cimientado, se vierte material granular de menor tamaño y hormigón, especificado en proyecto, para eliminar los huecos entre bloques y así homogeneizar la cimentación, la cual ha de sobresalir 15-20 cm para garantizar la trabazón y un mejor contacto con el resto de las hiladas. Una vez colocada la primera hilada del cuerpo del muro, se procede a finalizar la construcción del cimientado, enrasando el intradós del muro, el cual no puede tener puntos bajos donde se acumule el agua, ya que sobre este se colocará un geotextil con material drenante para evitar la acumulación del agua.

### CUERPO

En todas las fases de la construcción del muro y en particular en la ejecución del cuerpo, se ha de contar con un operario auxiliar que asista al maquinista en la selección y colocación de cada bloque, así como en la materialización de la geometría del muro. Debido a la longitud del tramo afectado (P.K. 433+600 – 434+000) se utilizan 2 retroexcavadoras tipo Liebherr 904 sobre ruedas, por tanto, durante esta fase es necesario la presencia de dos operarios auxiliares que han de ir provistos de cinta métrica y escuadra con nivel para realizar adecuadamente su trabajo. Trabajo que deberá ser revisado periódicamente por medio de equipos topográficos.



Figura 74 Cimiento del manto de escollera Fuente: Elaboración propia.



Figura 75 Operario auxiliar y grúa Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que la gestión de estudiar la ubicación tanto de la maquinaria como del lugar donde se acopien las piedras de escollera es de gran importancia, ya que el operador ha de tener buena visibilidad de ambas áreas y realizar al mismo tiempo el mínimo número de movimientos que sea posible para la colocación esta.

El ciclo básico de colocación de un bloque de escollera en el cuerpo del muro se compone de las siguientes fases:

1. Colocación de la piedra dentro del cazo o captura de la misma con las pinzas.
2. Maniobra con la piedra cargada.
3. Descarga de la piedra sobre el paramento del muro.
4. Posicionamiento correcto de la piedra en el muro.
5. Regreso al acopio de piedras de escollera.

Además, las piedras de escollera que componen el manto se han de colocar con la contrainclinación ya comentada anteriormente en el punto del cimient y han de poseer un mismo huso granulométrico, es decir, una sección transversal similar, con el fin de reducir, en la medida de lo posible, los huecos entre las rocas, para asegurar una adecuada trabazón y estabilidad. Este proceso requiere de una gran experiencia por parte de lo operarios, ya que se ha de ir seleccionando específicamente cada bloque para conseguir el mayor contacto superior, inferior y lateral de cada elemento que compone el manto de escollera.



Figura 76 Evolución de los bataches a lo largo del tramo Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la Ilustración 76, debido a la gran altura del talud, 14 m, es necesario la construcción de bataches auxiliares que permitan el acceso a los puntos más altos de la coronación del manto, que se encuentra a 2/3 de la altura total del desmonte desde la base. Estas construcciones provisionales van ganando altura a medida que se van construyendo las filas y han de tener una anchura suficiente para que se pueda realizar el trabajo de apilado de forma segura, por tanto, también cabe tener en cuenta el transporte de tierras necesario para la construcción de esos bataches.

Una vez finalizado la construcción del manto, para aumentar la superficie de contacto y mejorar el rozamiento entre la superficie del terreno y la escollera, se reciben los bloques de escollera con material pétreo de la misma precedencia, pero con un menor tamaño, vigilando que no se produzcan movimientos en el muro y que ningún bloque apoye sobre el recebo.



Figura 77 Finalización del manto de escollera con recebado en la parte inferior Fuente: Elaboración propia.

Se acaba de rematar el trabajo con la limpieza de elementos no deseados en la calzada y se retira todo el equipo de maquinaria y del material sobrante, para poder poner la infraestructura al servicio de los usuarios, ofreciendo el 100% de su capacidad una vez retirado el balizamiento provisional por obras.

## CONTROL

Una vez finalizada la construcción, incluyendo las plantaciones en coronación de talud, se recomienda efectuar un seguimiento topográfico periódico, al menos de la coronación, para detectar posibles desplazamientos. Para ello, puede resultar adecuada la materialización de una superficie plana de hormigón, sobre la que ubicar las correspondientes referencias topográficas.

Se considera necesaria la auscultación, puesto que la situación de estabilidad puede resultar precaria, ya que la construcción del muro de escollera se emplea como modo de corrección del colapso por inestabilidad global de la ladera. Las medidas más comunes utilizadas en este tipo de control es la instalación de tuberías inclinométricas que también pueden utilizarse como piezómetros, situadas en el trasdós del muro o en la base de este.

## MAQUINARIA

Puede no parecerlo, pero la importancia del tipo de maquinaria se ve reflejada en la producción de la construcción del manto de escollera, porque de los tres factores fundamentales a tener en cuenta influye en gran medida la elección de la maquinaria. Los factores son:

1. Tamaño y forma de los bloques de escollera.
2. Potencia de la máquina y capacidad del cazo o pinza.
3. Duración del ciclo básico y habilidad del maquinista.

Generalmente, la máquina más adecuada para la ejecución de un manto de escollera es la excavadora de orugas con equipo retro-excavador con cuchara o pinzas. Las características del trabajo a realizar aconsejan el empleo de maquinaria sobre orugas con potencia mínima de ciento quince kilovatios (115 kW). Cuando utilicen pinzas y se trate de una excavadora sobre orugas, se considera más adecuado, debido a que de esta forma se facilita en gran medida la manipulación de cada bloque y también por la estabilidad que suponen las orugas.

Pese a estas recomendaciones, al tratarse de una obra con carácter de emergencia, uno de los condicionantes que más prima en la elección de la maquinaria es la disponibilidad total e inmediata para ser utilizada. En el caso objeto de estudio, se trata de dos retroexcavadoras de la casa comercial Liebherr sobre ruedas con cuchara y pinza para alternar los trabajos de movimiento de tierras y de colocación de la escollera, para las construcciones auxiliares de batches y para la construcción del manto respectivamente.

El modelo de las retroexcavadoras (Ilustración 78) es el Liebherr 914, cuya potencia es algo inferior a la recomendada anteriormente, pero cumple la función asignada:



Figura 78 Maquinaria utilizada en la obra de emergencia Fuente: Elaboración propia.

Existe un tipo de maquinaria que pasa desapercibida en este tipo de trabajo, sin la cual sería imposible realizar ninguna mejora del talud, son los camiones bañera, sin los cuales no se podría transportar el material necesario. Como ya se ha comentado, la capacidad de estos camiones especializados en mercancía pesada es de 20 m<sup>3</sup> y para poder calcular su rendimiento hay que tener en cuenta un factor determinante que es el tamaño y la forma de los bloques de escollera.

Es por ello, que los factores que más influyen en la producción del proyecto guardan una estrecha relación con la maquinaria utilizada.

## 11. PLAN DE OBRA

En esta última parte del trabajo se ha realizado un plan de trabajos en el que se muestran las acciones necesarias para ejecutar la solución recomendada. Para visualizar dicha planificación se ha utilizado la aplicación informática Microsoft Project y además, se ha estimado el coste de los trabajos llevados a cabo para conseguir la estabilización de la ladera en el tramo objeto de estudio que empieza en el P.K. 433+600 de la A-7 mediante un manto de escollera.

El objeto de este capítulo no es conseguir tener únicamente una aproximación del tiempo de duración de las obras y de la estructura en la que se organizan las distintas tareas y el orden de preferencia de las mismas, es decir, saber que tarea precede a otra y la holgura de las mismas en caso de que exista la posibilidad, sino que también se pretende establecer una valoración de forma genérica de la obra.

Para ello se han de distribuir las tareas más pequeñas en bloques más grandes, de los cuales se obtendrán las unidades de obra que componen el proyecto de emergencia para completar el plan de obra con una estimación económica.

A continuación, se definirá la distribución de todas las actividades a tener en cuenta durante el proceso constructivo, el cual se divide en 5 bloques principales:

1. Trabajos previos.
  - i. La **instalación de servicios** se compone de la señalización necesaria para inhabilitar la mitad de la calzada y delimitar la zona de carga y descarga y para transportar la maquinaria necesaria.
  - ii. **Desbroce** de la vegetación y de la geomalla existente.
2. Movimientos de tierra.
  - i. **Control de la estabilidad**, mediante ensayos de campo.
  - ii. **Excavación** del material suelto, para regularizar el talud y generar los bataches auxiliares y el transporte del material necesario para la construcción del manto de escollera.
3. Muro de escollera.
  - i. La **cimentación** se compone de varias actividades, entre las cuales cabe destacar el perfilado de la zanja de 1 m, la colocación de la escollera junto con el geotextil y, por último, el vertido de hormigón para rellenar los huecos del cimiento.

- ii. En la **ejecución del cuerpo** también se contemplan múltiples actividades: el relleno de material drenante en el intradós del muro sobre el hormigón de limpieza, la colocación de los bloques del manto y el vertido de material pétreo de menor tamaño para el recebo de las oquedades.
- iii. **Control de calidad** de los acabados y de relación agua cemento para el hormigón de limpieza.

### 4. Trabajos finales.

- i. **Limpieza de la zona**, en la que se incluye el material sobrante y las construcciones auxiliares realizadas para llevar a cabo el elemento de contención.
- ii. **Restauración del paisaje**, en el que se contempla la plantación de vegetación en coronación del talud.

### 5. Actividades complementarias.

- i. **Seguridad y salud**, en el que se controla a lo largo del proceso constructivo el uso de EPIs.
- ii. El cumplimiento del **impacto ambiental** (IA), donde se incluye la gestión de residuos, la visitas a la obra y las actividades de seguimiento.

Como puede observarse más detalladamente en el *Anejo III. Plan de trabajo*, las operaciones se inician el 26 de junio y finalizan el 04 de septiembre, durando así un total de 45 días. Este intervalo de tiempo se ha definido teniendo en cuenta la época del año que ofrezca una mejor ventana operativa, la cual se puede observar en la Figura 5 del *Capítulo 2*, ya que en los meses de julio y agosto las precipitaciones no son muy frecuentes.

Por último, cabe resaltar que el bloque que más tiempo ocupa, a excepción de las actividades complementarias, es el tercero, Muro de Escollera, ya que en este se ejecuta el manto de escollera. La excepción de no tener en cuenta el último bloque de la programación se debe a que la duración de las actividades que lo componen se lleva a cabo en el intervalo de tiempo que dura la obra.

## 12. VALORACIÓN DE LAS OBRAS

Para llevar a cabo la valoración económica de una obra, es necesario tener en cuenta los siguientes pasos:

1. Identificar y definir las unidades de obra que intervienen en la construcción del manto de escollera.
2. Realizar las medidas de cada unidad de obra.
3. Conocer el precio unitario de cada unidad.
4. Obtener el resultado del cociente entre la medida de la unidad de obra y su precio unitario.
5. Obtener el presupuesto de ejecución material (PEM).



El coste de las unidades de obra es una aproximación, ya que no queda reflejado en ningún documento debido a dos factores de gran relevancia:

- El proyecto de estabilización posee un carácter de emergencia, por tanto, se priorizan los plazos frente a una documentación precisa.
- Las medidas de campo tampoco son del todo exactas, ya que la cota del talud no es regular y por ello el manto que ha de adaptarse al terreno, tampoco lo es.

Las diferentes unidades de obras que se han establecido son:

1. Desbroce
2. Excavación
3. Manto de escollera
4. Medidas de protección de taludes.
5. Restauración del paisaje

En el *Anejo IV. Valoración de las obras* se muestra con mayor detalle la justificación del presupuesto de ejecución material, ya que en este anejo se divide en cuatro secciones diferentes (mediciones, precios de las unidades de obra, valoración y PEM) que muestran el proceso de medición y valoración de las actuaciones recomendadas.

**Presupuesto de Ejecución Material**

1	DESBROCE	8.400,00 €	
2	EXCAVACIÓN	133.200,00 €	
3	MANTO DE ESCOLLERA	638.880,00 €	
4	MEDIDAS DE PROTECCIÓN DE TALUDES	160.188,00 €	
5	RESTAURACIÓN DE PAISAJE	1.900,00 €	
	TOTAL	942568,00 €	
	<b>3% SEGURIDAD Y SALUD</b>	28.277,04 €	
	<b>2% GESTIÓN DE RESIDUOS</b>	18.851,36 €	18.851,36 €
	<b>TOTAL, PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL:</b>	989.696,45 €	989.696.40 €

**NOVECIENTOS OCHENTA Y NUEVE MIL  
SEISCIENTOS NOVENTA Y SEIS  
EUROS CON CUARENTA CÉNTIMOS**

Un último detalle que es necesario tener en cuenta en la elaboración del PEM es el sobrecosto, en un 3%, de las actividades complementarias del proyecto con: la gestión de residuos y la seguridad y salud de la obra. Con todo ello se obtiene una aproximación del Presupuesto Base de Licitación.

**Presupuesto Base de Licitación**

PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL (PEM)	989.696,45 €
16% GASTOS GENERALES (s/PEM)	158.351,43 €
6% BENEFICIO INDUSTRIAL (s/PEM)	59.381,79 €
<b>TOTAL</b>	<b>1.207.429,67 €</b>
I.V.A.: 21% (s/PEM+GG+BI)	253.560,23 €
<b>TOTAL</b>	<b>1.460.989,90€</b>

Asciende el **Presupuesto Base de Licitación** a la expresada cantidad de UN MILLÓN CUATROCIENTOS SESNTA MIL NOVECIENTOS OCHENTA Y NUEVE EUROS CON NOVENTA CÉNTIMOS (1.460.989,90 €).

### 13. RESUMEN Y CONCLUSIONES

A modo de conclusión, el último apartado del Trabajo Final de Grado pretende resumir de forma escueta y clarificadora la problemática de la zona justificando junto con la solución adoptada.

En el P.K. 433+600 de la autovía A-7, en el término municipal de Muro de Alcoy, en Alicante se encuentra el inicio del tramo afectado por la inestabilidad global de la ladera. Falta de estabilidad que produce una afección parcial en la capacidad de la infraestructura viaria en el sentido Valencia-Alicante, debido al desprendimiento ocasionado en marzo de 2017 debido a las intensas lluvias durante el invierno y a principio de año,

En primer lugar, se lleva a cabo una búsqueda exhaustiva de información sobre las características y condiciones de contorno de la ladera objeto de estudio para tener una idea básica de la zona, recogidas en los *Capítulos 2 y 3*. A continuación, se realiza una visita de campo donde se observan soluciones adoptadas para la estabilización de zonas cercanas al tramo en estudio en esta misma autovía. Gracias a la visita se obtiene la información y conclusiones recogidas en el *Capítulo 4* y se extrae una muestra representativa del terreno para su posterior análisis en laboratorio, para una mayor veracidad en el contraste de información al respecto de la estabilidad del desmonte y de la información teórica obtenida en las hojas IGME y en Anejo Geotécnico del Proyecto Construcción del Corredor (*Capítulo 5*).

Tras analizar los resultados obtenidos de los diferentes ensayos realizados en el laboratorio, se procede al estudio de la estabilidad de la ladera, mediante una revisión teórica previa haciendo uso del método de rebanadas (criterio de Bishop simplificado, el Janbu simplificado y el Método de Morgenstern & Price), donde se concluye que la forma de inestabilidad más probable es por deslizamiento rotacional puesto que en todo el tramo en estudio, los desmontes están excavados en un terreno conocido como margas del TAP y este es un material de tránsito entre un suelo y una roca. En este tipo de materiales los factores claves en la estabilidad de los desmontes son: la presencia de nivel freático y la erosión del terreno.

El análisis de estabilidad explicado en el *Capítulo 6* se realiza mediante la herramienta informática *Slide2* de la casa comercial Rocscience y en esta aplicación informática se programan ambas geometrías: la inicial del proyecto construcción y la actual tras las obras de emergencia. Geometrías para las cuales se consideran las situaciones de corto y largo plazo para obtener los diferentes coeficientes de seguridad, que solo dan valores inferiores al mínimo permitido por normativa (1,3 en taludes que no son de nueva construcción) cuando las características de la cohesión

y del ángulo de rozamiento se ven influidas. De este modo se determina llevar a cabo un estudio de diferentes soluciones, con objeto de cerciorarse de que la solución adoptada es la correcta.

En el *Capítulo 7* se describen y plantean varias soluciones para la estabilización del tramo objeto de estudio, de las cuales algunas se descartan con criterio técnico y las restantes se resumen en 4 posibles soluciones diferentes que mediante el Proceso Analítico Jerárquico utilizado para el análisis multicriterio se demuestra que la alternativa realizada es la más correcta y óptima. Cabe destacar que en este proceso de análisis se saca en primer lugar, la influencia de cada criterio (siendo la variable del impacto ambiental la más relevante) y seguidamente la posición de las diferentes alternativas para cada uno de los criterios, para realizar finalmente el cociente de los pesos de las alternativas y los pesos de las variables. Además, para corroborar la veracidad del resultado se lleva a cabo un análisis de sensibilidad que corrobora que la solución del manto de escollera es la más adecuada, seguida por el muro de mampostería.

De las cuatro alternativas estudiadas, las dos más destacables son el muro de mampostería y el manto de escollera, siendo esta última la opción más eficiente y cuyo comportamiento se ve reflejado en el *Anejo I*, donde se incluyen todas las simulaciones de esta medida de estabilización llevada a cabo en la obra de emergencia. La cual, como se detalla en el *Capítulo 10* consta de un murete de escollera sobre el que apoya el manto de este mismo material que no tiene función estructural sino de revestimiento, la cual evita, de forma considerable la meteorización del terreno que lo degrada hasta desestabilizarlo. Antes de entrar en el detalle del proceso constructivo del antepenúltimo apartado detalla la restauración del paisaje afectado por el movimiento de tierras en el *Capítulo 9*, donde se determina la integración paisajística de la ladera, ya que se encuentra en una zona de gran exposición debido al flujo constante de usuarios que transitan la A-7.

Por último, en el *Capítulo 11 y 12* de este trabajo, también se realiza una medición y valoración aproximada de las obras, con el fin de obtener una aproximación del Presupuesto de Ejecución Material.

Finalmente, se alcanzan las siguientes conclusiones:

- Analizando la estabilidad de la ladera mediante la teoría de dovelas (conocida también por rebanadas) y haciendo uso de la aplicación informática *Slide2*, se han hecho visibles los problemas de seguridad del talud, siendo necesario llevar a cabo tareas de mantenimiento.
- La ejecución del manto de escollera en la obra de emergencia se integra en el paisaje de forma adecuada y, además, se ajusta económicamente. Hecho que se constata en el estado íntegro de la medida de estabilidad y en su reiterado uso a lo largo de zonas que poseen una problemática similar en ese tramo de la A-7.

- Se recomienda una revisión a fondo en el tramo afectado para llevar a cabo la limpieza y reparación de algunos elementos existentes en el desmonte. Algunas de las actuaciones recomendadas son: la limpieza de escombros de las ODT y su reparación y la retirada de mallas de hidrosiembra que no han cumplido su función.
- Los ensayos de laboratorio dan una mejor explicación al comportamiento del terreno existente, aclarando que el tamaño de las partículas que lo componen supone que en condiciones de precipitaciones intensas es inestable, llegándose a alterar algunos de los parámetros más relevantes del suelo.
- La solución actual de la obra de estabilización logra que la ladera sea estable a corto y largo plazo a excepción de ciertas situaciones muy desfavorables, cuyo riesgo es muy reducido.
- Mediante el análisis multicriterio se obtenido un peso considerable en la alternativa ejecutada, por la tanto, se ha decidido estudiar en mayor profundidad el comportamiento de la estabilidad en diferentes situaciones.
- El manto de escollera tiene una función de revestimiento que impide que la meteorización de las margas, ocasionada por la lluvia y el viento. Asimismo, el peso de la misma contrarresta el gran poder de hinchamiento ( $\approx 100$  kPa) de la marga cuando esta se moja, por tanto, un revestimiento ordinario más ligero, como una mampostería o un muro vegetal acabaría roto fruto del hinchamiento,
- La valoración económica de esta solución obtiene un presupuesto de ejecución material (PEM) de 942.568,00€ a lo cual se le suma un estudio de tráfico que ha permitido concluir la leve afección al tráfico reduciendo el nivel de servicio de la infraestructura viaria.

Antes de finalizar el trabajo fin de grado y de concluir con que la solución ejecutada en la obra de emergencia es la óptima, como futuro técnico y profesional, creo que es necesario pararse a reflexionar si este incidente, que afortunadamente no generó consecuencias importantes, se podría haber evitado realizando un correcto análisis geotécnico en fase de proyecto.

A primera vista, el gran número de ensayos realizados en el anejo geotécnico del *Proyecto de Autovía del mediterráneo* contradicen esta hipótesis, no obstante, durante la propia fase de construcción, se produjeron ya ciertos deslizamientos en el inicio del talud objeto de estudio y por ello se tuvo que construir un muro de escollera con una longitud de 30 m, no contemplado en el diseño del proyecto, para que contuviese las tierras desde el PP.KK. 433+570 al 433+600 (margen derecho, Figura 34).

A falta de finalizar la obra y para no incurrir en un mayor coste, debido a las actuaciones no contempladas en proyecto, se pudo pensar que lo ocurrido era irrelevante, sin embargo, la causalidad (relación entre causa y efecto) del deslizamiento demostraba la escasez de un adecuado reconocimiento geotécnico del talud objeto de estudio de 13 m de altura, que con el tiempo se ha traducido en un sobrecoste al tener que estabilizar el talud mediante una obra

de emergencia. Esta escasez de reconocimientos geotécnicos en los proyectos, la cual ya es advertida por parte de los docentes al alumnado del grado de ingeniería civil, es muy común y puede llegar a causar consecuencias importantes. Afortunadamente, en este caso las consecuencias socioeconómicas han sido leves, pero en otros casos se pueden producir externalidades importantes e incluso llegando a lamentar víctimas mortales.

Como dijo San José María: “Hay que hacer un trabajo bien hecho, no hay que hacer chapuzas... Si quieren mucho a una mujer, no le ofrecen algo que no valga nada; le ofrecen algo que cuesta un sacrificio. Pues a Dios le debemos ofrecer nuestro trabajo, y se lo debemos ofrecer bien hecho”.

Para concluir el Trabajo Fin de Grado, cabe resalta el cumplimiento de los objetivos establecidos al principio del documento, ya que se ha analizado de forma exhaustiva la evolución y el comportamiento de la medida de estabilización comparándola con posibles alternativas eficientes, consiguiendo un estudio de la afección socioeconómica generado por el desprendimiento.

Valencia, Junio 2023



Escribano Peralta, Sergio



## ANEJOS

ANEJO I. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES .....	67
ANEJO II. PLANOS.....	95
ANEJO III. PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO .....	99
ANEJO IV. PLAN DE TRABAJO .....	103
ANEJO V. VALORACIÓN DE LAS OBRAS .....	105



## ANEJO I. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

## Introducción

En el presente anejo se procede a estudiar la estabilidad de la ladera, para lo cual se emplea la herramienta informática Slide 2 de Rocscience.

Mediante esta aplicación se comprueba la estabilidad del talud antes y después de la rotura y en condiciones normales, es decir, sin presencia de agua y condiciones desfavorables, fruto de episodios de lluvia intensa. Esto permite estimar la causa última del colapso parcial que se produjo en el desmonte: meteorización, hinchamiento o cargas inesperadas en las proximidades de la coronación. Además, este software va a permitir comprobar los efectos estabilizadores del manto de escollera construido en la obra de emergencia y avalar los resultados obtenidos en el laboratorio.

A continuación, se va a detallar el procedimiento seguido para llevar a cabo un completo análisis de estabilidad de la ladera, detallando el motivo por el cual se realiza cada análisis y como se ha solucionado los diferentes problemas que surgen a medida que se ejecutan los cambios, tanto en geometría, como en la incorporación de agua.

Por último, es necesario resaltar que para el análisis se utiliza el Manual de taludes del IGME, el cual toma como coeficiente de seguridad mínimo 1,5 para la estabilidad de taludes, pese a que todo coeficiente de seguridad mayor que 1 asegura cierta estabilidad.

## Herramienta informática, Slide 2

La aplicación *Slide*, es el programa informático de aplicación numérica (elementos finitos) utilizado en este estudio.

Gracias a este software, se puede analizar la estabilidad de superficies de rotura mediante métodos de equilibrio límite basándose en el procedimiento de dovelas verticales.

*Slide 2* puede trabajar la estabilidad de taludes con superficies de rotura circulares y no-circulares. Además, con el objeto de analizar la seguridad del desmonte, se toman una gran cantidad de superficies de rotura posibles para determinar la superficie de rotura crítica, es decir, aquella que proporcione un factor de seguridad más bajo.

## Rotura global

Como ya se ha comentado en el Capítulo 6. Estabilidad global de la ladera, se pretende analizar las diferentes situaciones producidas en la infraestructura a lo largo de su vida útil desde las competencias del suelo a largo y a corto plazo, con el objeto de advertir la opción más crítica entre ambas situaciones:

### LARGO PLAZO

El criterio de rotura de Mohr-Coulomb del suelo a largo plazo se expresa originalmente de la siguiente forma:

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \operatorname{tg}\emptyset \quad (1)$$

Siendo

$\tau$ : tensión tangencial máxima o de corte máximo (rotura).

$c$ : cohesión.

$\sigma_n$ : tensión normal correspondiente al plano de rotura.

$\emptyset$ : ángulo de rozamiento interno del terreno.

No obstante, el comportamiento mecánico del suelo depende exclusivamente de las tensiones efectivas por lo que la fórmula tuvo que ser readaptada considerando la Ley de Terzaghi o de presiones efectivas, adquiriendo la siguiente forma:

$$\tau' = c' + \sigma'_n \cdot \operatorname{tg}\emptyset' \quad (2)$$

Siendo

$\tau'$ : tensión tangencial máxima o de corte máxima efectiva (rotura).

$c'$ : cohesión efectiva.

$\sigma'_n$ : tensión normal efectiva correspondiente al plano de rotura.

$\emptyset'$ : ángulo de rozamiento interno efectivo del terreno.

Es necesario aclarar que el ángulo de rozamiento interno del terreno ( $\emptyset$ ) corresponde a la resistencia proporcionada principalmente por los elementos granulares (arenas y gravas) y la cohesión ( $c$ ) se refiere a la resistencia por interacciones químicas (enlaces químicos y fuerzas de atracción electrostáticas).

### CORTO PLAZO

En condiciones no drenadas o de corto plazo el cálculo se simplifica, ya que solo se ha de tomar momentos de las fuerzas implicadas respecto del centro del círculo de deslizamiento para obtener la resultante de tensiones tangenciales movilizadas:

$$R_m = \int_0^L S_m \cdot dl \quad (3)$$

Siendo

$R_m$ : resultante de tensiones tangenciales.

$S_m$ : resistencia al corte movilizado.

$dl$ : diferencial de longitud del arco, considerado como vector.

$$S_m = \frac{S_u}{F} \quad (4)$$

Siendo

$S_u$ : resistencia a corte sin drenaje del suelo.

$F$ : coeficiente de seguridad.

$$F = - \frac{R}{M_W + M_A} \cdot S_u \cdot L_a \quad (5)$$

Siendo

$M_A$ : sumatorio de momentos de las acciones externas.

$M_W$ : sumatorio de momentos del peso.

$R$ : radio del círculo de deslizamiento

$L_a$ : longitud del arco AB

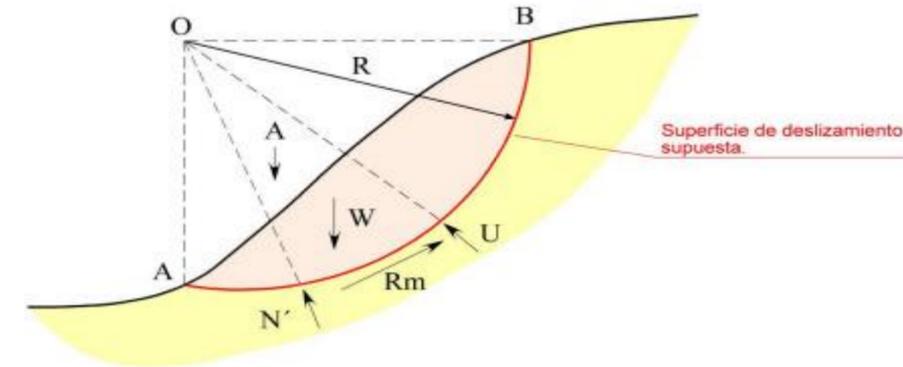


Figura 1 Fuerzas actuantes en una superficie circular de deslizamiento Fuente: Slide 2

### PROCEDIMIENTO

Primeramente, en la opción Project Settings se seleccionan las unidades con las que se va a trabajar, en este caso, solo es necesario indicar que se va a utilizar las unidades propias del Sistema Internacional y se define como se quiere que el programa estudie la rotura, de izquierda a derecha, según la orientación del desmonte. Esto se encuentra en el menú principal, (Figura 1) “Análisis” → “Project Settings” → “General”.

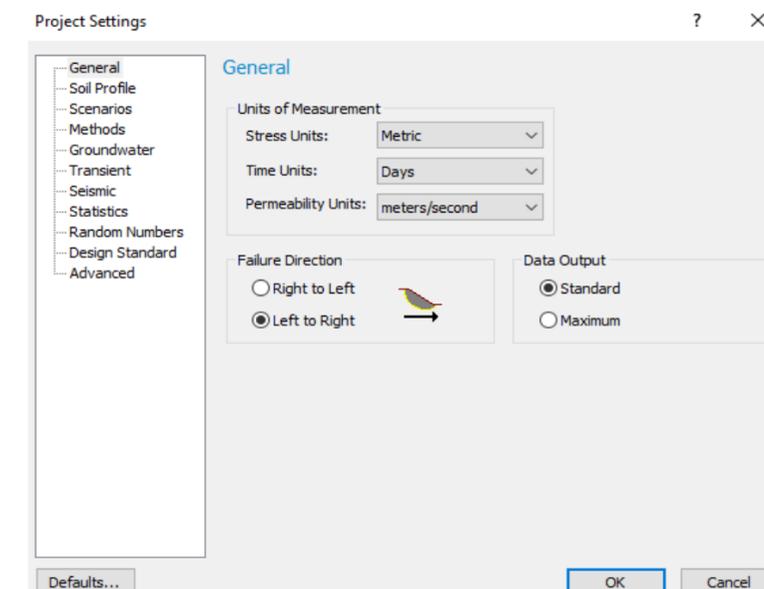


Figura 2 Ventana para la configuración inicial Fuente: Slide 2

Seguidamente, dentro de las múltiples funciones de “Project Settings” → “Methods” se establecen los métodos de cálculo que se deseen ejecutar en las diferentes situaciones. En este estudio se aplican los siguientes criterios: Bishop simplificado, Janbu simplificado y el Método de Morgenstern & Price.

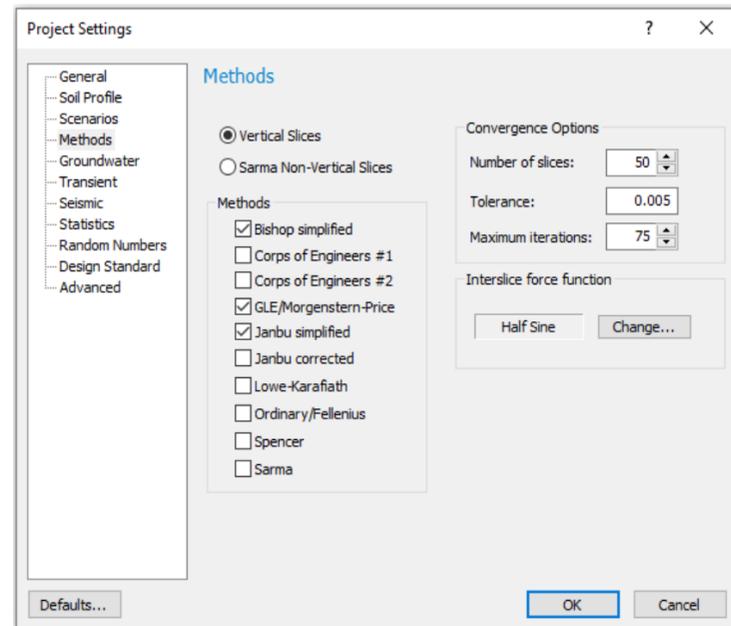


Figura 3 Elección de los métodos de rebanadas que se usan Fuente: Slide 2

Tras definir esto se introduce en la aplicación el perfil del terreno mediante coordenadas (x, y). Perfil que ha de formar un polígono cerrado para después poder definir todos los estratos existentes del terreno con sus respectivas características.

También se decide colocar una sobrecarga sobre la coronación del talud, simulando así la carga que transmite el tráfico, esta sobrecarga no se tiene en cuenta en todos los análisis de estabilidad de la ladera, con objeto de contrastar la situación más desfavorable y próxima a la realidad. Esta carga se añade accediendo a “Loading” → “Add Distributed Load”. Hay que destacar que, al tratarse de una vía de servicio, no es tramo muy transitado por vehículos.

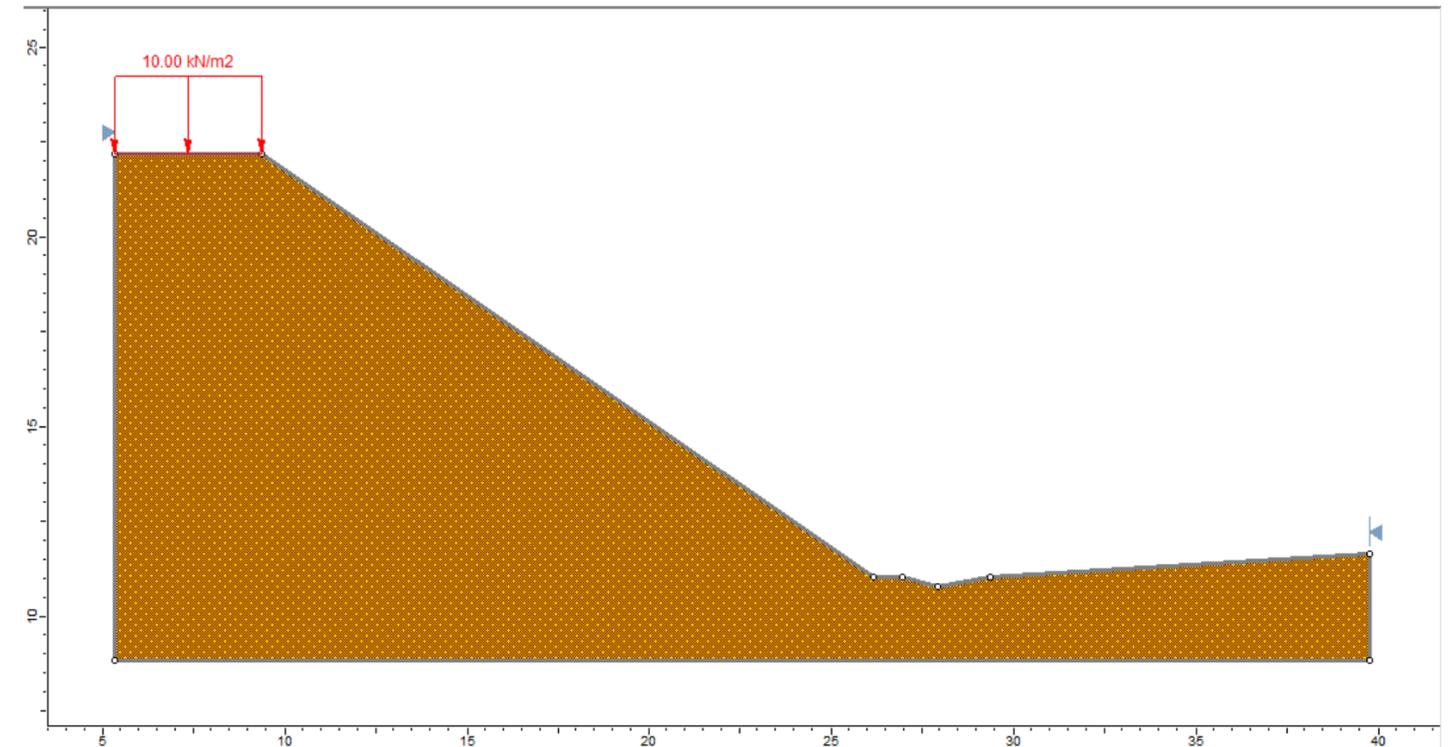


Figura 4 Perfil de la ladera objeto de estudio Fuente: Slide 2

Una vez tomados los datos de la campaña de campo y contrastados con la información ya existente en el Anejo Geotécnico del Proyecto del corredor, se ha precisado un único estrato de margas. Estrato que mediante datos contrastados se define introduciendo los siguientes valores obtenidos en el Proyecto Constructivo del Corredor Mediterráneo: la cohesión, el ángulo de rozamiento y el peso específico.

Para poder contrastar las diferentes situaciones producidas se aplica la existencia de nivel freático para simular el estado del talud frente a grandes precipitaciones y para comparar las situaciones de corto y largo plazo y visualizar su evolución en los diferentes escenarios existentes, también se obtiene el valor de la resistencia a compresión simple. Valor obtenido del Anejo Geotécnico del Proyecto Constructivo del Corredor Mediterráneo,  $R_u = 3.67 \text{ Kp/cm}^2$ , que es equivalente a  $R_u = 360 \text{ kPa}$ . Para finalizar se ha de programar el criterio de rotura específico para la situación de corto plazo “Undrained (Phi = 0)” y completar el parámetro necesario, que es la cohesión (igual a la mitad de la  $R_u$ ).

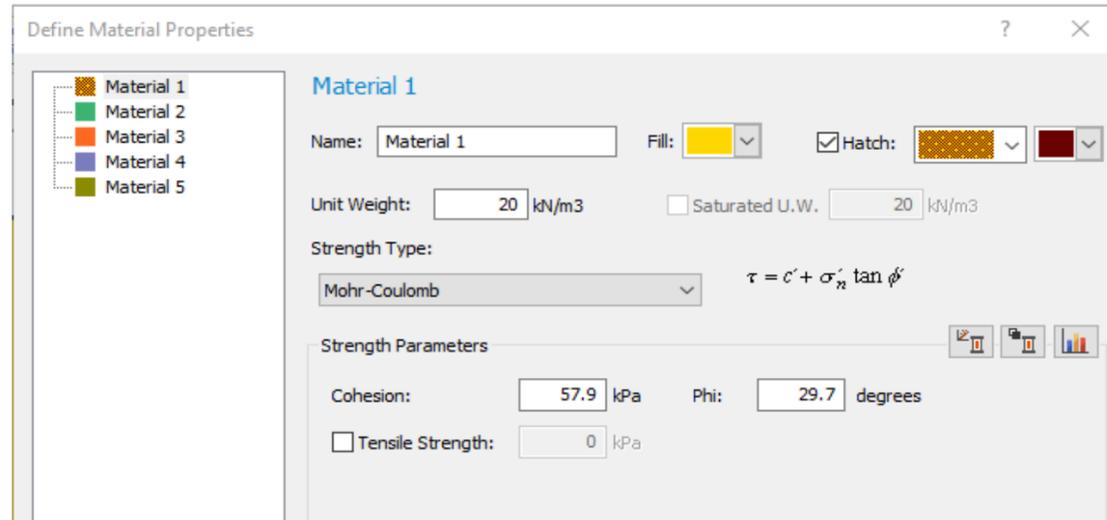


Figura 5 Caracterización del suelo en situación de largo plazo Fuente: Slide 2.

Finalmente, se utilizará la herramienta de calcular, mediante la cual el programa iterará los posibles planos de rotura y adoptando círculos de corte en el terreno discretizará el terreno mediante rebanadas, con el fin de realizar un sumatorio de acciones. Consiguiendo así varios factores de seguridad y tomando como referencia la rebanada cuyo coeficiente sea el mínimo, es decir, el más desfavorable.

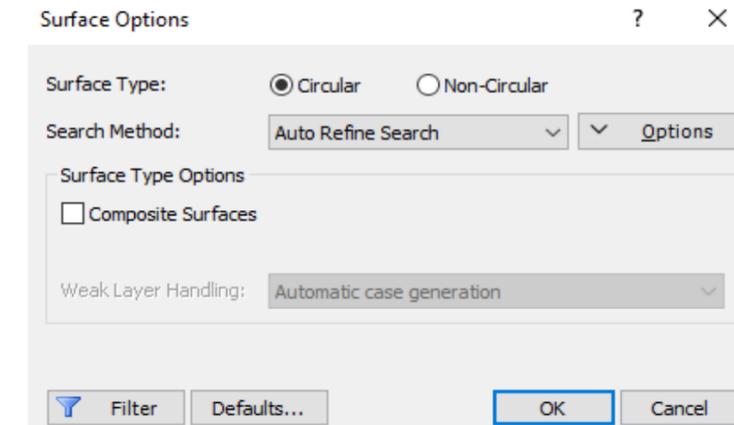


Figura 7 Tipología de rotura del terreno Fuente: Slide 2

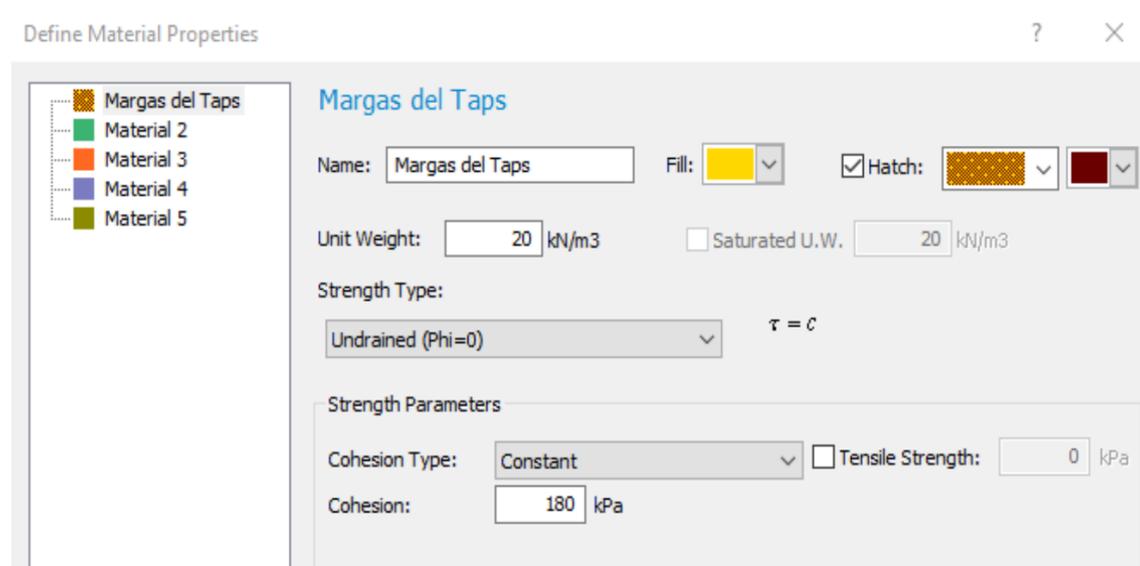


Figura 6 Caracterización del suelo en situación de corto plazo Fuente: Slide 2

Cabe destacar que para una mejor visualización de los datos se aplicará: un filtro, a través del cual se podrán observar las soluciones existentes a partir de un valor concreto (factor de seguridad 1.5) y varias tablas que mostrarán las propiedades de los materiales y los diferentes valores mínimos que obtendrán de los diferentes métodos de cálculo.

Este proceso se llevará a cabo con las diferentes situaciones comentadas anteriormente, para comprobar el comportamiento de la ladera en distintas simulaciones, que se realizan con la aplicación informática Slide 2:

1. TALUD INICIAL SIN PRESENCIA DE AGUA.
2. TALUD INICIAL CON PRESENCIA DE AGUA.
3. TALUD INESTABLE CON PRESENCIA DE AGUA.
  - a. TALUD INESTABLE CON PRESENCIA DE AGUA Y SIN CARGA EN CORONACIÓN.
4. TALUD REFORZADO CON MURO DE ESCOLLERA SIN PRESENCIA DE AGUA.
5. TALUD REFORZADO CON MURO DE ESCOLLERA CON PRESENCIA DE AGUA.
6. TALUD INESTABLE REFORZADO CON MURO DE ESCOLLERA CON PRESENCIA DE AGUA.
  - a. TALUD INESTABLE REFORZADO CON MURO DE ESCOLLERA CON PRESENCIA DE AGUA Y SIN CARGA EN CORONACIÓN.

**LARGO PLAZO**

➤ SITUACIÓN 1 → TALUD INICIAL

- Margas.
  - Peso específico = 20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Peso específico saturado = 20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 57,9 kPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 29, 7°.
  - Sin presencia de nivel freático.

El resultado obtenido aplicando el criterio de rotura de Mohr-Coulomb es el siguiente:

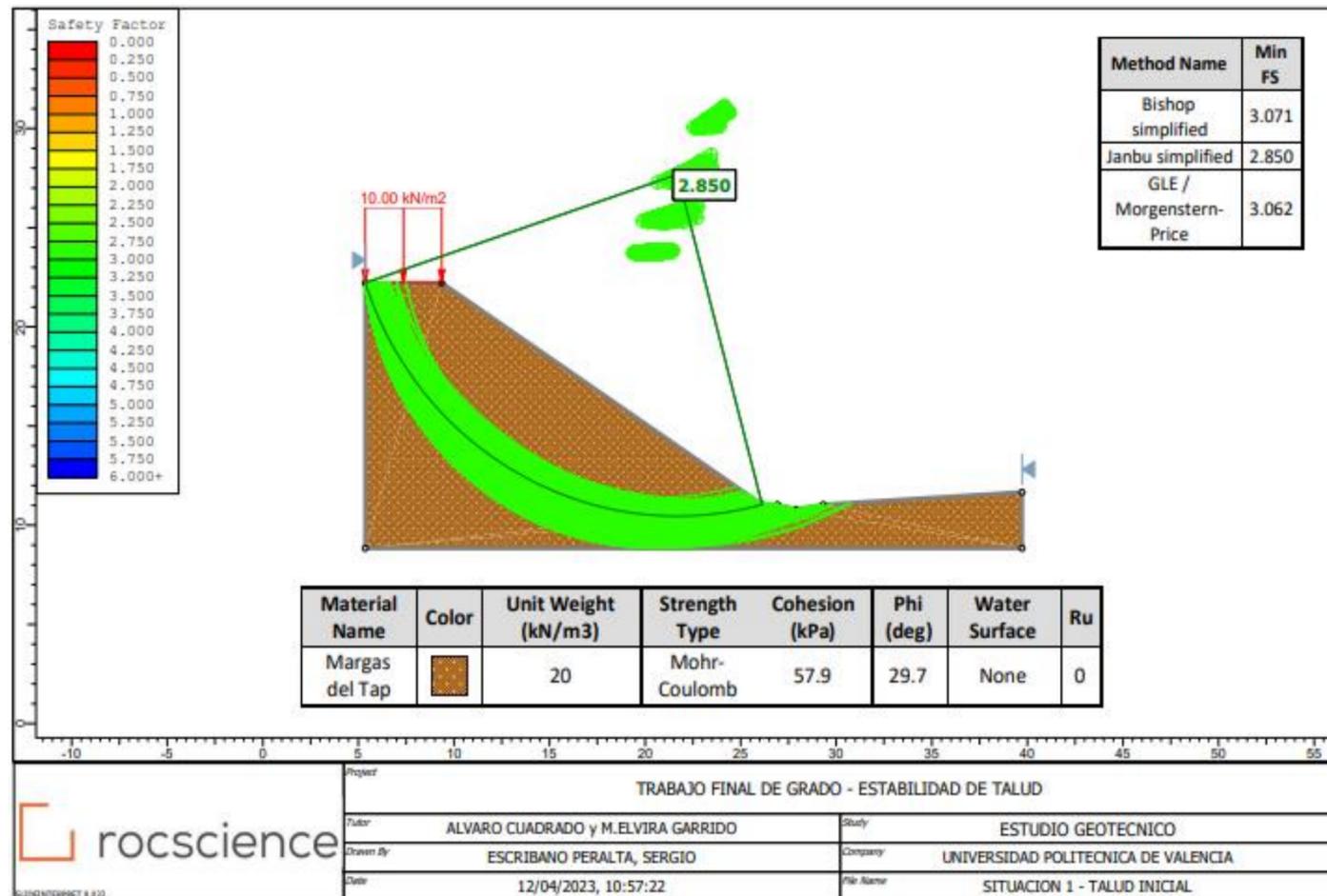


Figura 8 Situación inicial Fuente: Slide 2.

➤ SITUACIÓN 2 → TALUD INICIAL + NF

- Margas.
  - Peso específico = 20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Peso específico saturado = 20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 57,9 kPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 29, 7°.
  - Con presencia de nivel freático en la superficie del suelo.

El resultado obtenido cuando el talud objeto de estudio se encuentra sometido a un periodo intenso de fuertes precipitaciones es el siguiente:

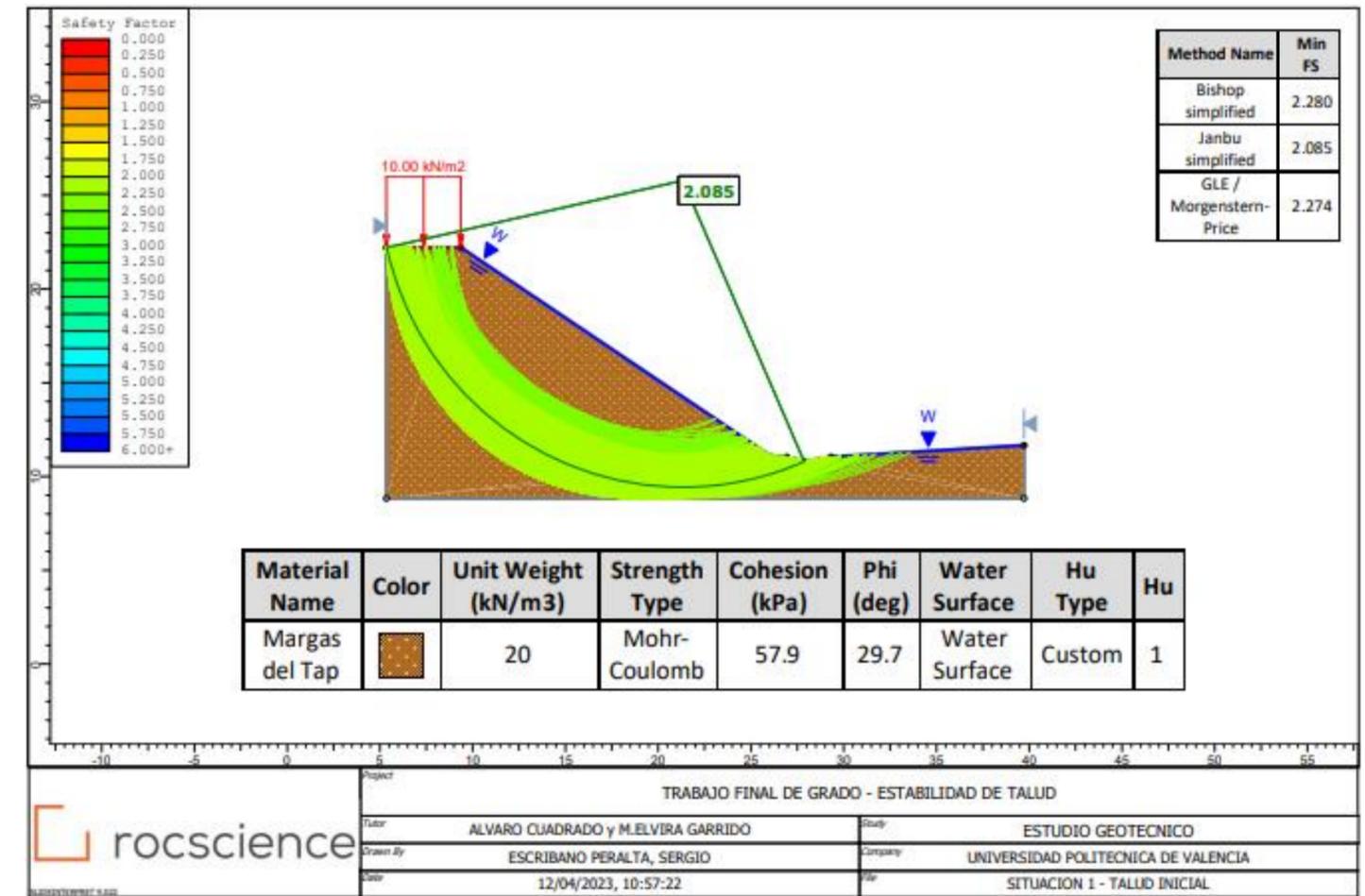


Figura 9 Situación inicial más existencia de nivel freático Fuente: Slide 2.

➤ SITUACIÓN 3 → TALUD INESTABLE + NF

• Margas.

- Peso específico = 20 kN/m<sup>3</sup>.
- Peso específico saturado = 20 kN/m<sup>3</sup>.
- Cohesión = 8 kPa.
- Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 29.7°.
- Con presencia de nivel freático en la superficie del suelo.

Fruto de las fuertes lluvias se produce en el terreno margoso una alteración de las propiedades del suelo, disminuyendo de forma considerable su cohesión efectiva, el resultado es el siguiente:

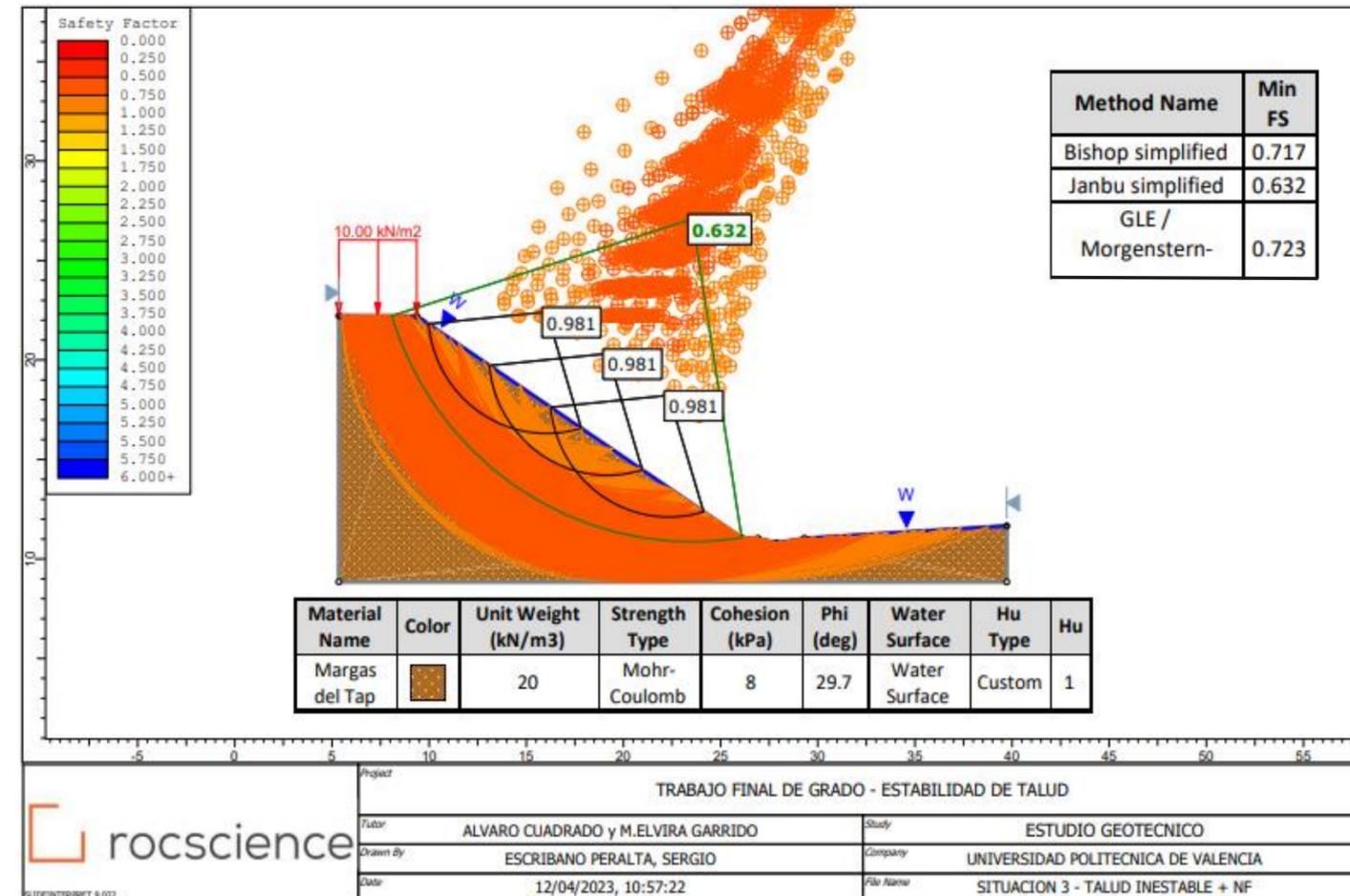


Figura 10 Situación de inestabilidad más existencia de nivel freático Fuente: Slide 2.

➤ SITUACIÓN 3' → TALUD INESTABLE + NF - CARGA EN CORONACIÓN

• Margas.

- Peso específico = 20 kN/m<sup>3</sup>.
- Peso específico saturado = 20 kN/m<sup>3</sup>.
- Cohesión = 8 kPa.
- Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 29.7°.
- Con presencia de nivel freático en la superficie del suelo.

Para comprobar la reacción del terreno con la misma situación anterior de inestabilidad, pero sin la carga de 10 kN/m<sup>2</sup> en coronación del talud.

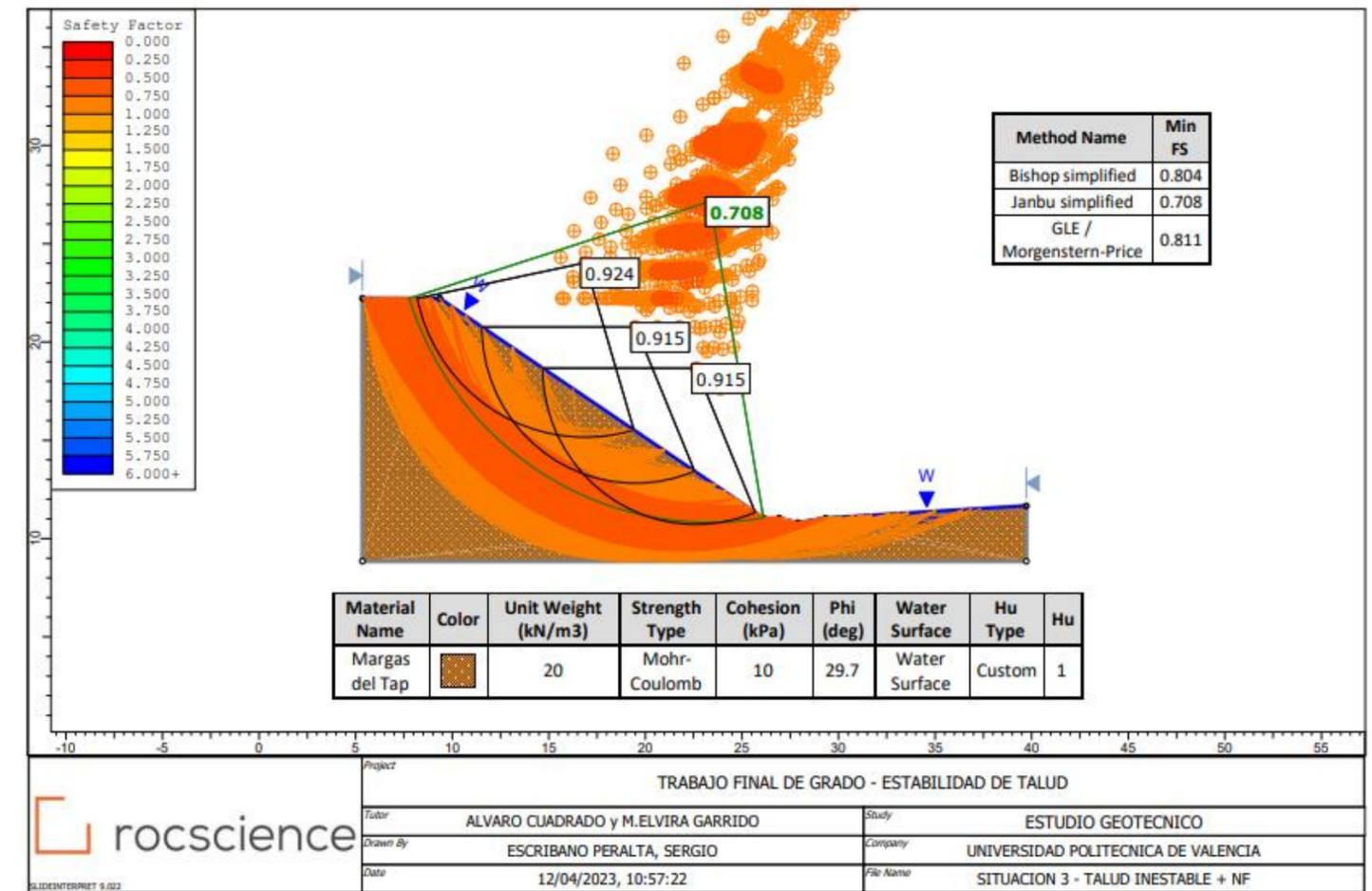


Figura 11 Situación 3 sin la existencia de la carga en coronación del talud Fuente: Slide 2.

➤ SITUACIÓN 4 → TALUD + MURO DE ESCOLLERA

- Margas.
  - Peso específico = 20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Peso específico saturado = 20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 57,9 kPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 29, 7°.
  - Sin presencia de nivel freático.
- Escollera.
  - Peso específico = 24 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 200 KPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 45°.

➤ SITUACIÓN 5 → TALUD + MURO DE ESCOLLERA + NF

- Margas.
  - Peso específico = 20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Peso específico saturado = 20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 57,9 kPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 29, 7°.
  - Con presencia de nivel freático.
- Escollera.
  - Peso específico = 24 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 200 KPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 45°.

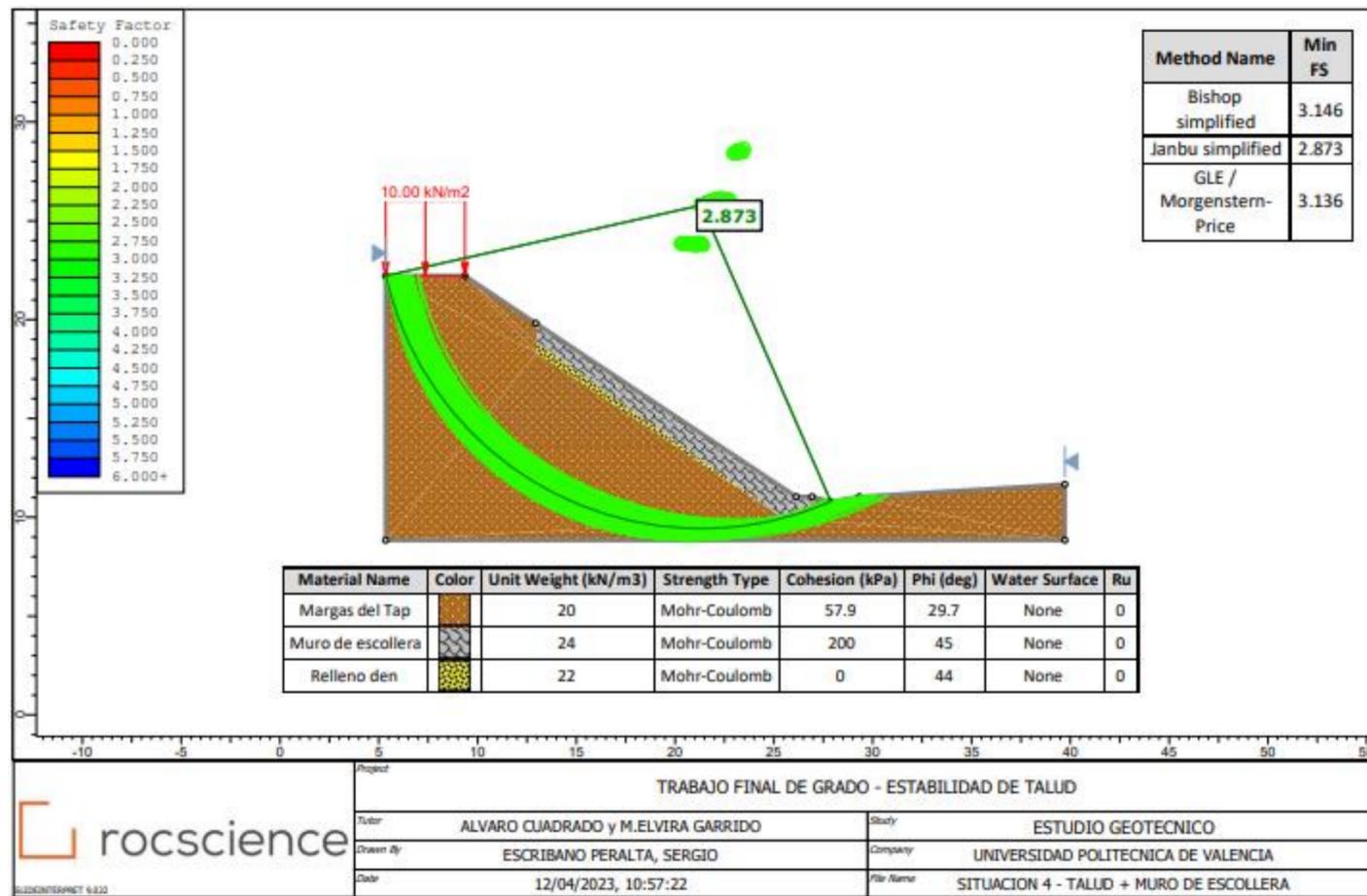


Figura 12 Situación de mejora del terreno sin existencia de nivel freático Fuente: Slide 2.

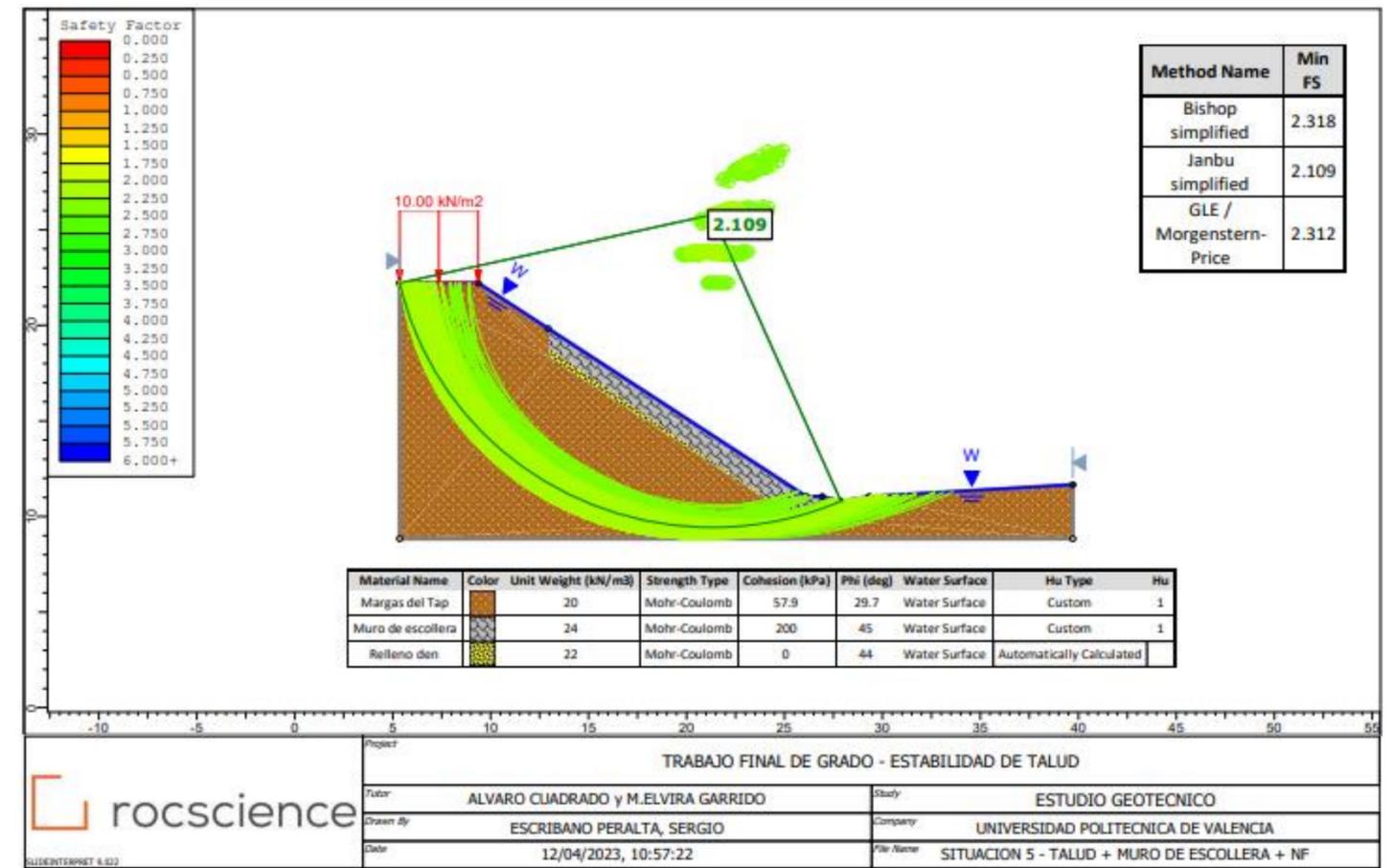


Figura 13 Situación de mejora del terreno con existencia de nivel freático Fuente: Slide 2.

➤ SITUACIÓN 6 → TALUD INESTABLE + MURO DE ESCOLLERA + NF

- Margas.
  - Peso específico = 20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Peso específico saturado = 20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 8 kPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 29,7°.
  - Con presencia de nivel freático.
- Escollera.
  - Peso específico = 24 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 200 KPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 45°.

➤ SITUACIÓN 6' → TALUD INESTABLE + MURO DE ESCOLLERA + NF - CARGA EN CORONACIÓN

- Margas.
  - Peso específico = 20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Peso específico saturado = 20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 8 kPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 29,7°.
  - Con presencia de nivel freático.
- Escollera.
  - Peso específico = 24 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 200 KPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 45°.

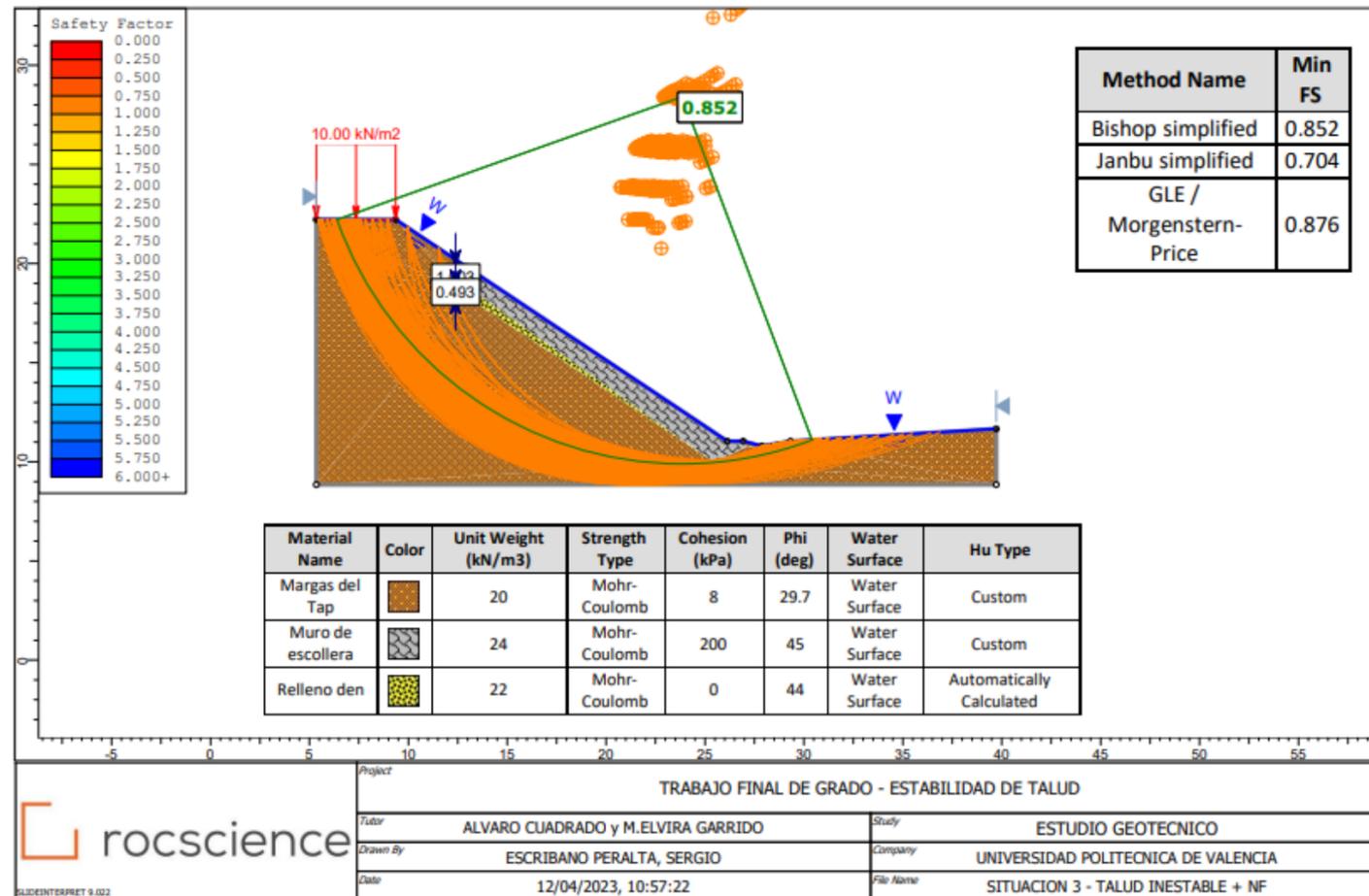


Figura 14 Situación de mejora del terreno inestable con existencia de nivel freático Fuente: Slide 2.

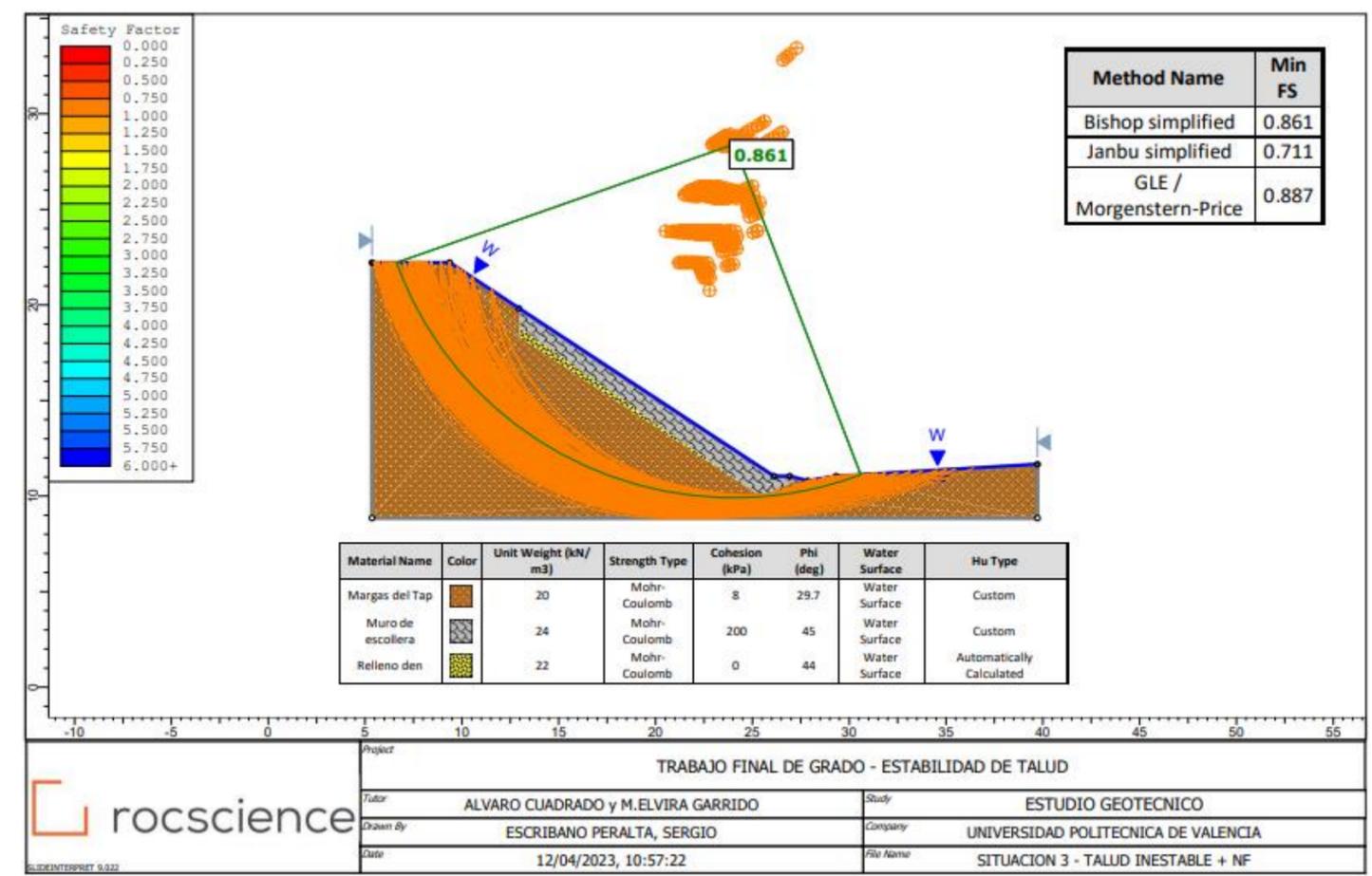


Figura 15 Situación 6 sin la existencia de la carga en coronación del talud Fuente: Slide 2.

**CORTO PLAZO**

➤ SITUACIÓN CP 1 → TALUD INICIAL

- Margas.
  - Peso específico =20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 180 kPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 0 °.
  - Sin presencia de nivel freático.

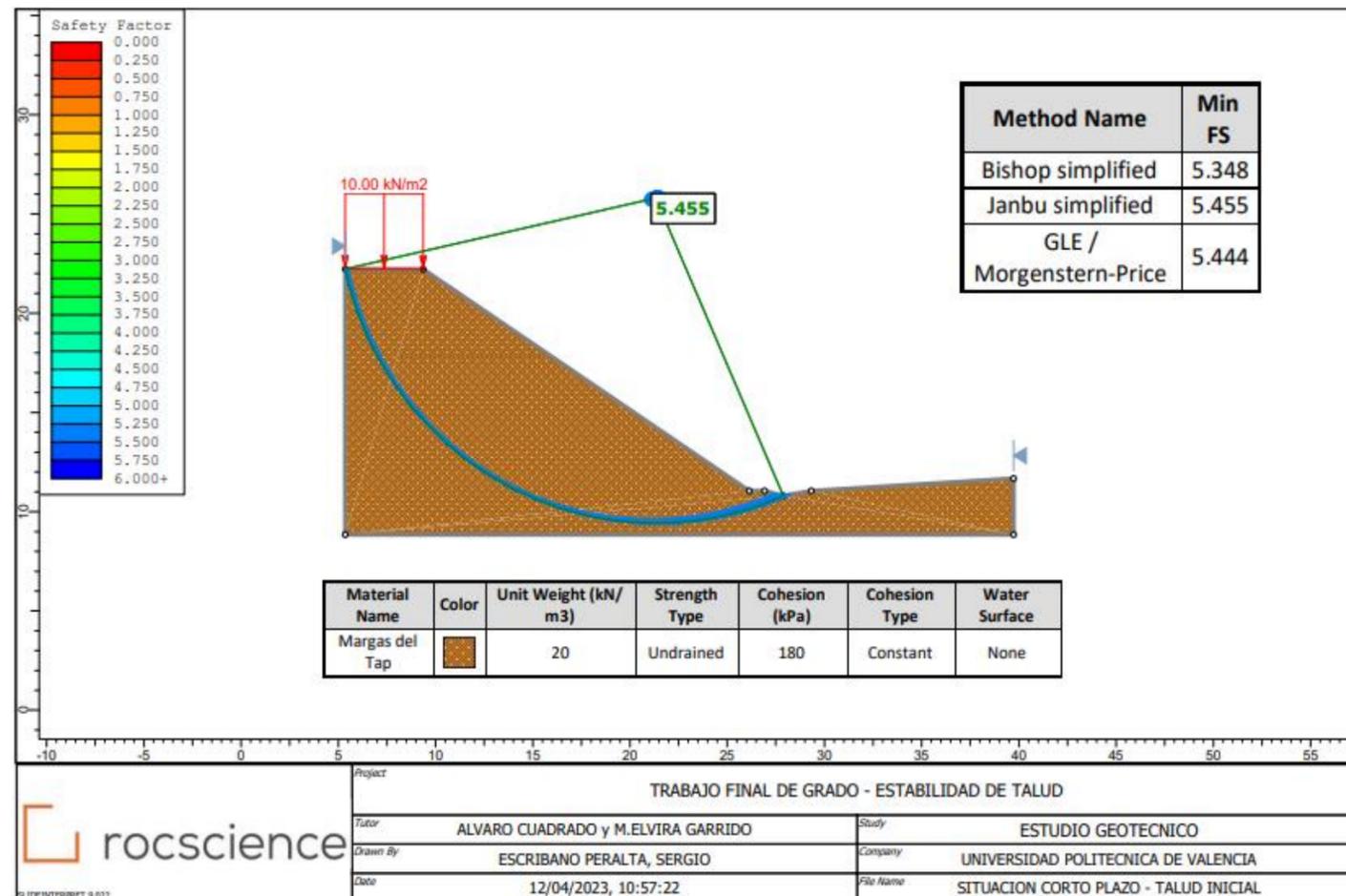


Figura 16 Situación inicial a corto plazo Fuente: Slide 2

➤ SITUACIÓN CP 2 → TALUD INICIAL + NF

- Margas.
  - Peso específico =20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 180 kPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 0 °.
  - Con presencia de nivel freático.

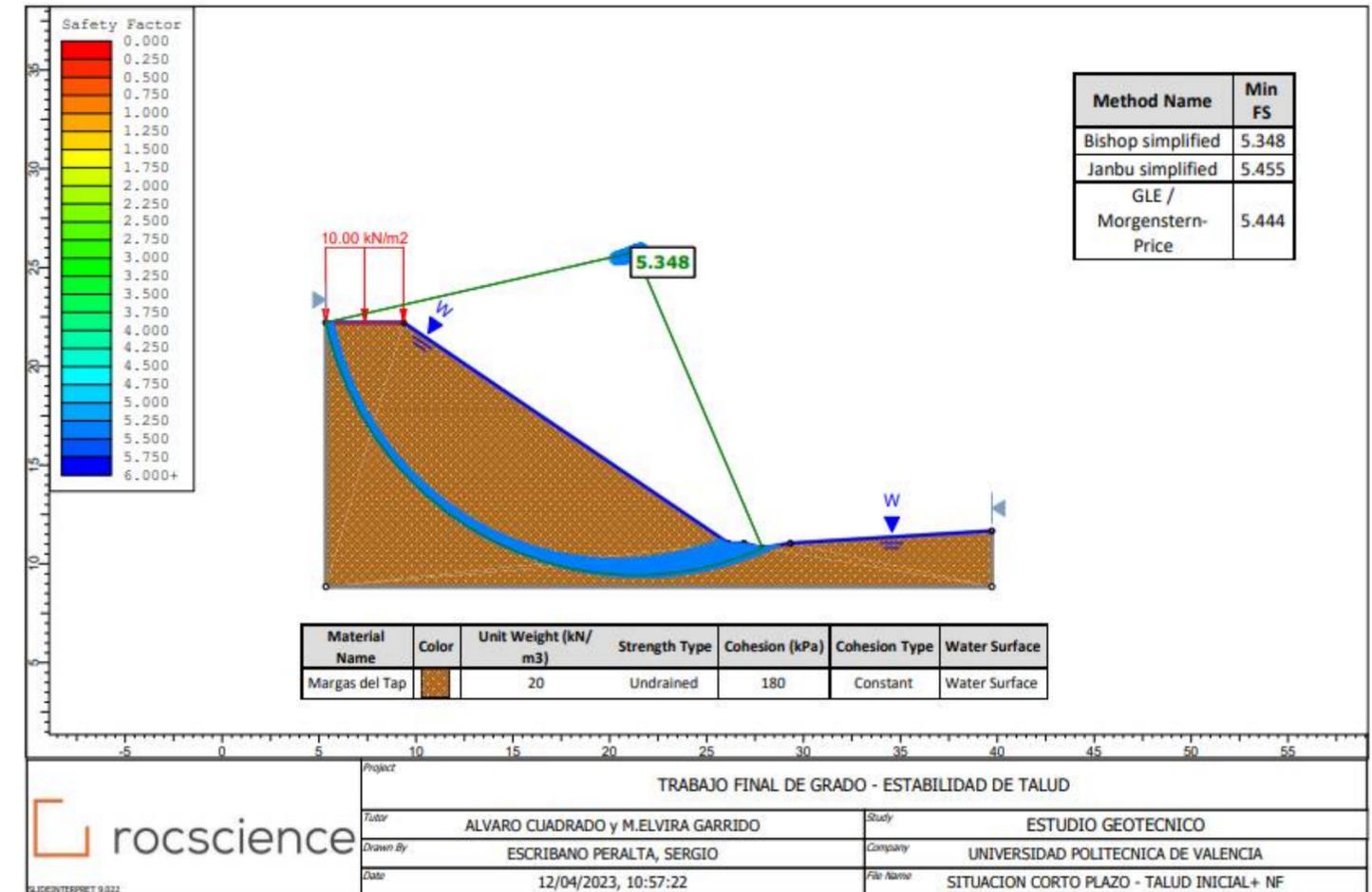


Figura 17 Situación inicial a corto plazo más existencia de nivel freático Fuente: Slide 2

➤ SITUACIÓN CP 3 → TALUD INESTABLE + NF

- Margas.
  - Peso específico = 20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 33 kPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 0 °.
  - Con presencia de nivel freático.

➤ SITUACIÓN CP 3' → TALUD INESTABLE + NF - CARGA EN CORONACIÓN

- Margas.
  - Peso específico = 20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 33 kPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 0 °.
  - Sin presencia de nivel freático.

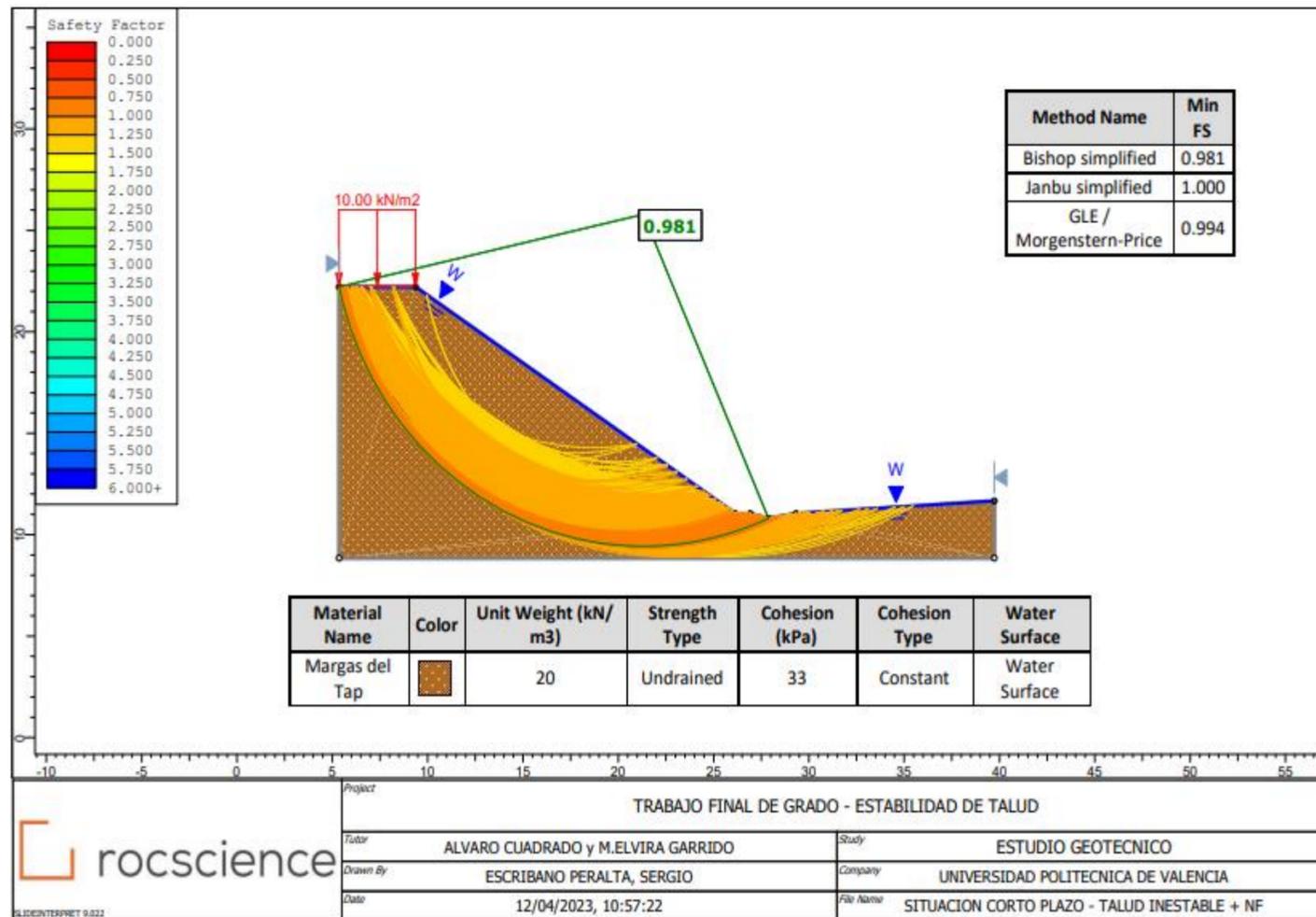


Figura 18 Situación de inestabilidad del talud a corto plazo con presencia del NF Fuente: Slide 2

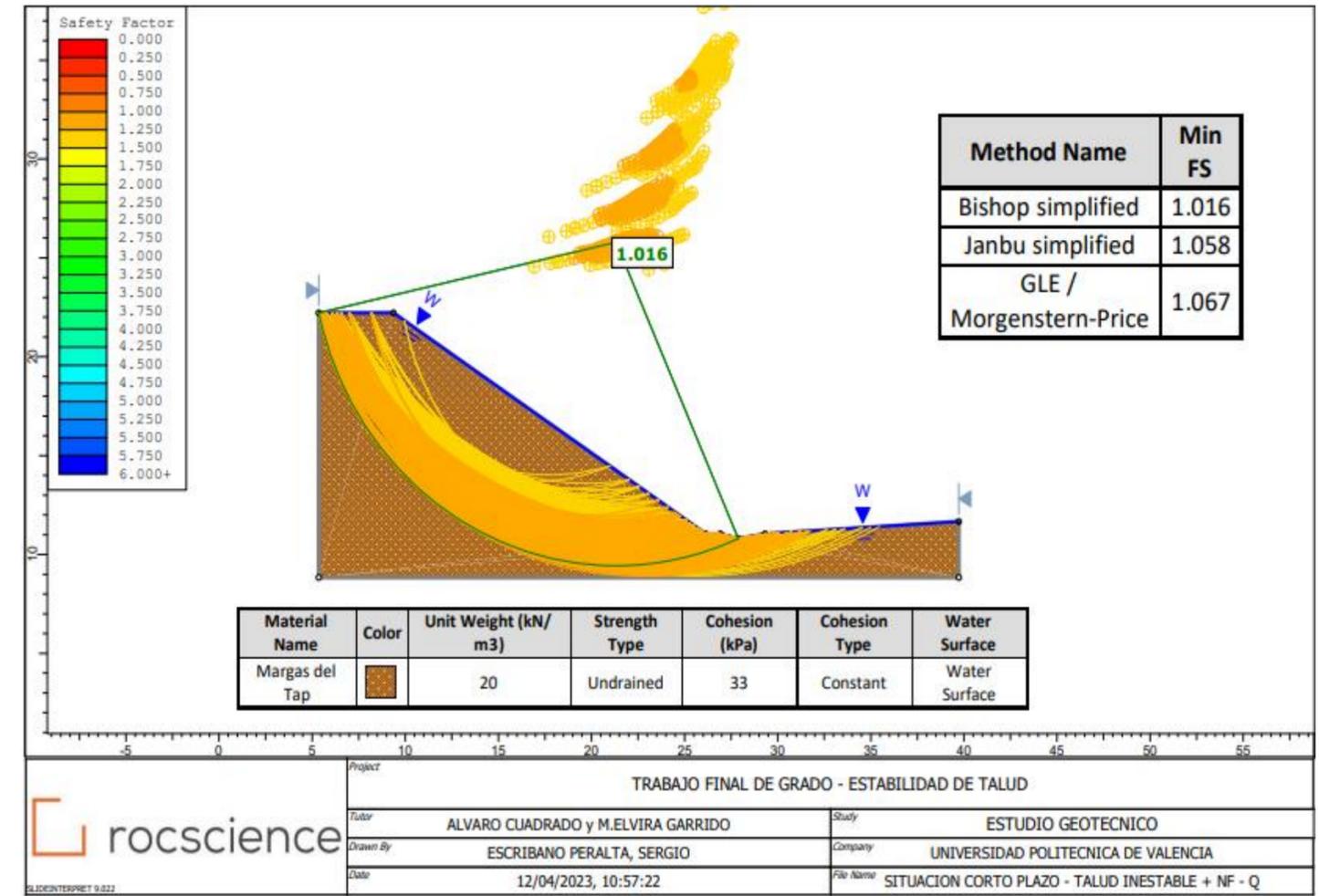


Figura 19 Situación de inestabilidad del talud a corto plazo con presencia del NF y sin la carga en coronación Fuente: Slide 2

➤ SITUACIÓN CP 4 → TALUD + MURO DE ESCOLLERA

- Margas.
  - Peso específico = 20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 33 kPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 0 °.
  - Sin presencia de nivel freático.
- Escollera.
  - Peso específico = 24 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 1 kPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 38 °.

➤ SITUACIÓN CP 5 → TALUD + MURO DE ESCOLLERA + NF

- Margas.
  - Peso específico = 20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 33 kPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 0 °.
  - Con presencia de nivel freático.
- Escollera.
  - Peso específico = 24 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 1 kPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 38 °.

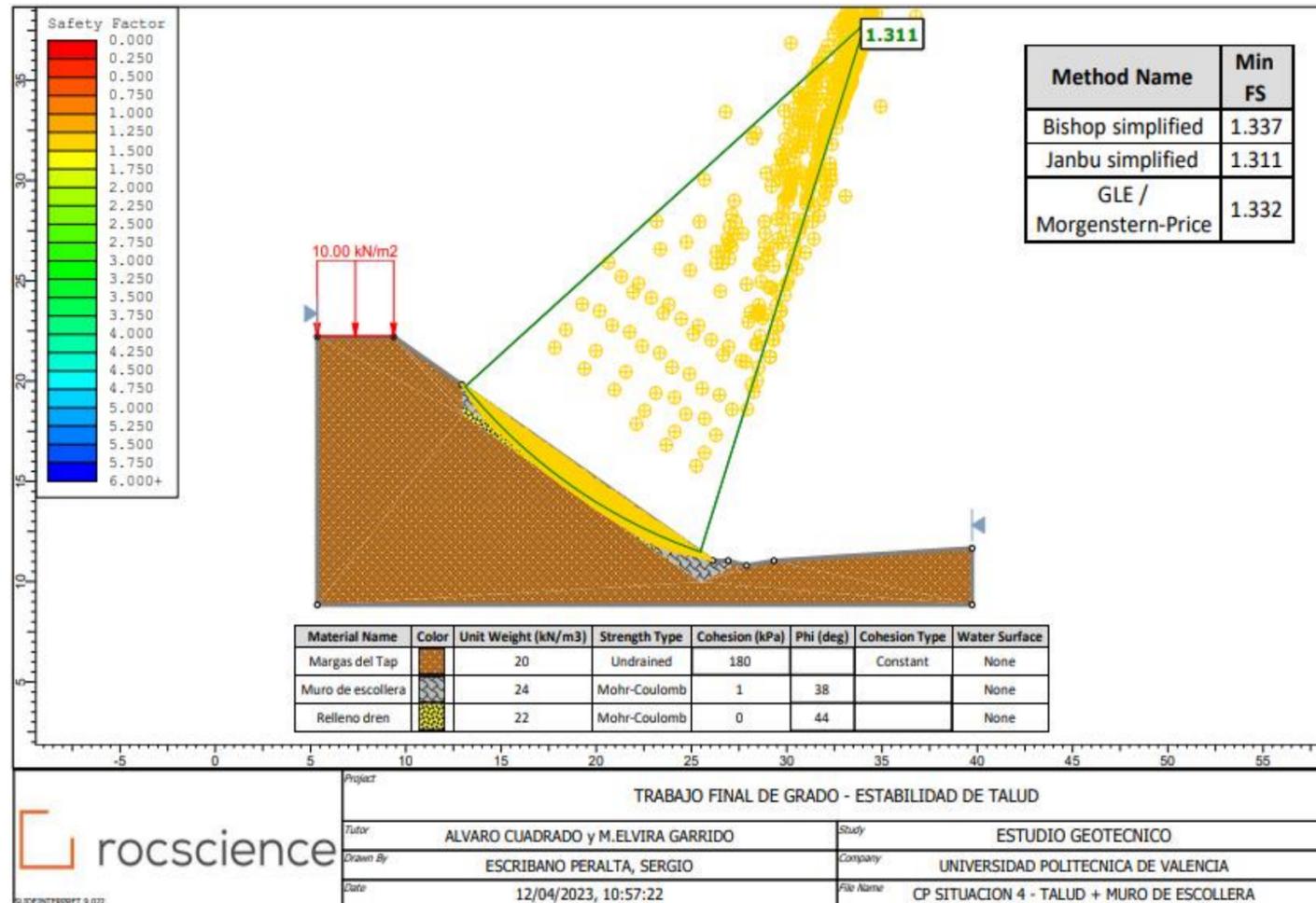


Figura 20 Situación de mejora del terreno a corto plazo sin existencia de nivel freático Fuente: Slide 2.

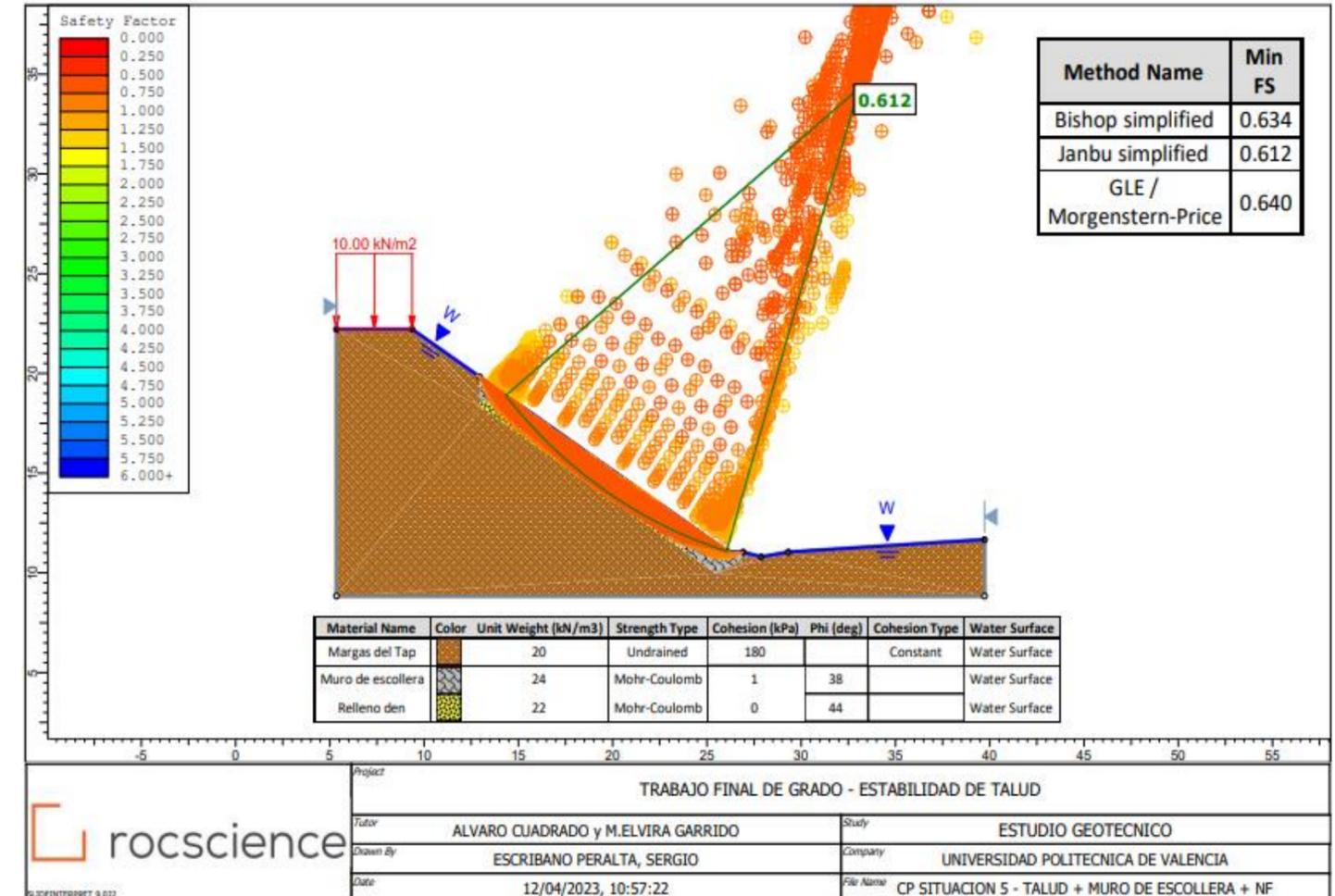


Figura 21 Situación de mejora del terreno a corto plazo con existencia de nivel freático Fuente: Slide 2.

➤ SITUACIÓN CP 5 → TALUD + MURO DE ESCOLLERA + NF - CARGA EN CORONACIÓN

- Margas.
  - Peso específico = 20 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 33 kPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 0 °.
  - Con presencia de nivel freático.
- Escollera.
  - Peso específico = 24 kN/m<sup>3</sup>.
  - Cohesión = 1 KPa.
  - Ángulo de rozamiento ( $\phi$ ) = 38 °

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Fruto de la creciente tendencia a construir estructuras cada vez más sostenibles, los ingenieros han de aplicar diferentes técnicas para optimizar tanto el diseño, como el dimensionamiento de las mismas. El análisis de sensibilidad es una herramienta de gran importancia en los problemas de optimización, ya que permite encontrar soluciones que reduzcan costes económicos e impacto ambiental y social.

Para analizar el comportamiento del manto de escollera frente a las diferentes situaciones analizadas y estudiar también la interacción del método de estabilización con el terreno del desmonte, se han contemplado dos situaciones diferentes.

Por un lado, se ha tomado un valor de la cohesión del material rocoso (manto de escollera) constante de 3 kPa, es decir, muy próximo a cero, debido a que la cohesión de este material es prácticamente nula y diferentes valores del ángulo de rozamiento entre 35 – 40°. Valores límites sacados de la *Guía para el proyecto y la ejecución de muros de escollera en obras de carretera* de la Dirección General de Carreteras que generan situaciones variables a evaluar.

Por otro lado, se toma un valor medio y constante de 38° para el ángulo de rozamiento, para el cual, se examina la variabilidad entre las diferentes situaciones de cohesión, a la cual se le otorgan valores de 0 – 8 kPa en intervalos de dos en dos.

A continuación, se mostrarán las diferentes situaciones a corto plazo que se han llevado a cabo para conseguir un adecuado análisis de sensibilidad. Se ha de tener en cuenta, que la finalidad del análisis es comprobar a partir de que valores el manto de escollera puede llegar a alcanzar un coeficiente de seguridad mayor a 1,3 que asegure la estabilidad del terreno. Los apartados en los que se divide este análisis son:

1. Cohesión constante
2. Ángulo de rozamiento constante
3. Situación más desfavorable

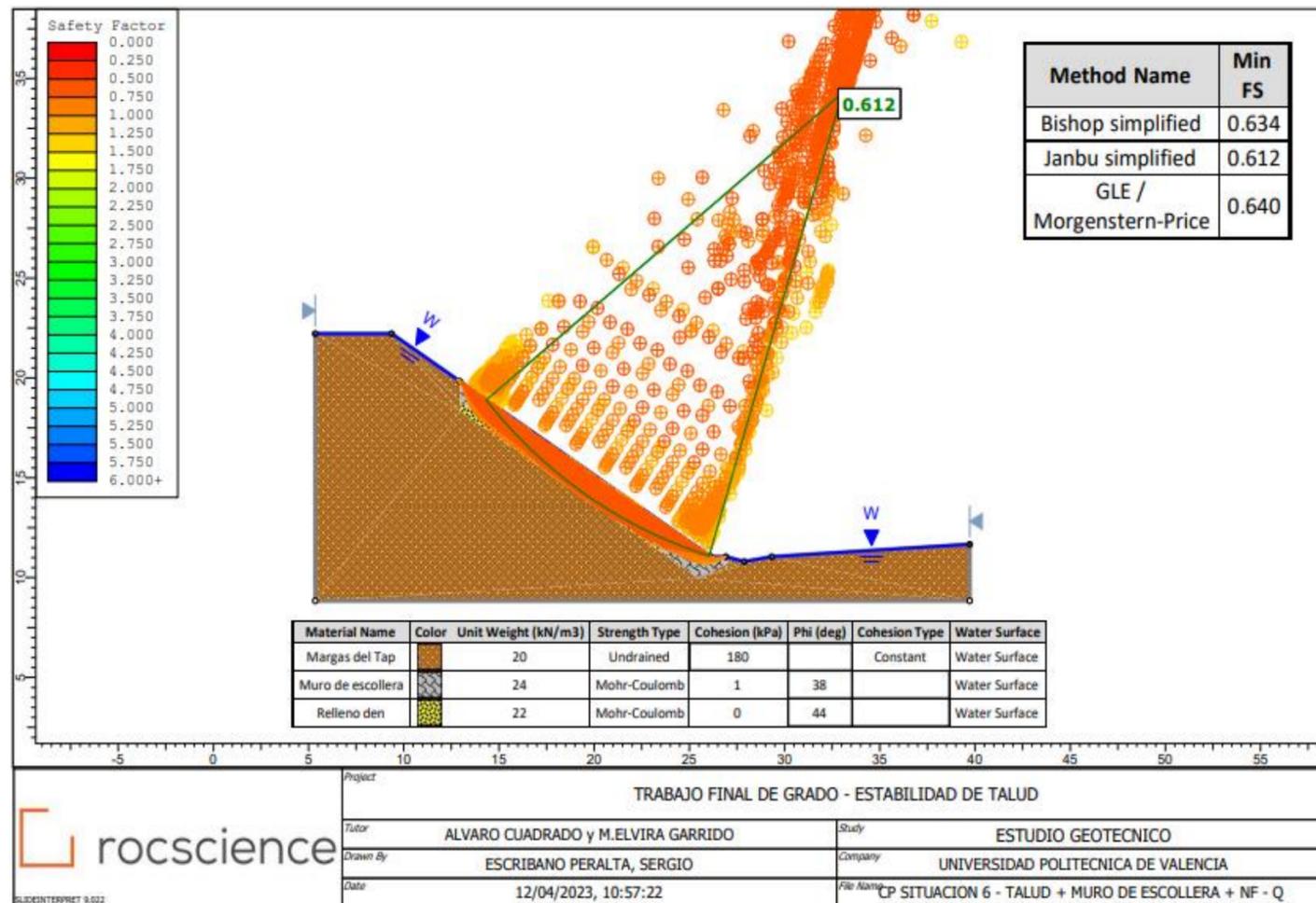
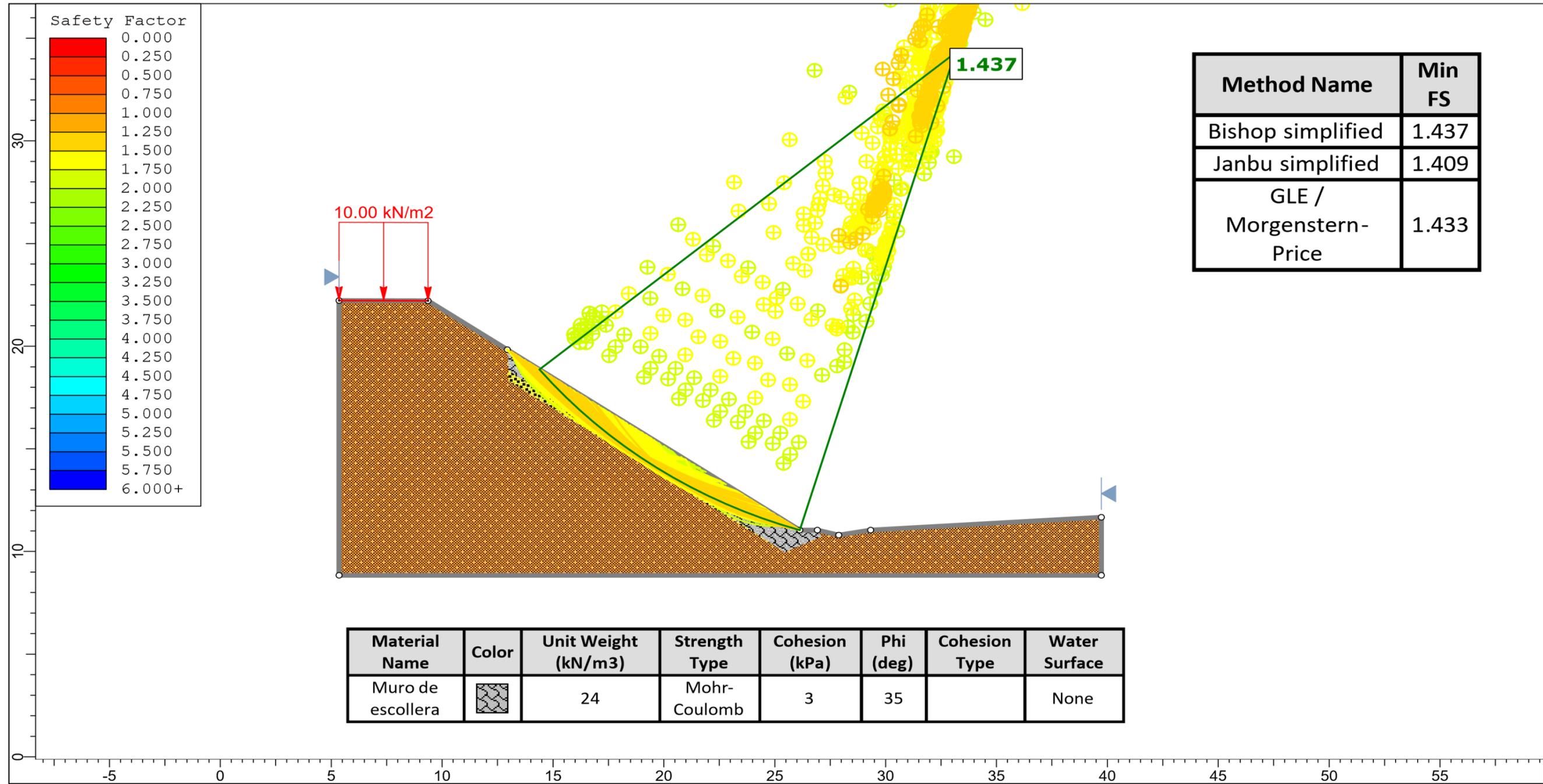


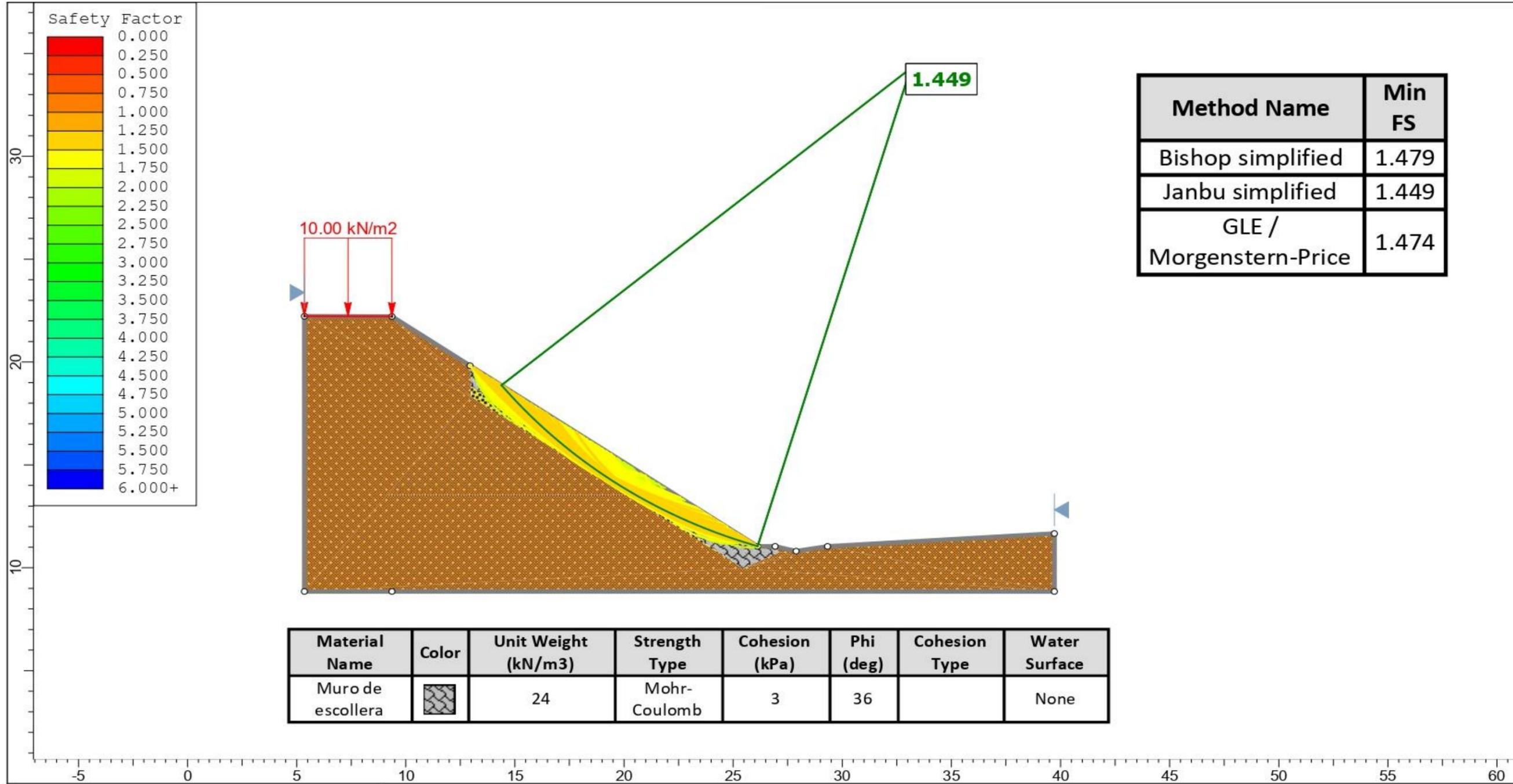
Figura 22 Situación de corto plazo sin la existencia de la carga en coronación del talud Fuente: Slide 2.



## 1) COHESIÓN CONSTANTE

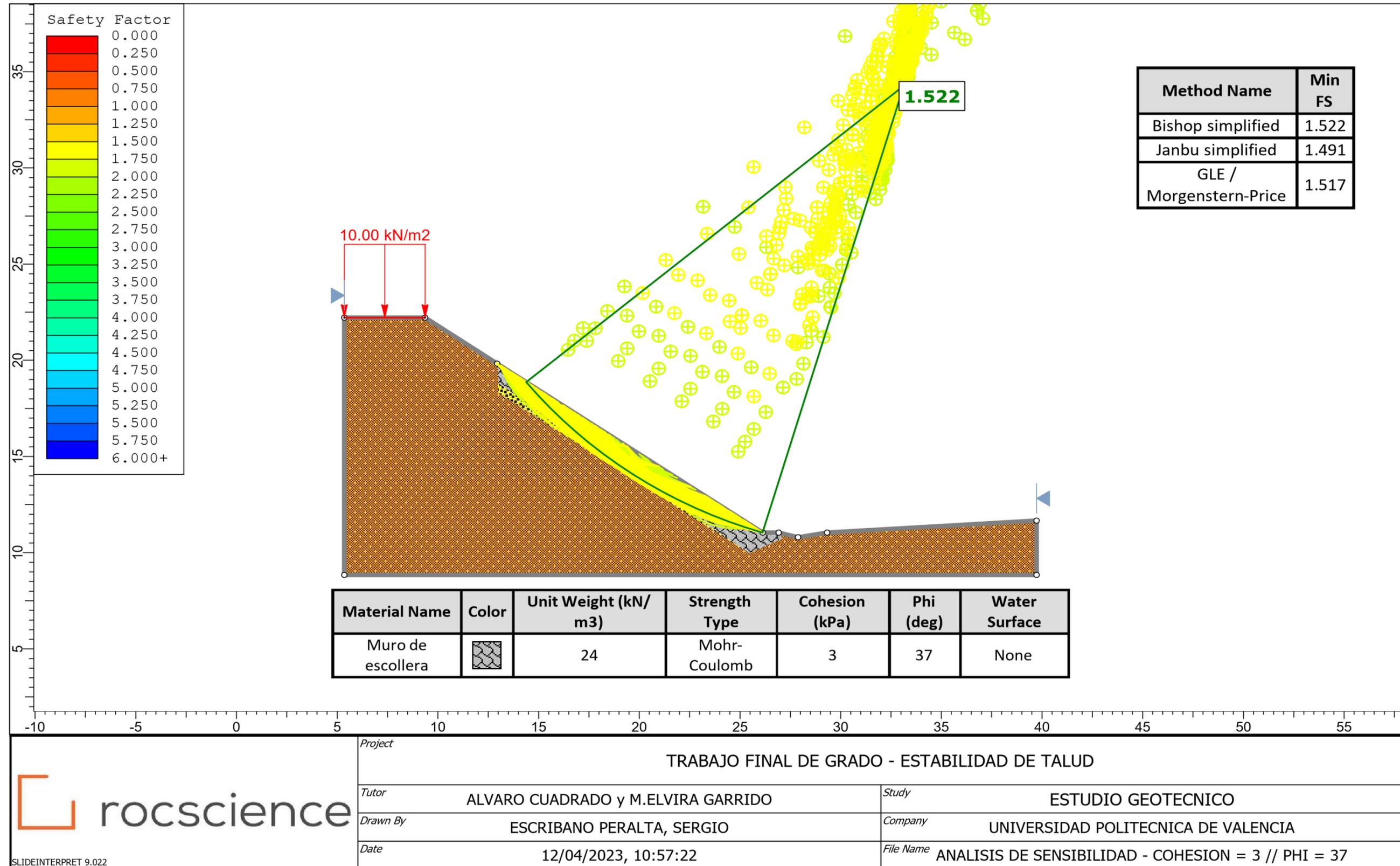


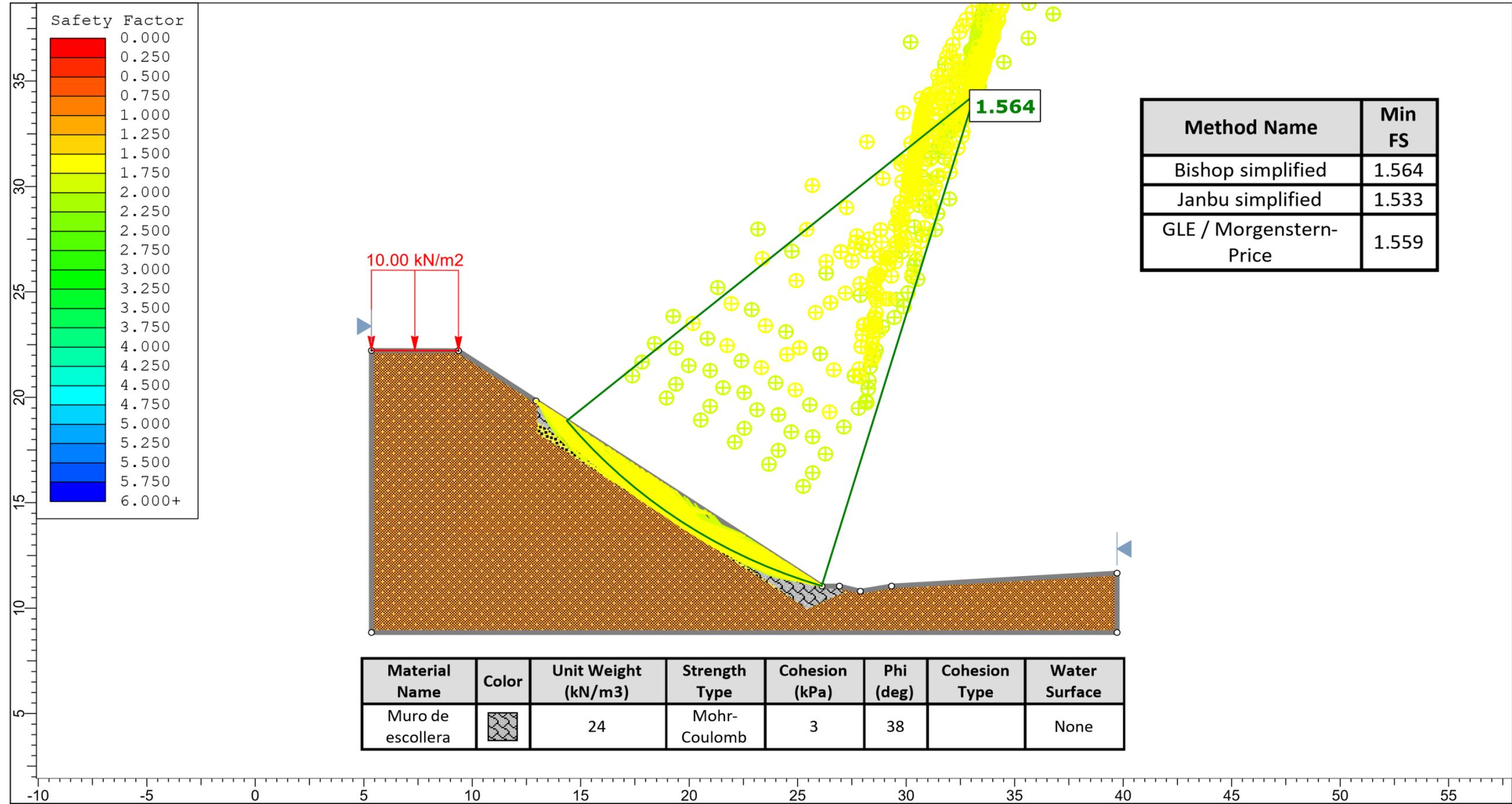
	Project		TRABAJO FINAL DE GRADO - ESTABILIDAD DE TALUD	
	Tutor	ALVARO CUADRADO y M.ELVIRA GARRIDO	Study	ESTUDIO GEOTECNICO
	Drawn By	ESCRIBANO PERALTA, SERGIO	Company	UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA
	Date	12/04/2023, 10:57:22	File Name	ANALISIS DE SENSIBILIDAD - COHESION = 3 // PHI = 35
	SLIDEINTERPRET 9.022			



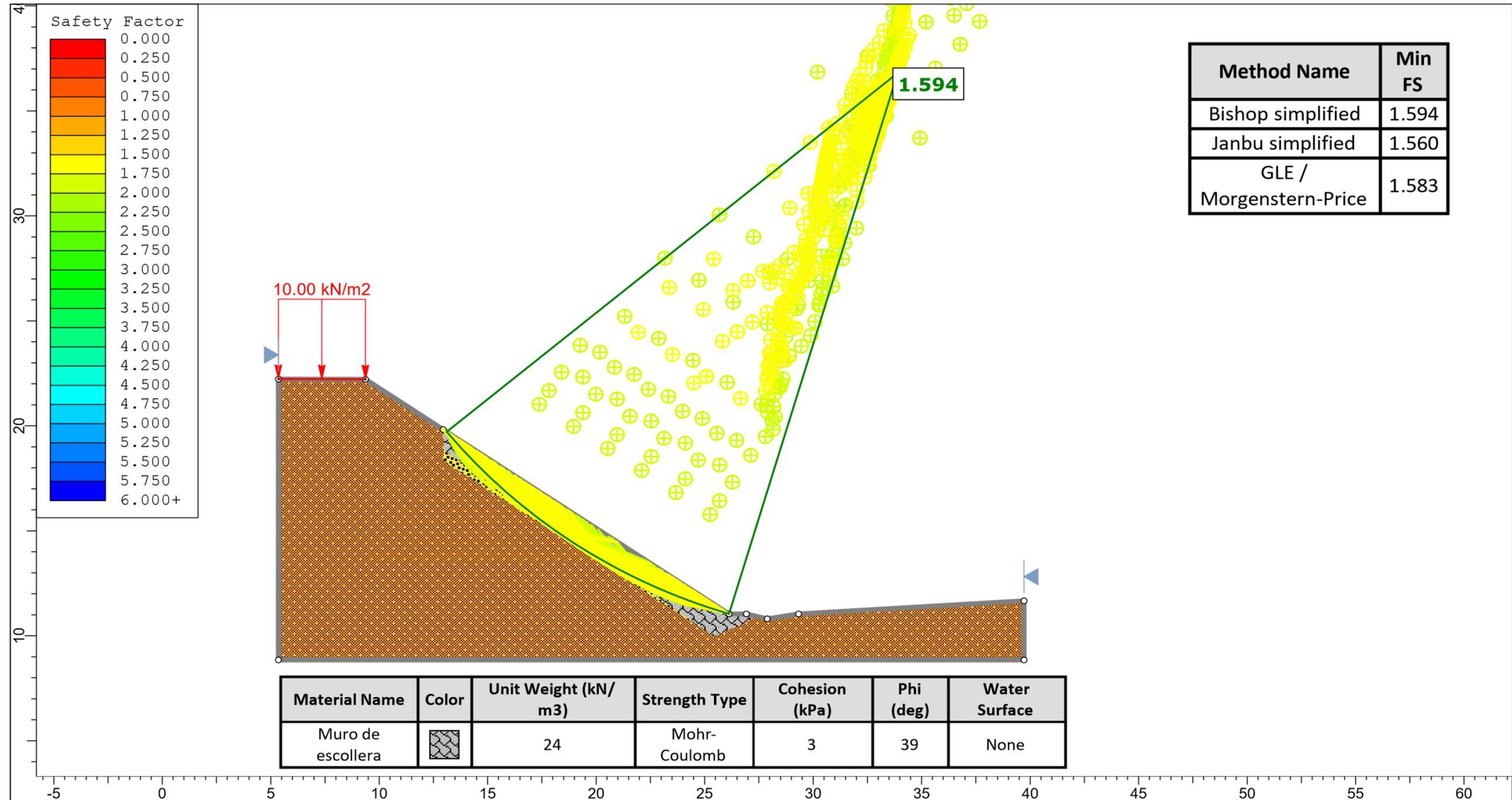
Method Name	Min FS
Bishop simplified	1.479
Janbu simplified	1.449
GLE / Morgenstern-Price	1.474

	Project		TRABAJO FINAL DE GRADO - ESTABILIDAD DE TALUD	
	Tutor	ALVARO CUADRADO y M.ELVIRA GARRIDO	Study	ESTUDIO GEOTECNICO
	Drawn By	ESCRIBANO PERALTA, SERGIO	Company	UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA
	Date	12/04/2023, 10:57:22	File Name	ANALISIS DE SENSIBILIDAD - COHESION = 3 // PHI = 36

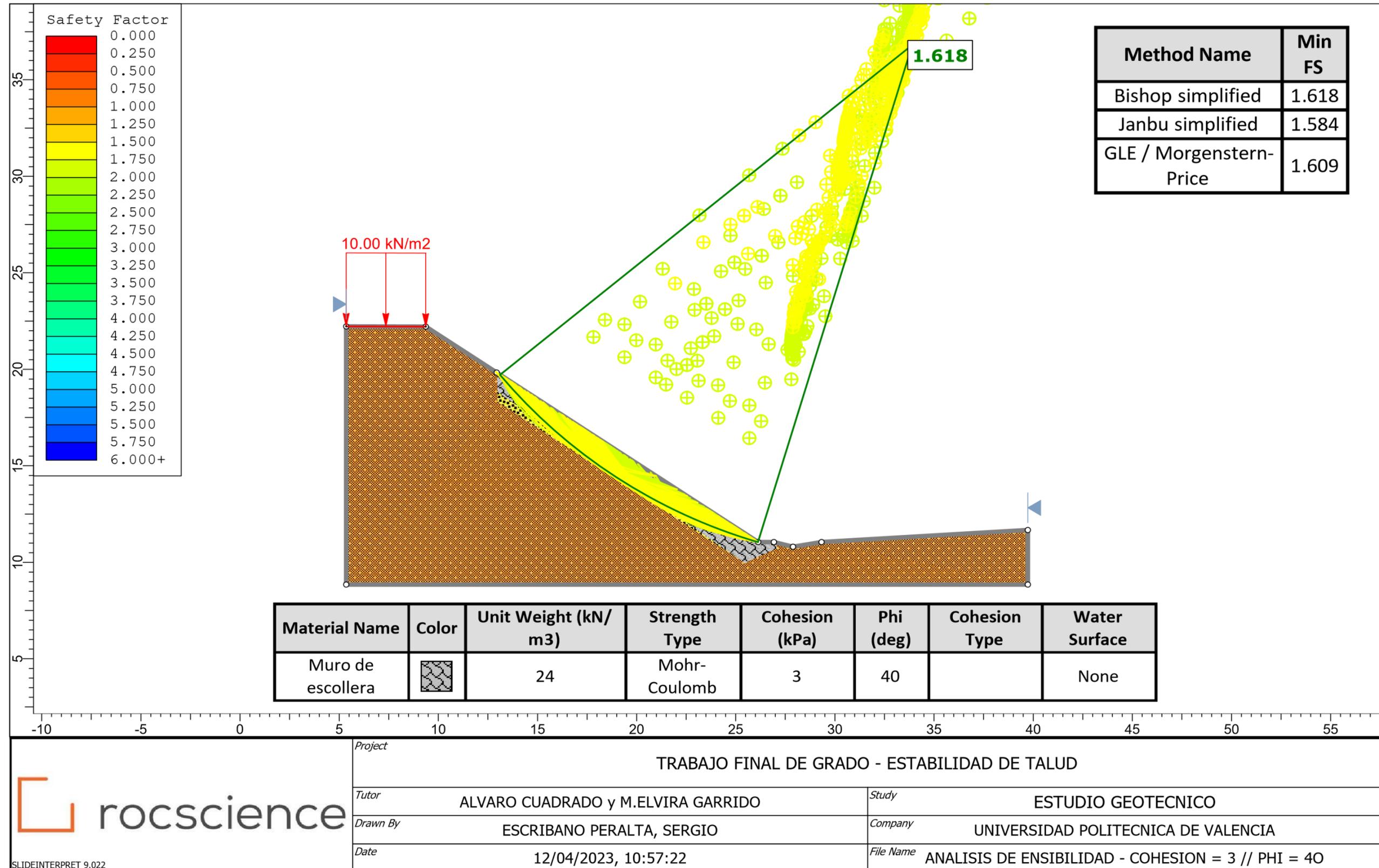




	Project		TRABAJO FINAL DE GRADO - ESTABILIDAD DE TALUD	
	Tutor	ALVARO CUADRADO y M.ELVIRA GARRIDO	Study	ESTUDIO GEOTECNICO
	Drawn By	ESCRIBANO PERALTA, SERGIO	Company	UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA
	Date	12/04/2023, 10:57:22	File Name	ANALISIS DE SENSIBILIDAD - COHESION = 3 // PHI = 38

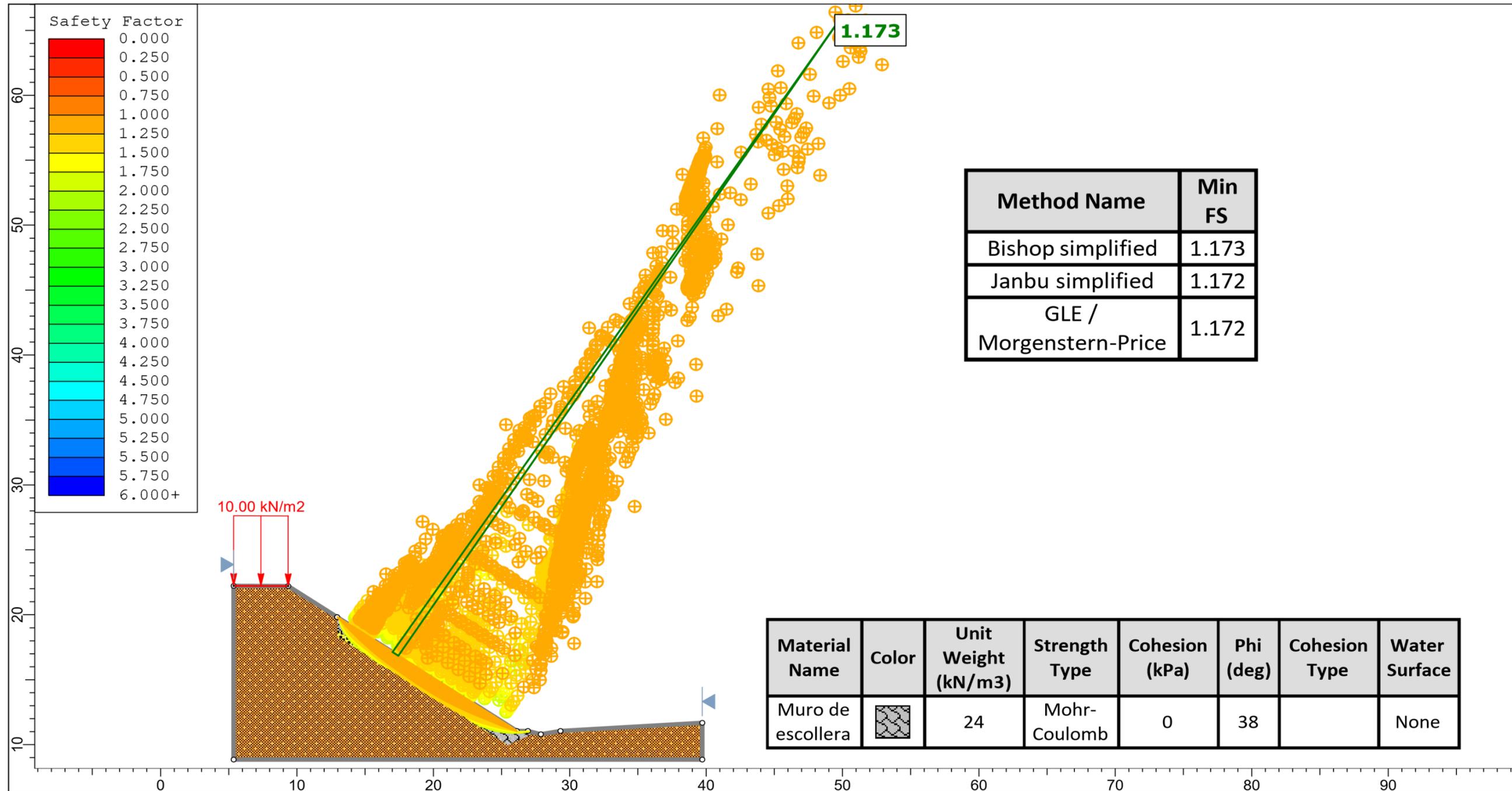


	Project		TRABAJO FINAL DE GRADO - ESTABILIDAD DE TALUD	
	Tutor	ALVARO CUADRADO y M.ELVIRA GARRIDO	Study	ESTUDIO GEOTECNICO
	Drawn By	ESCRIBANO PERALTA, SERGIO	Company	UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA
	Date	12/04/2023, 10:57:22	File Name	ANALISIS DE ENSIBILIDAD - COHESION = 3 // PHI = 39





## 2) **ÁNGULO DE ROZAMIENTO CONSTANTE**



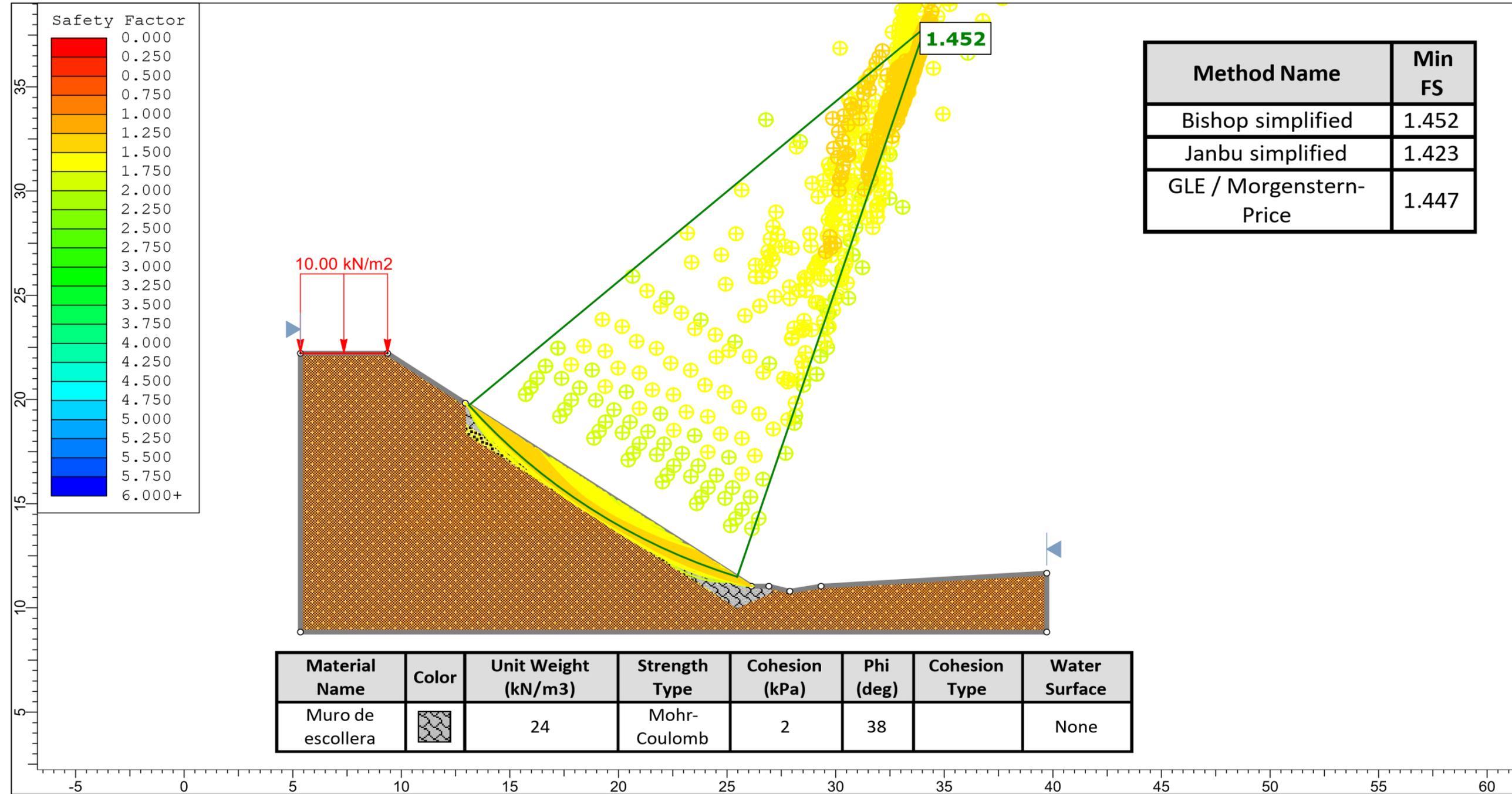
Method Name	Min FS
Bishop simplified	1.173
Janbu simplified	1.172
GLE / Morgenstern-Price	1.172

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface
Muro de escollera		24	Mohr-Coulomb	0	38		None

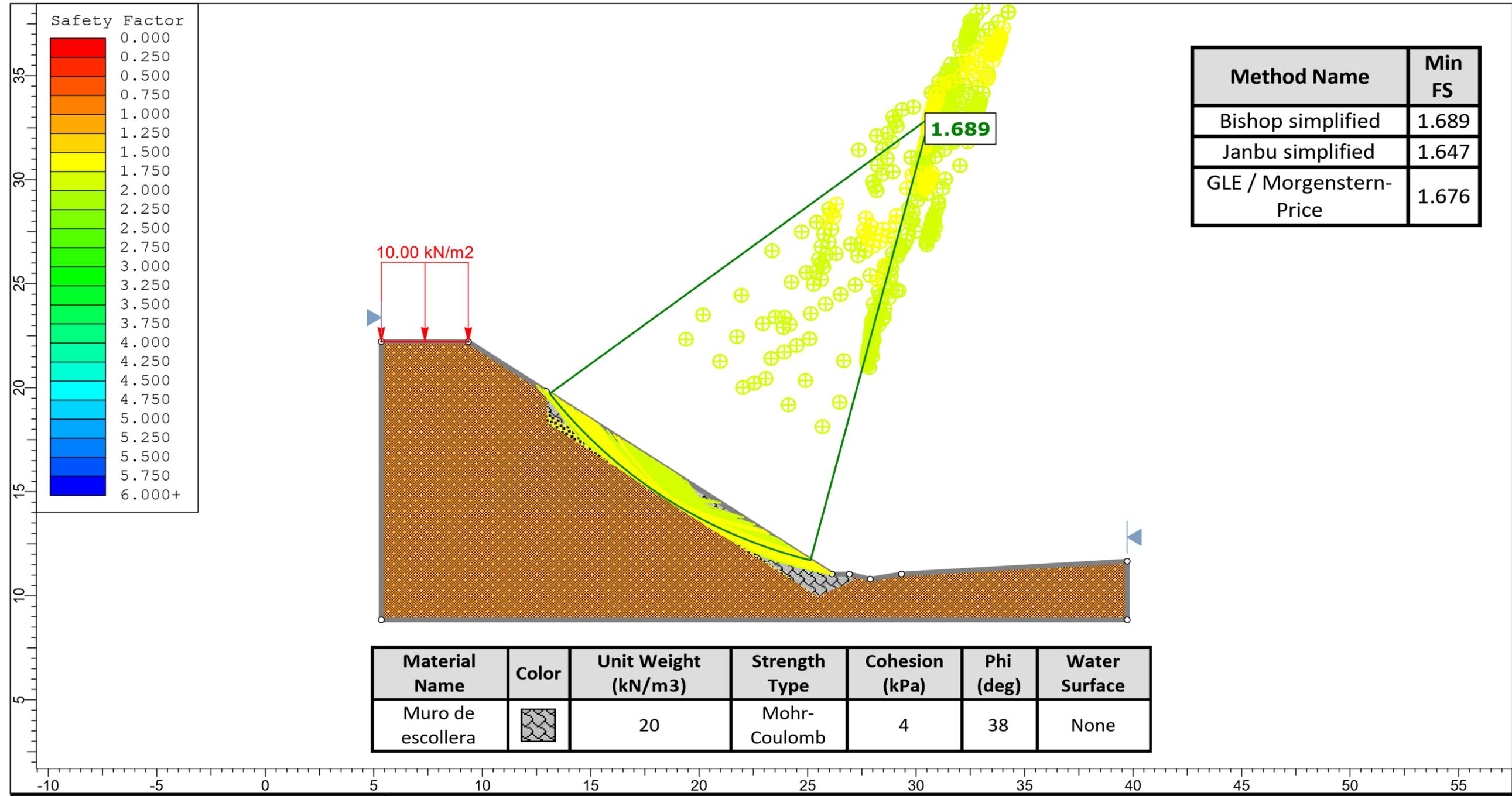


SLIDEINTERPRET 9.022

Project				TRABAJO FINAL DE GRADO - ESTABILIDAD DE TALUD			
Tutor		ALVARO CUADRADO y M.ELVIRA GARRIDO		Study		ESTUDIO GEOTECNICO	
Drawn By		ESCRIBANO PERALTA, SERGIO		Company		UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA	
Date		12/04/2023, 10:57:22		File Name		ANALISIS DE SENSIBILIDAD - COHESION = 0 // PHI = 38	



	Project		TRABAJO FINAL DE GRADO - ESTABILIDAD DE TALUD	
	Tutor	ALVARO CUADRADO y M.ELVIRA GARRIDO	Study	ESTUDIO GEOTECNICO
	Drawn By	ESCRIBANO PERALTA, SERGIO	Company	UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA
	Date	12/04/2023, 10:57:22	File Name	ANALISIS DE SENSIBILIDAD - COHESION = 2 // PHI = 38

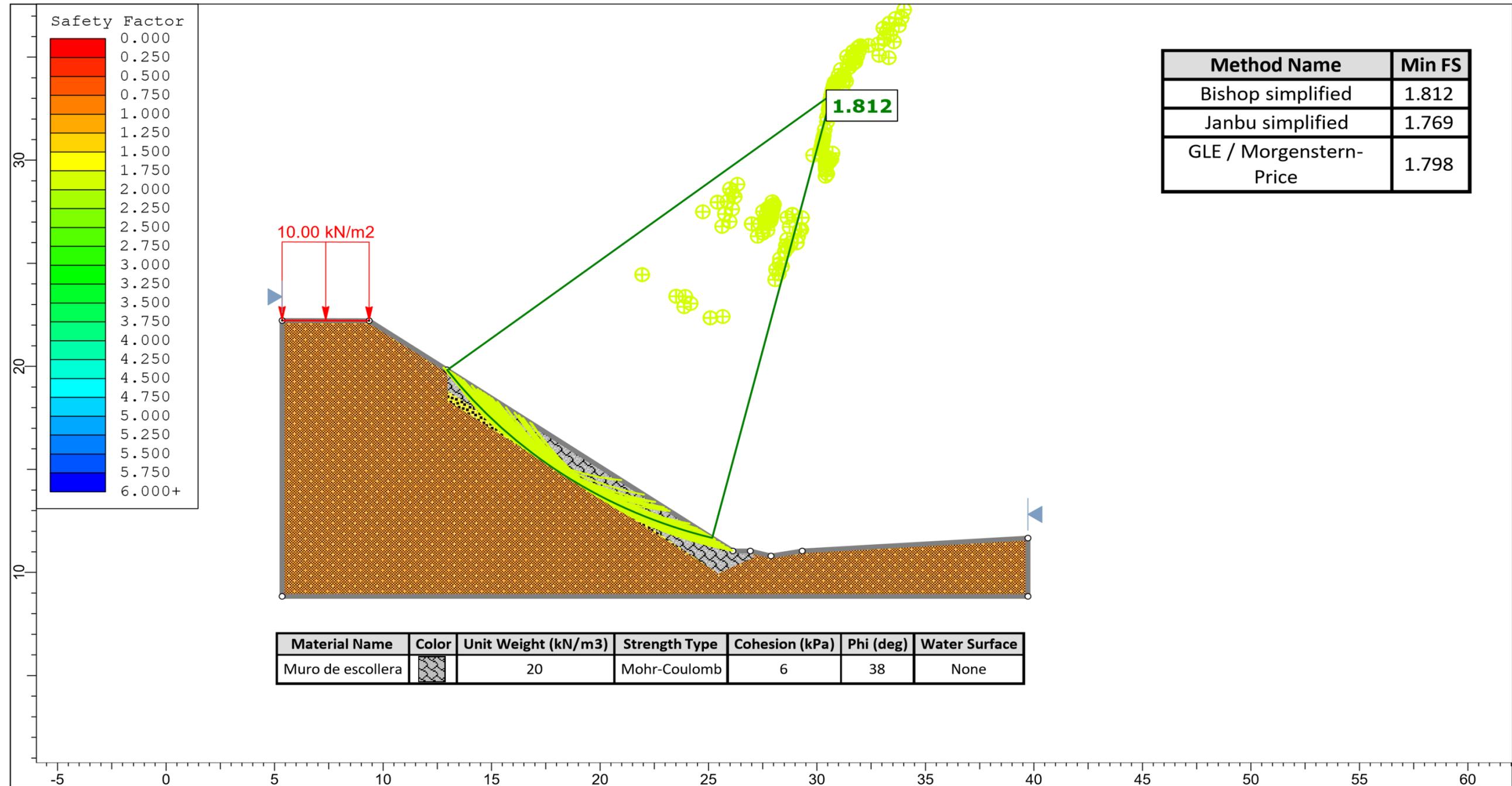


Method Name	Min FS
Bishop simplified	1.689
Janbu simplified	1.647
GLE / Morgenstern-Price	1.676



SLIDEINTERPRET 9.022

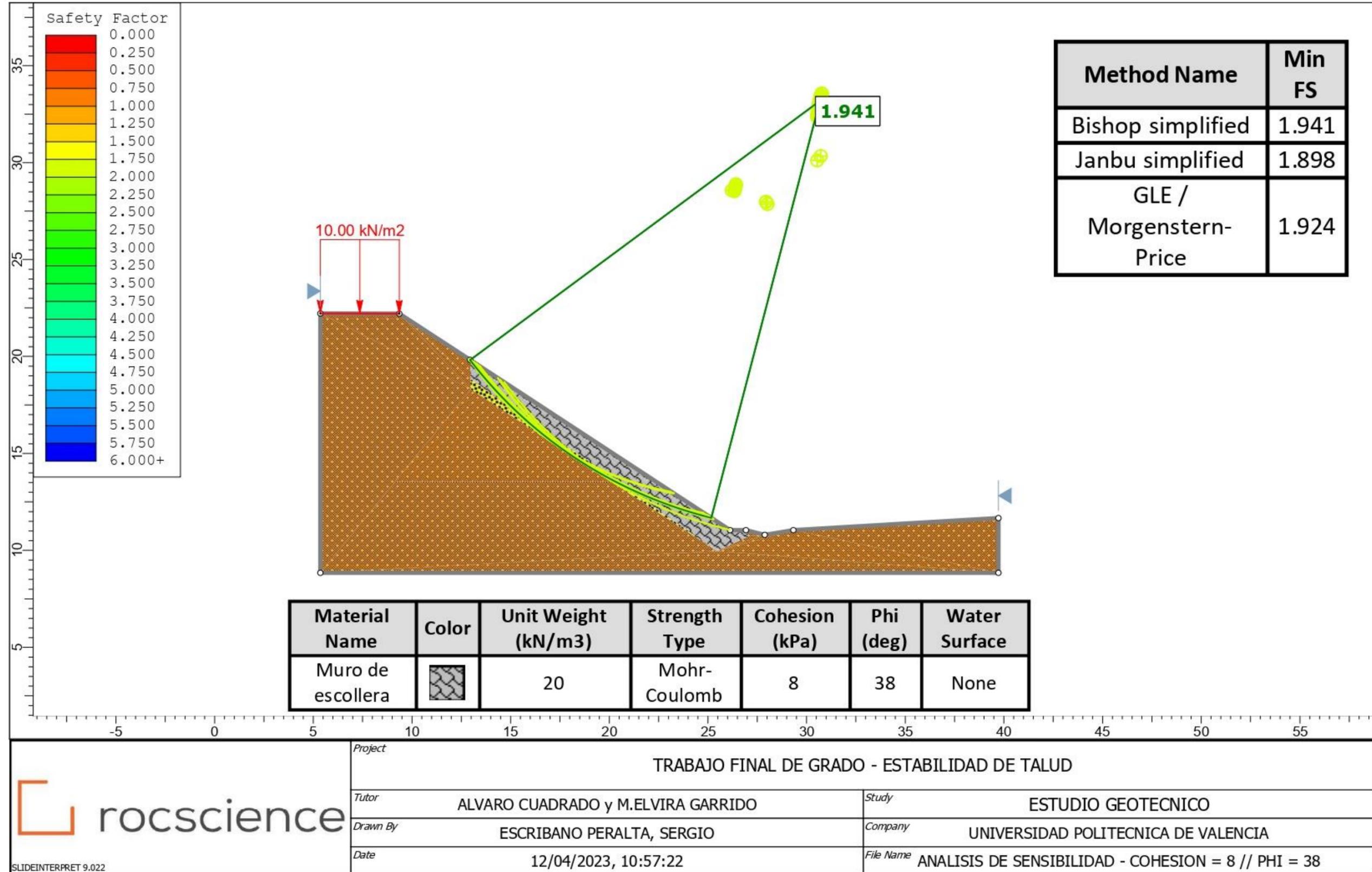
<i>Project</i>		TRABAJO FINAL DE GRADO - ESTABILIDAD DE TALUD	
<i>Tutor</i>	ALVARO CUADRADO y M.ELVIRA GARRIDO	<i>Study</i>	ESTUDIO GEOTECNICO
<i>Drawn By</i>	ESCRIBANO PERALTA, SERGIO	<i>Company</i>	UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA
<i>Date</i>	12/04/2023, 10:57:22	<i>File Name</i>	ANALISIS DE SENSIBILIDAD - COHESION = 4 // PHI = 38



Method Name	Min FS
Bishop simplified	1.812
Janbu simplified	1.769
GLE / Morgenstern-Price	1.798

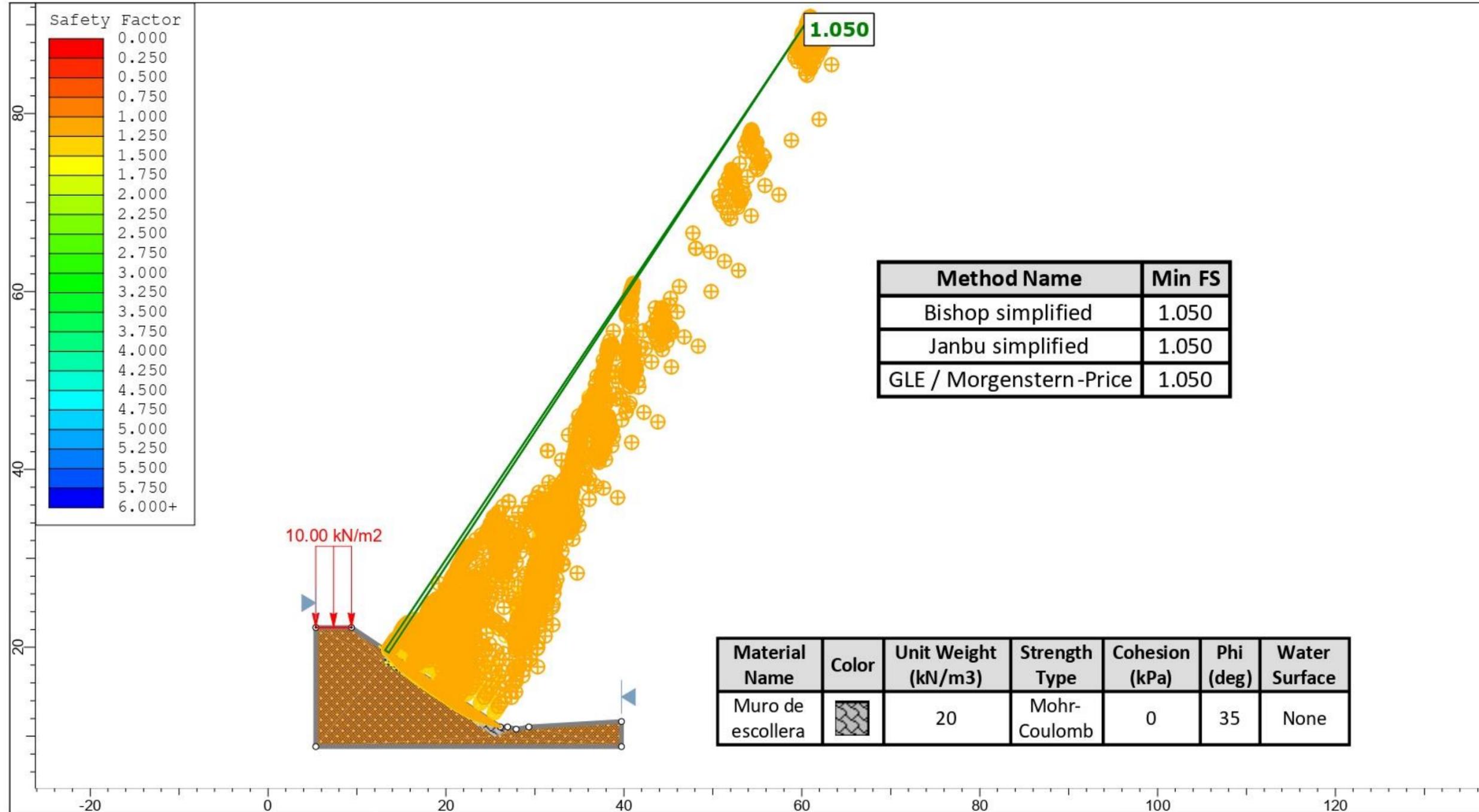
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Water Surface
Muro de escollera		20	Mohr-Coulomb	6	38	None

	Project		TRABAJO FINAL DE GRADO - ESTABILIDAD DE TALUD	
	Tutor	ALVARO CUADRADO y M.ELVIRA GARRIDO	Study	ESTUDIO GEOTECNICO
	Drawn By	ESCRIBANO PERALTA, SERGIO	Company	UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA
	Date	12/04/2023, 10:57:22	File Name	ANALISIS DE SENSIBILIDAD - COHESION = 6 // PHI = 38





### **3) Situación más desfavorable**



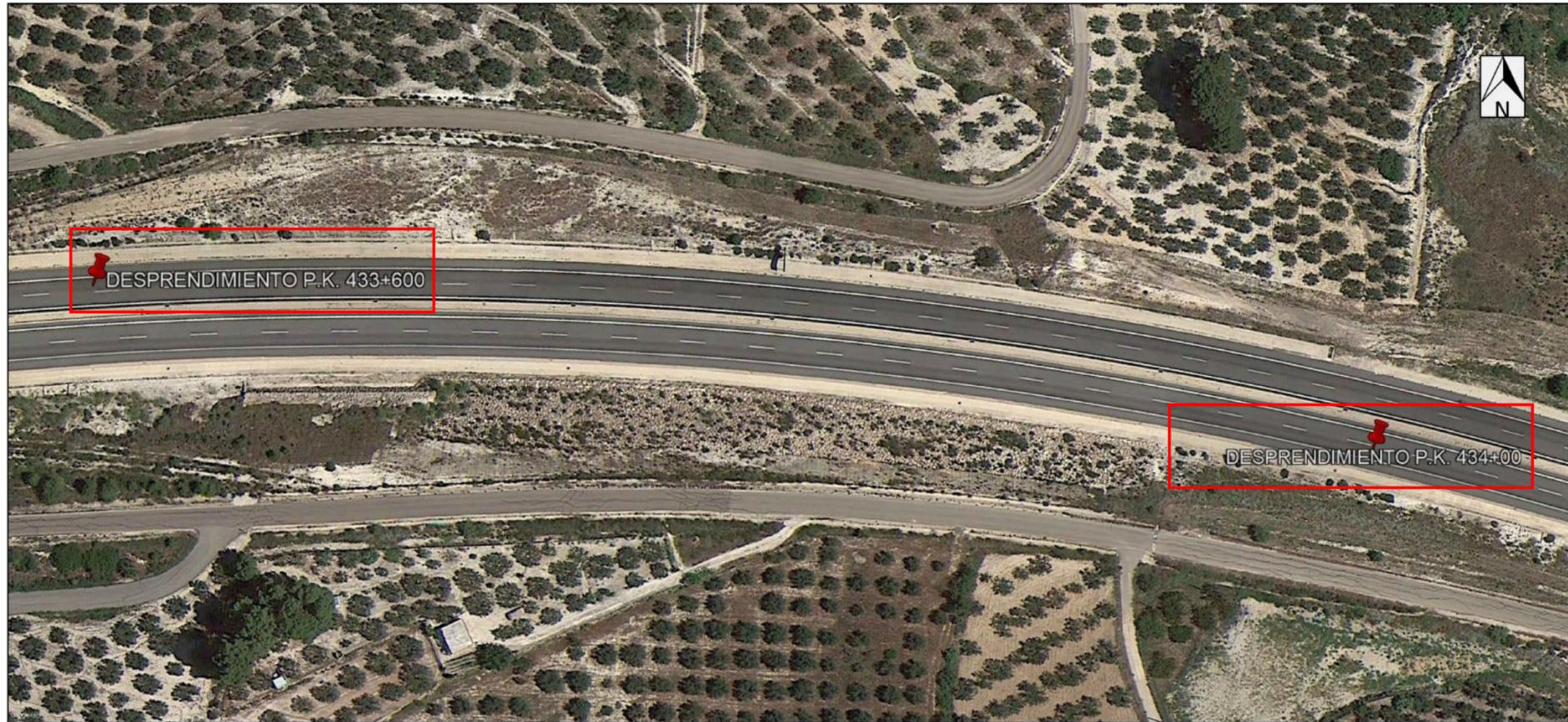
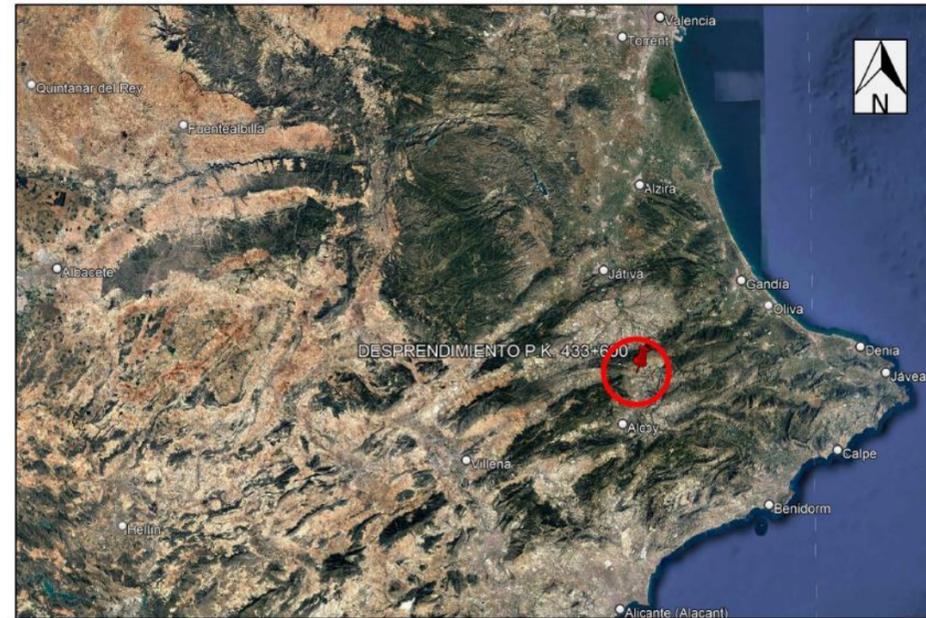
Method Name	Min FS
Bishop simplified	1.050
Janbu simplified	1.050
GLE / Morgenstern-Price	1.050

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Water Surface
Muro de escollera		20	Mohr-Coulomb	0	35	None

	Project		TRABAJO FINAL DE GRADO - ESTABILIDAD DE TALUD	
	Tutor	ALVARO CUADRADO y M.ELVIRA GARRIDO	Study	ESTUDIO GEOTECNICO
	Drawn By	ESCRIBANO PERALTA, SERGIO	Company	UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA
	Date	12/04/2023, 10:57:22	File Name	ANALISIS DE SENSIBILIDAD - COHESION = 0 // PHI = 35



## ANEJO II. PLANOS



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

TÍTULO DEL PROYECTO:  
 ESTUDIO DE LA ESTABILIZACIÓN DE LA LADERA LOCALIZADA  
 EN EL PK 433+600 DE LA CARRETERA A-7 Y SU AFECCIÓN  
 SOCIOECONÓMICA, TÉRMINO MUNICIPAL DE MURO DE ALCOY,  
 ALICANTE.

AUTOR: SERGIO ESCRIBANO PERALTA

PLANO: LOCALIZACIÓN

N: 1

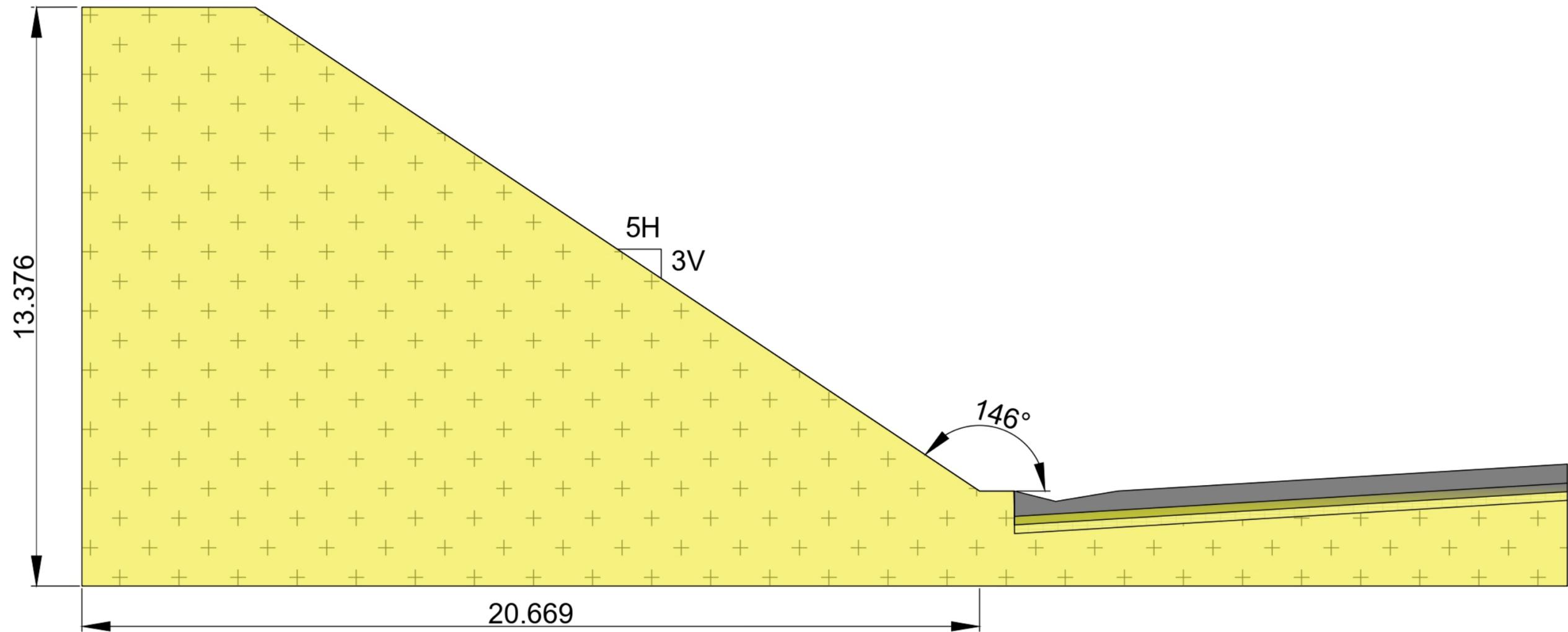
ESCALA: S/E

FECHA: 06/06/2023

TUTOR: ÁLVARO CUADRADO

FIRMA:

COTUTORA: M<sup>a</sup> ELVIRA GARRIDO



COTAS EN METROS

### LEYENDA

MATERIAL	PESO ESPECÍFICO (kN/m <sup>3</sup> )	COHESIÓN (kPa)	ÁNGULO DE ROZAMIENTO (deg)
MARGAS DEL TAP	20	57,90	29,70



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

TÍTULO DEL PROYECTO:  
 ESTUDIO DE LA ESTABILIZACIÓN DE LA LADERA LOCALIZADA  
 EN EL PK 433+600 DE LA CARRETERA A-7 Y SU AFECCIÓN  
 SOCIOECONÓMICA, TÉRMINO MUNICIPAL DE MURO DE ALCOY,  
 ALICANTE.

AUTOR: SERGIO ESCRIBANO PERALTA

PLANO: SECCIÓN TRANSVERSAL INICIAL N: 2

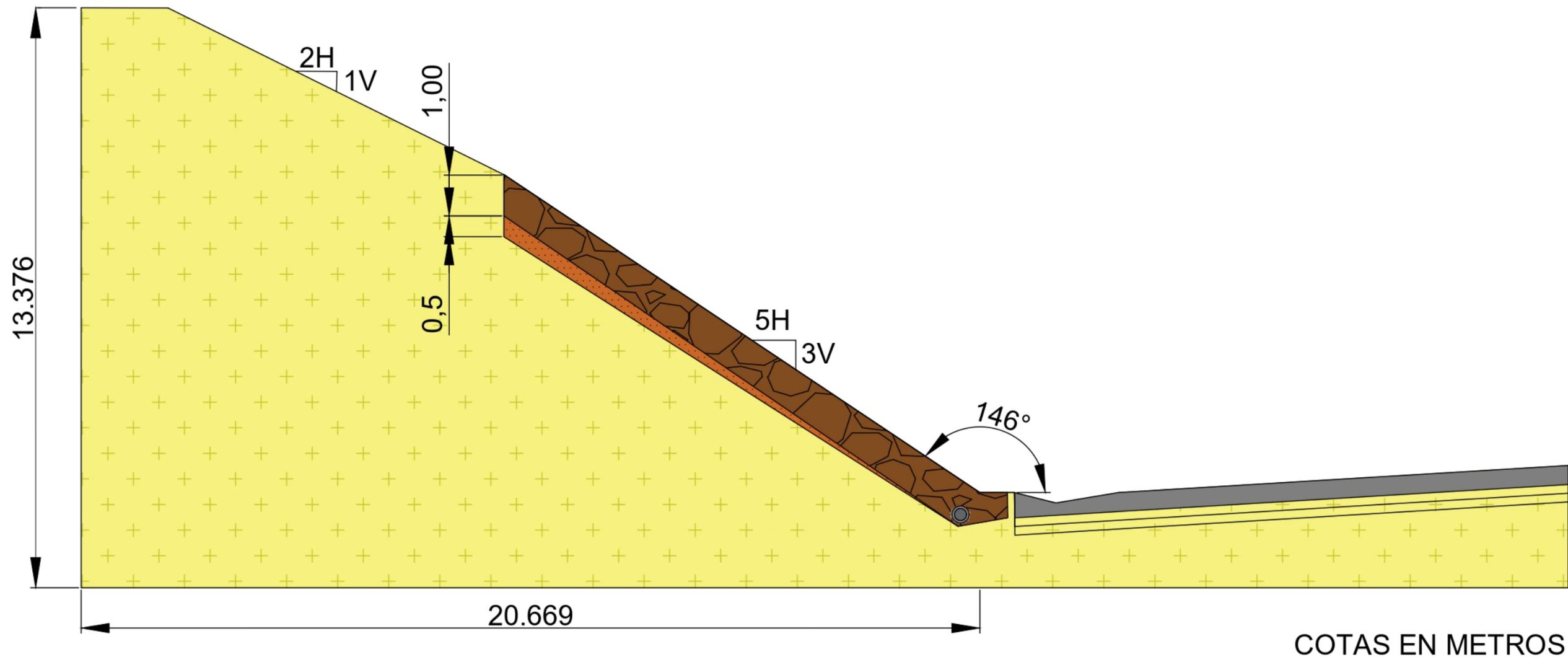
ESCALA: 1/200

FECHA: 07/06/2023

TUTOR: ÁLVARO CUADRADO

FIRMA:

COTUTORA: M<sup>a</sup> ELVIRA GARRIDO



### LEYENDA

MATERIAL	PESO ESPECÍFICO (kN/m <sup>3</sup> )	COHESIÓN (kPa)	ÁNGULO DE ROZAMIENTO (deg)
MARGAS DEL TAP	20	57,90	29,70
MATERIAL DREN	24	220,00	45,00
ESCOLLERA	22	0,00	44,00



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

TÍTULO DEL PROYECTO:  
ESTUDIO DE LA ESTABILIZACIÓN DE LA LADERA LOCALIZADA  
EN EL PK 433+600 DE LA CARRETERA A-7 Y SU AFECCIÓN  
SOCIOECONÓMICA, TÉRMINO MUNICIPAL DE MURO DE ALCOY,  
ALICANTE.

AUTOR: SERGIO ESCRIBANO PERALTA

PLANO: SECCIÓN TRANSVERSAL FINAL N: 3

ESCALA: 1/100

FECHA: 07/06/2023

TUTOR: ÁLVARO CUADRADO

FIRMA:

COTUTORA: M<sup>a</sup> ELVIRA GARRIDO



### ANEJO III. PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO

## Introducción

A continuación, se procederá a la explicación teórica de la metodología empleada para el estudio de alternativas. Este método recibe el nombre de **Analytic Hierarchy Process (AHP)**, cuya traducción al español recibe el nombre de Proceso Analítico Jerárquico.

La **toma de decisiones multicriterio (MCDM)** hace referencia a los múltiples métodos empleados en la toma de decisiones, no obstante, debido al crecimiento exponencial de metodologías se han propuesto varias clasificaciones. El ranquin más conocido se subdivide en los métodos de toma de decisión multiobjetivo (MODM) y en los métodos de toma de decisión multiatributo (MADM), siendo estos últimos, el grupo en el que se encuentra el método AHP. Los procedimientos de MADM se emplean para la resolución de problemas discretos, es decir, las alternativas están predeterminadas y los expertos valoran inicialmente cada criterio indicando su respectiva importancia (peso).

Por último, cabe destacar la gran utilidad para aplicar este procedimiento en casos en los que no se tenga una información precisa de cada uno de los criterios, por ello, para evaluar criterios como la belleza u otros condicionantes tenido en cuenta en procesos constructivos de emergencia en los cuales no se sigue un procedimiento claro, como el caso objeto de estudio, es de gran ayuda.

## Proceso analítico jerárquico

Para el análisis multicriterio se utilizará el método denominado **Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP)**, el cual se basa en las matemáticas y en la psicología. Este proceso de selección es muy útil para tomar una correcta decisión cuando se dispone de poca información. Su funcionamiento está basado en la selección de la alternativa óptima en función de una serie de criterios y subcriterios, los cuales suelen entrar en conflicto, organizados jerárquicamente. Criterios y subcriterios que han de estar bien definidos, ser relevantes y ser mutuamente excluyentes para conseguir la eficacia del método comparativo.

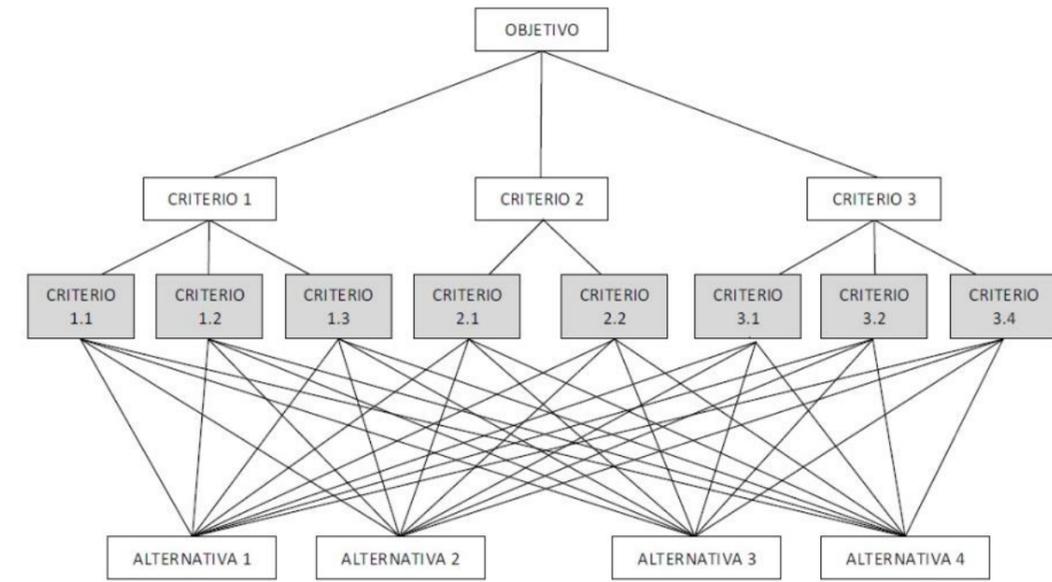


Figura 23 Ejemplo de estructura jerárquica AHP. Fuente: <https://victoryepes.blogs.upv.es>.

Una vez definida la estructura jerárquica, se comparan los criterios de cada grupo del mismo nivel jerárquico y la comparación directa por pares de las alternativas respecto a los criterios del nivel inferior. Para la comparación de cada par de alternativas se hace uso de una escala fundamental con valores del 1 al 9 que ha sido satisfactoria en comprobaciones empíricas realizadas en situaciones reales muy diversas (Ilustración YYYYYYYY).

VALOR	DEFINICIÓN	COMENTARIOS
1	Igual importancia	El criterio A es igual de importante que el criterio B
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente al criterio A sobre el B
5	Importancia grande	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente el criterio A sobre el B
7	Importancia muy grande	El criterio A es mucho más importante que el B
9	Importancia extrema	La mayor importancia del criterio A sobre el B está fuera de toda duda
2,4,6 y 8	Valores intermedios entre los anteriores, cuando es necesario matizar	

Figura 24 Escala de comparación por pares, Saaty. Fuente: <https://victoryepes.blogs.upv.es>.

La comparación de las diferentes alternativas respecto al criterio del nivel inferior de la estructura jerárquica, como la comparación de los diferentes criterios de un mismo nivel jerárquico dan lugar a una matriz cuadrada denominada matriz de decisión. Matriz que cumple con las propiedades de reciprocidad (si  $a_{ij}=x$ , entonces  $a_{ji}=1/x$ ), homogeneidad (si  $i$  y  $j$  son igualmente importantes,  $a_{ij}=a_{ji}=1$ , y, además,  $a_{ii}= 1$  para todo  $i$ ), y consistencia (la matriz no debe contener contradicciones en la valoración realizada).

La consistencia se obtiene mediante el índice de consistencia (Consistency Index, CI) donde  $\lambda_{max}$  es el máximo autovalor y  $n$  es la dimensión de la matriz de decisión (ecuación 6). Un índice de consistencia igual a cero significa que la consistencia es completa. Una vez obtenido CI, se obtiene la proporción de consistencia (Consistency Ratio, CR) (ecuación 7) siendo aceptado siempre que no supere los valores indicados en la (Ilustración YYY+). En caso de que en una matriz se supere el CR máximo, hay que revisar las ponderaciones.

$$CI = \frac{n - \lambda_{max}}{n - 1} \quad (6)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

RI es el índice aleatorio, que indica la consistencia de una matriz aleatoria. En la siguiente ilustración, se muestra el índice aleatorio en función del tamaño de la matriz.

Tamaño de la matriz	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice aleatorio	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Figura 25 Índice aleatorio RI, para el cálculo de la consistencia. Fuente: <https://victoryepes.blogspot.com>.

Tamaño de la matriz (n)	Ratio de consistencia
3	5%
4	9%
5 o mayor	10%

Figura 26 Porcentajes máximos de consistencia. Fuente: <https://victoryepes.blogspot.com>.

Una vez verificada la consistencia, se obtienen los pesos, que representan la importancia relativa de cada criterio o las prioridades de las diferentes alternativas respecto a un determinado criterio. Para ello, el AHP original utiliza el método de los autovalores, donde hay que resolver la siguiente ecuación:

$$A \cdot w = \lambda_{max} \cdot W \quad (8)$$

Siendo

$A$ : matriz de comparación.

$w$ : autovector o vector de referencia.

$\lambda_{max}$ : autovalor.

A continuación, se aplicará el método, realizando la matriz de decisión de las variables lo más objetivamente posible. Para ver más detalladamente el funcionamiento de dicho proceso, se adjunta la Hoja Excel utilizada:

N5

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	
4	<b>MATRIZ DE DECISIÓN</b>						n 4		ORDEN DE LA MATRIZ		VECTOR PROPIO									
6		A1	A2	A3	A4							mmult matriz y matriz				suma fila		fila/suma total		
7	A1	1,00	2,00	3,00	2,00							4	11,5	14	6,1666667		35,666667	0,409		
8	A2	0,50	1,00	2,00	0,33							1,8333333	4	6,1666667	2,6666667		14,666667	0,168		
9	A3	0,33	0,50	1,00	0,50							1,1666667	3,1666667	4	1,8333333		10,166667	0,117		
10	A4	0,50	3,00	2,00	1,00							3,1666667	8	11,5	4		26,666667	0,306		
11	suma columnas	2,33	6,50	8,00	3,83												suma tota	87,1667	1	
17	matriz/ suma columnas	IMPACTO	SOCIAL	CONSTRUCTIV	ECONÓMICO			Suma filas	Media suma filas			mmult matriz y matriz				suma fila		fila/suma total		
18		0,4286	0,3077	0,3750	0,5217			1,6330	0,4083			72,944444	185,6667	253,8333	105,66667		618,1111	0,410		
19		0,2143	0,1538	0,2500	0,0870			0,7051	0,1763			30,305556	77,94444	105,6667	43,944444		257,8611	0,171		
20		0,1429	0,0769	0,1250	0,1304			0,4752	0,1188			20,944444	53,41667	72,94444	30,305556		177,6111	0,118		
21		0,2143	0,4615	0,2500	0,2609			1,1867	0,2967			53,416667	136,8333	185,6667	77,944444		453,8611	0,301		
22	Σ COLUMNAS	0,7857	0,5385	0,7500	0,7391												suma tota	1507,44	1	
26	nult matriz y Media suma fil				mmult /Media suma filas						mmult matriz y matriz				suma fila		fila/suma total			
27		1,710553034	1,710553034					4,18995721				21908,383	56032,69	76269,02	31795,505		186005,6	0,410		
28		0,716896102	0,716896102					4,066985713				9133,267	23359,49	31795,5	13255,025		77543,29	0,171		
29		0,491360089	0,491360089					4,135897114				6293,2052	16095,48	21908,38	9133,267		53430,332	0,118		
30		1,267222587	1,2672					4,271439356				16095,477	41166,19	56032,69	23359,494		136653,85	0,301		
31		por qué el mismo valor repetido dos veces...??						4,166069848				mmult matriz y matriz				suma fila		fila/suma total		
32								MEDIA				1,983E+09	5,07E+09	6,91E+09	2,879E+09		1,684E+10	0,410		
33												826885182	2,11E+09	2,88E+09	1,2E+09		7,02E+09	0,171		
34												569756472	1,46E+09	1,98E+09	826885182		4,837E+09	0,118		
35	CI	0,055356616	$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$									1,457E+09	3,73E+09	5,07E+09	2,115E+09		1,237E+10	0,301		
36	CR	0,061507351	6,15%					< 9%				mmult matriz y matriz				suma tota		4,1E+10 1		

1. Muro de gaviones = A1.  
 2. Muro de contención = A2.  
 3. Muro pantalla de micropilotes = A3.  
 4. Muro de escollera compactada (manto) = A4.

Cada 2 valores distintos para el cálculo del CI para 4 alternativas de muro.  
 Cada 2 valores distintos para el cálculo del CR para 4 alternativas de muro.

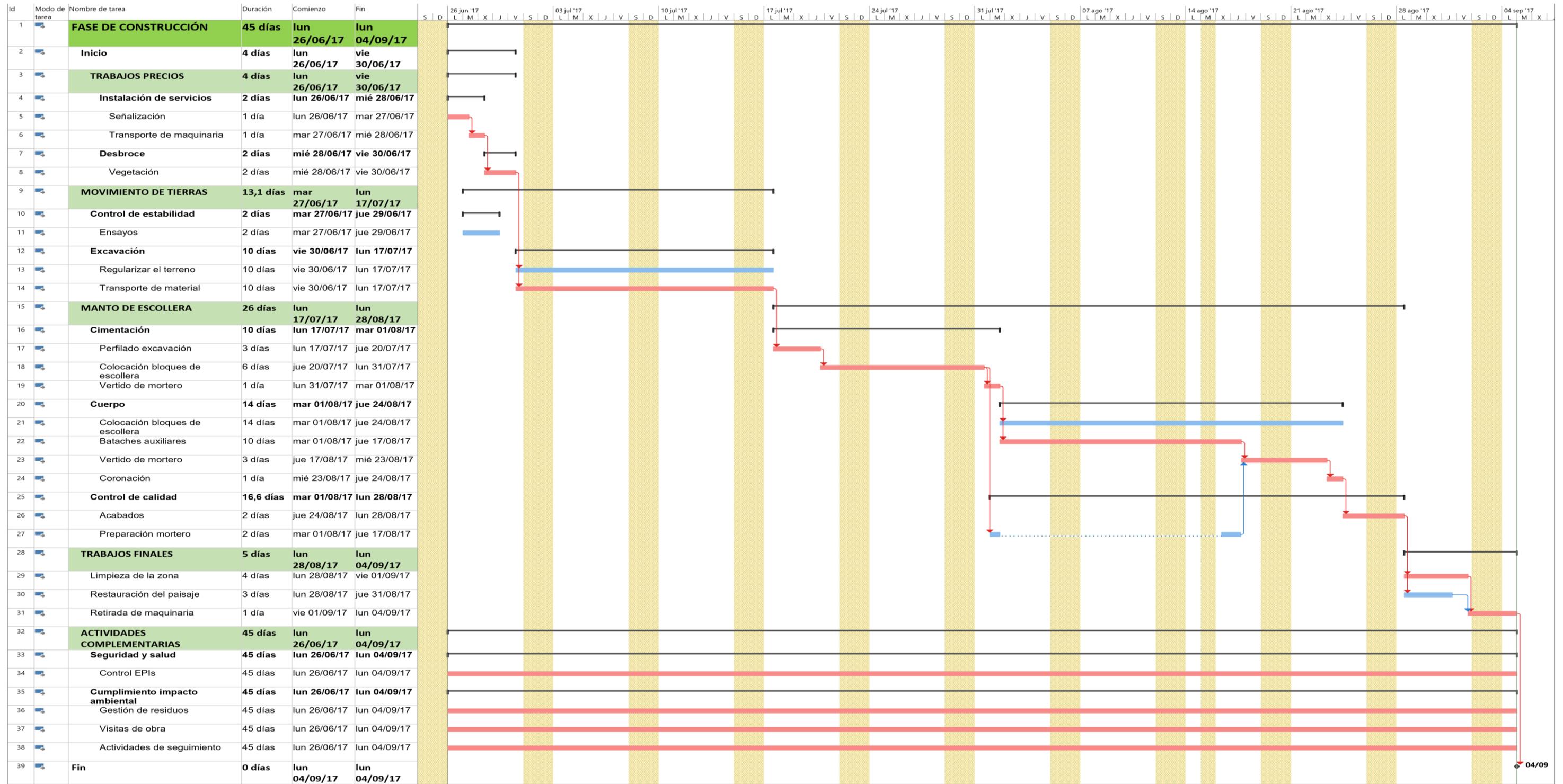
AHP | ANÁLISIS SENSIBILIDAD | TABLAS TFG



## ANEJO IV. PLAN DE TRABAJO



ESTUDIO DE LA ESTABILIZACIÓN DE LA LADERA LOCALIZADA EN EL PK 433+600 DE LA CARRETERA A-7 Y SU AFECCIÓN SOCIOECONÓMICA, TÉRMINO MUNICIPAL DE MURO DE ALCOY, ALICANTE.



Proyecto: TFG - PLANIFICACIÓN  
Fecha: jue 25/05/23

Tarea		Resumen		Hito inactivo		solo duración		solo el comienzo		Hito externo		División crítica	
División		Resumen del proyecto		Resumen inactivo		Informe de resumen manual		solo fin		Fecha limite		Progreso	
Hito		Tarea inactiva		Tarea manual		Resumen manual		Tareas externas		Tareas críticas		Progreso manual	



## ANEJO V. VALORACIÓN DE LAS OBRAS

## 1. MEDICIONES DEL PROYECTO

### 1.1 DESBROCE

Núm.	Código	Medición	UM	Descripción
1	DS01	5600,00	m <sup>2</sup>	Desbroce en el talud, con empleo de retroexcavadora, carga y transporte de los productos a vertedero o lugar de empleo.

Descripción	Unidades	Largo	Ancho	Alto	Parcial	TOTAL...
Talud	1	400,00	1,00	14,00	5600,00	5600,00

### 1.2 EXCAVACIÓN

Núm.	Código	Medición	UM	Descripción
2	EX01	400,00	m <sup>3</sup>	Excavación en talud en suelo, con empleo de retroexcavadora, con carga y transporte del material a vertedero o a acopio.

Descripción	Unidades	Largo	Ancho	Alto	Parcial	TOTAL...
Talud	1	400,00	1,00	1,00	400,00	400,00

Núm.	Código	Medición	UM	Descripción
3	EX02	2800,00	m <sup>3</sup>	Perfilado y refino de talud en tierra en suelo, incluso retirada y transporte de los productos resultantes a vertedero o a acopio.

Descripción	Unidades	Largo	Ancho	Alto	Parcial	TOTAL...
Talud	1	400,00	0,50	14,00	2800,00	2800,00

Núm.	Código	Medición	UM	Descripción
4	EX03	7200,00	m <sup>3</sup>	Formación de bataches al pie del muro, con productos adecuados procedentes de la excavación, incluso humectación.

Descripción	Unidades	Largo	Ancho	Alto	Parcial	TOTAL...
Batache	2					7200,00
Batache 1	1	200,00	3,00	6,00	3600,00	
Batache 2	1	200,00	3,00	6,00	3600,00	

### 1.3 MANTO DE ESCOLLERA

Núm.	Código	Medición	UM	Descripción
5	MNTO01	200,00	m <sup>2</sup>	Hormigón de limpieza HM de espesor 10 cm, en base de losa, incluso preparación de la superficie de asiento y nivelado, terminado.

Descripción	Unidades	Largo	Ancho	Alto	Parcial	TOTAL...
Talud	1	400,00	0,50	0,10	200,00	200,00

Núm.	Código	Medición	UM	Descripción
6	MNTO02	5400,00	m <sup>3</sup>	Escollera de cantera, 300 kg, incluyendo transporte y colocación y mortero M-7,5 en cada hilada incluso fabricación transporte y colocación.

Descripción	Unidades	Largo	Ancho	Alto	Parcial	TOTAL...
Talud	1	400,00	1,00	13,50	5400,00	5400,00

### 1.4 MEDIDAS DE PROTECCIÓN

Núm.	Código	Medición	UM	Descripción
7	PROT01	4200,00	m <sup>3</sup>	Saneamiento de taludes de excavación utilizando medios mecánicos convencionales, incluso retirada, carga y transporte a vertedero.

Descripción	Unidades	Largo	Ancho	Alto	Parcial	TOTAL...
Talud	1	400,00	0,75	14,00	4200,00	4200,00

### 1.5 RESTAURACIÓN DEL PAISAJE

Núm.	Código	Medición	UM	Descripción
8	REST01	50,00	ud	Pino carrasco de 12-14 cm de perímetro de tronco, suministrado a raíz desnuda y plantación en hoyo de 1x1x1 m, incluso abonado y primer riego.

Descripción	Unidades	Largo	Ancho	Alto	Parcial	TOTAL...
Talud	50				50,00	50,00

## 2. PRECIOS DEL PROYECTO

### 2.1 DESBROCE

Núm.	Código	UM	Descripción	Importe en letra	Importe en cifras
1	DS01	m <sup>2</sup>	Desbroce en el talud, con empleo de retroexcavadora, carga y transporte de los productos a vertedero o lugar de empleo.	UN EURO CON QUINCE CÉNTIMOS	1,50 €

### 2.2 EXCAVACIÓN

Núm.	Código	UM	Descripción	Importe en letra	Importe en cifras
2	EX01	m <sup>3</sup>	Excavación en talud en suelo, con empleo de retroexcavadora, con carga y transporte del material a vertedero o a acopio.	VEINTIDOS EUROS	22,00 €
3	EX02	m <sup>3</sup>	Perfilado y refino de talud en tierra en suelo, incluso retirada y transporte de los productos resultantes a vertedero o a acopio.	VEINTIE EUROS	20,00 €
4	EX03	m <sup>3</sup>	Formación de bataches al pie del muro, con productos adecuados procedentes de la excavación, incluso humectación.	NUEVE EUROS CON CINCUENTA CÉNTIMOS	9,50 €

### 2.3 MANTO DE ESCOLLERA

Núm.	Código	UM	Descripción	Importe en letra	Importe en cifras
5	MNTO01	m <sup>2</sup>	Hormigón de limpieza HM de espesor 10 cm, en base de losa, incluso preparación de la superficie de asiento y nivelado, terminado.	TREINTA Y CINCO EUROS Y CUARENTA CÉNTIMOS	35,40 €
6	MNTO02	m <sup>3</sup>	Escollera de cantera, 300 kg, incluyendo transporte y colocación y mortero M-7,5 en cada hilada incluso fabricación transporte y colocación.	CIENTO DECISETE EUROS	117,00 €

### 2.4 MEDIDAS DE PROTECCIÓN

Núm.	Código	UM	Descripción	Importe en letra	Importe en cifras
7	PROT01	m <sup>3</sup>	Saneo de taludes de excavación utilizando medios mecánicos convencionales, incluso retirada, carga y transporte a vertedero.	TREINTA Y OCHO EUROS Y CATORCE CÉNTIMOS	38,14 €

### 2.5 RESTAURACIÓN DEL PAISAJE

Núm.	Código	UM	Descripción	Importe en letra	Importe en cifras
8	REST01	ud	Pino carrasco de 12-14 cm de perímetro de tronco, suministrado a raíz desnuda y plantación en hoyo de 1x1x1 m, incluso abonado y primer riego.	TREINTA Y OCHO EUROS	38,00 €

### 3. VALORACIONES

#### 3.1 DESBROCE

Núm.	Código	UM	Descripción
1	DS01	m <sup>2</sup>	Desbroce en el talud, con empleo de retroexcavadora, carga y transporte de los productos a vertedero o lugar de empleo.
		Medición	Precio
		5600,00	1,50
		Importe	8400,00 €

#### 3.2 EXCAVACIÓN

Núm.	Código	UM	Descripción
2	EX01	m <sup>3</sup>	Excavación en talud en suelo, con empleo de retroexcavadora, con carga y transporte del material a vertedero o a acopio.
		Medición	Precio
		400,00	22,00
		Importe	8800,00 €

3	EX02	m <sup>3</sup>	Perfilado y refino de talud en tierra en suelo, incluso retirada y transporte de los productos resultantes a vertedero o a acopio.
		Medición	Precio
		2800,00	20,00
		Importe	56000,00 €

4	EX03	m <sup>3</sup>	Formación de bataches al pie del muro, con productos adecuados procedentes de la excavación, incluso humectación.
		Medición	Precio
		7200,00	9,50
		Importe	68400,00 €

#### 3.3 MANTO DE ESCOLLERA

Núm.	Código	UM	Descripción
5	MNTO01	m <sup>2</sup>	Hormigón de limpieza HM de espesor 10 cm, en base de losa, incluso preparación de la superficie de asiento y nivelado, terminado.

		Medición	Precio	Importe
		200,00	35,40	7080,00 €

6	MNTO02	m <sup>3</sup>	Escollera de cantera, 300 kg, incluyendo transporte y colocación y mortero M-7,5 en cada hilada incluso fabricación transporte y colocación.
---	--------	----------------	--

		Medición	Precio	Importe
		5400,00	117,00	631800,00 €

#### 3.4 MEDIDAS DE PROTECCIÓN

Núm.	Código	UM	Descripción
7	PROT01	m <sup>3</sup>	Saneamiento de taludes de excavación utilizando medios mecánicos convencionales, incluso retirada, carga y transporte a vertedero.

		Medición	Precio	Importe
		4200,00	38,14	160188,00 €

#### 3.5 RESTAURACIÓN DEL PAISAJE

Núm.	Código	UM	Descripción
8	REST01	ud	Pino carrasco de 12-14 cm de perímetro de tronco, suministrado a raíz desnuda y plantación en hoyo de 1x1x1 m, incluso abonado y primer riego.

		Medición	Precio	Importe
		50,00	38,00	1900,00 €



#### 4.PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL

---

1	DESBROCE	8400,00 €
2	EXCAVACIÓN	133200,00 €
3	MANTO DE ESCOLLERA	638880,00 €
4	MEDIDAS DE PROTECCIÓN DE TALUDES	160188,00 €
5	RESTAURACIÓN DE PAISAJE	1900,00 €
	TOTAL	942568,00 €
3%	SEGURIDAD Y SALUD	28.277,04 €
2%	GESTIÓN DE RESIDUOS	18.851,36 €
	TOTAL, PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL:	989.696.40 €

El presupuesto de ejecución material asciende a la cantidad de:

**NOVECIENTOS OCHENTA Y NUEVE MIL  
SEISCIENTOS NOVENTA Y SEIS  
EUROS CON CUARENTA CÉNTIMOS**