Universidad de Oviedo

Trabajo Fin de Máster

Análisis de modelos virtuales de taludes rocosos y propuestas de estabilización en la carretera autonómica AS-29 (Asturias)

Universidad de Oviedo
Máster en Recursos Geológicos e Ingeniería geológica
Carla Hernández Medrano
Febrero de 2022

Dña. Carla Hernández Medrano, autora del Trabajo Fin de Máster titulado "Análisis de modelos virtuales de taludes rocosos y propuestas de estabilización en la carretera autonómica AS-29 (Asturias)", confirma que es un trabajo original y solicita su presentación en el Máster Universitario de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 9 de febrero de 2022

Fdo. Carla Hernández Medrano

El Dr. Carlos López Fernández, Profesor del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo, confirma que ha tutelado el trabajo "Análisis de modelos virtuales de taludes rocosos y propuestas de estabilización en la carretera autonómica AS-29 (Asturias)", realizado por Dña. Carla Hernández Medrano y autoriza su presentación y defensa como Trabajo Fin de Máster en el Máster de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 9 de febrero de 2022

Fdo. Carlos López Fernández

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer el apoyo que he recibido durante la realización del presente Trabajo de Fin de Máster, ya que sin ellos no hubiera sido posible realizarlo:

- A Carlos López Fernández por su ayuda e inestimable paciencia para guiar esta memoria de manera telemática. También, darle las gracias por su disposición para resolver las dudas e imprevistos surgidos durante su realización.
- A Luis Alberto Pando González por su ayuda e indicaciones sobre la realización de los Modelos Digitales de Afloramiento.
- Por último, agradecer la compañía, apoyo y motivación de mi familia y amigos, y, en especial, a mis padres por brindarme la oportunidad de venir a cursar este máster.

¡Muchas gracias a todos!

ÍNDICE

Resumen....3
Abstract....3
1. INTRODUCCIÓN....4
1.1. Antecedentes....4
1.2. Zona de estudio....8
1.2.1. Localización geográfica....8
1.2.2. Características de la AS-29....9
1.3. Contexto geológico....9
1.3.1. Historia....9
1.3.2. Contexto sedimentológico....9
1.3.3. Estructura....10
1.3.4. Materiales....12
1.3.5. Hidrogeología....13
1.3.6. Geomorfología....14
1.4. Objetivos....14
2. METODOLOGÍA....15
2.1. Investigación de antecedentes....15
2.2. Labores de campo....15
2.2.1. Reconocimiento de taludes y caracterización geomecánica....15
2.2.2. Levantamiento Modelo Digital de Afloramiento....17
2.3. Trabajo de gabinete....19
2.3.1. Tratamiento SIG: modelos digitales de terreno (LiDAR)....19
2.3.2. Elaboración del Modelo Digital de Afloramiento....19
2.3.3. Definición de las características geomecánicas del macizo....20
2.3.4. Análisis de estabilidad de los taludes....22
2.3.5. Medidas de estabilización....23
2.3.6. Programa de auscultación geotécnica....25
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN....26
3.1. Modelos digitales de terreno (LiDAR)....26
3.2. Caracterización del macizo rocoso....28

3.2.1. Caracterización y clasificación del macizo rocoso 28
3.2.2. Modelos Digitales de Afloramiento 29
3.3. Análisis de estabilidad 31
3.3.1. Análisis de los factores de seguridad 40
3.4. Medidas de estabilización 52
3.5. Programa de auscultación geotécnica 53
4. CONCLUSIONES 54
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 55

ANEXOS

Anexo I.- Estaciones geomecánicas

Anexo II.- Datos de dirección de buzamiento/ buzamiento de discontinuidades medidas sobre los Modelos Digitales de Afloramiento

Anexo III.- Modelos Digitales de Afloramiento

Resumen

Los taludes de la carretera autonómica AS-29 se caracterizan por la ocurrencia de diferentes tipos de movimientos de ladera en roca que provocan el corte de la circulación dejando aisladas las poblaciones comunicadas por esta vía.

El presente Trabajo Fin de Máster aborda el estudio de estabilidad de tres taludes de esta carretera excavados en materiales de la Serie los Cabos. Para ello, además de los métodos tradicionales de caracterización del macizo rocoso, se ha utilizado una novedosa técnica basada en la elaboración de modelos virtuales de afloramiento, la cual permite mejorar sustancialmente la caracterización geomecánica del macizo. El estudio de estabilidad de los taludes ha incluido un análisis geométrico y cinemático de los mismos, así como una propuesta general de estabilización de estos, basada en el índice SMR, y un programa de auscultación geotécnica.

Abstract

The slopes of the AS-29 regional road are characterised by the occurrence of different types of rock slope movements, which cause traffic to be cut off, leaving the villages connected by this road isolated.

This Master Final Project deals with the study of the stability of three slopes of this road excavated in materials of the Serie los Cabos. For this purpose, in addition to the traditional methods of characterising the rock massif, a new technique based on the elaboration of virtual models of outcrops has been used, which allows for a substantial improvement in the geomechanical characterisation of the massif. The slope stability study included a geometric and kinematic analysis of the slopes, as well as a general proposal for slope stabilisation based on the SMR index and a geotechnical monitoring programme.

1. INTRODUCCIÓN

Esta memoria recoge el Trabajo Fin de Máster (en adelante, TFM) del Máster Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Facultad de Geología de la Universidad de Oviedo. El trabajo aborda el estudio de taludes en la carretera AS-29 que conecta Cangas del Narcea con la capital del municipio de Ibias, en el suroccidente de Asturias. Esta zona se caracteriza por la ocurrencia de diferentes tipos de movimientos de ladera de importantes dimensiones que han causado daños económicos directos e indirectos a los usuarios de la citada vía. Tradicionalmente, se ha intervenido en varios tramos de la carretera para tratar de mitigarlos mediante la instalación de mallas de guiado y de diferentes sistemas de anclaje. En este TFM se han seleccionado tres taludes para efectuar un completo estudio geológico-geotécnico de los mismos, recurriendo para ello a métodos tradicionales y a técnicas actuales de modelización, y elaborar, en su caso, una propuesta de estabilización de estos.

Como se detalla en el apartado correspondiente, para abordar este trabajo se han seguido diversas metodologías: (1) gabinete, con la recopilación bibliográfica, selección previa de posibles afloramientos, elaboración de Modelos Digitales de Afloramiento, análisis de sistemas de información geográfica (en adelante, SIG), definición de las características geomecánicas del macizo rocoso, análisis de estabilidad de los taludes, discusión de resultados obtenidos y planteamiento de posibles medidas de auscultación y (2) campo, con la selección de afloramientos, adquisición de imágenes para la elaboración de los Modelos Digitales de Afloramiento, levantamiento de estaciones geomecánicas y caracterización del macizo rocoso.

1.1. Antecedentes

La AS-29 en los últimos años se ha considerado una de las carreteras con más problemas de estabilidad de taludes del Principado de Asturias, junto con la AS-227 (San Martín-Puerto de Somiedo), la AS-253 (Cuevas - San Isidro) y la AS-117 (Avilés - Puerto de Tarna), por la ocurrencia de diversos movimientos de ladera que provocan a menudo el corte de las mismas al tráfico y la incomunicación de las poblaciones comunicadas por las mismas, en ocasiones, durante días. En la AS-29, además de la señalización vertical que advierte de potenciales desprendimientos, se han instalado diferentes medidas de estabilización y protección en los taludes. Destacan, por su frecuencia, las mallas de guiado, cuyo objetivo es reconducir los bloques de pequeñas dimensiones desprendidos como consecuencia del reducido espaciado entre las familias de discontinuidades que afectan al macizo rocoso. Es frecuente que el desprendimiento de bloques de mayores dimensiones provoque la rotura de dichas mallas y estas pierdan su función protectora.

Los movimientos de ladera más importantes de los últimos años, que han supuesto que diversas poblaciones del entorno del río Coto hayan quedado incomunicadas a través de esta vía, son los siguientes:

- El 5 de febrero de 2018 la carretera AS-29 permaneció cortada al tráfico durante 10 días debido a un desprendimiento de grandes dimensiones al oeste de la población de Vega de Hórreo (PK 31). Este movimiento de ladera sepultó los dos carriles de la carretera, lo que provocó su cierre al tráfico durante varios días (fig. 1).

Figura 1.- Desprendimiento en la AS-29 el 5 de febrero de 2018. Imágenes tomadas de Noticias del Occidente (2018).

- En la tarde del 21 de febrero de 2019 se ocasionó otro desprendimiento a la altura de la localidad de Yema (PK 41) que también provocó el corte de la vía al tráfico (fig. 2a).
- El 13 de diciembre de 2019 se desencadenó otro desprendimiento de grandes dimensiones al este de la población Vega de Hórreo (PK 31'4) que provocó el corte de la AS-29 (fig. 2b). Debido a la inestabilidad de la zona, los trabajos de estabilización y retirada de bloques de la calzada se retrasaron varios días.

Figura 2.- Movimientos de ladera en la AS-29 en 2019. A) Desprendimiento en el PK 41 en febrero. El Comercio (2019). B) Desprendimiento en el PK 31'4 en diciembre. Obtenido de RTPA (2019).

- En la madrugada del 22 de marzo de 2020 se produjo otro desprendimiento de grandes bloques que se precipitaron del talud del margen derecho de la plataforma de la carretera en el PK 14 (fig. 3a). La AS-29 permaneció cortada durante varios días mientras se procedió a la retirada del material y al reperfilado del talud afectado.
- En la mañana del 8 de diciembre de 2020 se registró otro importante movimiento de ladera en el PK 41 que afectó a la vía superior de acceso a Abanceña, Escrita, El Valle, El Viso, Cerveriz, Casares, San Damías y Perdiello, permanecieron ambas cortadas al tráfico (fig. 3b). Durante la retirada del material se produjeron desprendimientos en el propio material desprendido, lo que retraso su apertura manteniéndose cerrada durante cinco días.

Figura 3.- Movimientos de ladera en la AS-29 en 2020. A) Desprendimiento en el PK 14 en marzo. Obtenido de COPE (2020). B) Desprendimiento en el PK 41 en diciembre. Obtenido de La Nueva España (2020).

- El último gran desprendimiento registrado tuvo lugar el 1 de febrero de 2021 en el PK 40,9, también en las proximidades de la localidad de Yema, ocasionando nuevamente el cierre al tráfico de la vía (fig. 4).

Figura 4.- Desprendimiento en la AS-29 el 1de febrero de 2021. Obtenido del Comercio (2021).

En los diferentes artículos de prensa relativos a la AS-29 (*La Nueva España, 2021; La Nueva España, 2020; RTPA, 2019b; Europa Press, 2020; COPE Asturias, 2020ab; El Comercio, 2019, 2020, 2021; Elbúscolu, 2018; La Voz de Asturias, 2021; Noticias del occidente, 2018, 2020*) se apunta a que los principales factores desencadenantes de la desestabilización de los taludes fueron los fuertes temporales registrados días antes de que se produjesen los movimientos de ladera. A pesar de que el macizo rocoso está constituido por una litología especialmente resistente, la intensa fracturación que afecta al mismo, y, localmente, los efectos de las voladuras realizadas para la excavación de los taludes de la carretera han condicionado y favorecido la desestabilización de los mismos. Asimismo, la importante fracturación del macizo rocoso favorece la circulación del agua de lluvia que facilita, tanto el desencadenamiento de los movimientos de ladera, como el progreso de la alteración del macizo.

El tamaño de las cuñas desprendidas depende del número de familias de discontinuidades y el espaciado entre ellas, aunque también depende de la orientación de estas familias de discontinuidades en relación con la disposición de la carretera, las condiciones climáticas (temporales con fuertes lluvias, principalmente) y la existencia de taludes de elevada altura y pendiente.

Todo lo anterior justifica la propuesta de estudio y estabilización de varios taludes en la AS-29 que se aborda en este TFM.

1.2. Zona de estudio

1.2.1. Localización geográfica

La zona de estudio se sitúa en el suroccidente del Principado de Asturias, dentro del municipio de Cangas de Narcea. En concreto, en el tramo comprendido entre los puntos kilométricos 22 y 30 de la carretera AS-29 que conecta Cangas de Narcea con Ibias (fig. 5). Este tramo se sitúa dentro de una zona con una figura de protección, el *Parque Natural de las Fuentes del Narcea, Degaña e Ibias* reconocido por la UNESCO como *Reserva de la Biosfera e integrado en la Red Natura 2000*.

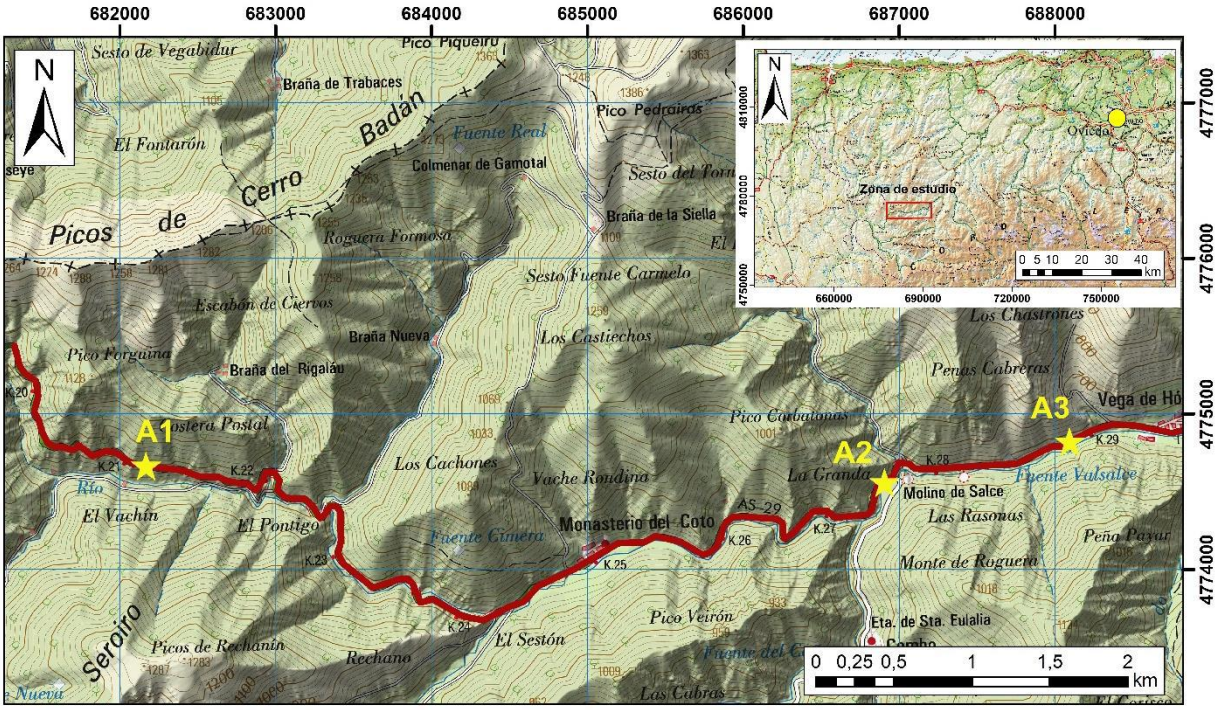


Figura 5.- Mapa de situación geográfica de la zona de estudio. Cartografía tomada de Iberpix.

La orografía de la zona es muy abrupta, con valles cerrados originados por el río Narcea y sus afluentes, como es el caso del río Coto que transcurre paralelo a la carretera AS-29. Este relieve tan accidentado, junto con un complejo contexto geológico, hace que la construcción de obras lineales presente dificultades añadidas.

El clima de esta zona, con carácter general, se puede clasificar como oceánico continentalizado con importantes rasgos mediterráneos, además de los rasgos propios del clima de montaña. Sin embargo, presenta la peculiaridad de que en la zona de estudio se genera un microclima único en Asturias debido a la influencia continental por la orografía y la lejanía al mar. De modo que hay una mayor oscilación térmica entre estaciones del año; los inviernos son más fríos que en otras zonas contiguas, rondando los -10 °C y, por el contrario, los veranos son más cálidos con temperaturas superiores a 30 °C. Asimismo, como consecuencia de su localización las precipitaciones son sensiblemente inferiores al resto de Asturias, rondando los 900 mm/anuales (Bastida et al., 1977).

La vegetación de la zona se caracteriza por la abundancia de especies arbóreas, siendo la predominante el roble albar, seguido del castaño, el rebollo, el haya y el abedul. En las orillas de los ríos se desarrollan bosques ribereños con estas especies arbóreas que protegen los márgenes fluviales de la erosión y a pesar de ser una zona de montaña, las coníferas sólo están representadas por menos del 9 % de la superficie de la zona. Concretamente, en el tramo estudiado de la carretera AS-29, las principales especies que crecen son arcedas blancas, orocantábricas con fresnos, rebollares orocantábricos, rebollares navianos y alcornocales altonavianos.

1.2.2. Características de la AS-29

La carretera AS-29, de 41,97 km de recorrido, conecta el municipio de Cangas de Narcea, de más de 12.000 habitantes, con San Antolín de Ibias, municipio con una población de 1.200 habitantes. Esta carretera se clasifica, de acuerdo a la legislación vigente, de tipo autonómica comarcal, estimándose su intensidad media diaria de tráfico (IMD) de 500 a 1999 (*Gobierno del Principado de Asturias, s.f.*). La plataforma de la carretera presenta una calzada simple para cada sentido, con carriles de 3 m, sin arcén y cuenta sólo con una cuneta interna de 0,5 m en las zonas contiguas al macizo. También alberga un guardarraíl sencillo en las zonas externas de la carretera donde hay mayor desnivel. A lo largo del recorrido de la zona de estudio, se han levantado dos pequeños viaductos (15-20 m de longitud) para sobrepasar el río Coto.

Además, cabe remarcar que la *Dirección General de Tráfico (s.f.)* consideró este vial en 2017 como *ruta ciclista protegida*.

1.3. Contexto geológico

1.3.1. Historia

El área de estudio de este TFM se sitúa en la Zona Asturoccidental-leonesa del Macizo Varisco (Lotze, F., 1945; Julivert, M., et al., 1972). Esta se caracteriza por una intensa deformación de las rocas (adquirida durante la Orogenia Varisca) que tiene lugar en los niveles más profundos de la corteza, llegando a ser suficientemente intensa como para modificar la microestructura original de las rocas en profundidad. Además, las litologías presentes en esta zona están asociada a importantes procesos de metamorfismo.

Posteriormente, estas rocas fueron deformadas por la deformación Alpina, cuya principal manifestación ha sido el desarrollo de un acortamiento Norte-Sur que ha generado nuevas fallas, algunas de notable longitud y desplazamiento, y que ha reactivado antiguas estructuras variscas (Bastida et al., 1977; Alonso et al., 1996).

1.3.2. Contexto sedimentológico

La cuenca de sedimentación de los materiales que afloran en la zona de estudio se conoce como "Surco Cántabro-Ibérico", que es de tipo graben limitada por fallas normales (fig. 6) y que se estima que se formó hace 590 millones de años (límite Precámbrico – Cámbrico). En el centro de la cuenca se situaba un mar somero epicontinental formado por procesos distensivos de tipo rift, que ocasionaron la apertura del océano Iapetus (protoAtlántico). La cuenca estaba

constituida por horsts y grabens a lo largo del Paleozoico inferior, de manera contemporánea con la sedimentación. Actualmente, se desconoce con exactitud la posición y época de actuación de cada una de las fallas debido a posteriores complicaciones tectónicas variscas, las cuales han dado lugar a la actual curvatura del Arco Astúrico que repliega la antigua cuenca paleozoica (Aramburu et al., 1995).

En general, la cuenca de sedimentación llegó a alcanzar un espesor de 12.000 m, aunque experimentó subsidencia. La mayor parte de los sedimentos eran aportados por la erosión del "Umbral Cántabro-Ibérico", a pesar de no tener un relieve muy acusado (fig. 6). Sin embargo, el borde de la cuenca no se ha podido delimitar con exactitud, pero como muestra la figura 6, algunas evidencias sugieren que zonas de Galicia central pudieron estar emergidas (Bastida et al., 1977).

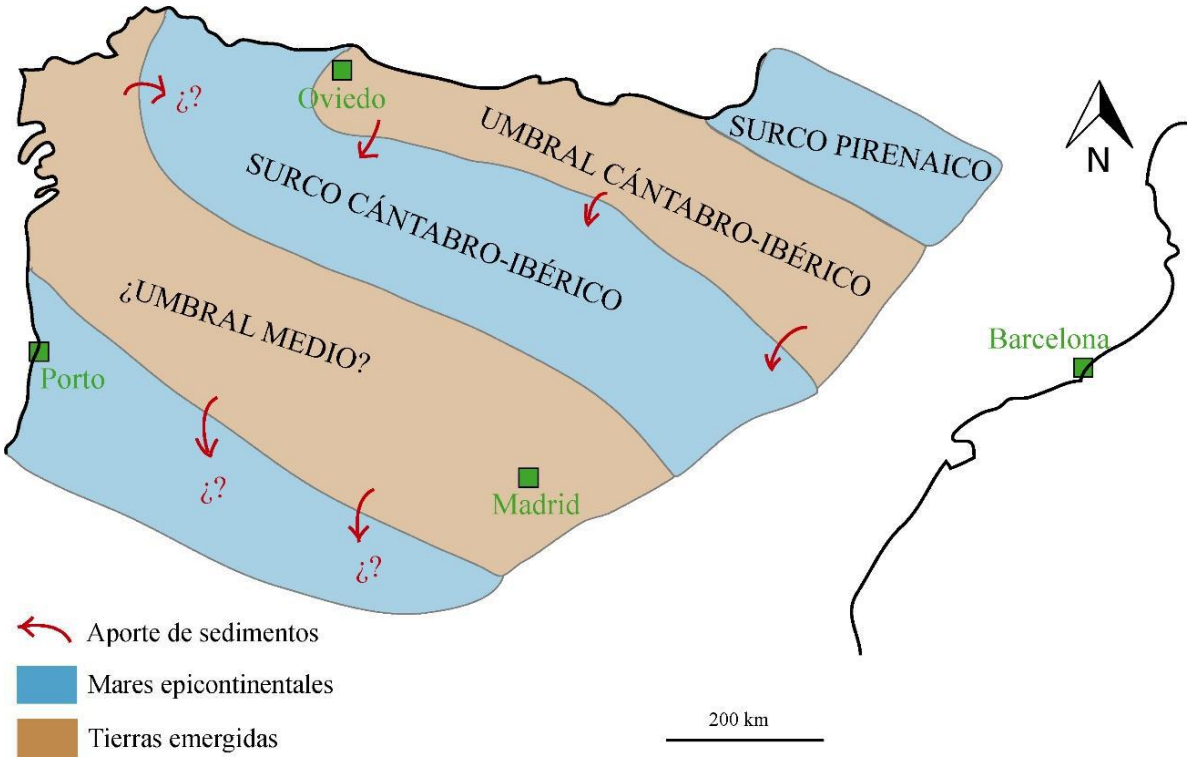


Figura 6.- Mapa esquemático de la paleogeografía del norte de la Península Ibérica en el Ordovícico inferior. Se diferencian las zonas emergidas, los mares epicontinentales (zona de estudio) y la procedencia de los aportes sedimentarios a sus aguas. Modificada de Aramburu et al. (1995).

1.3.3. Estructura

Como se indicó anteriormente, el área de estudio se enmarca en la Zona Asturoccidental-leonesa, la cual se subdivide en el Dominio del Navia y del Alto Sil, Dominio del Manto de Mondoñedo y Dominio del Caurel-Truchas. La AS-29 se sitúa dentro del primero, que se caracteriza por el gran espesor de rocas cambro-ordovícicas de naturaleza siliciclastica. Los materiales presentan foliaciones tectónicas y metamorfismo regional de bajo grado debido a una deformación interna importante de las zonas internas del orógeno. Además, se desarrollan pliegues de tamaño medio, pero apretados, cortado por cabalgamientos, e incluso, han sido replegados por ondulaciones suaves. Estas relaciones geométricas se repiten a escalas menores

(incluso microscópica), lo que ha permitido distinguir tres episodios o fases principales de deformación (Aramburu et al., 1995).

- Primera fase de deformación (F_1): pliegues apretados con vergencia este a escala de afloramiento en la mayoría de los casos. La deformación fue muy intensa, lo que generó la reorganización de los componentes minerales de las rocas, dando lugar a la foliación S_1. En el caso de las pizarras esta foliación es muy característica, ya que genera un clivaje pizarroso que en ocasiones llega a enmascarar su estatificación (S_0).
- Segunda fase de deformación (F_2): cabalgamientos que cortan a los pliegues F_1. Los pliegues de esta fase (F_2) son menores asimétricos, casi isoclinales y acostados, como consecuencia del comportamiento dúctil por el intenso metamorfismo. La foliación S_1 se deforma como resultado de F_2 y se origina una foliación de crenulación (S_2), que en rocas cuarcíticas se traduce en una fuerte foliación milonítica.
- Tercera fase de deformación (F_3): pliegues suaves, asimétricos, de plano axial subvertical y que llegan a alcanzar grandes dimensiones. La dirección axial de sus pliegues es subparalela a la de F_1, a los cabalgamientos de F_2 y a sus foliaciones (S_1 y S_2). Los pliegues F_1 y F_3 forman figuras de interferencia de tipo 3 de Ramsay. Asociada a F_3 aparece una tercera foliación (S_3), que su máximo desarrollo se da en las pizarras, considerándose como un clivaje de crenulación.

Además de estas estructuras descritas, posteriormente se produjeron estructuras tardías de menor entidad que no modifican sustancialmente la estructura previa y se dividen en estructuras longitudinales y transversales (Bastida et al., 1977). Por este motivo, los materiales de la zona de estudio presentan diversas familias de diaclasas con diferentes orientaciones, y, en general, la disposición de las capas (S_0) va variando a lo largo del trazado de la AS-29. Todo ello es consecuencia de las distintas fases de deformación a las que han estado sometidos los materiales.

1.3.4. Materiales

En la zona Asturoccidental-leonesa afloran las siguientes unidades litoestratigráficas (fig. 7):

(1) Grupo Cándana (Cámbrico inferior)
(2) Caliza de Vegadeo (Cámbrico inferior)
(3) Serie de los Cabos (Cámbrico medio – Ordovícico inferior)
(4) Pizarras de Luarca (Ordovícico medio)
(5) Formación Agüeira (Ordovícico superior)
(6) Capas de la Garganta (Silúrico).

Como se muestra en la figura 8 y como se ha mencionado anteriormente, en la zona de estudio únicamente afloran los materiales pertenecientes a la Serie de los Cabos y las Pizarras de Luarca.

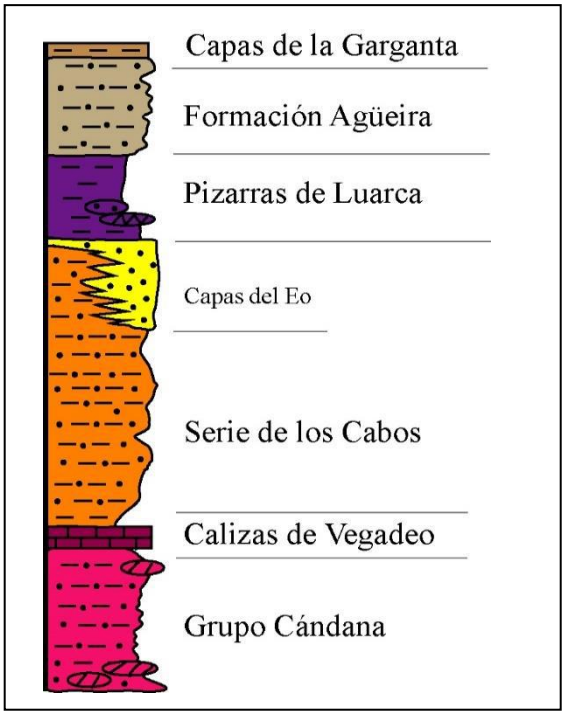


Figura 7.- Columna estratigráfica del Manto del Navia y el Alto Sil. Modificada de Aramburu, C., et al., (1995).

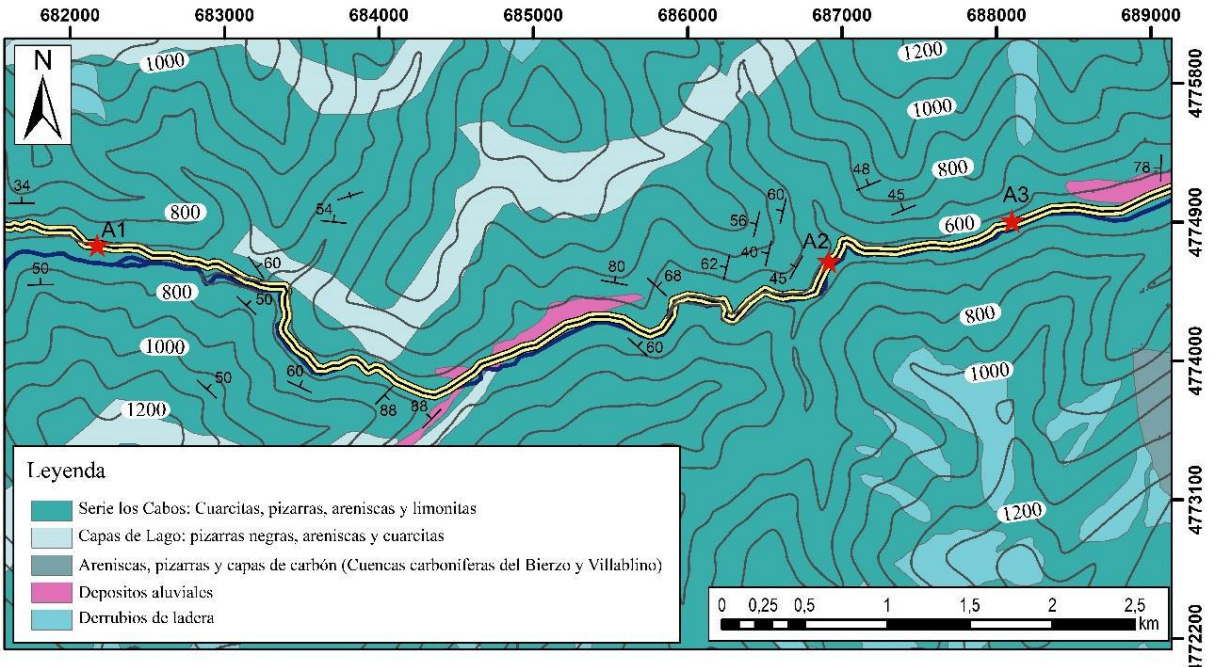


Figura 8.- Mapa geológico de la zona de estudio. Se indican los 3 afloramientos (A1, A2 y A3) con estrellas rojas, la carretera con la doble línea amarilla y el río con trazo azul. Cartografía tomada de Iberpix.

La Serie de los Cabos está constituida por una potente sucesión de 3.000 a 5.500 m de alternancias de pizarras, areniscas y limonitas. En el techo de la sucesión aparece un tramo cuarcítico de 50 a 1800 m de espesor, conocido como "capas superiores del Eo", que se corresponde con la litología de los afloramientos A1 y A2 de este trabajo. En cambio, el afloramiento A3 corresponde a las capas de areniscas. En el Dominio del Navia y Alto Sil predominan las trazas fósiles, destacando *Cruziana* y *Skolithos*. La parte más baja de la Serie de los Cabos se compone de pizarras verdes con abundantes trilobites del Cámbrico medio. En

el resto de la formación, sólo se han encontrado algunos fragmentos de equinodermos y lingúlidos de escaso valor cronoestratigráfico, por lo que la serie ha sido datada mediante las diferentes icnoespecies de Cruziana.

Las Pizarras de Luarca (Capas de Lago) están constituidas esencialmente por pizarras ricas en pirita y su potencia oscila entre los 300 y 1200 m, siendo menor hacia el Dominio del Manto de Mondoñedo. La parte inferior de la serie presenta intercalaciones de areniscas, donde en el Dominio del Navia y Alto Sil se individualiza hacia la parte media de la formación un horizonte bastante potente de cuarcita conocido como "Cuarcita de Sabugo". En algunas localidades más orientales a la zona de estudio, estas pizarras se encuentran intercaladas con rocas volcánicas básicas (diabasas) y niveles de hierro oolítico. Las Pizarras de Luarca han sido datadas con los escasos fósiles presentes, como los graptolites y trilobites, indicando una edad del Ordovícico medio en la parte más occidental y Ordovícico inferior, con el hallazgo de algunos ejemplares de cruzianas (Bastida et al., 1977).

1.3.5. Hidrogeología

La zona de estudio se sitúa en la cuenca hidrográfica del río Narcea (vertiente izquierda), cuyos principales afluentes son los ríos Naviego, Arganza, Nonaya, Pigüeña y Coto; este último discurre prácticamente en su totalidad paralelo al tramo de la AS-29 estudiado. El río Coto nace en las proximidades de la localidad de Valvaler, desembocando tras casi 25 km en el río Narcea, en las inmediaciones de la población de La Regla.

La naturaleza y estructura del sustrato rocoso por el que discurre la AS-29 hace que el agua procedente de las precipitaciones circule y se almacene en la red de fracturación del macizo. Por el contrario, las formaciones superficiales (coluviones, canchales, etc.) constituyen acuíferos porosos, cuya capacidad de almacenamiento depende de la extensión y potencia de las propias formaciones. Como se indicó anteriormente, el macizo rocoso se comporta principalmente como un acuífero fisural, dada la elevada fracturación (principalmente de origen físico) del mismo y la reducida permeabilidad de la matriz rocosa. Esta impermeabilidad está relacionada directamente con el metamorfismo que han sufrido estos materiales, que ha provocado la desaparición de su porosidad primaria, anulando o restringiendo notablemente sus posibilidades acuíferas.

El macizo rocoso presenta una combinación de ambos tipos, aunque destacando el fisural por el alto número de discontinuidades. En un segundo plano, debido a la porosidad del propio material, también se crean acuíferos porosos, pero de menor capacidad de movilización. Las características hidrogeológicas de los materiales que afloran en la zona de estudio se pueden asociar a dos grandes grupos de materiales, los preestefanienses y los estefanienses (Bastida et al., 1977). Según los resultados de ensayos Lugeon contenidos en el proyecto constructivo del túnel del Rañadoiro (PK 34-35 de la AS-29) (comunicación personal), la Serie de Los Cabos ofrece valores de 2,38 a 3,36 Unidades Lugeon, lo que apunta a un macizo rocoso poco permeable - permeable (tabla 1).

Tipo de macizo rocoso	Unidades Lugeon	Presión (kp/cm^2)
Muy impermeable	0 - 1	10
Poco permeable	1 – 3	10
Permeable	> 3	10
	1,5 – 6	5
Muy permeable	> 3	10
	> 6	5

Tabla 1.- Clasificación del tipo del macizo rocoso en función de su permeabilidad. Obtenido de Olalla y Sopeña. (1991).

1.3.6. Geomorfología

Asturias es la región con la orografía más accidentada de la Península Ibérica y su abrupto relieve se debe a su historia geológica y al clima. Su relieve ha ido evolucionando gracias a los fenómenos geomorfológicos de carácter principalmente erosivo. La Cordillera Cantábrica se caracteriza por procesos erosivos en laderas y cauces debidos a las precipitaciones, las fuertes pendientes y los grandes desniveles entre cumbres y valles (Aramburu et al., 1995). Estos procesos naturales han ido modelando el relieve de la zona de estudio, esculpiendo valles profundos de gran desnivel. En las laderas, aparecen de forma dispersa depósitos de ladera, generalmente de tipo canchal (con poca a abundante matriz dependiendo de la zona), originados por acumulación de bloques areniscosos desprendidos de las zonas más elevadas. También hay aluviones procedentes del río Coto en el fondo del valle. En todo caso, las formaciones superficiales de la zona de estudio apenas tienen relevancia para este trabajo, dado que los taludes de la AS-29 están excavados en el sustrato rocoso.

La orientación general de las laderas es Noreste-Suroeste, salvo en la zona más occidental, donde su orientación es Oeste-Este, prácticamente perpendicular a la orientación general del entorno de la AS-29. El valle por el que discurre la carretera y el río Coto presenta una orientación Noroeste-Sureste en el sector más occidental (desde el PK 19 al 24) y Suroeste-Noreste en el oriental (entre el PK 24 y el 42). Las cumbres de las laderas en las inmediaciones de la AS-29 alcanzan una cota de hasta 1.200 m, siendo la cota media del fondo del valle de 600 m. La pendiente media de las laderas se sitúa en 33º, estando concentrados los taludes de mayor entidad en la zona donde se han seleccionado los afloramientos objeto de estudio en este trabajo.

1.4. Objetivos

- Caracterizar geomecánicamente el macizo rocoso en los puntos de interés.
- Comprobar la aportación de los Modelos Digitales de Afloramiento a la caracterización del macizo rocoso.
- Analizar la estabilidad de los taludes frente a los mecanismos de rotura habituales en roca.
- Elaborar una propuesta de estabilización y un programa de auscultación geotécnica para los taludes.

2. METODOLOGÍA

La metodología seguida para la realización de esta memoria consta de tres etapas principales: (1) la investigación de antecedentes sobre la zona de estudio, (2) trabajo de campo y (3) trabajo de gabinete.

2.1. Investigación de antecedentes

La revisión de antecedentes sobre la zona de estudio y la recopilación de información sobre las propiedades de los materiales se ha llevado a cabo a partir de la revisión de diversos artículos científicos, manuales técnicos, trabajos académicos, artículos de presa e informes geológicos-geotécnicos específicos.

2.2. Labores de campo

El reconocimiento de taludes contó con una fase previa de búsqueda de posibles afloramientos susceptibles para levantar las estaciones geomecánicas y su Modelo Digital de Afloramiento (en adelante, MDA). Tras la selección de los tres taludes (tabla 2), se han determinado los parámetros necesarios para su correcta caracterización geológica-geotécnica. Para ello, se han tomado datos sobre su localización, frente rocoso, sustrato, resistencia, espaciado, estado de las discontinuidades y presencia de agua en las juntas. También se ha determinado la resistencia mecánica de los materiales mediante la utilización un esclerómetro (tipo L, según la norma española UNE-EN 12504-2), seleccionando para ello dos muestras representativas de cada afloramiento.

Estación geomecánica	Localización (PK)	Coordenadas UTM X	Coordenadas UTM Y
A1	22,25	682114,1	4774674,6
A2	28,25	686859,8	4774519,0
A3	29,50	688127,3	4774822,4

Tabla 2.- Localización de cada afloramiento seleccionado de la carretera AS-29. Coordenadas ETRS 1989 UTM Zone 29N.

2.2.1. Reconocimiento de taludes y caracterización geomecánica

En la fase de reconocimiento y la selección de los tres afloramientos, previamente al trabajo de campo, se recurrió a diferentes visores cartográficos. Inicialmente se preseleccionaron diez afloramientos, escogiendo finalmente tres para poder realizar un trabajo completo de caracterización geológica y geotécnica. El principal problema de los taludes descartados para su estudio es que contaban con una malla para reconducir las cuñas desprendidas, lo que impedía elaborar de forma adecuada el MDA, técnica que se pretendía testar en este trabajo. Además, muchos de ellos no presentaban unas dimensiones mínimas o se localizaban en una zona potencialmente peligrosa para su estudio. Otro factor que se tuvo en cuenta fue la accesibilidad de los afloramientos y la logística (entendida como capacidad de trabajo en la zona de estudio), puesto que todos ellos se situaban en taludes de la carretera AS-29.

En cada uno de los afloramientos se levantó su correspondiente estación geomecánica y se tomaron medidas de diferentes parámetros (ver estadillos en Anexo I y II). El orden seguido

para la toma de datos se estructura en (1) datos principales, (2) localización, (3) frente rocoso, (4) recubrimiento, (5) toma de imágenes, (6) identificación, (7) alteración, (8) determinación indirecta de la resistencia a la compresión simple de manera cualitativa y cuantitativa (esclerómetro), (9) descripción de las discontinuidades identificadas, (10) medidas de la fracturación y (11) cuantificación de la calidad del macizo rocoso (fig. 9).

Figura 9.- Levantamiento de la estación geomecánica 2 (A2).

La toma de datos estructurales se llevó a cabo con la aplicación para Android de *FieldMove Clino* (v. 2.5.19) (fig. 10). En cada afloramiento, asimismo, se tomaron dos muestras para posteriormente realizar los ensayos de resistencia al rebote mediante esclerómetro según la norma UNE-EN 12504-2.

Figura 10.- Medición de dirección y buzamiento de las discontinuidades con FieldMove Clino (v. 2.5.19).

2.2.2. Levantamiento Modelo Digital de Afloramiento.

En los tres afloramientos seleccionados, como se ha mencionado en el apartado anterior y se detalla en el Anexo I y II, se tomaron imágenes convencionales de cada uno de los taludes para dar las primeras impresiones de la estabilidad del macizo rocoso (fig. 11).

El levantamiento del MDA se realizó mediante una serie de fotografías, entre 10 y 15 por afloramiento. Con el teléfono móvil, Redmi Note 7, se tomaron fotografías a alta resolución (48 Mpx) y a estándar (12 Mpx). De modo que de cada afloramiento se obtuvieron 4 series de fotografías: 2 de alta resolución y 2 de resolución estándar. En total, por afloramiento se tomaron 40 – 60 fotografías, la mitad con la resolución estándar y la otra alta. Cabe destacar que no se tomó un mayor número de fotografías para conseguir agilizar el proceso de modelización digital de los afloramientos (que entrañaba cierto peligro por el volumen de tráfico de la vía), ya que con un limitado número de fotografías se cumplen de forma suficiente los objetivos planteados en este TFM.

A partir de estas fotografías se elaboró el MDA utilizando la técnica fotométrica de Stucture From Motion (SfM). Esta metodología consiste en hacer varias fotografías horizontales, con un solape mínimo entre ellas del 60-70 %, tomadas en semicírculo a una distancia de 5-6 m del frente rocoso.

Sobre el afloramiento se colocaron dos jalones, uno a cada extremo, elementos que ha permitido fijar la escala vertical (con la altura de cada jalón) y horizontal (con la distancia entre ambos) del afloramiento. Los jalones se instalaron a una distancia aproximada de 9-10 m en cada estación geomecánica y se determinó la orientación de la línea que los separaba. Estos elementos permitieron escalar y orientar los MDA para que posteriormente se pudieran obtener medidas estructurales como si de un talud real se tratase.

Aun así, para contrastar la información tomada con el MDA, en campo se tomaron aproximadamente 20 medidas de dirección y buzamiento por afloramiento, seleccionando un plano de referencia que se marcó con espray fotográfico (fig. 11).

a)

b)

Figura 11.- Aspecto general de los afloramientos estudiados. a) Afloramiento A1, b) afloramiento A2 y c) afloramiento A3.

2.3. Trabajo de gabinete

El trabajo de gabinete realizado en esta memoria se basó en (1) el tratamiento SIG para realizar modelos detallados de elevaciones del terreno, (2) la elaboración de los MDA, (3) la definición de las características geomecánicas del macizo, (4) el análisis de estabilidad de los taludes y, por último, (5) las medidas necesarias para su estabilización y auscultación. Con todos estos procedimientos, acompañados de la información recopilada de los métodos anteriores, es posible alcanzar los objetivos fijados inicialmente.

2.3.1. Tratamiento SIG: modelos digitales de terreno (LiDAR)

La elaboración de modelos detallados de terreno se realizó mediante el programa *ArcGIS* (v.10.8). Desde el portal del Centro Nacional de Información Geográfica se descargaron los modelos digitales de elevaciones de LiDAR 1ª Cobertura y se elaboraron tres modelos detallados de cada uno de los afloramientos (sistema de coordenadas: ETRS 1989 UTM 29N), con resoluciones vertical y horizontal de 0,5 m.

2.3.2. Elaboración del Modelo Digital de Afloramiento.

La elaboración de MDA es una técnica innovadora que tiene como objetivo efectuar medidas estructurales en fase de gabinete. Tras la toma de imágenes de campo, explicada en apartados anteriores, se integraron las imágenes de cada afloramiento a máxima resolución (48 Mpx) y se analizaron las coincidencias entre ellas para generar la nube de puntos que permite visualizar los taludes. Para ello, se utilizó el programa *Agisoft* (v. 1.4.5.7354).

Posteriormente, se editó la nube de puntos, con el software *CloudCompare* (v. 2.11.3). Se comprobó su calidad y se eliminaron las zonas situadas fuera de la zona de estudio comprendida entre los dos jalones y/o con anomalías, es decir, se delimitó espacialmente el MDA. Además, se escaló cada modelo tomando como referencia, tanto vertical como horizontal, la altura de los jalones y la distancia entre los mismos respectivamente. Seguidamente, se procedió a orientar el modelo mediante la posición relativa de los jalones. Una vez realizados todos estos pasos, se procedió a realizar medidas de dirección y buzamiento y medir distancias entre diferentes puntos. Toda la información obtenida fue exportada para proceder a su tratamiento.

2.3.3. Definición de las características geomecánicas del macizo

En cada afloramiento se llevó a cabo el levantamiento de una estación geomecánica con el objetivo de caracterizar el macizo rocoso. Este TFM afronta el levantamiento de estaciones geomecánicas de una forma novedosa, dado que muchos datos estructurales han podido ser establecidos en fase de gabinete a partir de los citados MDA.

Para determinar las características geomecánicas del macizo rocoso se siguieron los estadillos recogidos en los Anexos I y II que incluyen (1) la información general del afloramiento, (2) los datos sobre la roca matriz, (3) la calidad del macizo rocoso (RMR_{89}, RQD, Índice Q, GSI y SMR), (4) la fracturación del macizo y (5) la descripción de discontinuidades.

(1) La información general de cada estación geomecánica incluye la naturaleza del macizo rocoso, su localización geográfica y una descripción general del mismo.
(2) En lo relativo a la roca matriz, se ha identificado la litología y su grado de alteración, y se ha establecido su resistencia mecánica a partir de los índices de campo y del esclerómetro. Para calcular la resistencia mediante el esclerómetro, se ha partido de la norma UNE-EN 12504-2, donde se puede hacer la conversión del rebote del martillo (R) a la resistencia a la compresión uniaxial (σ_{ci}, MPa) gracias a la gráfica de Miller (1965) (fig. 12).

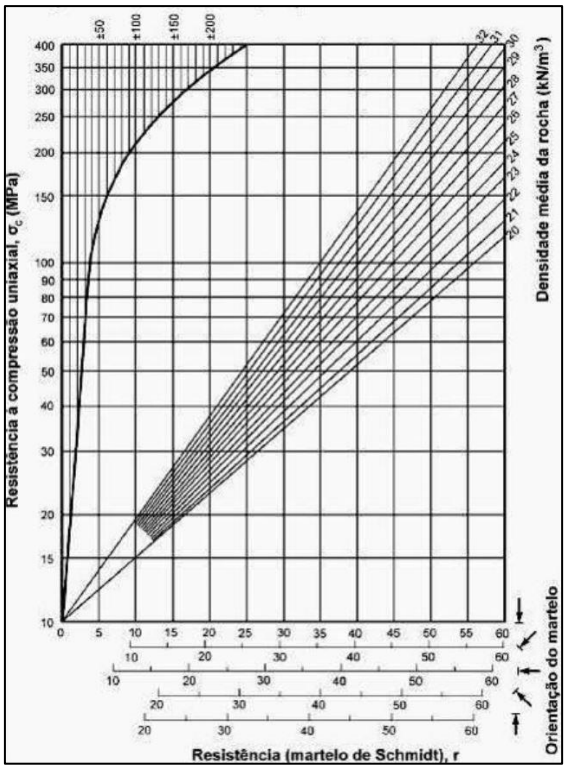


Figura 12.- Gráfico de correlación para el martillo Schmidt entre resistencia a compresión, densidad de la roca y rebote (Miller, 1965).

(3) La descripción de la calidad del macizo rocoso se ha basado en la clasificación geomecánica RMR de Bieniewski (1989), y, de manera complementaria, el índice Q de calidad del macizo rocoso de Barton (1974), el índice de resistencia geológica GSI (Hoek, E., & Brown, E. T.,2019) y la clasificación geomecánica SMR propuesta por Romana (1985). Esta primera clasificación permite obtener un índice de calidad del macizo rocoso a partir de resistencia de la roca intacta, grado de fracturación y diaclasado, presencia de agua y orientación de las discontinuidades respecto al talud. De este modo se obtiene un valor numérico que oscila entre 0 y 100 (tabla 3).

Clasificación RMR de Bieniawski (1989)

Valoración del RMR	Clasificación	Descripción de la roca
100 – 81	I	Muy buena
80 – 61	II	Buena
60 – 41	III	Media
40 – 21	IV	Mala
< 20	V	Muy mala

Tabla 3.- Clasificación del macizo rocoso a partir del RMR (Bieniawski, 1989).

(4) Para analizar la fracturación del macizo rocoso se determinó el parámetro Jv, número de juntas por metro cúbico, que a su vez sirvió para establecer el índice de calidad del macizo (RQD, tabla 4). Para ello se recurrió a la relación: RQD = 110 – 2.5 * Jv (para $4 \leq Jv \leq 44$.

Calidad	RQD (%)
Muy mala	< 25
Mala	25 - 50
Aceptable	50 – 75
Buena	75 – 90
Muy buena	90 - 100

Tabla 4.- Calidad del macizo rocoso.

(5) Para la descripción de discontinuidades, en campo se tomaron varios planos de diferentes familias de discontinuidades. Asimismo, a partir de los MDA se tomaron medidas de decenas de planos, muchos de ellos no accesibles en campo. En el Anexo II se muestra la descripción de todas las familias de discontinuidades.

2.3.4. Análisis de estabilidad de los taludes

Con toda la información obtenida se abordó el análisis de estabilidad de cada talud. Los principales mecanismos de inestabilidad esperables en estos taludes son (1) los deslizamientos planares, (2) deslizamientos en cuña y (3) vuelcos.

(1) Los deslizamientos planares son aquellos que se producen a favor de una familia de discontinuidades con un rumbo de ± 20° con respecto a la cresta del talud. Para que se produzcan, el ángulo de rozamiento debe ser menor que el ángulo de inclinación del potencial plano de deslizamiento y este, a su vez, inferior al ángulo de la cara del talud.
(2) Los deslizamientos en cuña se producen con la intersección de dos familias de discontinuidades. Para que se ocasione, el buzamiento del talud debe ser mayor a la línea de intersección de ambos planos, y, esta a su vez, ser mayor que el ángulo de fricción.
(3) Los vuelcos se producen cuando el plano de discontinuidad coincide aproximadamente con el plano del talud y tiene un elevado buzamiento. Los vuelcos por flexión se producen cuando hay una discontinuidad con una orientación muy marcada y espaciados pequeños.

Para realizar el análisis de estabilidad de los tres taludes se ha recurrido a los programas *Dips v.7.0; RocPlane v.2.0.2.9; Swedge v.4.0.7.8; RocTopple v.2.004* de Roscience.

Con el programa *Dips* se identificaron los planos medios de las familias de discontinuidades tomadas en cada afloramiento. Posteriormente, se procedió a realizar el análisis geométrico y cinemático para deslizamientos planares, deslizamientos en cuña, vuelcos por flexión y vuelcos directos en cada afloramiento.

Con *RocPlane* se ha calculado la probabilidad de ocurrencia de las roturas planares para las diferentes familias de discontinuidades de acuerdo al análisis previo efectuado con *Dips*. Este análisis probabilístico se ha basado en el método de muestreo Monte Carlo (1000 muestras por afloramiento). introduciendo como única variable el ángulo de rozamiento (A1 = 29º; A2 = 30º; A3 = 27º) con una desviación estándar de 3º y un valor mínimo y máximo relativo de 6º.

Con *Swedge* se realizó el análisis de probabilístico y con el método de muestreo de Monte Carlo, para conocer la estabilidad de los taludes frente a deslizamientos de cuñas. El único parámetro introducido en este caso también fue el ángulo de rozamiento, que posteriormente fue analizado mediante el análisis de probabilidad acumulativa.

Con *RocTopple* se llevó a cabo el estudio de estabilidad del talud frente a la ocurrencia de vuelco flexural y directo. Al igual que en anteriores casos, se consideró una distribución normal del ángulo de rozamiento con un promedio para cada afloramiento y una distribución estándar de 3º con un valor mínimo y máximo relativo de 6º.

Para poder realizar estos análisis con los diferentes programas, se calculó la cohesión, el peso unitario y el ángulo de rozamiento de cada macizo rocoso.

La cohesión se ha obtenido mediante la fórmula (1).

$$(1)\ C = 5 * RMR$$

Esta cohesión es la del macizo rocoso como material, pero para el análisis de estabilidad realizado se va a utilizar la cohesión que existe en los planos de las discontinuidades. El peso unitario y el ángulo de rozamiento del macizo rocoso se han estimado en función de su litología y características internas (González de Vallejo, L.I., 2002).

2.3.5. Medidas de estabilización

La propuesta de estabilización de los taludes se abordó considerando el mantenimiento de la actual geometría de los taludes, pero adoptando, en su caso, diferentes técnicas de estabilización. Para ello, se consideraron los procedimientos propuestos según al índice SMR y al J_v determinado en cada talud.

Con la adición de elementos estructurales se busca aumentar la resistencia del terreno con: (1) sistemas de protección, (2) sistemas de refuerzo, (3) elementos de hormigón, (4) medidas de corrección del régimen hidráulico y (5) reexcavación. Aunque en esta memoria sólo se van a detallar las cuatro primeras medidas debido a que son las más adecuadas según los resultados obtenidos en los próximos apartados.

En las tablas 5 se recogen las diferentes medidas propuestas por Romana (1985) para la estabilización de taludes de acuerdo con su índice SMR.

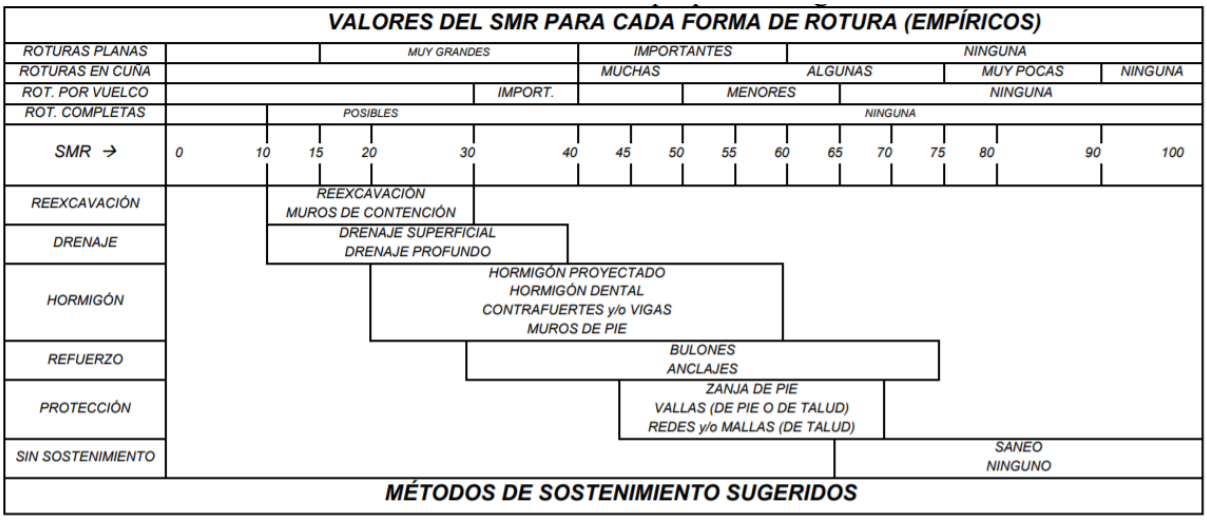


Tabla 5.- Métodos de sostenimiento sugeridos en función del valor del SMR y del tipo de rotura producida en el talud. Obtenido de Romana, 1985.

En la tabla 6 se muestran el tipo de bulones requerido según el SMR, indicando la densidad de la red de bulones por metro cuadrado, la distancia entre ellos, la densidad de fuerza y si precisa de gunita como medida complementaria.

Clase	SMR	Bulones por m^2	Distancia entre bulones (m)	Densidad de fuerza (t/m^2)	Gunita
II	> 65	0,08	3,5	1,00 – 1,25	No
IIb	65 – 60	0,11	3,0	1,30 – 1,60	No
III	60 – 45	0,40	1,6	4,50 – 6,00	Ocasional
		0,70	1,2	8,00 – 10,00	Ocasional/ Sistemática
		1,00	1,0	12,00 – 15,00	Sistemática
IIIb	45 – 40	1,00	1,0	12,00 – 15,00	Sistemática

Tabla 6.- Esquema indicativo sobre el bulonado según el SMR. Modificado de Romana, 1985.

En la tabla 7 también se determina el tipo de bulones necesarios según su J_v con su correspondiente espaciado de juntas y el tipo de roca. De la cual, se obtienen las características del bulonado y la distancia entre ellos.

Tipo de roca	Espaciamiento de juntas	J_v	Bulonado	Distancia (m)
Dura. En bloque	> 1	1 – 3	Sistemático	3,0 – 3,5
Dura. Fracturada	0,3 – 0,1	3 – 10	Sistemático	1,0 – 3,0
Dura. Muy dura	< 0,3	10 – 18	Sistemático	1,0
Dura. Muy dura	< 0,3	> 18	Sólo con gunita	1,0
Meteorizada. Con juntas débiles	-	-	Según las juntas	Variable
Blanda (C_0 5-25 MPa)	-	-	Sólo con gunita	-
Blanda (C_0 5-25 MPa)	-	-	No adecuado	-

Tabla 7.- Recomendaciones de bulonado de macizos rocosos según el J_v. Modificado de Romana, 1985.

En la tabla 8 se indican las características principales del tipo de red y el peso de los bloques según su J_v. De este modo, a partir de su valor de J_v, se conoce el peso del bloque y el tipo de red que necesitaría el talud.

J_v	Tipo de red	Peso del bloque (t)
5 – 10	Reforzada o de cables	0,15 – 0,50
> 10	Normal o de alambre	< 0,15

Tabla 8.- Condiciones indicativas para el uso de redes según su J_v. Modificado de Romana, 1985.

2.3.6. Programa de auscultación geotécnica

Cuando se presentan signos de inestabilidad en un talud rocoso, se recurre a la auscultación del propio talud y de su entorno, para obtener información sobre su comportamiento y características del movimiento (González de Vallejo, L.I., 2002). Debido al coste que suponen el seguimiento de medidas de auscultación, únicamente suelen limitarse a situaciones en las que la inestabilidad del talud puede afectar a infraestructuras cercanas, como es el caso de la carretera AS-29. Durante la estabilización del terreno, se plantea el seguimiento del comportamiento y características del macizo rocoso para conocer su evolución tras las acciones inducidas por las medidas de estabilización. Para ello, se presenta un programa de auscultación geotécnica que permite ejecutar las obras de manera controlada, optimizar el diseño de las estructuras propuestas, y, en general, mejorar la seguridad de los taludes de la AS-29.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Modelos digitales de terreno (LiDAR)

En este apartado se presentan los tres modelos detallados de terreno de cada uno de los afloramientos (fig. 13, 14 y 15), cuya elaboración pretende aportar una contextualización topográfica del entorno de los mismos. En los modelos se muestra con una línea doble amarilla la carretera AS-29, con un recuadro rojo la zona del afloramiento y el cauce del río Coto con trazo azul.

Como se puede observar en las citadas figuras 13, 14 y 15, la zona donde se ubican los taludes objeto de estudio muestra un relieve abrupto, con laderas de orientación Sur (Sureste en el A2) que adoptan una fuerte pendiente. Las rondan los 1000 m de altitud, siendo ligeramente inferior en el A3. El fondo del valle por el que transcurre el cauce presenta una cota de ~725 m en el A1, entre 600 y 575 m en el A2 y finalmente a 550 m en el A3. La AS-29, en los afloramientos A2 y A3, se sitúa muy próxima al río debido al encajamiento del valle. Estos dos taludes están a una cota comprendida entre 550 y 575 m. Sin embargo, el A1 está a una altitud superior (~ 800 m), lo que supera en más de 200 m a los otros afloramientos.

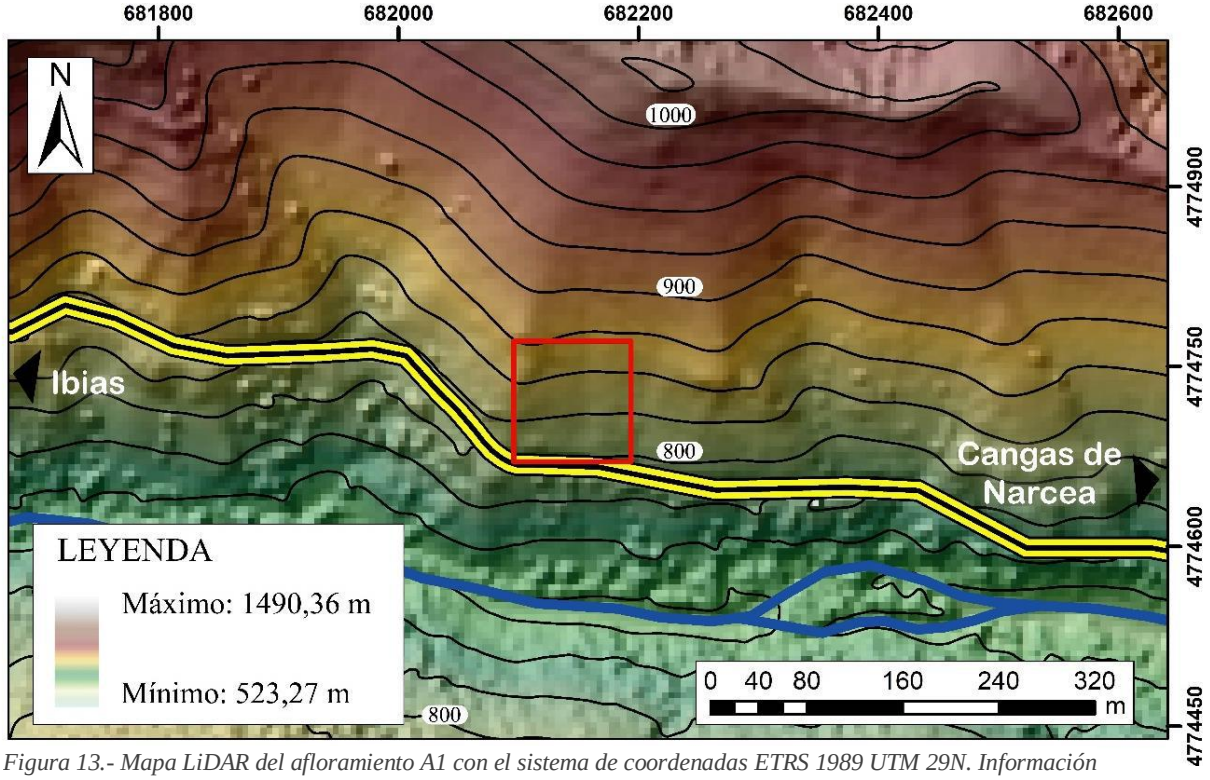


Figura 13.- Mapa LiDAR del afloramiento A1 con el sistema de coordenadas ETRS 1989 UTM 29N. Información obtenida del CNIG.

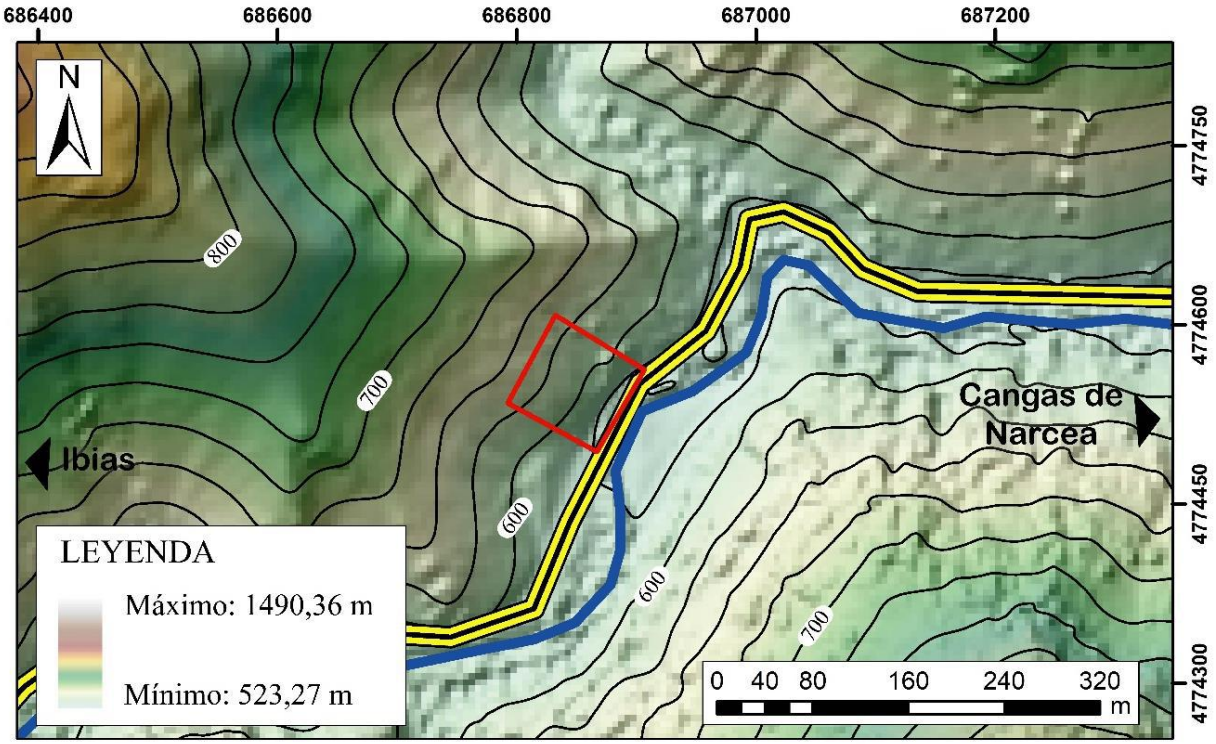


Figura 14.- Mapa LiDAR del afloramiento A2 con el sistema de coordenadas ETRS 1989 UTM 29N. Información obtenida del CNIG.

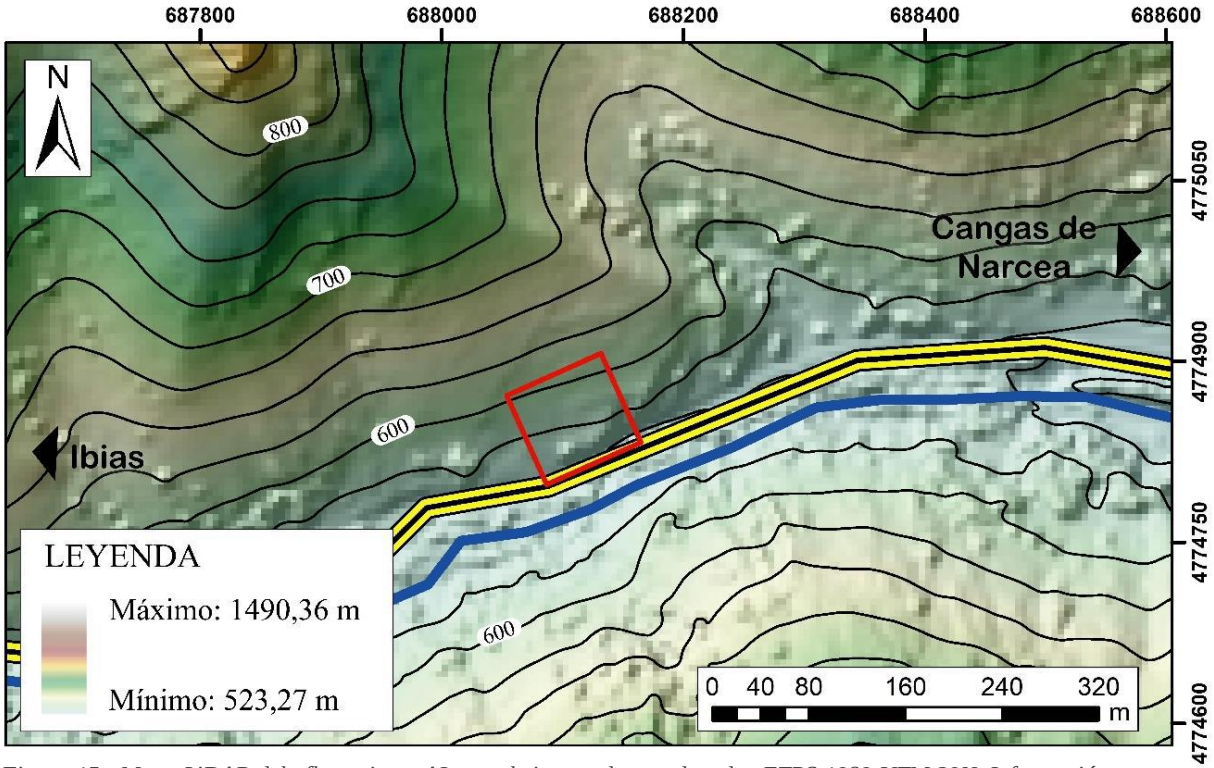


Figura 15.- Mapa LiDAR del afloramiento A3 con el sistema de coordenadas ETRS 1989 UTM 29N. Información obtenida del CNIG.

3.2. Caracterización del macizo rocoso

3.2.1. Caracterización y clasificación del macizo rocoso

A continuación, se expone la síntesis de los resultados obtenidos de caracterización del macizo rocoso en cada uno de los tres taludes estudiados. Los datos completos se recogen en los Anexos I y II.

3.2.1.1. Estación geomecánica 1 (A1)

La estación geomecánica 1 se sitúa en el PK 22,25, en un talud de orientación 206/65 de cuarciarenitas de la Serie de los Cabos. El macizo rocoso está fracturado, formando bloques de tamaño pequeño, con índice J_v entre 10 y 30 discontinuidades/m^3. Su resistencia mecánica, según los índices de campo, es muy dura (100 – 250 MPa), aunque con el esclerómetro indica valores más bajos (30 – 50 MPa), lo que correspondería con una roca moderadamente dura. Se estimó una cohesión de 3 kPa y un ángulo de rozamiento de 29°.

El talud presenta tres familias de discontinuidades: (1) S_0, o estratificación, con orientación 105/72; (2) F_1 de 237/55 y (3) F_2 de 288/49. El espaciado medio de sus discontinuidades oscila entre 20 y 6 cm, con una longitud de hasta 10 m, con abertura de juntas inferior a 1 mm en todos los casos y sin relleno. Los planos de las discontinuidades son ligeramente rugosos, con paredes levemente alteradas y sin presencia de agua evidente.

Se determinó un RQD del 67,50 % (calidad aceptable), un $RMR_{básico}$ de 62 (calidad buena, clase II), el índice Q de 1,13 mostraba un tipo de roca mala, un GSI de 70 (calidad muy buena) y un SMR de 50,25, 53,10 y 45,00 (para F_0, F_1 y F_2, respectivamente) de calidad normal (clase III), que indicaba que el talud es parcialmente estable.

3.2.1.2. Estación geomecánica 2 (A2)

La estación geomecánica 2 (A2) se sitúa en el PK 28,25, en un talud de orientación 150/75 de cuarciarenitas de la Serie de los Cabos. El macizo rocoso también está fracturado, pero formando bloques de tamaño pequeño, y muy ocasionalmente mediano, con índice J_v entre 10 y 30 discontinuidades/m^3. Su resistencia mecánica, según los índices de campo, es muy dura (100 – 250 MPa), aunque con el esclerómetro indica valores más bajos (45 – 55 MPa), lo que correspondería con una roca moderadamente dura a dura (ligeramente más resistente que el macizo del afloramiento 1). Se estimó una cohesión de 3 kPa y un ángulo de rozamiento de 30°.

El talud presenta tres familias de discontinuidades: (1) F_0, o estratificación, con orientación 277/66; (2) F_1 de 041/59 y (3) F_2 de 116/57. El espaciado medio de sus discontinuidades oscila en torno a 20 cm, con una longitud de entre 3 y 10 m, con abertura de juntas de 0,1 a 1 mm en todos los casos y sin relleno o relleno muy duro (< 5 mm). Los planos de las discontinuidades son ligeramente rugosos, con paredes muy alteradas y sin presencia de agua evidente.

Se determinó un RQD del 50 % (calidad mala – aceptable), un $RMR_{básico}$ de 76 (calidad buena, clase II), el índice Q de 0,22 mostraba un tipo de roca muy mala, un GSI de 55 (buena – media)

y un SMR de 60,50, 59,00 y 59,00 (para F_0, F_1 y F_2, respectivamente) de calidad normal (clase III), que indicaba que el talud es parcialmente estable.

3.2.1.3. Estación geomecánica 3 (A3)

La estación geomecánica 3 (A3) se sitúa en el PK 29,50, en un talud de orientación 162/85 de areniscas de la Serie de los Cabos. El macizo rocoso está fracturado y también forma bloques de tamaño pequeño, y ocasionalmente mediano, con índice J_v entre 10 y 30 discontinuidades/m^3. Su resistencia mecánica, según los índices de campo, es muy dura (100 – 250 MPa), aunque con el esclerómetro indica valores más bajos (30 – 45 MPa), lo que correspondería con una roca moderadamente dura. Se estimó una cohesión de 3 kPa y un ángulo de rozamiento de 27°.

El talud presenta tres familias de discontinuidades: (1) F_0, o estratificación, con orientación 269/75; (2) F_1 de 018/55 y (3) F_2 de 236/77. El espaciado medio de sus discontinuidades varía entre 20 y 6 cm, con una longitud superior a 20 m, con abertura de juntas de 0,1 a 1 mm en todos los casos y sin relleno. Los planos de las discontinuidades son ligeramente rugosos, con paredes muy alteradas y sin presencia de agua evidente.

Se determinó un RQD del 52,5 % (calidad aceptable), un $RMR_{básico}$ de 78 (calidad buena, clase II), el índice Q de 0,44 mostraba un tipo de roca muy mala, un GSI de 65 (buena – muy buena) y un SMR de 69,10, 61,00 y 69,30 (para F_0, F_1 y F_2, respectivamente) de calidad buena (clase II), que indicaba que el talud es estable.

3.2.1.4. Síntesis de los resultados obtenidos

Englobando todos los resultados obtenidos de la caracterización y clasificación de los taludes, en la tabla 9 se presentan los valores del $RMR_{básico}$, RQD, Q y GSI obtenidos para las estaciones geomecánicas realizadas.

	A1		A2		A3	
$RMR_{básico}$	62	Calidad buena	76	Calidad buena	78	Calidad buena
RQD (%)	67,50	Calidad aceptable	50,00	Calidad mala - aceptable	52,50	Calidad aceptable
Q	1,13	Tipo de roca mala	0,22	Tipo de roca muy mala	0,44	Tipo de roca muy mala
GSI	70	Muy buena	55	Buena – Media	65	Muy buena - Buena

Tabla 9.- Clasificación de las estaciones geomecánicas A1, A2 y A3 según su $RMR_{básico}$ (89), RQD, índice Q y GSI.

3.2.2. Modelos Digitales de Afloramiento

En este apartado se presentan los MDA generados para los diferentes afloramientos (fig. 16, 17 y 18), lo que ha requerido un procesado de 8.997.803 puntos para el A1, 34.642.695 para el A2

y 33.352.517 para el A3. Gracias a esta técnica se han podido efectuar medidas estructurales en zonas de muy difícil acceso (ver Anexo II).

Figura 16.- Modelo Digital de Afloramiento A1.

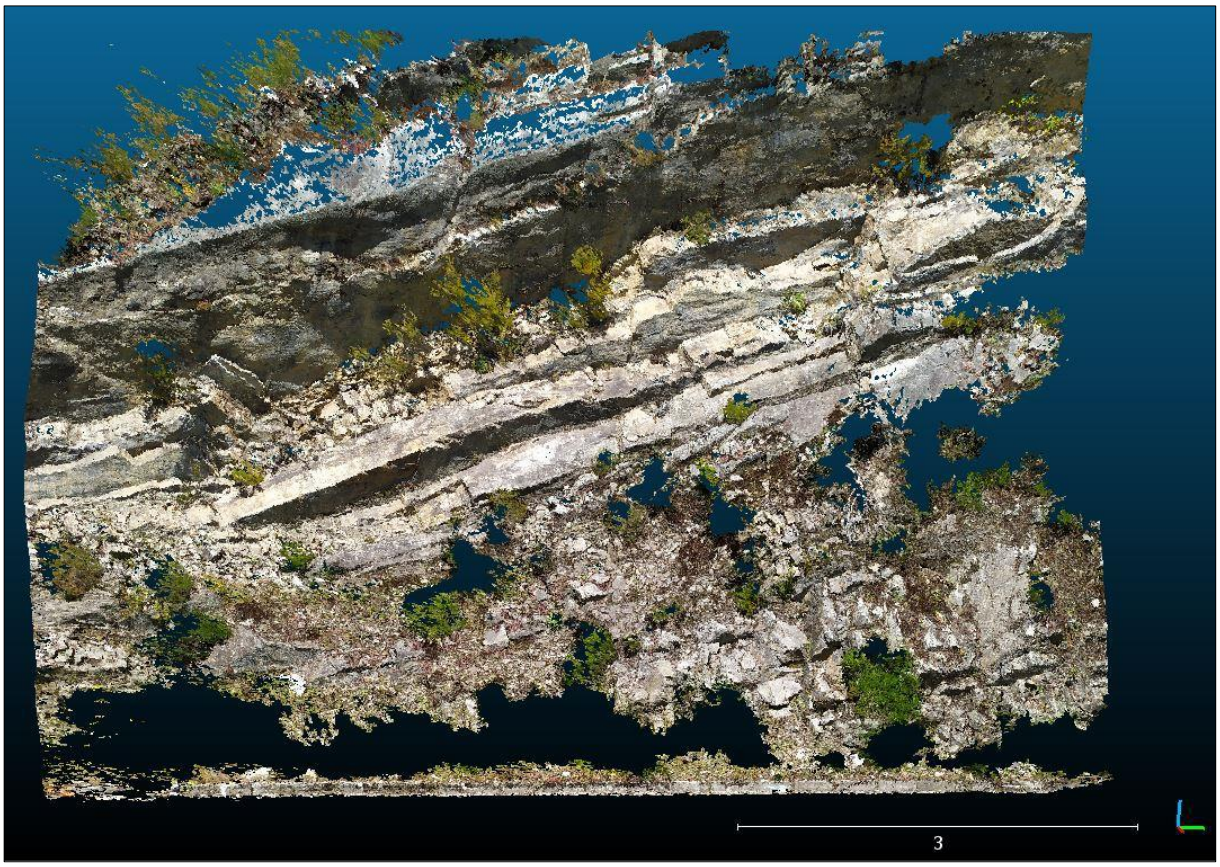


Figura 17.- Modelo Digital de Afloramiento A2.

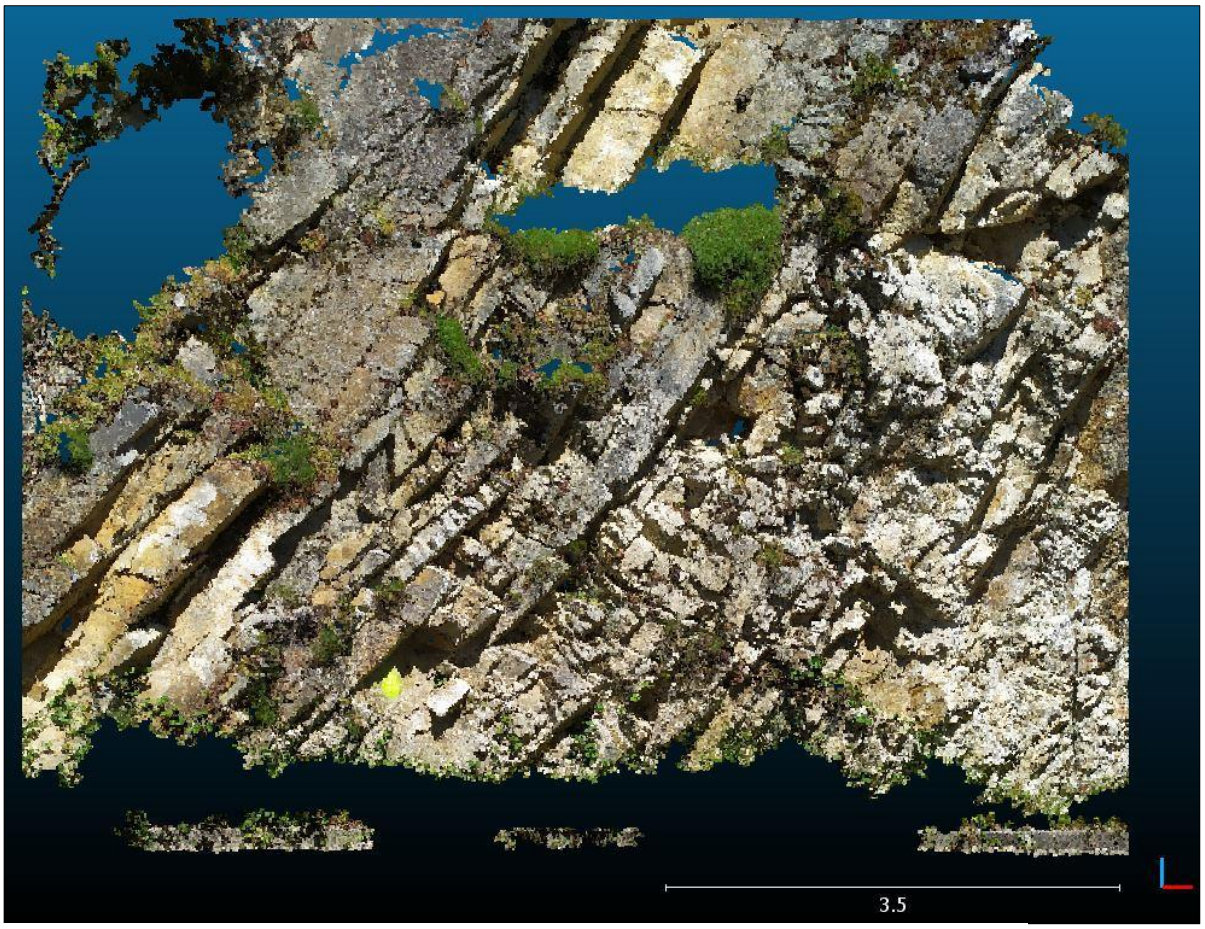


Figura 18.- Modelo Digital de Afloramiento A3.

3.3. Análisis de estabilidad

Para analizar la estabilidad de los taludes objeto de estudio, se ha procedido inicialmente a su clasificación de acuerdo con su índice SMR (tabla 10). En los afloramientos A1 y A2 estudiados se obtiene una clase III (calidad normal, parcialmente estable) para todas las discontinuidades, mientras que en el caso del talud A3 el macizo presenta mayor estabilidad, clasificándose como Clase II (calidad buena, estable).

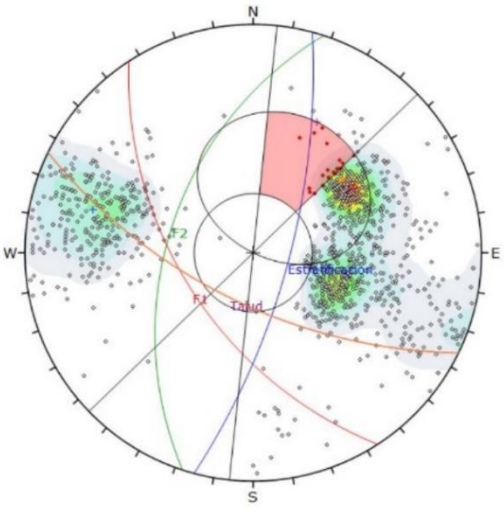
SMR		A1		A2		A3
F_0	50,25	Clase III Calidad normal (Parcialmente estable)	60,50	Clase III Calidad normal (Parcialmente estable)	69,10	Clase II Calidad buena (Estable)
F_1	53,10	Clase III Calidad normal (Parcialmente estable)	59,00	Clase III Calidad normal (Parcialmente estable)	61,00	Clase II Calidad buena (Estable)
F_2	45,00	Clase III Calidad normal (Parcialmente estable)	59,00	Clase III Calidad normal (Parcialmente estable)	69,30	Clase II Calidad buena (Estable)

Tabla 10.- Clasificación de las estaciones geomecánicas A1, A2 y A3 según su SMR para cada familia de discontinuidades.

A continuación, se abordó el estudio geométrico y cinemático para cada talud estudiado cuyos resultados se sintetizan en las tablas 11, 12 y 13. En estas se indican la dirección y buzamiento de cada familia de discontinuidades y del talud, y los puntos críticos encontrados en relación con los totales. También se muestran los parámetros adoptados para el análisis, como son el ángulo de rozamiento o los límites laterales en el caso de deslizamientos planares y vuelcos.

Análisis talud A1		
Número de valores	1037	
	Dirección	**Buzamiento**
Talud	206	65
F0 (estratificación)	105	75
F1	237	55
F2	288	49
Ángulo de fricción	29°	
Límites laterales	20°	

D. Planar	**Puntos críticos**	**Porcentaje (%)**	**Puntos totales**
F1	18	6,67%	270

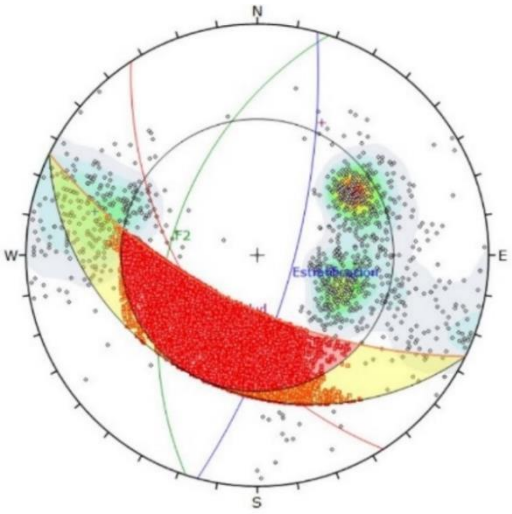


Symbol	Feature
◇	Pole Vectors
◆	Critical Vectors
▫	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.30
	1.30 - 2.60
	2.60 - 3.90
	3.90 - 5.20
	5.20 - 6.50
	6.50 - 7.80
	7.80 - 9.10
	9.10 - 10.40
	10.40 - 11.70
	11.70 - 13.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	12.49%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

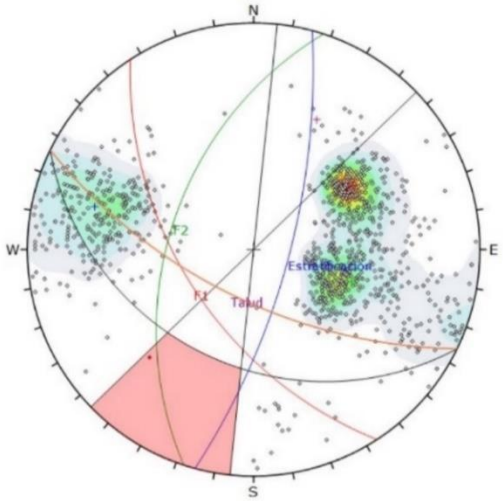
D. Cuña	**Puntos críticos (ambos planos)**	**Porcentaje (%)**	**Puntos críticos (un plano)**	**Porcentaje (%)**	**Puntos totales**
F1-F2	18297	16,25	20028	17,79	112590
F0-F1	64733	69,9	8427	9,1	92610
F0-F2	8571	5,99	92	0,06	143031



Symbol	Feature
◇	Pole Vectors
◆	Critical Vectors
▫	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.30
	1.30 - 2.60
	2.60 - 3.90
	3.90 - 5.20
	5.20 - 6.50
	6.50 - 7.80
	7.80 - 9.10
	9.10 - 10.40
	10.40 - 11.70
	11.70 - 13.00
Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	12.49%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Vuelco flexural	Puntos críticos	Porcentaje (%)	Puntos totales
F0	1	0,29	343

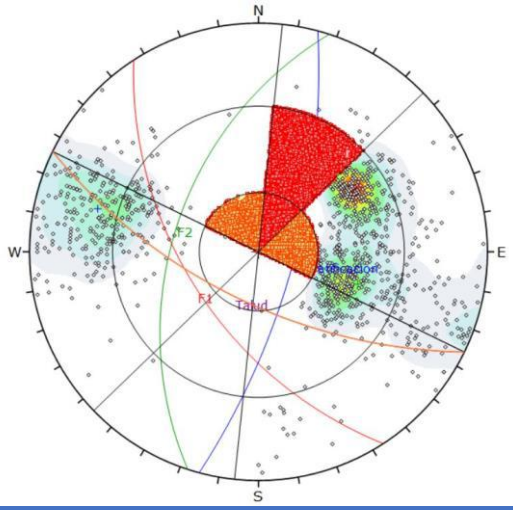


Symbol	Feature
◇	Pole Vectors
◆	Critical Vectors
▫	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.30
	1.30 - 2.60
	2.60 - 3.90
	3.90 - 5.20
	5.20 - 6.50
	6.50 - 7.80
	7.80 - 9.10
	9.10 - 10.40
	10.40 - 11.70
	11.70 - 13.00
Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	12.49%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Vuelco directo (Plano base)	Puntos críticos	Porcentaje (%)	Puntos totales
F1	20	7,41	270
F2	8	1,92	417

Vuelco directo (Intersección)	Puntos críticos (V.directo)	Porcentaje (%)	Puntos críticos (V. oblicuo)	Porcentaje (%)	Puntos totales
F1-F2	0	0	193	0,17	112590
F0-F1	0	0	59	0,06	92610
F0-F2	8786	6,14	831	0,58	143031



Symbol	Feature
◇	Pole Vectors
◆	Critical Vectors
▫	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.30
	1.30 - 2.60
	2.60 - 3.90
	3.90 - 5.20
	5.20 - 6.50
	6.50 - 7.80
	7.80 - 9.10
	9.10 - 10.40
	10.40 - 11.70
	11.70 - 13.00

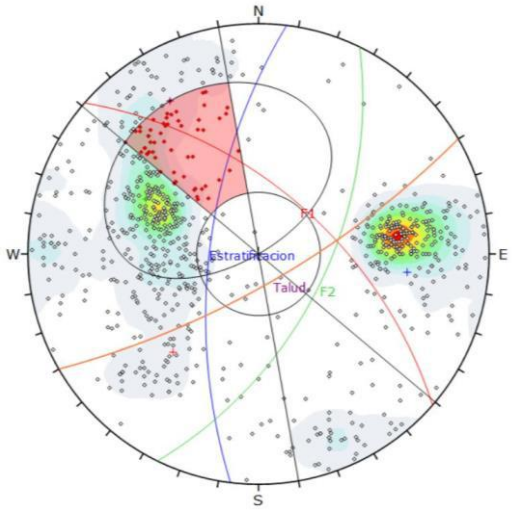
Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	12.49%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Tabla 11.- Resumen de los parámetros más importantes del análisis geométrico y cinemático realizado con Dips para el talud A1.

Análisis talud A2

Número de valores	765	
	Dirección	**Buzamiento**
Talud	150	75
F0 (estratificación)	277	66
F1	041	59
F2	116	57
Ángulo de fricción	30°	
Límites laterales	20°	

D. Planar	Puntos críticos	Porcentaje (%)	Puntos totales
F2	59	14,53	406

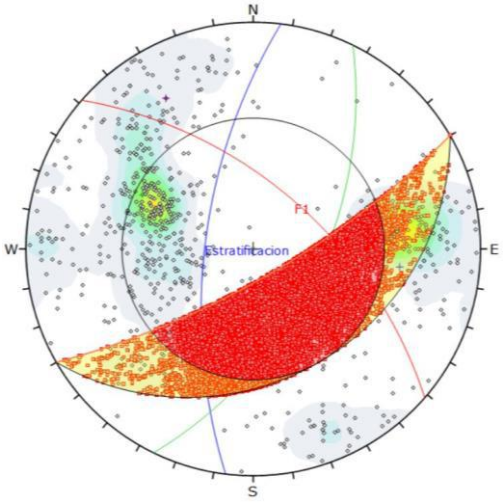


Symbol	Feature
◇	Pole Vectors
◆	Critical Vectors
▫	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.10
	1.10 - 2.20
	2.20 - 3.30
	3.30 - 4.40
	4.40 - 5.50
	5.50 - 6.60
	6.60 - 7.70
	7.70 - 8.80
	8.80 - 9.90
	9.90 - 11.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	10.45%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

D. Cuña	Puntos críticos (ambos planos)	Porcentaje (%)	Puntos críticos (un plano)	Porcentaje (%)	Puntos totales
F1-F2	7165	20,28	9712	27,50	35322
F0-F1	71	0,28	0	0	25143
F0-F2	24978	21,29	11188	9,54	117334

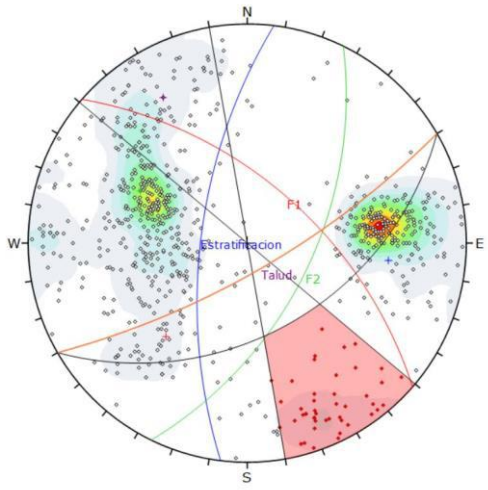


Symbol	Feature
◇	Pole Vectors
◆	Critical Vectors
▫	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.10
	1.10 - 2.20
	2.20 - 3.30
	3.30 - 4.40
	4.40 - 5.50
	5.50 - 6.60
	6.60 - 7.70
	7.70 - 8.80
	8.80 - 9.90
	9.90 - 11.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	10.45%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Vuelco flexural	Puntos críticos	Porcentaje (%)	Puntos totales
F0	45	15,57	289

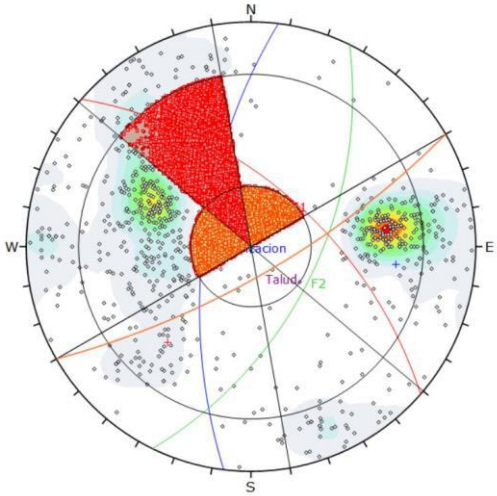


Symbol	Feature
◇	Pole Vectors
◆	Critical Vectors
▫	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.10
	1.10 - 2.20
	2.20 - 3.30
	3.30 - 4.40
	4.40 - 5.50
	5.50 - 6.60
	6.60 - 7.70
	7.70 - 8.80
	8.80 - 9.90
	9.90 - 11.00
Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	10.45%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Vuelco directo (Plano base)	Puntos críticos	Porcentaje (%)	Puntos totales
F1	1	1,15	87
F2	77	18,97	406

Vuelco directo (Intersección)	Puntos críticos (V.directo)	Porcentaje (%)	Puntos críticos (V. oblicuo)	Porcentaje (%)	Puntos totales
F1-F2	80	0,23	1783	5,05	35322
F0-F1	15035	59,8	2363	9,4	25143
F0-F2	523	0,45	2620	2,23	117334



Symbol	Feature
◇	Pole Vectors
◆	Critical Vectors
▫	Critical Intersection

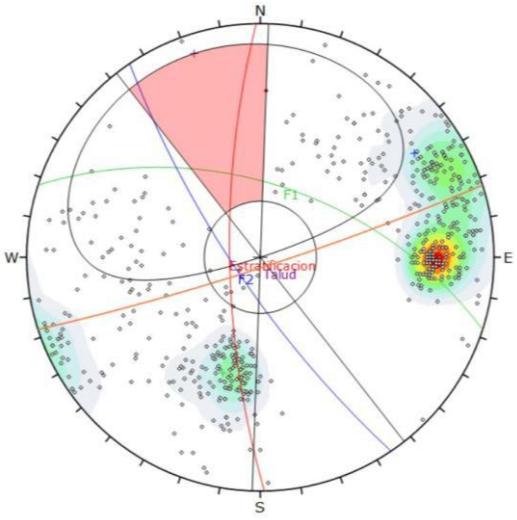
Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.10
	1.10 - 2.20
	2.20 - 3.30
	3.30 - 4.40
	4.40 - 5.50
	5.50 - 6.60
	6.60 - 7.70
	7.70 - 8.80
	8.80 - 9.90
	9.90 - 11.00
Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	10.45%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Tabla 12.- Resumen de los parámetros más importantes del análisis geométrico y cinemático realizado con Dips para el talud A2.

Análisis talud A3

Número de valores	560	
	Dirección	**Buzamiento**
Talud	162	85
F0 (estratificación)	269	75
F1	018	55
F2	236	77
Ángulo de fricción	27°	
Límites laterales	20°	

D. Planar	Puntos críticos	Porcentaje (%)	Puntos totales
F1	1	0,57	174

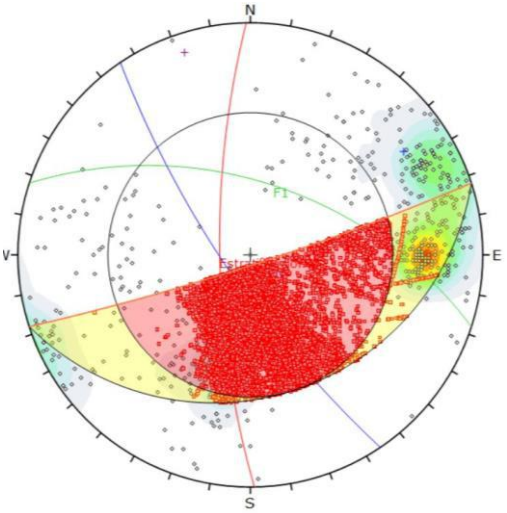


Symbol	Feature
◇	Pole Vectors
◆	Critical Vectors
▫	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.70
	1.70 - 3.40
	3.40 - 5.10
	5.10 - 6.80
	6.80 - 8.50
	8.50 - 10.20
	10.20 - 11.90
	11.90 - 13.60
	13.60 - 15.30
	15.30 - 17.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	16.13%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

D. Cuña	Puntos críticos (ambos planos)	Porcentaje (%)	Puntos críticos (un plano)	Porcentaje (%)	Puntos totales
F1-F2	57	0,21	105	0,39	26796
F0-F1	0	0	0	0	25256
F0-F2	7122	24,96	1939	6,79	28536

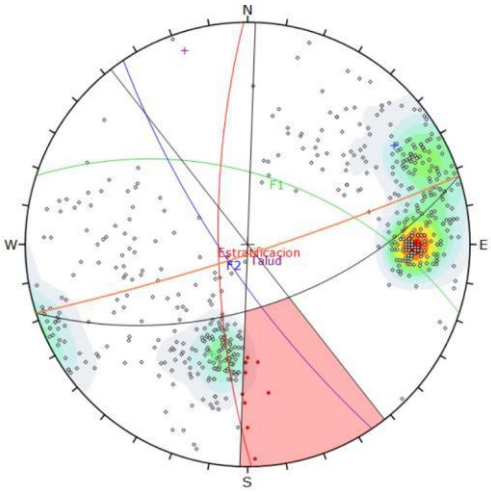


Symbol	Feature
◇	Pole Vectors
◆	Critical Vectors
▫	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.70
	1.70 - 3.40
	3.40 - 5.10
	5.10 - 6.80
	6.80 - 8.50
	8.50 - 10.20
	10.20 - 11.90
	11.90 - 13.60
	13.60 - 15.30
	15.30 - 17.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	16.13%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Vuelco flexural	Puntos críticos	Porcentaje (%)	Puntos totales
F1	7	4,55	154



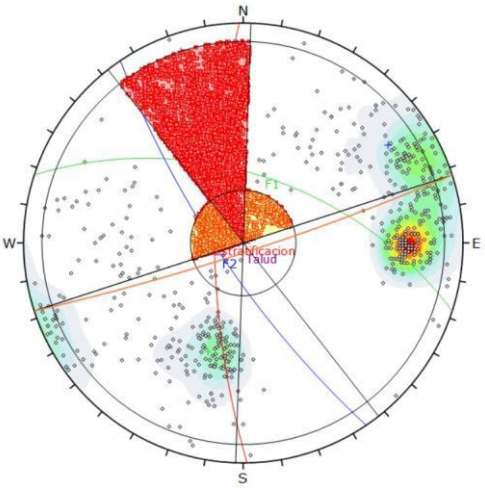
Symbol	Feature
◇	Pole Vectors
◆	Critical Vectors
▫	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.70
	1.70 - 3.40
	3.40 - 5.10
	5.10 - 6.80
	6.80 - 8.50
	8.50 - 10.20
	10.20 - 11.90
	11.90 - 13.60
	13.60 - 15.30
	15.30 - 17.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	16.13%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Vuelco directo (Plano base)	Puntos críticos	Porcentaje (%)	Puntos totales
F2	1	0,57	174

Vuelco directo (Intersección)	Puntos críticos (V.directo)	Porcentaje (%)	Puntos críticos (V. oblicuo)	Porcentaje (%)	Puntos totales
F1-F2	13729	51,24	675	2,52	26796
F0-F1	22649	89,68	1247	4,94	25256
F0-F2	9075	31,8	7811	27,37	28536



Symbol	Feature
◇	Pole Vectors
◆	Critical Vectors
▫	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.70
	1.70 - 3.40
	3.40 - 5.10
	5.10 - 6.80
	6.80 - 8.50
	8.50 - 10.20
	10.20 - 11.90
	11.90 - 13.60
	13.60 - 15.30
	15.30 - 17.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	16.13%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Tabla 13.- Resumen de los parámetros más importantes del análisis geométrico y cinemático realizado con Dips para el talud A3.

A partir del análisis realizado, se ha reconocido que en el talud A1 únicamente son esperables deslizamientos planares en la familia F1 (6,7 %), mientras que la intersección entre las diferentes familias provoca la formación de cuñas, predominando las formadas por las intersecciones F0-F1 (69,9 %) y F1-F2 (16, 3 %). No se espera que se produzcan vuelcos por

flexión significativos, habiéndose observado únicamente una probabilidad de 7,4 % y 1,9 % de potenciales planos basales de deslizamientos en la F1 y F2, respectivamente. También se observa que un 6,1 % de intersecciones entre F0-F2 podrían provocar vuelcos de bloques.

En el talud A2 sólo se produce deslizamiento planar en la familia F2 (14, 5 %) y en cuña en la intersección entre todos los planos F1-F2 (20,3 %) y F0-F1 (21,3 %). Se producen vuelcos en relación con la F0 (15,5 %), identificándose potenciales planos basales pertenecientes a las familias F2 (19,0 %) y F1 (1,2 %). En este afloramiento, también se generan vuelcos de bloques en la intersección entre F0 – F1 con una probabilidad del 59,8 %.

En el talud A3 únicamente se producen deslizamientos planares en F1 (0,6 %) y en cuña en la intersección F0-F2 (25,0 %). La probabilidad de ocurrencia de vuelcos flexurales es residual (F1 = 4,6 %) y no se desarrollan planos basales significativos. Sin embargo, hay una probabilidad del 89,7 % de vuelcos de bloques en la intersección entre F0-F1.

En la tabla 14 se sintetizan los resultados obtenidos del estudio realizado con el programa *Dips*. Se indican los tipos de movimientos de ladera posibles para cada afloramiento dependiendo de la familia de discontinuidades considerada o intersección entre dos de ellas. En tono rojo se han sombreado los planos favorables a producir deslizamientos planares, en cuña o vuelcos, e indicando que son inestables.

	Planar		Cuña		Vuelco flexural		Vuelco directo			
A1	F0	No	F0-F1	Sí	F0	Sí	F0	No	F0-F1	No
	F1	Sí	F1-F2	Sí	F1	No	F1	Sí	F1-F2	No
	F2	No	F0-F2	Sí	F2	No	F2	Sí	F0-F2	Sí
A2	F0	No	F0-F1	Sí	F0	Sí	F0	No	F0-F1	Sí
	F1	No	F1-F2	Sí	F1	No	F1	Sí	F1-F2	Sí
	F2	Sí	F0-F2	Sí	F2	No	F2	Sí	F0-F2	Sí
A3	F0	No	F0-F1	No	F0	No	F0	No	F0-F1	Sí
	F1	No	F1-F2	Sí	F1	Sí	F1	No	F1-F2	Sí
	F2	Sí	F0-F2	Sí	F2	No	F2	Sí	F0-F2	Sí

Tabla 14.- Resumen de los posibles movimientos de ladera según Dips. "Sí", indica inestabilidad del talud, y "No", su estabilidad.

Considerando la probabilidad de rotura más alta para cada tipo de movimiento de ladera en los tres afloramientos, se obtiene la figura 19. En ella se muestra de manera gráfica el tipo de movimiento predominante en el talud A1, A2 y A3.

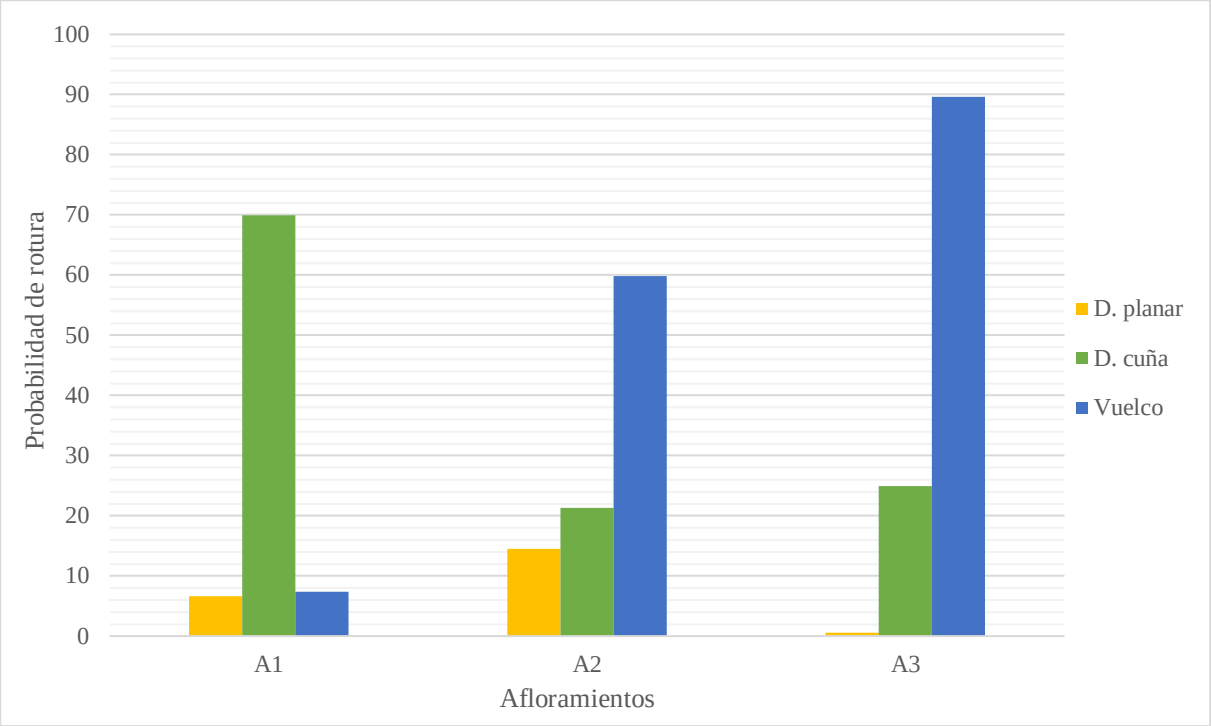


Figura 19.- Gráfica que relaciona la probabilidad de rotura para cada tipo de movimiento de ladera para los afloramientos.

Para el afloramiento A1, se muestra que el principal tipo de movimiento de ladera que se puede desencadenar, en función de su probabilidad de rotura, es el deslizamiento en cuña (69,90 %) en la intersección de las familias F0-F1. Tanto en el talud A2 como A3, fundamentalmente se desarrollan vuelcos de bloques en la intersección de F0-F1, con una probabilidad de rotura del 59,80 % y 89,58 %, respectivamente. En los tres afloramientos, se observa que las familias que provocan la desestabilización de los taludes, sin importar el tipo de movimiento que se desarrolle, se localiza en la intersección entre F0-F1. Es decir, entre el plano de estratificación y F1.

A partir de los resultados obtenidos, se puede afirmar que son taludes potencialmente inestables y que, por tanto, precisarían de la adopción de medidas de estabilización para deslizamientos planares y en cuña, y vuelcos.

3.3.1. Análisis de los factores de seguridad

Tras el estudio geométrico y cinemático, se procedió a abordar el estudio de los factores de seguridad y probabilidad de ocurrencia de cada mecanismo de inestabilidad mediante programas específicos, cuyos resultados se exponen a continuación.

3.3.1.1. Deslizamientos planares

En la Tabla 15 se presenta una síntesis de los parámetros analizados en el análisis de deslizamientos planares. También se exponen datos sobre la cuña media de cada afloramiento (peso, volumen, fuerza, etc.), la geometría que presenta, las propiedades del talud, de la cara superior y del plano de falla y su resistencia. Los resultados obtenidos contemplan que las

discontinuidades están saturadas en agua al 100 %, con lo que se obtiene en todos los casos una probabilidad de deslizamiento del 100 % y el factor de seguridad de 0.

	Afloramientos		
Resultados del análisis	A1 (F1)	A2 (F2)	A3 (F2)
Tipo de análisis	Probabilístico	Probabilístico	Probabilístico
Probabilidad de deslizamiento (PF)	1 (100 %)	1 (100 %)	1 (100 %)
índice de fiabilidad normal	1,79e+308	1,79e+308	1,79e+308
Índice de fiabilidad lognormal	1,79e+308	1,79e+308	1,79e+308
Número de cuñas de prueba	1000	1000	1000
Número de cuñas válidas	1000	1000	1000
Número de cuñas no validas	0	0	0
Número de cuñas fallidas	1000	1000	1000
Número de cuñas fallidas que son flotantes	1000	1000	1000
Datos de la cuña media			
Factor de seguridad	0	0	0
Peso de la cuña	23,06 t/m	22,68 t/m	16,74 t/m
Volumen de la cuña	8,54 m^3/m	8,40 m^3/m	6,20 m^3/m
Fuerza normal	0 t/m	0 t/m	0 t/m
Fuerza de resistencia	0 t/m	0 t/m	0 t/m
Fuerza motriz	18,89 t/m	19,02 t/m	16,31 t/m
Geometría			
Punto de intersección (B) del talud y la cara superior	3,73; 8,00	1,61; 6,00	0,79; 9,00
plano de falla y la cara superior	6,39; 9,13	4,77; 7,34	2,22; 9,61
Longitud de la cara superior (B → C)	2,89 m	3,43 m	1,55 m
Longitud del plano de falla (Origen → C)	11,15 m	8,75 m	9,86 m
Longitud del talud (Origen → B)	8,82 m	6,21 m	9,03 m
Propiedades del talud			
Ángulo medio del talud	65º	75º	85º
Altura del talud medio	8 m	6 m	9 m
Peso unitario medio	2,7 t/m^3	2,7 t/m^3	2,7 t/m^3
Propiedades de la cara superior			
Ángulo medio de la cara superior	23 º	23 º	23 º
Propiedades del plano de falla			
ángulo medio del plano de falla	55º	57º	77º
Plano de ondulación	0º	0º	0º
Resistencia en el plano de falla			
Modelo de resistencia al cizallamiento	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb
Cohesión	3 kPa	3 kPa	3 kPa
Ángulo de fricción	29º	30º	27º

Distribución estadística	Normal	Normal	Normal
Desviación estándar	3º	3º	3º
Valor mínimo relativo	6º	6º	6º
Valor máximo relativo	6º	6º	6º
Grieta de tensión	No considerada	No considerada	No considerada
Presión del agua	Presente	Presente	Presente
Peso unitario del agua	1 t/m^3	1 t/m^3	1 t/m^3
Modelo de distribución de la presión	Presión máxima - Altura media	Presión máxima - Altura media	Presión máxima - Altura media
Porcentaje de llenado medio	100%	100%	100%
Fuerza media del agua en el plano de falla	25,44 t/m	16,07 t/m	23,68 t/m
Fuerza sísmica	No considerada	No considerada	No considerada
Método de muestreo	Monte Carlo	Monte Carlo	Monte Carlo
Número de muestras	1000	1000	1000
Fuerzas externas	No considerada	No considerada	No considerada

Tabla 15.- Resumen de las propiedades de los posibles deslizamientos planares para cada afloramiento estudiado.

En el talud A1, de 8 m de altura, la mayor cuña posible que se forma con la discontinuidad F1, tiene un valor de 23 t/m según el análisis probabilístico realizado. Se ha observado que un factor decisivo para su estabilidad es la existencia de presión del agua en los planos de discontinuidades, que en este caso concreto corresponde a F1. Considerando dicha presión de agua con un peso unitario de 1 t/m^3 y un porcentaje de llenado del 100 %, se alcanza un factor de seguridad de 0 y una probabilidad de deslizamiento del 100 %. Por lo que, bajo estas condiciones se puede afirmar que el talud es inestable. En condiciones secas, el factor de seguridad aumenta ligeramente (FS = 0,57), manteniéndose la probabilidad de deslizamiento constante en 100 %.

Del talud A2, de 6 m de altura, se han extraído las mismas conclusiones. Bajo condiciones de presión de agua en el plano de discontinuidad F2, se forma una cuña de casi 23 t/m. Su factor de seguridad es 0 y la probabilidad de deslizamiento del 100 %, con un porcentaje de llenado del 100 % (peso unitario = 1 t/m^3). En condiciones secas, el factor de seguridad es similar que en condiciones saturadas (FS = 0,51) y la probabilidad de deslizamiento sigue siendo del 100%.

El talud A3, de 9 m, tampoco presenta dependencia, su estabilidad, con la presión del agua en las discontinuidades (F2). La cuña media que se forma es del 17 t/m, considerando un porcentaje de llenado del 100 % y un peso unitario de 1 t/m^3. En estas condiciones el factor de seguridad es 0 y la probabilidad de deslizamiento del 100 %, siendo un talud altamente inestable. En condiciones secas, también es inestable, con un factor de seguridad de 0,30 y una probabilidad de deslizamiento del 100 %.

En la figura 20 se ilustra, respectivamente, la cuña media formada en cada afloramiento y que es susceptible de deslizar planarmente bajo las condiciones anteriores en presencia de agua en las discontinuidades. Además, se indican algunos de los valores más relevantes de la cuña analizada en cada talud.

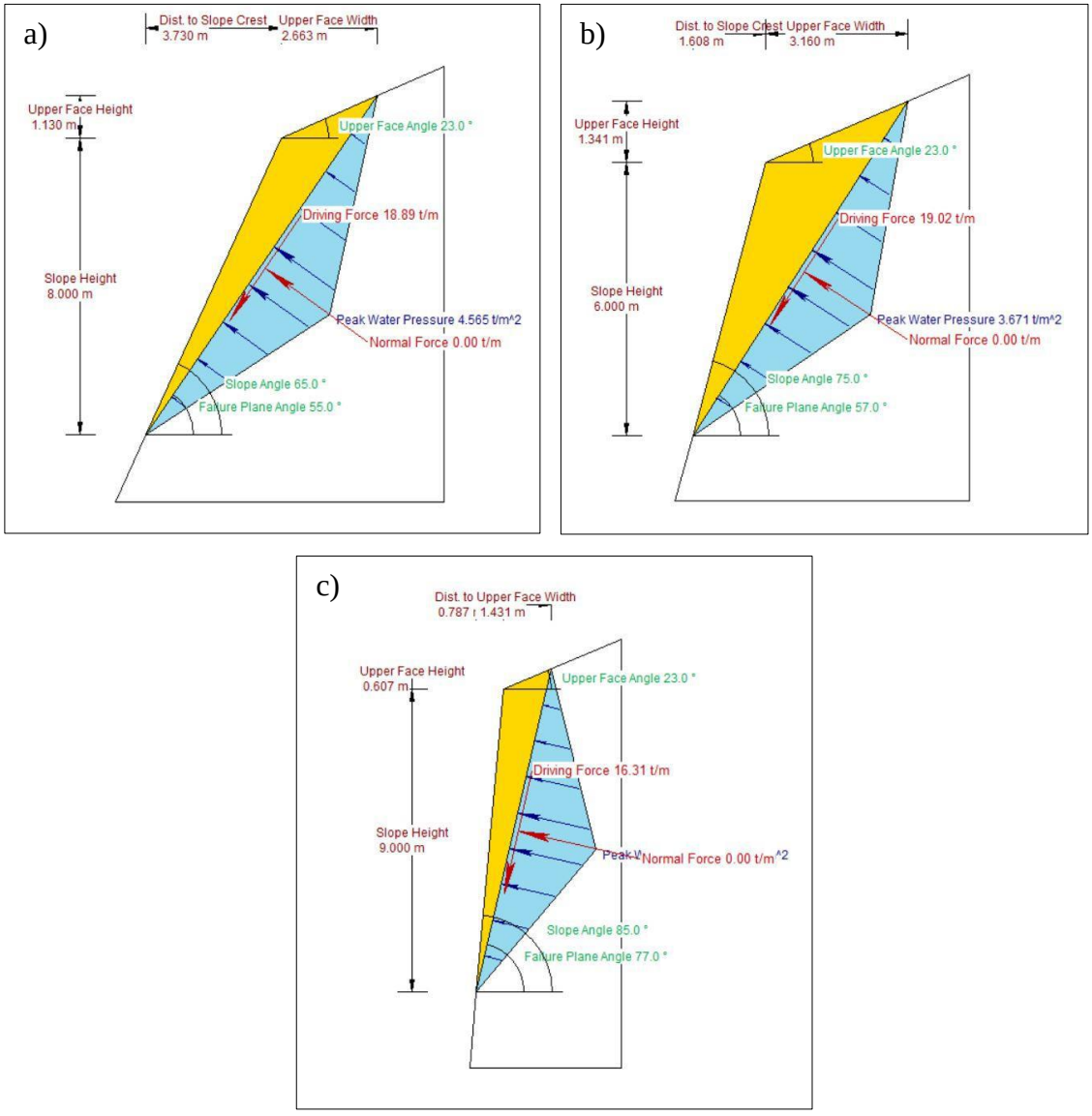


Figura 20.- Esquemas de la cuña media para el afloramiento a) A1, b) A2 y c) A3. Obtenido de RocPlane.

3.3.1.2. Deslizamientos en cuña

Con el programa *Swedge* se realizó el análisis de estabilidad para deslizamientos en cuña por la intersección de dos planos del talud. Los resultados obtenidos se sintetizan en la tabla 16.

En esta tabla 16 se presenta los parámetros analizados en el análisis de deslizamientos en cuña. Al igual que para el deslizamiento planar, se ha escogido un análisis de tipo probabilístico y método de muestreo Monte Carlo (1000 muestras), considerando como única variable el ángulo

de rozamiento. Se exponen los valores de probabilidad de deslizamiento y factor de seguridad en cada situación calculada.

También se muestran datos sobre la cuña media de cada afloramiento (altura, volumen, peso, área, etc.), la fuerza de la presión del agua en los planos de las discontinuidades, el modo de fallo, la línea de intersección entre ambas familias, las longitudes de trazado en las diferentes caras del modelo, la persistencia máxima de los sets, los ángulos de intersección, datos sobre el talud y la cara superior.

	A1 (F0 - F1)	A2 (F1 - F2)	A2 (F0 - F2)
Tipo de análisis	Probabilístico	Probabilístico	Probabilístico
Método de muestreo	Monte Carlo	Monte Carlo	Monte Carlo
Muestreo pseudoaleatorio	Sí	Sí	Sí
Probabilidad de deslizamiento	0,55	1 (100 %)	0 (0 %)
Número de muestras	1000	1000	1000
Número de cuñas válidas	1000	1000	1000
Número de cuñas fallidas	550	1000	0
Número de cuñas seguras	450	0	1000
Datos de la cuña media			
Factor de seguridad	0,99	0	3,82
Altura de la cuña	8 m	6 m	6 m
Anchura de la cuña (en la cara superior)	4,05 m	0,12 m	6,48 m
Volumen de la cuña	56,14 m^3	0,03 m^3	82,23 m^3
Peso de la cuña	151,58 t	0,07 t	222,02 t
Área de la cuña (Set 1)	19,10 m^2	0,44 m^2	27,50 m2
Área de la cuña (Set 2)	49,65 m^2	0,76 m^2	57,55 m^2
Área de la cuña (talud)	41,70 m^2	0,68 m^2	38,19 m^2
Área de la cuña (cara superior)	18,20 m^2	0,01 m^2	35,46 m^2
Fuerza normal (Set 1)	66,31 t	0,46 t	187,60 t
Fuerza normal (Set 2)	62,96 t	0,73 t	191,95 t
Fuerza motriz	93,47 t	0,00 t	64,07 t
Fuerza de resistencia	92,28 t	0,00 t	244,65 t
Fuerza de la presión del agua			
Media de la presión del agua en las fisuras	1,09 t/m^2	0,99 t/m^2	0,53 t/m^2
Fuerza del agua (Set 1)	20,75 t	0,44 t	14,66 t
Fuerza del agua (Set 2)	53,90 t	0,76 t	30,69 t
Peso unitario del agua	1 t/m^3	1 t/m^3	1 t/m^3

Método de definición de la presión	Porcentaje de fisuras rellenas	Porcentaje de fisuras rellenas	Porcentaje de fisuras rellenas
Porcentaje de llenado	100 %	100 %	100 %
Modo de fallo	Deslizamiento en la línea de intersección F0-F1	Pérdida de contacto en ambas discontinuidades	Deslizamiento en la línea de intersección F0-F2
Línea de intersección Set 1 y 2			
Buzamiento	38 °	52°	17°
Dirección	180°	81°	195°
Longitudes de trazado			
J1 en la cara del talud	9,45 m	7,59 m	7,70 m
J2 en la cara del talud	11,73 m	7,78 m	10,39 m
J1 en la cara superior	4,05 m	0,12 m	7,18 m
J2 en la cara superior	10,04 m	0,27 m	15,45 m
Persistencia máxima			
Set 1 (J1)	10,57 m	7,60 m	11,09 m
Set 2 (J2)	11,73 m	7,78 m	15,45 m
Ángulos de intersección			
J1-J2 en la cara del talud	49°	1°	73°
J1-Cresta en la cara del talud	79°	136º	65°
J1-Cresta en la cara superior	93°	84°	115°
J2-Cresta en la cara del talud	52°	42°	42°
J2-Cresta en la cara superior	24°	25°	25°
J2-J1 en la cara superior	63°	71°	40°
Datos del set 1	F0	F1	F0
Buzamiento	72º	59º	66º
Dirección	105º	041º	277º
Cohesión	3 kPa	3 kPa	3 kPa
Ángulo de rozamiento	29°	30°	30°
Distribución estadística	Normal	Normal	Normal
Desviación estándar	3°	3°	3°
Valor mínimo relativo	6°	6°	6°
Valor máximo relativo	6°	6°	6°
Datos del set 2	F1	F2	F2
Buzamiento	55º	57º	57º
Dirección	237º	116º	116º
Cohesión	3 kPa	3 kPa	3 kPa
Ángulo de rozamiento	29º	30º	30º
Distribución estadística	Normal	Normal	Normal
Desviación estándar	3°	3°	3°

Valor mínimo relativo	6°	6°	6°
Valor máximo relativo	6°	6°	6°
Datos del talud			
Buzamiento	65°	75°	75°
Dirección	206°	150º	150º
Inclinación	8 m	6 m	6 m
Peso unitario	2,7 t/m^3	2,7 t/m^3	2,7 t/m^3
Presiones de agua en el talud	Sí	Sí	Sí
Cara del talud sobresale	No	No	No
Fuerza aplicada externamente	No	No	No
Grieta de tensión	No	No	No
Datos de la cara superior			
Buzamiento	23°	23°	23°

Tabla 16.- Resumen de las propiedades de los deslizamientos en cuña formados mediante Swedge a partir de los planos medios de cada familia.

En la intersección entre F0 – F1 del talud A1, presenta una probabilidad de deslizamiento del 55 % y su factor de seguridad es muy próximo a 1. Por lo que, se podría considerar teóricamente estable, aunque pequeñas variaciones en la presión del agua podrían provocar su desestabilización. El volumen de la cuña media es de 4,05 m^3 y su peso de ~152 t. Las fuerzas normales a las que está sometida oscilan entre 65 t y la fuerza motriz y de resistencia en torno a 92-93 t. La presión que ejerce el agua en las fisuras es próxima a 1 t/m^2, siendo la fuerza en el set 1 de 20,75 t y en el set 2 más del doble (53,90 t), considerando una presión de llenado del 100%. Sin embargo, a partir del 78 % de llenado ya se producen deslizamientos en cuña en la intersección entre ambos planos, con una probabilidad de deslizamiento de 0,1 %y un factor de seguridad de 1,22. El modo de fallo que genera el deslizamiento en cuña se produce en la línea de intersección entre ambos planos. Dicha línea tiene una orientación de 38/180. Las longitudes de trazado en ambos sets son mayores en la cara del talud (J1 = 9,45 m; J2 =1,73 m) con respecto a la superior (J1 = 4,05 m; J2 =10,04 m), aunque en ambos casos el J2 supera a J1. En la tabla 16 también se muestran los ángulos de intersección entre las dos familias, los datos del set 1, el set 2, el talud y la cara superior, lo que permite visualizar en tres dimensiones la cuña media (fig. 21).

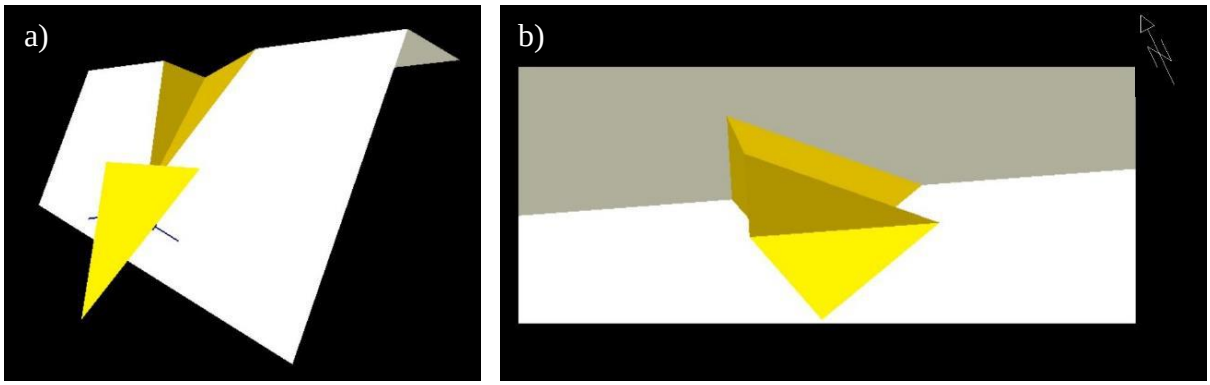


Figura 21.- Modelización de la cuña media formada por la intersección de F0 – F1 en el afloramiento A1. a) Vista en perspectiva desde el pie del talud donde se observa la fuerza que ejerce el agua. b) Vista desde el techo, donde se indica el norte del talud. Obtenido a partir de Swedge.

En la intersección entre F1 – F2 del talud A2, presenta una probabilidad de deslizamiento del 100 % y su factor de seguridad es 0. El volumen de la cuña media es de tan sólo 0,12 m^3 y su peso de 0.07 t (70 kg). Las fuerzas normales a las que está sometida oscilan entre 0,40 y 0,75 t. La presión que ejerce el agua en las fisuras también es próxima a 1 t/m^2, siendo la fuerza en el set 1 de 0,44 t y en el set 2 casi el doble (0,76 t). Para ello se ha considerado una presión de llenado del 100 %, aunque con un 34 % ya desliza la cuña con una probabilidad de deslizamiento del 100 % y un factor de seguridad 0. El modo de fallo que genera el deslizamiento en cuña se produce por la pérdida de contacto entre ambas discontinuidades. La línea de intersección entre familias tiene una orientación de 52/081. Las longitudes de trazado en ambos sets son muy similares entre sí, siendo en la cara del talud J1 = 7,59 m y J2 =7,78 m, y en la cara superior J1 = 0,12 m y J2 =0,27 m. Por el contrario, dependiendo de la cara considerada, varía notablemente, aportando a la cuña una geometría afilada (fig. 22), como se puede observar a partir de los ángulos de intersección entre las dos familias, los datos del set 1, el set 2, el talud y la cara superior.

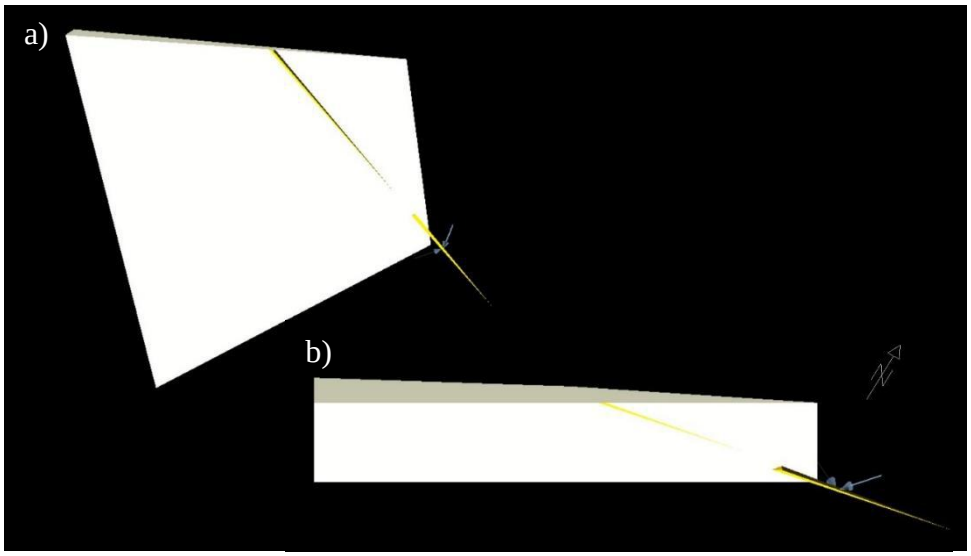


Figura 22.- Modelización de la cuña media formada por la intersección de F1 – F2 en el afloramiento A2. a) Vista en perspectiva desde el pie del talud donde se observa la fuerza que ejerce el agua. b) Vista desde el techo, donde se indica el norte del talud. Obtenido a partir de Swedge.

En la intersección entre F0 – F2 del talud A2, presenta una probabilidad de deslizamiento del 0 % y su factor de seguridad es 3,82. Por lo que, bajo estas condiciones podría considerarse prácticamente estable para esta intersección de familias. El volumen y el peso de la cuña media es superior a los casos anteriores con 82 m^3 y 222 t, respectivamente. Las fuerzas normales a las que está sometida oscilan entre 190 t, la fuerza motriz es de 64 t y la fuerza de resistencia de 244,65 t. La presión que ejerce el agua en las fisuras también es 0,53 t/m^2, siendo la fuerza en el set 1 de 14,66 t y en el set 2 el doble (30,69 t), considerando una presión de llenado del 100% como en los casos anteriores. El modo de fallo que genera el deslizamiento en cuña es el mismo que en talud A1, por la línea de intersección de las dos discontinuidades. Esta línea tiene una orientación de 17/195. Las longitudes de trazado son superiores en el set 2, tanto en la cara del talud, como la superior ($F2_{talud}$ =10,39 m; $F2_{superior}$ =15,45 m), que en el set ($F1_{talud}$ =7,70 m; $F1_{superior}$ =7,18 m). Esto junto a los ángulos de intersección entre las dos familias, los datos del set 1, el set 2, el talud y la cara superior, condicionan su geometría (fig. 23).

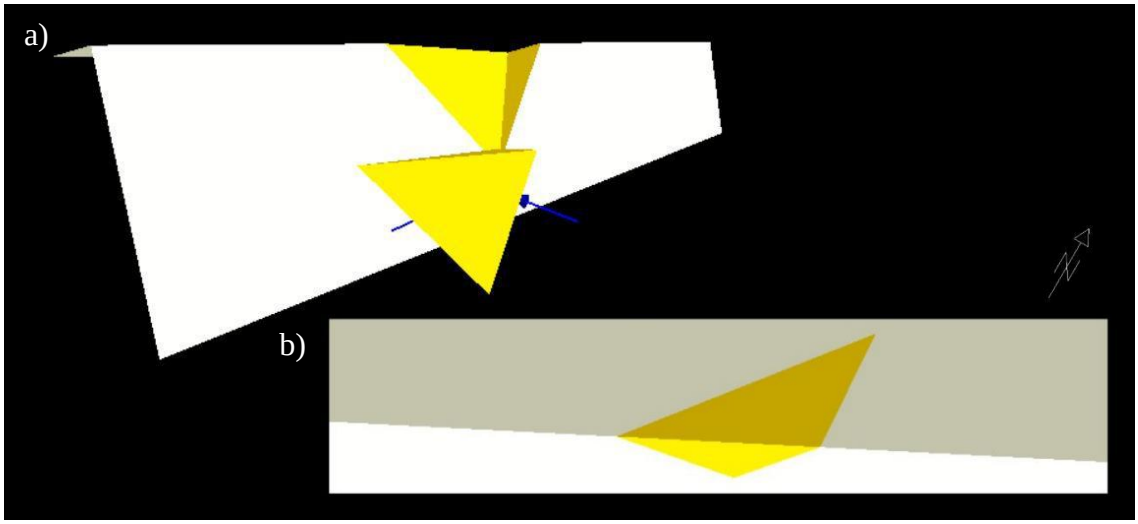


Figura 23.- Modelización de la cuña media formada por la intersección de F0 – F2 en el afloramiento A3. a) Vista en perspectiva desde el pie del talud donde se observa la fuerza que ejerce el agua. b) Vista desde el techo, donde se indica el norte del talud. Obtenido a partir de Swedge.

La cohesión obtenida mediante la formula expresada en la metodología, presenta unos valores próximos a 300 kPa. De modo que se ha considerado una centésima parte de dicha cohesión, obteniendo un valor para los planos de discontinuidades de 3 kPa. Esta cifra es más aproximada a la situación real de los taludes que 0 kPa, ya que dichos planos presentan un ligero relleno.

Esta tabla 17, presenta los datos recogidos del análisis con el programa *Swedge* con los planos medios de cada familia de discontinuidades calculados con *Dips*. Esta metodología presenta cierta limitación a la hora de introducir la geometría del talud junto a la de los planos medios de cada set, debido a la dispersión de los planos tomados con *CloudCompare*. Al introducir el plano medio muchos de los valores más alejados al promedio, no son considerados en el análisis con *Swedge* a pesar de que con el análisis previo con *Dips* sí lo fuesen. Esto se debe a que se ha calculado un gran número de planos por afloramiento (entre 500 y 1000 planos, Anexo II),

lo que ocasiona una mayor dispersión de sus valores. En la tabla 17 se comparan las familias que potencialmente podrían presentar un deslizamiento en cuña mediante *Dips* y *Swedge.*

		Dips	Swedge
A1	F0-F1	Sí	Sí
	F1-F2	Sí	No*
	F0-F2	Sí	No*
A2	F0-F1	Sí	No*
	F1-F2	Sí	Sí
	F0-F2	Sí	Sí
A3	F0-F1	No	No
	F1-F2	Sí	No*
	F0-F2	Sí	No*

*Tabla 17.- Resumen de las familias previamente consideradas inestables frente a las finalmente analizadas con Swedge con los planos medios. *Geometría del plano medio no valida.*

3.2.1.3. Análisis de vuelcos

El estudio cinemático realizado apunta a la posibilidad de mecanismos de vuelco en los taludes A2 y A3. En la figura 24, se presenta el análisis para el afloramiento A2 de los vuelcos de bloques para la intersección de las familias F0 y F1 (línea de intersección = 164/48), para el que se ha obtenido un factor de seguridad de 0,79 y una probabilidad de rotura superior al 93 % (fig. 25).

En el talud A3 se han modelizado el vuelco de bloques de la intersección F0-F1, que se dispone con una orientación de 161/41. En este caso se ha obtenido un factor de seguridad de 0,78 (Fig. 26) y una probabilidad de rotura del 100 % (Fig. 27).

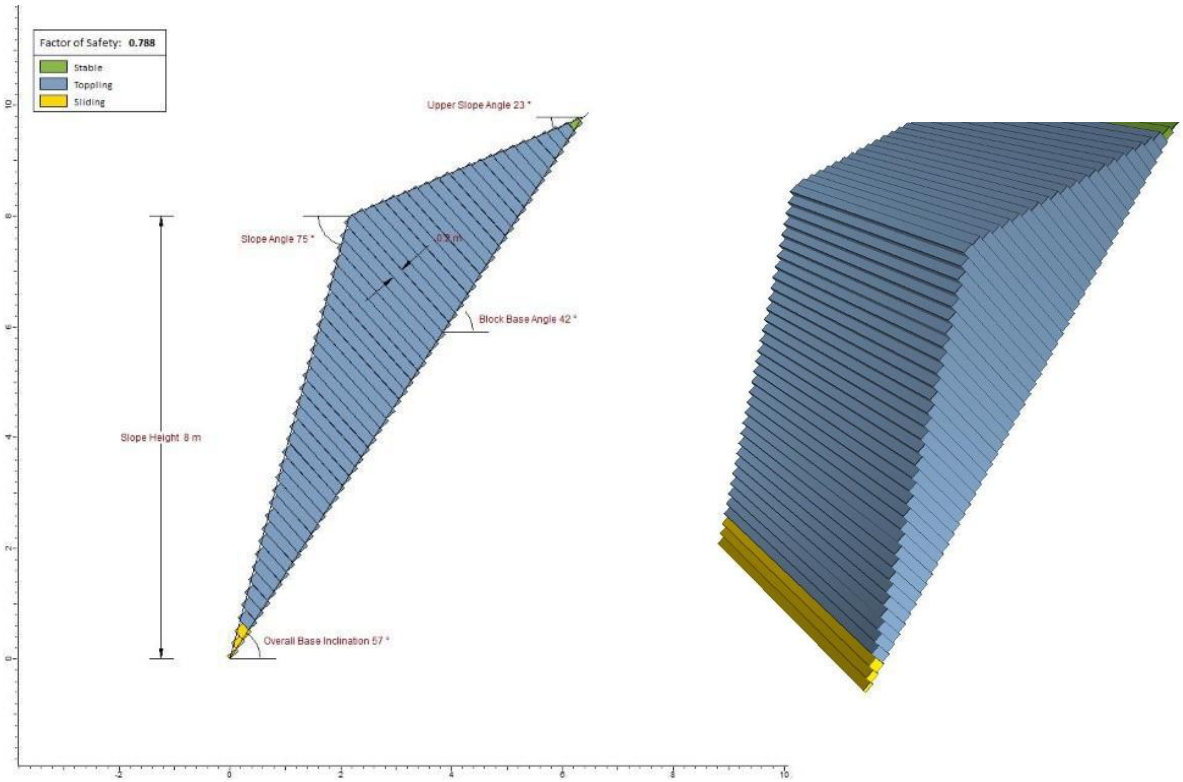


Figura 24.- Modelización de vuelcos de bloques por la intersección de las familias F0-F1 del talud A2, mediante el análisis determinístico. En color amarillo se muestran los posibles bloques a deslizar, de color azul los que pueden volcar y verde los que son estables. También se indica el factor de seguridad calculado. Realizado con RocTopple.

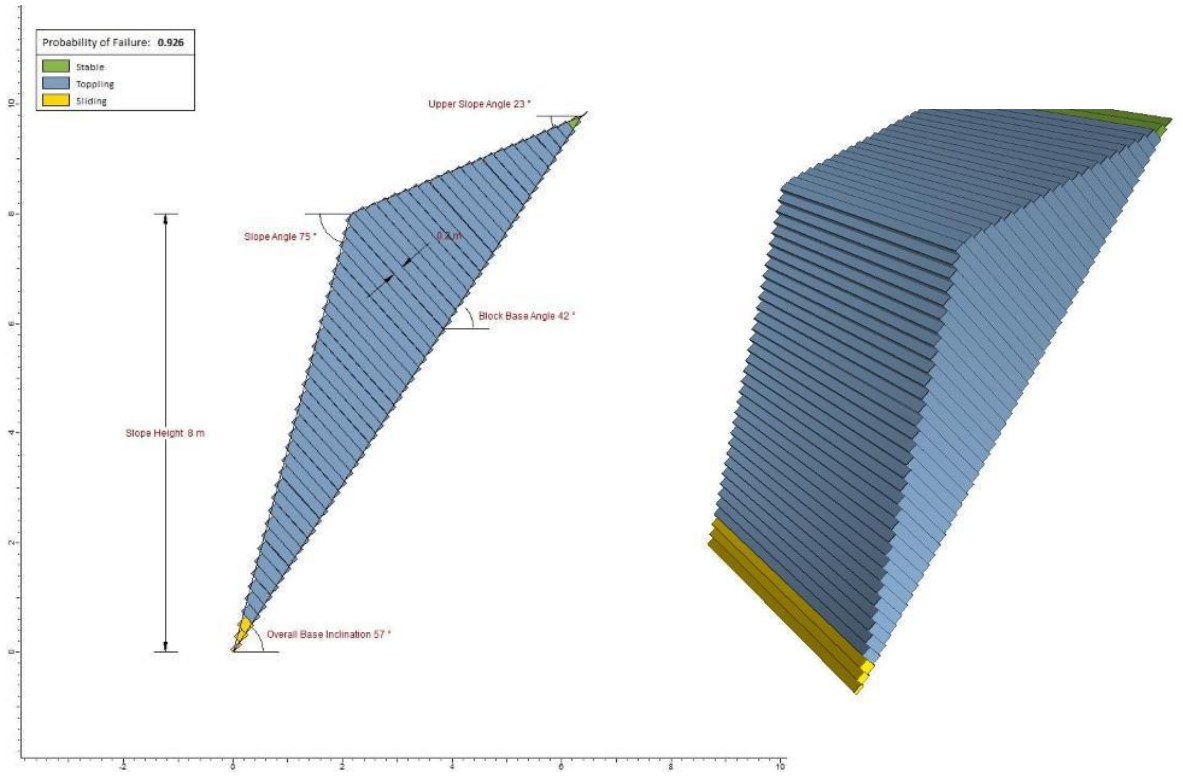


Figura 25.- Modelización de vuelcos de bloques por la intersección de las familias F0-F1 del talud A2, mediante el análisis probabilístico. En color amarillo se muestran los posibles bloques a deslizar, de color azul los que pueden volcar y verde los que son estables. También se indica la probabilidad de rotura calculada. Realizado con RocTopple.

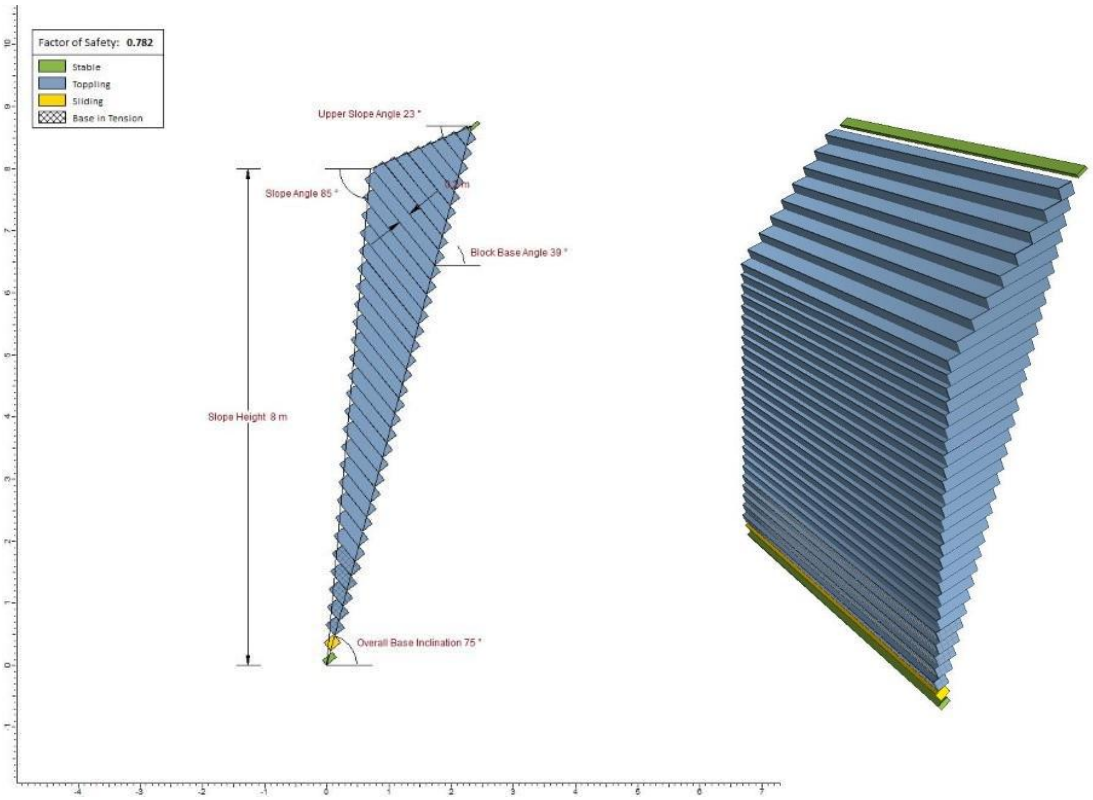


Figura 26.- Modelización de vuelcos de bloques por la intersección de las familias F0-F1 del talud A3, mediante el análisis determinístico. En color amarillo se muestran los posibles bloques a deslizar, de color azul los que pueden volcar y verde los que son estables. También se indica el factor de seguridad calculado. Realizado con RocTopple.

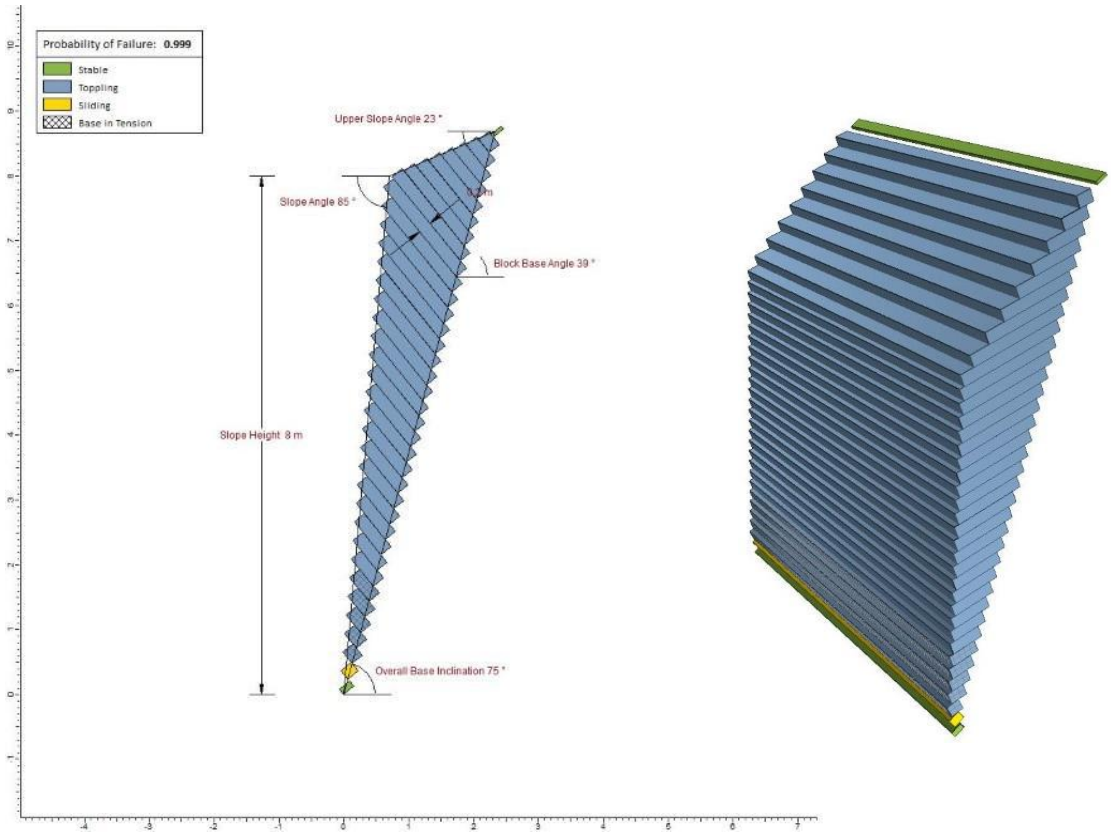


Figura 27.- Modelización de vuelcos de bloques por la intersección de las familias F0-F1 del talud A3, mediante el análisis probabilístico. En color amarillo se muestran los posibles bloques a deslizar, de color azul los que pueden volcar y verde los que son estables. También se indica la probabilidad de rotura calculada. Realizado con RocTopple.

3.2.1.4. Síntesis del análisis de estabilidad

En la tabla 18 se presenta una comparativa de estabilidad de los tres taludes estudiados en función de las diferentes clasificaciones y del análisis informático realizado.

	Menos estable		Más estable
SMR	A1	A2	A3
RMR	A1	A2	A3
RQD	A2	A3	A1
Q	A2	A3	A1
GSI	A2	A3	A1
Dips	A2	A1 y A3	
RocPlane	A3	A2	A1
Swedge	A2	A1	A3
RocTopple	A3	A2	A1
TOTAL	A2	A3	A1

Tabla 18.- Síntesis de la estabilidad de los taludes en función de su clasificación y análisis con Dips, RocPlane, Swedge y RocTopple.

Se puede observar que el talud A2 es el más inestable por la diversidad de movimientos de ladera posibles y por los valores obtenidos de las clasificaciones de la calidad del macizo rocoso, por lo que requeriría una actuación más urgente.

Los taludes A1 y A3, presentan propiedades similares en cuanto a estabilidad. En ambos afloramientos existen ocho posibles planos, o intersecciones de planos, a deslizar o volcar. Sin embargo, tras su análisis se aprecian valores más bajos en la clasificación del RQD, Q y GSI para el talud A3. Además, en el análisis de deslizamiento planar y vuelco presenta el factor de seguridad más bajo en condiciones secas, al contrario que en el deslizamiento en cuña donde es el más alto de los tres casos modelizados.

3.4. Medidas de estabilización

A partir de los resultados obtenidos, se ha definido una propuesta de estabilización de los tres taludes objeto de estudio que se describe a continuación.

En el caso del talud A1, de acuerdo con los valores SMR obtenidos, se propone una estabilización basada en un bulonado sistemático con una densidad de ~ 0,85 bulones/m^2, siendo la distancia media ente bulones de 1,10 m y que ejercen una fuerza de 10-15 t/m^2 (tabla 19). Además, requiere gunitado en zonas locales del frente rocoso y se podría contemplar la instalación de una malla de alambre reforzada con una red de cables, como medida complementaria si fuese necesario.

Para el talud A2, de acuerdo a los valores SRM y Jv, también se propone una estabilización basada en un refuerzo mediante bulones, con una densidad de ~ 0,30 bulones/m^2, con una distancia media entre bulones de 2,0 m y que ejercen una fuerza de 4,5 y 6 t/m^2 (tabla 19). Se

debe gunitar de manera local el frente rocoso e instalar una malla de alambre reforzada con una red de cables.

Para el talud A3, de acuerdo con los valores SRM y Jv, también se propone una estabilización basada en un refuerzo mediante bulones, con una densidad de ~ 0,11 bulones/m^2 y con una densidad de fuerza entre 1 y 1,5 t/m^2 (tabla 19), y la instalación de una malla de alambre reforzada con una red de cables.

Talud	SMR	Bulones por m^2	Distancia entre bulones	Densidad de fuerza (t/m^2)	Gunita
A1	50,25; 53,10; 45,00	0,85	1,1	10,00-15,00	Ocasional
A2	60,50; 59,00; 59,00	0,30	2,0	4,50-6,00	Ocasional
A3	69,10; 69,30; 61,00	0,08-0,11	3,0-3,5	1,00-1,25	Sin gunita

Tabla 19.- Valores detallados sobre la instalación de bulones en función de sus SMR según las familias de discontinuidades en cada talud.

A parte de estas medidas, se debe drenar el talud para minimizar los daños provocados por el aumento del contenido de agua en la red de discontinuidades. Para ello, se plantea la instalación de drenes californianos con una inclinación aproximada de 5-10º para permitir el drenaje de los tubos ranurados. Se propone la instalación de al menos 2 filas de drenes espaciados 1 m a una altura aproximada de 1 y 4 m respectivamente de la base del talud, según la Orden Circular 17/2003.

3.5. Programa de auscultación geotécnica

El programa de auscultación geotécnica más adecuado, dados los mecanismos de inestabilidad estudiados, debe basarse en técnicas topográficas. Así, se plantea una monitorización basada en la instalación de puntos de control topográfico (dianas, clavos, etc.) situados en diferentes puntos del talud.

Tras la instalación de los puntos de control deben registrarse las medidas periódicamente con una frecuencia mensual, y, preferiblemente, antes y después de fuertes temporales. Los equipos más adecuados debido a la accesibilidad del afloramiento serían los hitos topográficos, que registran los movimientos horizontales y verticales, y las dianas para los vuelos con dron que permiten registrarlos en tres dimensiones. Estos puntos de control deben ser localizados espacialmente tras su colocación para poder conocer la diferencia entre la medida inicial y las sucesivas. La densidad de estos puntos, teniendo en cuenta las dimensiones del talud, deben ser de 1 punto de control cada 4-5 metros cuadrado aproximadamente y registrar los desplazamientos periódicamente con una frecuencia mensual.

4. CONCLUSIONES

A partir de los resultados de este TFM se pueden destacar tres conclusiones principales, relativas a la caracterización geomecánica de los macizos rocosos mediante MDA y el correspondiente análisis de estabilidad, seguido de las oportunas propuestas de estabilización y del programa de auscultación geotécnica.

- Los taludes rocosos estudiados han sido excavados sobre los materiales de la Serie los Cabos y se caracterizan por una importante red de discontinuidades, mayoritariamente de origen natural y en parte incrementadas como consecuencia de las voladuras para la ejecución de la carretera AS-29. Esta fracturación constituye el principal factor condicionante de la estabilidad de estos taludes, mientras que el contenido en agua se sitúa como principal factor desencadenante.
- Mediante la realización de estaciones geomecánicas se ha abordado el estudio de los macizos rocosos en cada punto estudiado, estableciéndose una calidad media – buena para todos ellos. Los resultados obtenidos tanto en la caracterización del macizo como en el estudio geométrico y cinemático realizado indican que el talud más inestable es el denominado A2, seguido de A3 y A1. En todo caso, todos ellos precisan medidas de estabilización basadas en el refuerzo mediante un bulonado sistemático y el drenaje con drenes californianos. A parte de estas medidas, el talud A2 precisaría de proyección de gunita en zonas locales y la instalación de una malla de guiado. En el A3 también se debería implementar una malla de guiado, mientras que el A1 requeriría gunitado en zonas concretas. Además, se plantea un programa de auscultación geotécnica para monitorizar potenciales movimientos del macizo rocoso con técnicas topográficas convencionales.
- Como resultado de este TFM también se puede confirmar el potencial de los MDA como técnica de caracterización geomecánica del macizo rocoso, dado que permite efectuar un análisis estructural detallado y obtener datos de zonas inaccesibles del mismo.

Por lo tanto, este TFM pone de manifiesto la importancia de los MDA para la elaboración de las estaciones geomecánicas de forma más eficiente, que posteriormente, permiten realizar sus correspondientes análisis de estabilidad con una mayor representatividad. Y, a partir de esta información, se pueden proponer medidas de estabilización acordes a sus características y seguir un programa de auscultación geotécnica minucioso, que controle los movimientos del macizo rocoso, con el objetivo de prevenir daños en la AS-29.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aramburu, C., Bastida, F., & Arbizu, M. (Eds.). (1995). *Geología de Asturias*. Ediciones Trea.

Bastida, F. et al. (1977). MAGNA 50 - Hoja 75 (Gendrez). [Mapa] 1:50.000. Madrid.

Bastida, F. et al. (1977). MAGNA 50 - Hoja 75 (Gendrez). [PDF] 1:50.000. Madrid.

Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classification*. Wiley & Sons, New York.

Cascudo, T. (14 de enero de 2021). *El acceso a Abanceña, en Cangas, tendrá un paso provisional esta semana*. La Nueva España. Recuperado de: https://www.lne.es/occidente/2021/01/14/acceso-abancena-cangas-tendra-paso-28210255.html

D, Á. (9 de diciembre de 2020). *Se multiplican los argayos, con cortes en vías de toda la región*. La Nueva España. Recuperado de: https://www.lne.es/asturias/2020/12/09/multiplican-argayos-cortes-vias-region-26089945.html

Dirección General de Tráfico (s.f.). *Listado de rutas ciclistas protegidas 2017*. Disponible en: https://revista.dgt.es/Galerias/noticia/nacional/2017/07JULIO/Rutas-ciclistas-protegidas-2017.pdf

Dos argayos provocan cortes en carreteras del suroccidente. (13 de diciembre de 2019). Radiotelevisión del Principado de Asturias (RTPA). Recuperado de: https://www.rtpa.es/noticias-asturias:Dos-argayos-provocan-cortes-en-carreteras-del-suroccidente_111576242479.html

El Principado habilita un carril en la vía entre San Antolín de Ibias y la Regla de Perandones, afectada por un argayo. (22 de marzo de 2020). Europa press. Recuperado de: https://www.europapress.es/asturias/noticia-principado-habilita-carril-via-san-antolin-ibias-regla-perandones-afectada-argayo-20200322185938.html

El Principado trabaja en despejar la AS-29, a la altura de Yema, en Cangas del Narcea, cortada por un argayo. (9 de diciembre de 2020). COPE Asturias. Recuperado de: https://www.cope.es/emisoras/asturias/noticias/principado-trabaja-despejar-as-29-altura-yema-cangas-del-narcea-cortada-por-argayo-20201209_1035834

Fuente, D.S. (21 de febrero de 2019). *Un argayo corta por completo la As-29 entre Cangas del Narcea e Ibias*. El Comercio. Recuperado de: https://www.elcomercio.es/asturias/occidente/argayo-corta-completo-cangas-narcea-ibias-yema-20190221194823-nt.html

Gobierno del Principado de Asturias (s.f.). *Mapa de Aforos 2011*. Disponible en: https://www.asturias.es/documents/217090/556201/Mapa+de+aforos+2011.pdf/6d561d9d-4ae6-595e-76e4-c8b7cd1dc73d?t=1606825830489

González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación.

Hidalgo, B.G. (8 de diciembre de 2020). *«Se veía venir, pero no hicieron nada para solucionarlo», claman los vecinos afectados por el argayo en la AS-29.* El Comercio.

Recuperado de: https://www.elcomercio.es/asturias/occidente/argayo-as-29-vecinos-cangas-narcea-veia-venir-hicieron-20201208172824-nt.html

Hidalgo, B.G. (1 de febrero de 2021). *La carretera AS-29 es «una de las más peligrosas por sus taludes inestables»*. El Comercio. Recuperado de: https://www.elcomercio.es/asturias/occidente/carretera-as29-peligrosas-taludes-inestables-20210201001130-ntvo.html

Hoek, E., & Brown, E. T. (2019). *The Hoek–Brown failure criterion and GSI*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 11(3), 445-463.

Infraestructuras reabre al tráfico uno de los carriles de la carretera AS-29, que da acceso a Ibias desde Cangas del Narcea. (15 de febrero de 2018). Elbúscolu. Recuperado de: https://www.elbuscolu.com/noticias-asturias/infraestructuras-reabre-al-trfico-uno-de-los-carriles-de-la-carretera-as-29-que-da-acceso-a-ibias-desde-cangas-del-narcea/28302

Julivert, M., Fontboté, J. M., Ribeiro, A. y Conde, L. (1972). *Mapa tectónico de la Península Ibérica y Baleares*. Instituto Geológico y Minero de España, 113 pp.

La AS-29 de Cangas del Narcea a Ibias permanecerá cortada hasta garantizar la seguridad (06 de febrero de 2018). Noticias del Occidente. Recuperado de: https://noticiasdeloccidente.com/2018/02/06/la-as-29-cangas-del-narcea-ibias-permanecera-cortada-garantizar-la-seguridad/

Laso, P. (3 de octubre de 2019). *Río Coto, Cangas de Narcea*. Turismo de Observación. Disponible en: https://www.turismodeobservacion.com/foto/rio-del-coto-cangas-del-narcea/44946/

Lotze, F. (1945). *Zur Gliederung der Varisziden der Iberischen Meseta*. Geotekt. Forschg., *6*, 78-92.

Los daños causados por los últimos temporales en Asturias rozan los 3 millones. (15 de enero de 2021). La Voz de Asturias. Recuperado de: https://www.lavozdeasturias.es/noticia/asturias/2021/01/15/danos-causados-ultimos-temporales-asturias-rozan-3-millones/00031610710185266328819.htm

Martínez Catalán, J. R. (1985). *Estratigrafía y estructura del Domo de Lugo (sector oeste de la Zona Asturoccidental-leonesa).* Corpus Geologicum Gallaeciae, II: 291 pp.

Miller, R. P. (1965). *Engineering Classification and index properties for intact rock,* phD thesis, University of Illions.

Olalla, C.; Sopeña, L. (1991). *Ensayos de campo*. Monografía, (5).

Parrilla, A., et al. (2003). *Orden circular 17/2003: Recomendaciones para el proyecto y construcción del drenaje subterráneo en obras de carretera*. Servicio de Geotecnia de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento.

Población del Padrón Continuo por Unidad Poblacional (2020). Cangas de Narcea. Instituto Nacional de Estadística. Disponible en:

https://www.ine.es/nomen2/index.do?accion=busquedaAvanzada&entidad_amb=no&codProv=33&codMuni=11&codEC=0&codES=0&codNUC=0&denominacion_op=like&denominacion_txt=&L=0

Ritchie, AM (1963). *Evaluación del desprendimiento de rocas y su control*. *Registro de investigación de carreteras*, (17).

Río Narcea (s.f.). Confederación Hidrográfica del Cantábrico O.A. Recuperado de: https://www.chcantabrico.es/las-cuencas-cantabricas/marco-fisico/hidrologia/rios/narcea [11 de diciembre de 2021].

Romana, M. (1985). *New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes*. En Int. Symp. on the role of rock mechanics ISRM. Zacatecas. pp 49-53.

Un argayo corta la carretera entre San Antolín de Ibias y la Regla de Perandones. (22 de marzo de 2020). COPE Asturias. Recuperado de: https://www.cope.es/emisoras/asturias/noticias/argayo-corta-carretera-entre-san-antolin-ibias-regla-perandones-20200322_654431

Un argayo mantiene cortada en Cangas del Narcea la carretera AS-29. (14 de diciembre de 2019). Radiotelevisión del Principado de Asturias (RTPA). Recuperado de: https://www.rtpa.es/noticias-asturias:Un-argayo-mantiene-cortada-en-Cangas-del-Narcea-la-carretera-AS-29_111576325717.html

Un impresionante argayo mantiene cortada la carretera de Ibias a La Regla, en Cangas del Narcea (05 de febrero de 2018). Noticias del Occidente. Recuperado de: https://noticiasdeloccidente.com/2018/02/05/impresionante-argayo-mantiene-cortada-la-carretera-ibias-la-regla-cangas-del-narcea/

U*na fana corta la vía Cangas-Ibias y deja incomunicados varios pueblos.* (8 de diciembre de 2020). Noticias del occidente. Recuperado de: https://noticiasdeloccidente.com/2020/12/08/una-fana-corta-la-via-cangas-ibias-y-deja-incomunicados-varios-pueblos/

UNE-EN 12504-2, 2013. *Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 2: Ensayos no destructivos. Determinación del índice de rebote*. Madrid: AENOR. Depósito legal: M 26758:2013.

Parrilla, A., et al. (2003). *Orden circular 17/2003: Recomendaciones para el proyecto y construcción del drenaje subterráneo en obras de carretera*. Servicio de Geotecnia de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento.

ANEXOS

ANEXO I.- ESTACIONES GEOMECÁNICAS

Estación geomecánica 1 (A1)

Información general

DATOS PRINCIPALES

ID	**A1**
Responsable	C.H.M.
Fecha	07/06/2021
Hora	11:15 h
Cond. Meteo.	Soleado
Proyecto	TFM

LOCALIZACIÓN

Denominación		A1
UTM	**X**	682114,1
	Y	4774674,6
Cota		796 m
Datum		ETRS89
Huso		29
Hoja MTN50		75 (10-6) GEDREZ

FRENTE ROCOSO

Tipología	Cuarciarenitas ordovícicas
Orientación	N64E
Anchura	12 m
Pendiente	65° S
Altura	7 - 8 m
Signos inestabilidad	Caída de cuñas centimétricas

SUSTRATO

Unidad	Serie de los Cabos
Edad	Ordovícico inferior

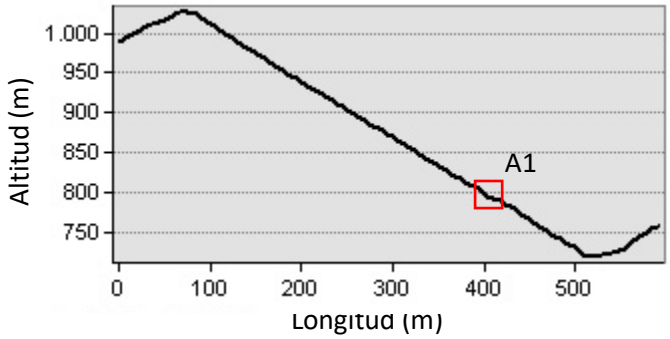
IMÁGENES

Panorámica general 360º	Sí
Fotografía convencional	Sí
Adquisición para MDA	Sí

RECUBRIMIENTO

No hay

PERFIL DE LA LADERA



FOTOGRAFÍA

Datos sobre la roca matriz

ALTERACIÓN	**Tipo**	**Fresca**	
		Decolorada	x
		Desintegrada	
		Descompuesta	
	Grado de meteorización (ISRM)		II
	Meteorización física		Por dilatación, termofracción o gelifracción
	Meteorización química		No
	Coloración		Transparente normal - parda

RESISTENCIA MECÁNICA: ÍNDICES DE CAMPO		**ROCA**	
	Extremadamente blanda	0,25 - 1	
	Muy blanda	1-5	
	Blanda	5-25	
	Moderadamente dura	25-50	
	Dura	50-100	
	Muy dura	100-250	X
	Extremadamente dura	> 250	

RESISTENCIA MECÁNICA: ESCLERÓMETRO	Tipo de martillo	Tipo L														
	Posición de golpeo	Perpendicular														
	Y (kN/m^3)	25														
	Normativa	UNE-EN 12504-2: 2013														
	Rebote (R)	28	24	30	31	30	28	30	30	32	27	30	30	31	28	29
		28	30	31	30	30	30	28	32	31	30	28	31	28	29	31

	R	σ_{ci} (MPa)
Máximo	32	52
Mínimo	24	32
Promedio	29.5	47.5
Mediana	30	48
Moda	30	48

Calidad del macizo rocoso RMR_{89}

ASIGNACIÓN DE VALORES

	Parámetros	Rangos de valores
1	σ_{ci} (MPa)	250 - 100
	valoración	12
2	RQD (%)	50 - 25
	valoración	8
3	Espaciado	20 - 6
	valoración	8
4	Estado de las discontinuidades	Ligeramente rugosas, separación < 1 mm y paredes ligeramente alteradas
	valoración	25
4.1.	Longitud	1 - 10
	valoración	4 - 2
4.2.	Abertura	< 0,1 - 1 mm
	valoración	5 - 4
4.3.	Rugosidad	Ligeramente rugosa - Suave
	valoración	3 - 1
4.4.	Relleno	Ninguno
	valoración	6
4.5.	Alteración	Ligeramente alterado
	valoración	5
5	Agua en juntas	Seco - Algo húmedo
	valoración	15 - 10

ORIENTACIÓN DISCONTINUIDADES

	Dirección perpendicular a la carretera				Dirección paralela a la carretera		Buzamiento 0-20° en cualquier dirección
	Excavación a favor		Excavación en contra				
Buzamiento	45-90°	20-45°	45-90°	20-45°	45-90°	20-45°	
Orientación	Muy favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy desfavorable	Media	Desfavorable
					x		

CORRELACIÓN DE ORIENTACIONES

Dirección y buzamiento	Muy favorable	Favorables	Medias	Desf avora bles	Muy desfavo-rables
Taludes	0	-5	-25	-50	-60
					x

CLASIFICACIÓN	RMR básico	Rango de puntuación	Clase de macizo	Descripción	Ángulo de rozamiento	Cohesión (kPa)	
		≥ 80	I	Muy bueno	> 45 º	> 400	
	62	80-61	II	Bueno	45-35	400-300	x
		60-41	III	Medio	35-25	300-200	
		40-21	IV	Malo	25-15	200-100	
		≤ 20	V	Muy malo	< 15	< 100	

Fracturación del macizo rocoso

FRACTURACIÓN DEL MACIZO			
	Tamaño bloque	Bloques pequeños	
	Jv (discont./m^3)	10-30	
	Forma bloques	Cúbico	Bloques aproximadamente equidimensionales
		Tabular	Bloques con una dimensión menor que las otras dos
	Calidad	Mala	
	RQD (%)	25-50	
	Número de familias	3 familias de discontinuidades más otras ocasionales	

Calidad del macizo rocoso RQD (%)

PARÁMETROS		
	Jv (discontinuidades/m^3)	17
	RQD = 110 - 2.5 * Jv	RQD = 110 - 2.5 * 17 = 67.5 %

CLASIFICACIÓN	**RQD (%)**	**Calidad**	
	< 25	Muy mala	
	25 – 50	Mala	
	50 – 75	Aceptable	x
	75 – 90	Buenas	
	90 – 100	Muy buena	

Calidad del macizo rocoso Índice Q

FÓRMULA

$$Q = \frac{RQD}{Jn} * \frac{Jr}{Ja} * \frac{Jw}{SRF} \qquad Q = \frac{67,5}{12} * \frac{3}{2} * \frac{1}{7,5} = 1,13$$

CÁLCULO DE Jn

Parámetro	Descripción	
0,5 – 1	Roca masiva	
2	Una familia de diaclasas	
3	Una familia de diaclasas y algunas diaclasas ocasionales	
4	Dos familias de diaclasas	
6	Dos familias de diaclasas y algunas diaclasas ocasionales	
9	Tres familias de diaclasas	
12	Tres familias de diaclasas y algunas diaclasas ocasionales	x
15	Cuatro o más familias de diaclasas, roca muy fracturada	
20	Roca triturada	

CÁLCULO DE Jr

Contacto entre las dos caras de las diaclasas con poco desplazamiento lateral (< 10 cm)

Parámetro	Descripción	
4	Juntas discontinuas	
3	Juntas rugosas o irregular ondulada	x
2	Suave ondulada	
1,5	Espejo de falla, ondulada	
1,5	Rugosa o irregular, plana	
1	Suave plana	
0,5	Espejo de falla, plana	

No existe contacto entre las dos caras de las diaclasas cuando ambas se desplazan lateralmente

1	Zona de contenido de minerales arcillosos, suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las caras de las diaclasas
1	Arenas, gravas o zona fallada suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las dos caras de las diaclasas

CÁLCULO DE Jw

Parámetro	Descripción	Presión del agua (kg/cm^2)	
1	Excavaciones secas o de influencia poco importante	< 1	x
0,66	Fluencia o presión medias. Ocasional lavado de los rellenos de las diaclasas	1 – 2,5	
0,33	Fluencia grande o presión alta, considerable lavado de los rellenos de las diaclasas	2,5 – 10	
0,1 – 0,2	Fluencia o presión de agua excepcionalmente altas, decayendo con el tiempo	> 10	
0,05 – 0,01	Fluencia o presión de aguas excepcionalmente altas y continuas, sin disminución	> 10	

CÁLCULO DE Ja

	Ja	Φ°	Descripción	
Contacto entre las dos caras de las diaclasas	0,75	25 – 30	Junta sellada, dura, sin reblandecimiento impermeable como por ejemplo cuarzo en paredes	
	1	25 – 30	Caras de la junta únicamente manchadas	
	2	25 – 30	Las caras de la junta están alteradas ligeramente y contienen minerales no blandos partículas de arena, roca desintegrada libre de arcilla	x
	3	20 – 25	Recubrimiento de limo o arena arcillosa, pequeña fricción arcillosa no reblandecible	
	4	8 – 16	Recubrimiento de minerales arcillosos blandos o de baja fricción como caolinita, clorita, talco, yeso, grafito y pequeñas cantidades de arcillas expansivas	
Contacto entre dos caras de la diaclasa con menos de 10 cm de desplazamiento lateral	4	25 – 30	Partículas de arena, con roca desintegrada libre de arcilla	
	6	16 – 24	Fuertemente sobreconsolidados rellenos de minerales arcillosos no blandos. Los recubrimientos son continuos de menos de 5 mm de espesor	
	8	12 – 16	Sobreconsolidación media a baja, blandos, rellenos de minerales arcillosos. Los recubrimientos son continuos de menos de 5 mm de espesor	
	8 – 12	6 – 12	Rellenos de arcilla expansiva, de espesor continuo de 5 mm. El valor Ja dependerá del porcentaje de partículas de tamaño de la arcilla expansiva	
No existe contacto entre las dos caras de la diaclasa cuando está cizallada	6-8-12	6 – 24	Zonas o bandas de roca desintegrada o manchada y arcilla	
	5	6 – 24	Zonas blandas de arcilla limosa o arenosa con pequeña fricción de arcilla no blandas	
	13 - 20	6 – 24	Granos arcillosos gruesos	

CÁLCULO DE S.R.F.

Zona débil que interceptan la excavación y pueden causar caídas de bloques

S.R.F.	Descripción	
10	Varias zonas débiles conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, roca muy suelta alrededor	
5	Sólo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (prof. Excavación < 50 m)	
2,5	Sólo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (prof. Excavación > 50 m)	
7,5	Varias zonas de fractura en roca competente libre de arcilla, roca suelta alrededor (cualquier profundidad)	x
5	Sólo una zona fracturada en roca competente libre de arcilla (prof. Excavación < 50 m)	
2,5	Sólo una zona fracturada en roca competente libre de arcilla (prof. Excavación > 50 m)	
5	Diaclasas abiertas sueltas, muy fracturadas. Cualquier profundidad.	

Rocas competentes con problemas tensionales en las rocas

S.R.F.	σ_c/σ_1	σ_t/σ_1	Descripción
2,5	> 200	> 13	Tensiones pequeñas cerca de la superficie
1,0	200 -10	13-0,33	Tensiones medias
0,5-2,0	10 – 5	0,66-0,33	Tensiones altas estructura muy compacta, favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad
5 – 10	5 – 2,5	0,33-0,16	Explosión de roca suave (roca masiva)
10 - 20	< 2,5	<0,16	Explosión de roca fuerte (roca masiva)

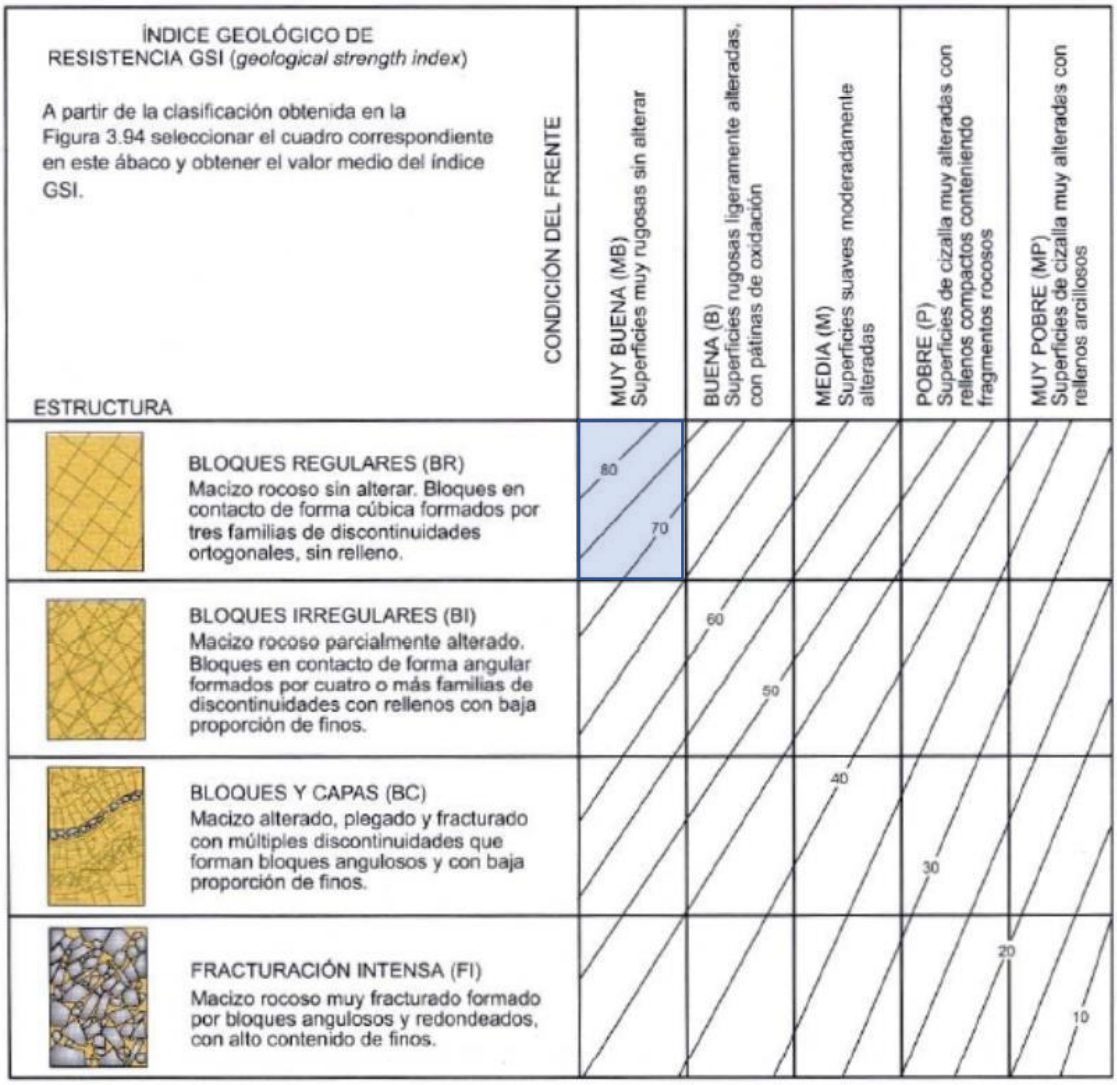
Roca fluyente, flujo plástico de roca incompetente bajo la influencia de altas presiones litostática

S.R.F.	Descripción
5 – 10	Presión de flujo suave
10 – 20	Presión de flujo intensa
5 – 10	Presión expansiva suave
10 – 15	Presión expansiva intensa

	Valor de Q	Tipo de roca	
CLASIFICACIÓN	10^{-3} - 10^{-2}	Excepcionalmente mala	
	10^{-2} - 10^{-1}	Extremadamente mala	
	10^{-1} – 1	Muy mala	
	1 – 4	Mala	x
	4 – 10	Media	
	10 – 40	Buena	
	40 – 100	Muy buena	
	100 – 400	Extremadamente buena	
	400 - 1000	Excepcionalmente buena	

Calidad del macizo rocoso GSI

CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO PARA ESTIMAR SU RESISTENCIA Basándose en el aspecto de la roca elegir la categoría que mejor describa las condiciones del macizo previo a la excavación. Tener en cuenta que las voladuras pueden crear una impresión falsa sobre la calidad del macizo rocoso, en cuyo caso será necesario realizar algún tipo de ajuste por daños debidos a voladuras; la observación de testigos de sondeos y de frentes de roca en zonas afectadas y no afectadas por voladuras puede ser de ayuda. Para la definición del grado de fracturación (*blockiness*) debe considerarse la relación entre el tamaño del bloque y la dimensión del frente de excavación. ESTRUCTURA	CONDICIÓN DEL FRENTE MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con pátinas de oxidación	MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas	POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos	MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos
BLOQUES REGULARES (BR) Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno.	BR/MB	BR/B	BR/M	BR/P	BR/MP
BLOQUES IRREGULARES (BI) Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos.	BI/MB	BI/B	BI/M	BI/P	BI/MP
BLOQUES Y CAPAS (BC) Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos.	BC/MB	BC/B	BC/M	BC/P	BC/MP
FRACTURACIÓN INTENSA (FI) Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos.	FI/MB	FI/B	FI/M	FI/P	FI/MP



CLASIFICACIÓN	Condición del frente	Estructura	GSI
	Muy buena (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	Bloques rectangulares (BR)	70

Calidad del macizo rocoso SMR

TIPO DE ROTURA			MUY FAVORABLE	FAVORABLE	NORMAL	DESFAVORABLE	MUY DESFAVORABLE
P	A	$\lvert\alpha_j-\alpha_s\rvert$	>30°	30-20°	20-10°	10-5°	<5°
T	A	$\lvert\alpha_j-\alpha_s-180\rvert$					
W	A	$\lvert\alpha_r-\alpha_s\rvert$					
P/T/W		**F_1**	**0.15**	**0.40**	**0.70**	**0.85**	**1.00**
P/W	B	$\lvert\beta_j\rvert$ ó $\lvert\beta_r\rvert$	<20°	20-30°	30-35°	35-45°	>45°
P/W		**F_2**	**0.15**	**0.40**	**0.70**	**0.85**	**1.00**
T			**1.00**				
P	C	$\beta_j-\beta_s$	>10°	10-0°	0°	0-(-10°)	<(-10°)
W	C	$\beta_r-\beta_s$					
T	C	$\beta_j+\beta_s$	<110°	110-120°	>120°	-	-
P/T/W		**F_3**	**0**	**-6**	**-25**	**-50**	**-60**

MÉTODO DE EXCAVACIÓN (F_4)			
Talud natural	+15	Voladura normal o excavación mecánica	0
Precorte	+10	Voladura deficiente	-8
Voladura suave	+8		

P: rotura plana; T: rotura por vuelco; W: rotura en cuña.

Clases de estabilidad

Clase	V	IV	III	II	I
SMR	0 – 20	21 – 40	41 – 40	61 – 80	81 – 100
Descripción	Muy mala	Mala	Normal	Buena	Muy buena
Estabilidad	Totalmente inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Totalmente estable
Roturas	Grandes roturas por planos continuos o por masa	Juntas o grandes cuñas	Algunas juntas o muchas cuñas	Algunos bloques	Ninguna
Tratamiento	Reexcavación	Corrección	Sistemático	Ocasional	Ninguno

P: rotura plana; T: rotura por vuelco; α_s: dirección del talud; α_j: dirección de las juntas; β_s: buzamiento del talud; β_j: buzamiento de las juntas

CLASIFICACIÓN	$SMR = RMR_{básico} + (F_1 * F_2 * F_3) + F_4$	SMR
F_0	SMR = 67,5 + (0,15*1*(-25))-8	55,75: Calidad Normal (parcialmente estable)
F_1	SMR = 67,5 + (0,15*1*(-6))-8	58,60: Calidad Normal (parcialmente estable)
F_2	SMR = 67,5 + (0,15*1*(-60))-8	50,5: Calidad Normal (parcialmente estable)

Estación geomecánica 2 (A2)

Información general

DATOS PRINCIPALES

ID	A2
Responsable	C.H.M.
Fecha	07/06/2021
Hora	12:31 h
Cond. Meteo.	Soleado
Proyecto	TFM

LOCALIZACIÓN

Denominación		A2
UTM	**X**	686859,8
	Y	4774519
Cota		625,2 m
Datum		ETRS89
Huso		29
Hoja MTN50		75 (10-6) GEDREZ

FRENTE ROCOSO

Tipología	Cuarciarenitas ordovícicas con talud en voladizo
Orientación	S20N
Anchura	12 m
Pendiente	50° S
Altura	8 - 10 m
Signos inestabilidad	Caída de rocas y vuelcos

SUSTRATO

Unidad	Serie de los Cabos
Edad	Ordovícico inferior

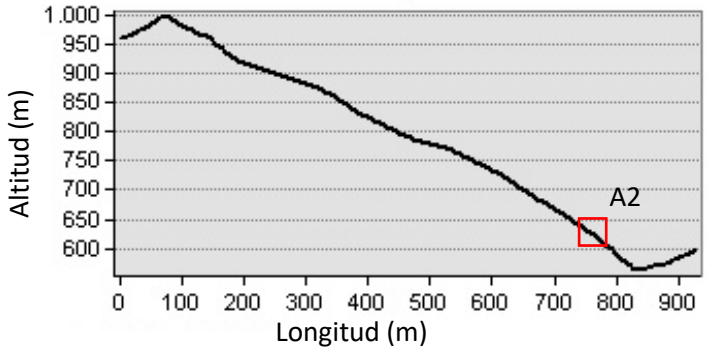
IMÁGENES

Panorámica general 360º	Sí
Fotografía convencional	Sí
Adquisición para MDA	Sí

RECUBRIMIENTO

No hay

PERFIL DE LA LADERA



FOTOGRAFÍA

Datos sobre la roca matriz

ALTERACIÓN	Tipo	Fresca	
		Decolorada	x
		Desintegrada	
		Descompuesta	
	Grado de meteorización (ISRM)		II
	Meteorización física		Por dilatación, termofracción o gelifracción
	Meteorización química		No
	Coloración		Gris - Parda

		ROCA	
RESISTENCIA MECÁNICA: ÍNDICES DE CAMPO	Extremadamente blanda	0,25 - 1	
	Muy blanda	1-5	
	Blanda	5-25	
	Moderadamente dura	25-50	
	Dura	50-100	
	Muy dura	100-250	X
	Extremadamente dura	> 250	

RESISTENCIA MECÁNICA: ESCLERÓMETRO	Tipo de martillo	Tipo L														
	Posición de golpeo	Perpendicular														
	Y (kN/m^3)	25														
	Normativa	UNE-EN 12504-2														
	Rebote (R)	28	28	28	28	32	31	27	25	32	28	30	29	32	28	27
		30	28	25	25	29	27	27	27	25	33	32	33	28	30	29
		R										σ_{ci} (MPa)				
	Máximo	33										55				
	Mínimo	25										48				
	Promedio	28.7										45.5				
	Mediana	28										44				
	Moda	28										44				

Calidad del macizo rocoso RMR_{89}

ASIGNACIÓN DE VALORES

	Parámetros	Rangos de valores
1	σ_{ci} (MPa)	150 - 100
	valoración	10
2	RQD (%)	50 - 25
	valoración	8
3	Espaciado	60 - 6
	valoración	9
4	Estado de las discontinuidades	Ligeramente rugosas, separación < 1 mm y paredes muy alteradas
	valoración	20
4.1.	Longitud	3 - 10
	valoración	2
4.2.	Abertura	0,1 - 5 mm
	valoración	4 - 1
4.3.	Rugosidad	Ligeramente rugosa
	valoración	3
4.4.	Relleno	Ninguno - Duro
	valoración	5
4.5.	Alteración	Ligeramente alterado – Mod. alterado
	valoración	4
5	Agua en juntas	Seco - Algo húmedo
	valoración	15 - 10

ORIENTACIÓN DISCONTINUIDADES

	Dirección perpendicular a la carretera				Dirección paralela a la carretera		Buzamiento 0-20° en cualquier dirección
	Excavación a favor		Excavación en contra				
Buzamiento	45-90°	20-45°	45-90°	20-45°	45-90°	20-45°	
Orientación	Muy favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy desfavorable	Media	
					x		

CORRELACIÓN DE ORIENTACIONES

Dirección y buzamiento	Muy favorable	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Taludes	0	-5	-25	-50	-60
					x

	RMR básico	Rango de puntuación	Clase de macizo	Descripción	Ángulo de rozamiento	Cohesión (kPa)	
CLASIFICACIÓN		≥ 80	I	Muy bueno	> 45 º	> 400	
	76	80-61	II	Bueno	45-35	400-300	x
		60-41	III	Medio	35-25	300-200	
		40-21	IV	Malo	25-15	200-100	
		≤ 20	V	Muy malo	< 15	< 100	

Fracturación del macizo rocoso

FRACTURACIÓN DEL MACIZO	Tamaño bloque	Bloques pequeños	
	Jv (discont./m^3)	10 – 30	
	Forma bloques	Tabular	Bloques con una dimensión menor que las otras dos
	Calidad	Mala	
	RQD (%)	25 - 50	
	Número de familias	3 familias de discontinuidades más otras ocasionales	

Calidad del macizo rocoso RQD (%)

PARÁMETROS	Jv (discontinuidades/m^3)	24
	RQD = 110 - 2.5 * Jv	RQD = 110 - 2.5 * 24 = 50 %

	RQD (%)	**Calidad**	
CLASIFICACIÓN	< 25	Muy mala	
	25 – 50	Mala	x
	50 – 75	Aceptable	x
	75 – 90	Buenas	
	90 – 100	Muy buena	

Calidad del macizo rocoso Índice Q

FÓRMULA

$$Q = \frac{RQD}{Jn} * \frac{Jr}{Ja} * \frac{Jw}{SRF} \qquad Q = \frac{50}{15} * \frac{1}{2} * \frac{1}{7{,}5} = 0{,}22$$

CÁLCULO DE Jn

Parámetro	Descripción	
0,5 – 1	Roca masiva	
2	Una familia de diaclasas	
3	Una familia de diaclasas y algunas diaclasas ocasionales	
4	Dos familias de diaclasas	
6	Dos familias de diaclasas y algunas diaclasas ocasionales	
9	Tres familias de diaclasas	
12	Tres familias de diaclasas y algunas diaclasas ocasionales	
15	Cuatro o más familias de diaclasas, roca muy fracturada	x
20	Roca triturada	

CÁLCULO DE Jr

Contacto entre las dos caras de las diaclasas con poco desplazamiento lateral (< 10 cm)

Parámetro	Descripción	
4	Juntas discontinuas	
3	Juntas rugosas o irregular ondulada	
2	Suave ondulada	
1,5	Espejo de falla, ondulada	
1,5	Rugosa o irregular, plana	
1	Suave plana	x
0,5	Espejo de falla, plana	

No existe contacto entre las dos caras de las diaclasas cuando ambas se desplazan lateralmente

1	Zona de contenido de minerales arcillosos, suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las caras de las diaclasas
1	Arenas, gravas o zona fallada suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las dos caras de las diaclasas

CÁLCULO DE Jw

Parámetro	Descripción	Presión del agua (kg/cm^2)	
1	Excavaciones secas o de influencia poco importante	< 1	x
0,66	Fluencia o presión medias. Ocasional lavado de los rellenos de las diaclasas	1 – 2,5	
0,33	Fluencia grande o presión alta, considerable lavado de los rellenos de las diaclasas	2,5 – 10	
0,1 – 0,2	Fluencia o presión de agua excepcionalmente altas, decayendo con el tiempo	> 10	
0,05 – 0,01	Fluencia o presión de aguas excepcionalmente altas y continuas, sin disminución	> 10	

CÁLCULO DE Ja

	Ja	Φ°	Descripción	
Contacto entre las dos caras de las diaclasas	0,75	25 – 30	Junta sellada, dura, sin reblandecimiento impermeable como por ejemplo cuarzo en paredes	
	1	25 – 30	Caras de la junta únicamente manchadas	
	2	25 – 30	Las caras de la junta están alteradas ligeramente y contienen minerales no blandos partículas de arena, roca desintegrada libre de arcilla	x
	3	20 – 25	Recubrimiento de limo o arena arcillosa, pequeña fricción arcillosa no reblandecible	
	4	8 – 16	Recubrimiento de minerales arcillosos blandos o de baja fricción como caolinita, clorita, talco, yeso, grafito y pequeñas cantidades de arcillas expansivas	
Contacto entre dos caras de la diaclasa con menos de 10 cm de desplazamiento lateral	4	25 – 30	Partículas de arena, con roca desintegrada libre de arcilla	
	6	16 – 24	Fuertemente sobreconsolidados rellenos de minerales arcillosos no blandos. Los recubrimientos son continuos de menos de 5 mm de espesor	
	8	12 – 16	Sobreconsolidación media a baja, blandos, rellenos de minerales arcillosos. Los recubrimientos son continuos de menos de 5 mm de espesor	
	8 – 12	6 – 12	Rellenos de arcilla expansiva, de espesor continuo de 5 mm. El valor Ja dependerá del porcentaje de partículas de tamaño de la arcilla expansiva	
No existe contacto entre las dos caras de la diaclasa cuando está cizallada	6-8-12	6 – 24	Zonas o bandas de roca desintegrada o manchada y arcilla	
	5	6 – 24	Zonas blandas de arcilla limosa o arenosa con pequeña fricción de arcilla no blandas	
	13 - 20	6 – 24	Granos arcillosos gruesos	

CÁLCULO DE S.R.F.

Zona débil que interceptan la excavación y pueden causar caídas de bloques

S.R.F.	Descripción	
10	Varias zonas débiles conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, roca muy suelta alrededor	
5	Sólo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (prof. Excavación < 50 m)	
2,5	Sólo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (prof. Excavación > 50 m)	
7,5	Varias zonas de fractura en roca competente libre de arcilla, roca suelta alrededor (cualquier profundidad)	x
5	Sólo una zona fracturada en roca competente libre de arcilla (prof. Excavación < 50 m)	
2,5	Sólo una zona fracturada en roca competente libre de arcilla (prof. Excavación > 50 m)	
5	Diaclasas abiertas sueltas, muy fracturadas. Cualquier profundidad.	

Rocas competentes con problemas tensionales en las rocas

S.R.F.	σ_c/σ_1	σ_t/σ_1	Descripción
2,5	> 200	> 13	Tensiones pequeñas cerca de la superficie
1,0	200 -10	13-0,33	Tensiones medias
0,5-2,0	10 – 5	0,66-0,33	Tensiones altas estructura muy compacta, favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad
5 – 10	5 – 2,5	0,33-0,16	Explosión de roca suave (roca masiva)
10 - 20	< 2,5	<0,16	Explosión de roca fuerte (roca masiva)

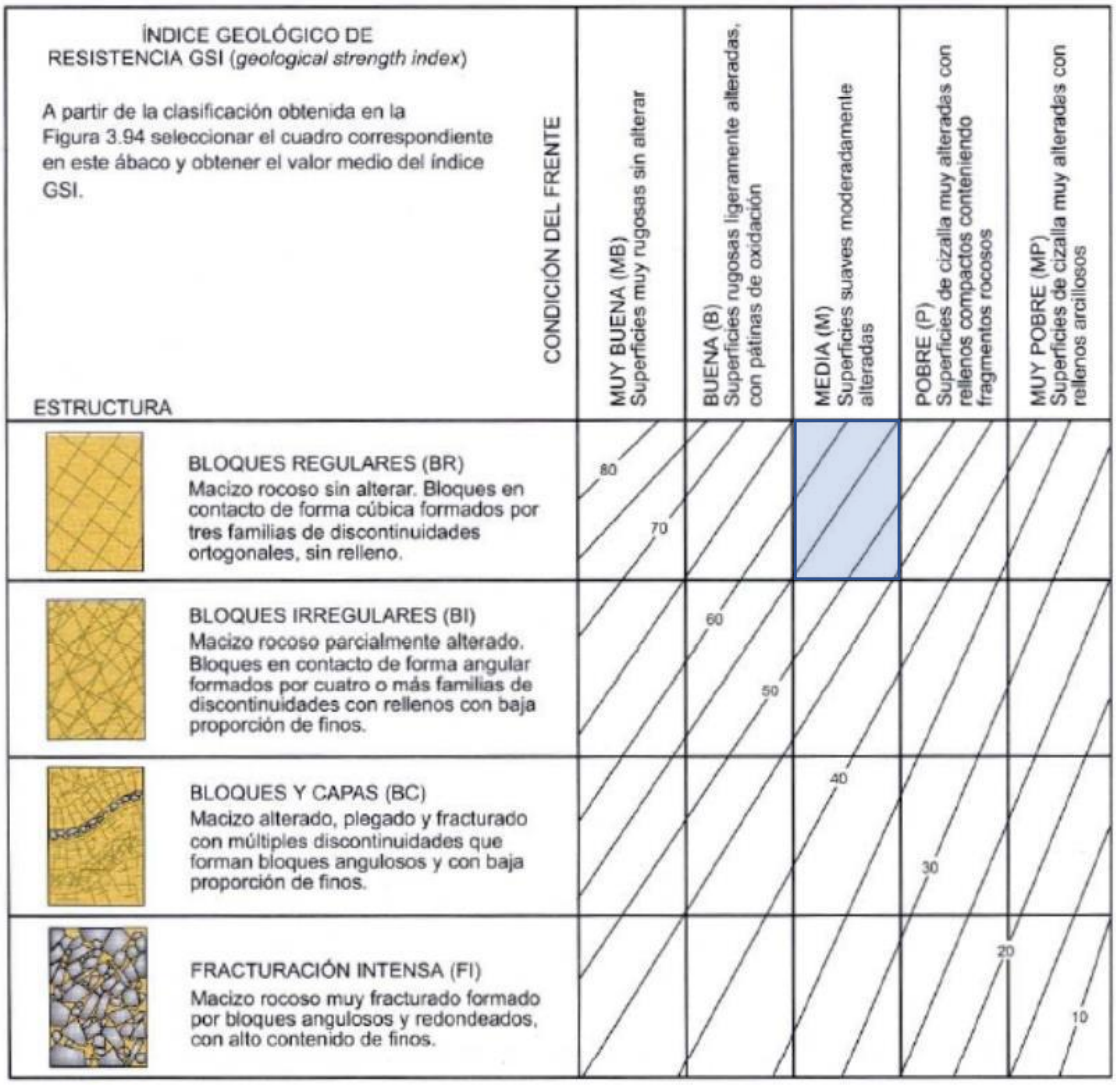
Roca fluyente, flujo plástico de roca incompetente bajo la influencia de altas presiones litostática

S.R.F.	Descripción
5 – 10	Presión de flujo suave
10 – 20	Presión de flujo intensa
5 – 10	Presión expansiva suave
10 – 15	Presión expansiva intensa

CLASIFICACIÓN	Valor de Q	Tipo de roca	
	10^{-3} - 10^{-2}	Excepcionalmente mala	
	10^{-2} - 10^{-1}	Extremadamente mala	
	10^{-1} – 1	Muy mala	x
	1 – 4	Mala	
	4 – 10	Media	
	10 – 40	Buena	
	40 – 100	Muy buena	
	100 – 400	Extremadamente buena	
	400 - 1000	Excepcionalmente buena	

Calidad del macizo rocoso GSI

CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO PARA ESTIMAR SU RESISTENCIA Basándose en el aspecto de la roca elegir la categoría que mejor describa las condiciones del macizo previo a la excavación. Tener en cuenta que las voladuras pueden crear una impresión falsa sobre la calidad del macizo rocoso, en cuyo caso será necesario realizar algún tipo de ajuste por daños debidos a voladuras; la observación de testigos de sondeos y de frentes de roca en zonas afectadas y no afectadas por voladuras puede ser de ayuda. Para la definición del grado de fracturación (*blockiness*) debe considerarse la relación entre el tamaño del bloque y la dimensión del frente de excavación. ESTRUCTURA		CONDICIÓN DEL FRENTE MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con pátinas de oxidación	MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas	POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos	MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos
	BLOQUES REGULARES (BR) Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno.	BR/MB	BR/B	BR/M	BR/P	BR/MP
	BLOQUES IRREGULARES (BI) Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos.	BI/MB	BI/B	BI/M	BI/P	BI/MP
	BLOQUES Y CAPAS (BC) Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos.	BC/MB	BC/B	BC/M	BC/P	BC/MP
	FRACTURACIÓN INTENSA (FI) Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos.	FI/MB	FI/B	FI/M	FI/P	FI/MP



CLASIFICACIÓN	Condición del frente	Estructura	GSI
	Media (M) Superficies suaves moderadamente alteradas	Bloques rectangulares (BR)	55

Calidad del macizo rocoso SMR

TIPO DE ROTURA			MUY FAVORABLE	FAVORABLE	NORMAL	DESFAVORABLE	MUY DESFAVORABLE
P	A	$\lvert\alpha_j-\alpha_s\rvert$	>30°	30-20°	20-10°	10-5°	<5°
T	A	$\lvert\alpha_j-\alpha_s-180\rvert$					
W	A	$\lvert\alpha_i-\alpha_s\rvert$					
P/T/W		**F_1**	**0.15**	**0.40**	**0.70**	**0.85**	**1.00**
P/W	B	$\lvert\beta_j\rvert$ ó $\lvert\beta_i\rvert$	<20°	20-30°	30-35°	35-45°	>45°
P/W		**F_2**	**0.15**	**0.40**	**0.70**	**0.85**	**1.00**
T			**1.00**				
P	C	$\beta_j-\beta_s$	>10°	10-0°	0°	0-(-10°)	<(-10°)
W	C	$\beta_i-\beta_s$					
T	C	$\beta_j+\beta_s$	<110°	110-120°	>120°	-	-
P/T/W		**F_3**	**0**	**-6**	**-25**	**-50**	**-60**

MÉTODO DE EXCAVACIÓN (F_4)			
Talud natural	+15	Voladura normal o excavación mecánica	0
Precorte	+10	Voladura deficiente	-8
Voladura suave	+8		

P: rotura plana; T: rotura por vuelco; W: rotura en cuña.

Clases de estabilidad

Clase	V	IV	III	II	I
SMR	0 – 20	21 – 40	41 – 40	61 – 80	81 – 100
Descripción	Muy mala	Mala	Normal	Buena	Muy buena
Estabilidad	Totalmente inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Totalmente estable
Roturas	Grandes roturas por planos continuos o por masa	Juntas o grandes cuñas	Algunas juntas o muchas cuñas	Algunos bloques	Ninguna
Tratamiento	Reexcavación	Corrección	Sistemático	Ocasional	Ninguno

P: rotura plana; T: rotura por vuelco; α_s: dirección del talud; α_j: dirección de las juntas; β_s: buzamiento del talud; β_j: buzamiento de las juntas

CLASIFICACIÓN	$SMR = RMR_{básico} + (F_1 * F_2 * F_3) + F_4$	SMR
F_0	SMR = 76 + (0,15*1*(-50))-8	60,50: Calidad Normal (parcialmente estable)
F_1	SMR = 76 + (0,15*1*(-60))-8	59,00: Calidad Normal (parcialmente estable)
F_2	SMR = 76 + (0,15*1*(-60))-8	59,00: Calidad Normal (parcialmente estable)

Estación geomecánica 3 (A3)

Información general

DATOS PRINCIPALES

ID	A3
Responsable	C.H.M.
Fecha	07/06/2021
Hora	13:29 h
Cond. Meteo.	Soleado
Proyecto	TFM

LOCALIZACIÓN

Denominación		A3
UTM	**X**	688127,3
	Y	4774822,4
Cota		588,8 m
Datum		ETRS89
Huso		29
Hoja MTN50		75 (10-6) GEDREZ

FRENTE ROCOSO

Tipología	Areniscas ordovícicas
Orientación	N62E
Anchura	15 m
Pendiente	85° - 90° S
Altura	>10 m
Signos inestabilidad	Caída de cuñas centimétricas

SUSTRATO

Unidad	Serie de los Cabos
Edad	Ordovícico inferior

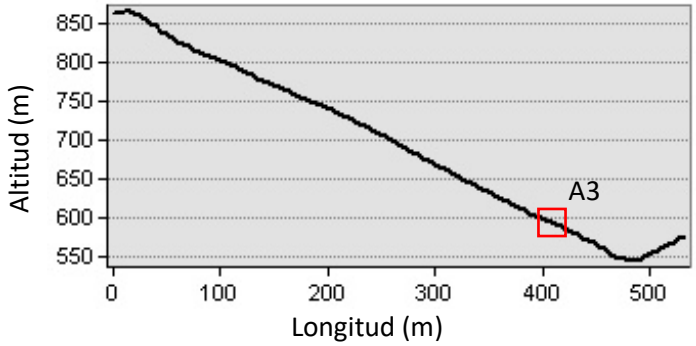
IMÁGENES

Panorámica general 360º	Sí
Fotografía convencional	Sí
Adquisición para MDA	Sí

RECUBRIMIENTO

No hay

PERFIL DE LA LADERA



FOTOGRAFÍA

Datos sobre la roca matriz

ALTERACIÓN	Tipo	Fresca	
		Decolorada	x
		Desintegrada	
		Descompuesta	
	Grado de meteorización (ISRM)		II
	Meteorización física		Por dilatación, termofracción o gelifracción
	Meteorización química		No
	Coloración		Grisácea

RESISTENCIA MECÁNICA: ÍNDICES DE CAMPO		**ROCA**	
	Extremadamente blanda	0,25 - 1	
	Muy blanda	1-5	
	Blanda	5-25	
	Moderadamente dura	25-50	
	Dura	50-100	
	Muy dura	100-250	X
	Extremadamente dura	> 250	

RESISTENCIA MECÁNICA: ESCLERÓMETRO	Tipo de martillo	Tipo L														
	Posición de golpeo	Perpendicular														
	Y (kN/m^3)	25														
	Normativa	UNE-EN 12504-2														
	Rebote (R)	23	23	27	20	25	27	27	26	26	27	24	27	25	25	27
		24	20	20	20	22	22	21	28	20	27	28	21	20	21	20
		R										σ_{ci} (MPa)				
	Máximo	28										44				
	Mínimo	20										29				
	Promedio	23.8										33				
	Mediana	24										32				
	Moda	27										41				

Calidad del macizo rocoso RMR_{89}

ASIGNACIÓN DE VALORES

	Parámetros	Rangos de valores
1	σ_{ci} (MPa)	250 - 100
	valoración	14 - 13
2	RQD (%)	50 - 25
	valoración	8
3	Espaciado	20 - 6
	valoración	8
4	Estado de las discontinuidades	Ligeramente rugosas, separación < 1 mm y paredes muy alteradas
	valoración	20
4.1.	Longitud	> 20
	valoración	0
4.2.	Abertura	< 0,1 - 1 mm
	valoración	5 - 4
4.3.	Rugosidad	Ligeramente rugosa - Suave
	valoración	2
4.4.	Relleno	Ninguno
	valoración	6
4.5.	Alteración	Moderadamente alterado
	valoración	3
5	Agua en juntas	Seco - Algo húmedo
	valoración	15 - 10

ORIENTACIÓN DISCONTINUIDADES

	Dirección perpendicular a la carretera				Dirección paralela a la carretera		Buzamiento 0-20° en cualquier dirección
	Excavación a favor		Excavación en contra				
Buzamiento	45-90°	20-45°	45-90°	20-45°	45-90°	20-45°	
Orientación	Muy favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy desfavorable	Media	
				x			

CORRELACIÓN DE ORIENTACIONES

Dirección y buzamiento	Muy favorable	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Taludes	0	-5	-25	-50	-60
			x		

	RMR básico	Rango de puntuación	Clase de macizo	Descripción	Ángulo de rozamiento	Cohesión (kPa)	
CLASIFICACIÓN		≥ 80	I	Muy bueno	> 45 º	> 400	
	78	80-61	II	Bueno	45-35	400-300	x
		60-41	III	Medio	35-25	300-200	
		40-21	IV	Malo	25-15	200-100	
		≤ 20	V	Muy malo	< 15	< 100	

Fracturación del macizo rocoso

FRACTURACIÓN DEL MACIZO	Tamaño bloque		Bloques pequeños
	Jv (discont./m^3)		10 – 30
	Forma bloques	Tabular	Bloques con una dimensión menor que las otras dos
	Calidad		Mala
	RQD (%)		25-50
	Número de familias		3 familias de discontinuidades más otras ocasionales

Calidad del macizo rocoso RQD (%)

PARÁMETROS	Jv (discontinuidades/m^3)	23
	RQD = 110 - 2.5 * Jv	RQD = 110 - 2.5 * 23 = 52,5 %

	RQD (%)	**Calidad**	
CLASIFICACIÓN	< 25	Muy mala	
	25 – 50	Mala	
	50 – 75	Aceptable	x
	75 – 90	Buenas	
	90 – 100	Muy buena	

Calidad del macizo rocoso Índice Q

FÓRMULA	$Q = \frac{RQD}{Jn} * \frac{Jr}{Ja} * \frac{Jw}{SRF}$ $\quad Q = \frac{52,5}{12} * \frac{1,5}{2} * \frac{1}{7,5} = 0,44$

CÁLCULO DE Jn

Parámetro	Descripción	
0,5 – 1	Roca masiva	
2	Una familia de diaclasas	
3	Una familia de diaclasas y algunas diaclasas ocasionales	
4	Dos familias de diaclasas	
6	Dos familias de diaclasas y algunas diaclasas ocasionales	
9	Tres familias de diaclasas	
12	Tres familias de diaclasas y algunas diaclasas ocasionales	x
15	Cuatro o más familias de diaclasas, roca muy fracturada	
20	Roca triturada	

CÁLCULO DE Jr

Contacto entre las dos caras de las diaclasas con poco desplazamiento lateral (< 10 cm)

Parámetro	Descripción	
4	Juntas discontinuas	
3	Juntas rugosas o irregular ondulada	
2	Suave ondulada	
1,5	Espejo de falla, ondulada	
1,5	Rugosa o irregular, plana	x
1	Suave plana	
0,5	Espejo de falla, plana	

No existe contacto entre las dos caras de las diaclasas cuando ambas se desplazan lateralmente

1	Zona de contenido de minerales arcillosos, suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las caras de las diaclasas
1	Arenas, gravas o zona fallada suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las dos caras de las diaclasas

CÁLCULO DE Jw

Parámetro	Descripción	Presión del agua (kg/cm^2)	
1	Excavaciones secas o de influencia poco importante	< 1	x
0,66	Fluencia o presión medias. Ocasional lavado de los rellenos de las diaclasas	1 – 2,5	
0,33	Fluencia grande o presión alta, considerable lavado de los rellenos de las diaclasas	2,5 – 10	
0,1 – 0,2	Fluencia o presión de agua excepcionalmente altas, decayendo con el tiempo	> 10	
0,05 – 0,01	Fluencia o presión de aguas excepcionalmente altas y continuas, sin disminución	> 10	

CÁLCULO DE Ja

	Ja	Φ°	Descripción	
Contacto entre las dos caras de las diaclasas	0,75	25 – 30	Junta sellada, dura, sin reblandecimiento impermeable como por ejemplo cuarzo en paredes	
	1	25 – 30	Caras de la junta únicamente manchadas	
	2	25 – 30	Las caras de la junta están alteradas ligeramente y contienen minerales no blandos partículas de arena, roca desintegrada libre de arcilla	x
	3	20 – 25	Recubrimiento de limo o arena arcillosa, pequeña fricción arcillosa no reblandecible	
	4	8 – 16	Recubrimiento de minerales arcillosos blandos o de baja fricción como caolinita, clorita, talco, yeso, grafito y pequeñas cantidades de arcillas expansivas	
Contacto entre dos caras de la diaclasa con menos de 10 cm de desplazamiento lateral	4	25 – 30	Partículas de arena, con roca desintegrada libre de arcilla	
	6	16 – 24	Fuertemente sobreconsolidados rellenos de minerales arcillosos no blandos. Los recubrimientos son continuos de menos de 5 mm de espesor	
	8	12 – 16	Sobreconsolidación media a baja, blandos, rellenos de minerales arcillosos. Los recubrimientos son continuos de menos de 5 mm de espesor	
	8 – 12	6 – 12	Rellenos de arcilla expansiva, de espesor continuo de 5 mm. El valor Ja dependerá del porcentaje de partículas de tamaño de la arcilla expansiva	
No existe contacto entre las dos caras de la diaclasa cuando está cizallada	6-8-12	6 – 24	Zonas o bandas de roca desintegrada o manchada y arcilla	
	5	6 – 24	Zonas blandas de arcilla limosa o arenosa con pequeña fricción de arcilla no blandas	
	13 - 20	6 – 24	Granos arcillosos gruesos	

CÁLCULO DE S.R.F.

Zona débil que interceptan la excavación y pueden causar caídas de bloques

S.R.F.	Descripción	
10	Varias zonas débiles conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, roca muy suelta alrededor	
5	Sólo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (prof. Excavación < 50 m)	
2,5	Sólo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (prof. Excavación > 50 m)	
7,5	Varias zonas de fractura en roca competente libre de arcilla, roca suelta alrededor (cualquier profundidad)	x
5	Sólo una zona fracturada en roca competente libre de arcilla (prof. Excavación < 50 m)	
2,5	Sólo una zona fracturada en roca competente libre de arcilla (prof. Excavación > 50 m)	
5	Diaclasas abiertas sueltas, muy fracturadas. Cualquier profundidad.	

Rocas competentes con problemas tensionales en las rocas

S.R.F.	σ_c/σ_1	σ_t/σ_1	Descripción
2,5	> 200	> 13	Tensiones pequeñas cerca de la superficie
1,0	200 -10	13-0,33	Tensiones medias
0,5-2,0	10 – 5	0,66-0,33	Tensiones altas estructura muy compacta, favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad
5 – 10	5 – 2,5	0,33-0,16	Explosión de roca suave (roca masiva)
10 - 20	< 2,5	<0,16	Explosión de roca fuerte (roca masiva)

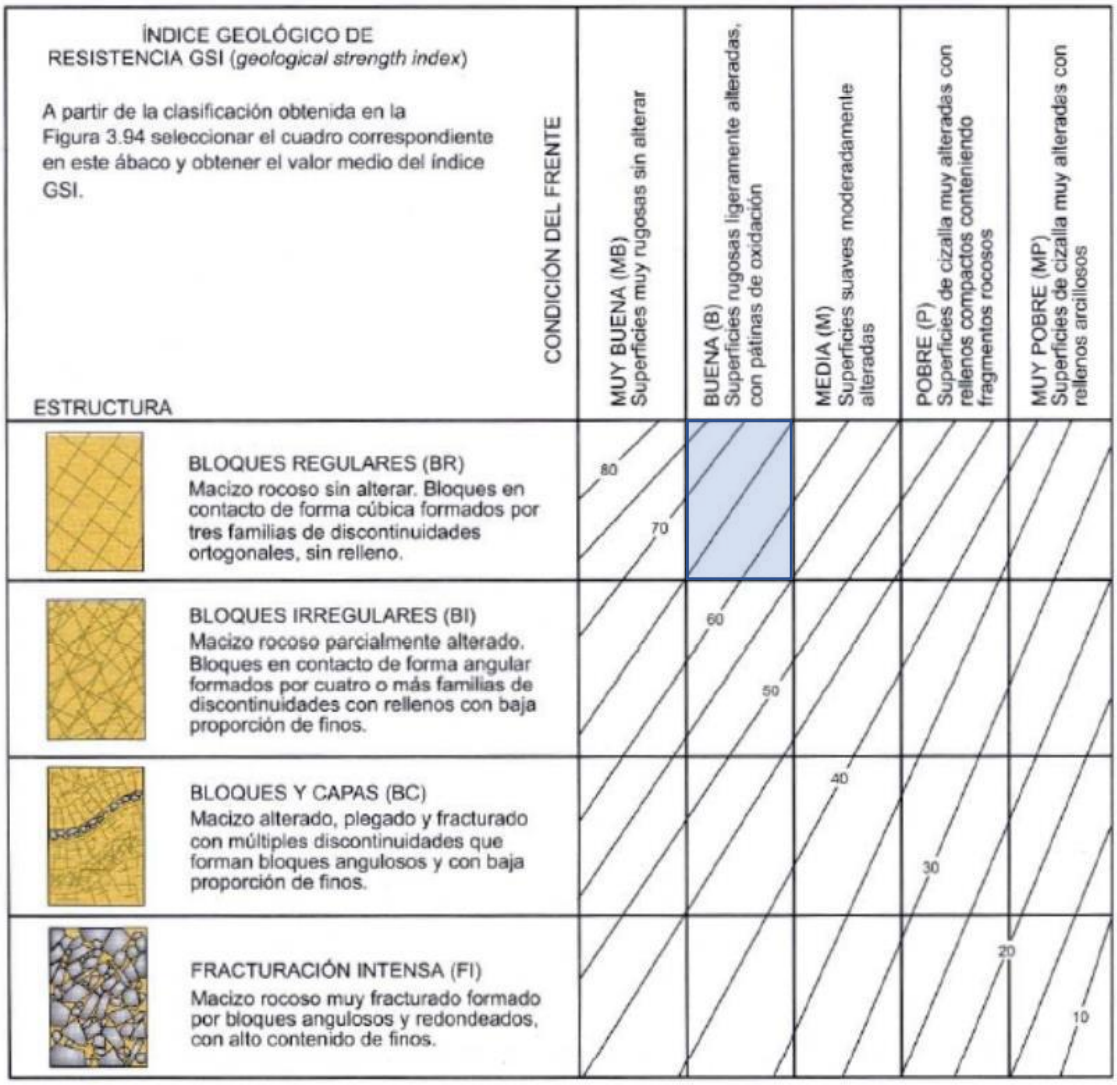
Roca fluyente, flujo plástico de roca incompetente bajo la influencia de altas presiones litostática

S.R.F.	Descripción
5 – 10	Presión de flujo suave
10 – 20	Presión de flujo intensa
5 – 10	Presión expansiva suave
10 – 15	Presión expansiva intensa

CLASIFICACIÓN	Valor de Q	Tipo de roca	
	10^{-3} - 10^{-2}	Excepcionalmente mala	
	10^{-2} - 10^{-1}	Extremadamente mala	
	10^{-1} – 1	Muy mala	x
	1 – 4	Mala	
	4 – 10	Media	
	10 – 40	Buena	
	40 – 100	Muy buena	
	100 – 400	Extremadamente buena	
	400 - 1000	Excepcionalmente buena	

Calidad del macizo rocoso GSI

CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO PARA ESTIMAR SU RESISTENCIA Basándose en el aspecto de la roca elegir la categoría que mejor describa las condiciones del macizo previo a la excavación. Tener en cuenta que las voladuras pueden crear una impresión falsa sobre la calidad del macizo rocoso, en cuyo caso será necesario realizar algún tipo de ajuste por daños debidos a voladuras; la observación de testigos de sondeos y de frentes de roca en zonas afectadas y no afectadas por voladuras puede ser de ayuda. Para la definición del grado de fracturación (*blockiness*) debe considerarse la relación entre el tamaño del bloque y la dimensión del frente de excavación. ESTRUCTURA		CONDICIÓN DEL FRENTE MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con pátinas de oxidación	MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas	POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos	MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos
	BLOQUES REGULARES (BR) Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno.	BR/MB	BR/B	BR/M	BR/P	BR/MP
	BLOQUES IRREGULARES (BI) Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos.	BI/MB	BI/B	BI/M	BI/P	BI/MP
	BLOQUES Y CAPAS (BC) Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos.	BC/MB	BC/B	BC/M	BC/P	BC/MP
	FRACTURACIÓN INTENSA (FI) Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos.	FI/MB	FI/B	FI/M	FI/P	FI/MP



CLASIFICACIÓN	Condición del frente	Estructura	GSI
	Buena (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con patinas de oxidación	Bloques rectangulares (BR)	65

Calidad del macizo rocoso SMR

TIPO DE ROTURA			MUY FAVORABLE	FAVORABLE	NORMAL	DESFAVORABLE	MUY DESFAVORABLE
P	A	$\lvert\alpha_j-\alpha_s\rvert$	>30°	30-20°	20-10°	10-5°	<5°
T	A	$\lvert\alpha_j-\alpha_s-180\rvert$					
W	A	$\lvert\alpha_r-\alpha_s\rvert$					
P/T/W		**F_1**	**0.15**	**0.40**	**0.70**	**0.85**	**1.00**
P/W	B	$\lvert\beta_j\rvert$ ó $\lvert\beta_r\rvert$	<20°	20-30°	30-35°	35-45°	>45°
P/W		**F_2**	**0.15**	**0.40**	**0.70**	**0.85**	**1.00**
T			**1.00**				
P	C	$\beta_j-\beta_s$	>10°	10-0°	0°	0-(-10°)	<(-10°)
W	C	$\beta_r-\beta_s$					
T	C	$\beta_j+\beta_s$	<110°	110-120°	>120°	-	-
P/T/W		**F_3**	**0**	**-6**	**-25**	**-50**	**-60**

MÉTODO DE EXCAVACIÓN (F_4)			
Talud natural	+15	Voladura normal o excavación mecánica	0
Precorte	+10	Voladura deficiente	-8
Voladura suave	+8		

P: rotura plana; T: rotura por vuelco; W: rotura en cuña.

Clases de estabilidad

Clase	V	IV	III	II	I
SMR	0 – 20	21 – 40	41 – 40	61 – 80	81 – 100
Descripción	Muy mala	Mala	Normal	Buena	Muy buena
Estabilidad	Totalmente inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Totalmente estable
Roturas	Grandes roturas por planos continuos o por masa	Juntas o grandes cuñas	Algunas juntas o muchas cuñas	Algunos bloques	Ninguna
Tratamiento	Reexcavación	Corrección	Sistemático	Ocasional	Ninguno

P: rotura plana; T: rotura por vuelco; α_s: dirección del talud; α_j: dirección de las juntas; β_s: buzamiento del talud; β_j: buzamiento de las juntas

CLASIFICACIÓN	$SMR = RMR_{básico} + (F_1 * F_2 * F_3) + F_4$	SMR
F_0	SMR = 62 + (0,15*1*(-25))-8	69,10: Calidad buena (estable)
F_1	SMR = 62 + (0,15*1*(-6))-8	61,00: Calidad buena (estable)
F_2	SMR = 62 + (0,15*1*(-60))-8	69,30: Calidad buena (estable)

ANEXO II.- DATOS DE DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO / BUZAMIENTO DE DISCONTINUIDADES MEDIDAS SOBRE LOS MODELOS DIGITALES DE AFLORAMIENTO

Planos A1

Buzamiento	Dirección
27	280
30	280
29	276
26	278
27	273
31	278
26	282
28	284
30	281
35	284
33	273
49	238
51	235
51	236
52	236
53	238
47	236
51	235
48	241
51	230
49	233
57	255
46	238
47	242
51	237
54	260
56	231
49	230
48	232
50	233
50	235
59	251
50	232
41	272
48	261
39	265
37	271
49	250
48	230
58	243
51	243
47	236
49	239
48	238
48	244
53	248
60	236
50	241
50	241
49	249
47	252
41	226
46	226
55	249
62	250
57	247
36	259
43	238
50	235
50	239
48	237
55	233
52	251
51	238
50	245
56	231
52	232
50	230
51	232
51	234
51	233
30	283
56	227
55	232
54	227
57	229
57	249
50	243
47	257
64	247
46	243
46	265
60	256
47	235
40	223
54	109
69	107
70	101
53	110
62	117
82	106
70	223
58	232
62	233
73	213
74	219
73	193
46	230
41	236
49	238
55	225
50	227
55	276
42	283
37	268
52	236
65	216
60	214
36	280
31	285
36	286
37	284
30	287
31	284
28	281
31	281
29	284
40	245
36	279
34	291
35	291
35	294
41	295
38	297
47	296
46	282
52	299
42	306
41	305
45	254
48	277
52	275
58	236
56	226

42	291
45	292
58	230
55	245
41	288
43	280
57	256
47	283
57	242
70	235
61	252
44	295
40	306
59	259
57	250
70	235
56	245
41	286
56	301
50	261
49	274
43	281
38	295
38	270
37	292
38	285
43	299
35	293
50	308
36	289
44	292
45	282
53	291
56	241
55	244
66	241
56	237
53	244
59	246
51	249
70	235
56	239
57	239
63	244
51	265
49	265

56	267
52	235
60	279
53	289
71	236
37	248
61	254
38	281
48	275
59	237
62	240
63	235
60	240
59	241
58	243
68	271
70	268
53	285
67	233
52	249
56	242
57	247
56	255
56	277
53	248
44	290
47	272
51	285
41	309
35	292
43	251
57	257
44	295
44	283
41	297
51	285
39	282
42	297
39	296
44	288
41	283
35	298
40	294
37	282
40	297
48	294

41	277
34	279
43	254
36	289
30	271
36	281
47	291
33	299
30	275
35	279
47	259
39	286
42	269
51	260
68	251
73	262
49	281
39	287
37	296
39	297
32	277
40	270
52	254
32	289
31	295
47	249
46	291
51	240
55	244
45	289
50	299
53	261
49	264
45	285
45	255
71	249
69	265
61	251
56	235
54	240
60	235
65	248
51	235
53	242
48	236
38	310

39	301
44	306
51	272
46	230
61	290
61	290
51	296
47	313
43	244
71	242
52	273
59	263
63	284
54	229
50	276
49	240
54	236
48	298
51	306
51	311
53	236
44	235
51	289
47	292
58	268
58	239
55	242
58	235
38	266
64	231
51	234
55	238
46	275
50	301
48	298
57	251
54	233
44	250
54	244
63	270
56	247
45	290
47	285
46	284
66	243
61	236

50	235
48	238
71	260
61	270
69	256
59	274
57	267
49	232
48	235
46	228
44	240
48	255
49	232
48	235
54	239
55	262
49	237
53	241
59	248
52	229
52	229
50	228
53	234
50	231
51	232
53	239
69	220
55	236
53	226
53	233
62	245
49	247
52	239
53	235
54	263
40	303
55	251
44	297
47	318
46	309
52	241
47	289
50	300
52	316
38	294
55	228

56	231
62	230
39	273
48	278
43	280
62	251
52	253
54	242
50	236
62	241
56	248
50	237
49	253
70	254
61	251
43	308
40	317
56	233
50	232
41	293
41	308
43	301
39	295
42	300
56	268
45	248
58	305
57	227
52	222
49	227
34	300
39	289
56	245
46	235
49	222
54	239
62	234
66	288
63	290
68	307
70	301
75	305
76	299
65	279
61	288
60	290

67	288
67	288
58	297
60	291
65	282
65	281
51	284
46	265
41	221
55	237
51	235
50	225
56	232
63	285
64	287
39	292
44	286
48	311
44	285
64	259
50	290
46	274
35	307
41	298
42	294
47	290
47	290
63	292
44	284
57	280
49	273
47	292
50	268
54	279
55	262
47	243
59	234
58	223
63	226
67	223
55	271
63	280
61	207
57	263
37	294
39	258

55	285
45	284
46	286
45	294
46	282
33	247
57	249
63	253
57	252
42	244
49	247
45	248
47	283
52	282
56	306
60	282
40	256
32	269
65	249
47	270
49	262
59	260
66	275
50	252
53	254
54	252
63	233
64	235
51	243
50	230
61	234
67	241
59	240
71	247
73	215
56	247
54	238
47	292
62	244
72	245
64	255
56	233
54	261
56	249
54	234
43	299

57	202
50	286
38	267
33	289
40	275
48	285
39	272
73	246
49	238
38	252
46	285
46	274
39	265
55	270
39	269
34	284
46	266
50	255
39	261
68	284
59	279
66	291
46	278
59	238
59	233
41	251
37	249
65	255
49	293
51	287
47	289
63	231
58	231
56	235
68	231
51	276
70	236
69	239
69	232
68	233
65	226
57	234
67	238
58	235
60	271
56	266

44	238
33	246
39	268
47	286
78	302
44	301
73	296
69	292
65	298
85	293
88	113
78	300
74	300
80	301
75	301
73	308
83	308
85	299
81	308
76	298
86	285
66	303
78	107
75	108
76	114
88	293
81	301
76	116
81	295
78	449
84	112
86	291
88	292
78	119
88	292
85	284
54	238
57	230
42	304
45	294
53	225
48	229
58	225
75	102
62	112
63	104

58	109
60	107
62	122
77	115
81	100
72	97
61	104
61	96
84	95
70	103
71	446
82	113
56	103
84	238
56	110
62	285
46	117
67	104
78	261
59	118
77	107
57	120
67	248
85	414
68	109
66	95
70	139
50	111
37	449
80	292
79	93
72	442
64	118
70	110
88	96
80	109
70	445
72	108
71	107
84	277
73	97
52	95
83	98
79	91
89	239
74	446

60	115
78	294
86	118
79	94
75	91
72	448
80	436
87	111
73	440
69	101
67	95
53	95
54	97
73	98
66	94
56	448
72	94
71	96
69	96
80	109
80	109
67	91
86	439
61	90
61	90
64	132
76	119
70	449
77	113
69	115
83	109
80	278
74	419
73	431
18	114
68	267
68	289
80	109
62	110
73	114
78	286
69	277
75	260
79	109
76	95
70	282

70	282
64	282
85	113
73	113
73	126
60	426
69	441
58	123
67	103
68	203
77	120
82	440
78	120
75	109
77	278
63	120
83	118
82	115
64	112
89	99
77	284
67	105
63	104
43	98
89	292
80	287
89	129
46	104
88	444
84	92
79	96
67	449
50	98
44	446
74	104
78	316
74	294
83	284
89	136
83	291
58	291
74	298
82	290
58	121
79	100
71	93

89	283
77	113
52	236
84	114
60	104
56	98
51	236
71	102
67	446
80	439
68	102
62	93
71	111
57	111
65	94
66	100
81	98
79	95
89	439
73	265
85	289
83	98
83	253
62	441
78	443
66	100
61	118
72	119
89	101
76	263
62	117
71	115
74	109
58	98
73	117
40	106
77	113
62	109
61	115
75	107
80	106
78	115
57	120
68	100
79	97
65	97

86	442
61	105
62	96
72	259
69	91
64	101
59	109
54	92
55	117
57	111
66	294
80	102
63	113
88	120
62	97
70	446
87	291
81	102
54	110
74	91
67	109
82	109
62	101
54	108
59	109
53	112
55	114
87	94
68	138
62	119
88	91
88	279
88	113
50	438
64	94
69	90
62	110
88	242
82	91
84	93
89	268
67	104
45	108
58	436
64	113
71	102

65	95
67	104
84	106
85	297
84	107
73	283
77	115
75	302
81	299
83	116
73	111
89	291
69	113
41	101
58	98
74	92
75	109
62	108
62	110
57	111
89	308
68	312
65	112
57	112
57	111
54	121
59	115
69	112
69	101
51	300
76	100
71	102
75	107
76	115
71	99
77	94
65	444
79	103
67	93
74	442
65	94
88	92
65	437
67	404
73	114
86	97

86	112
85	105
82	107
87	293
89	290
81	112
81	302
69	295
77	97
75	282
75	282
77	295
81	109
79	102
89	443
69	99
87	99
88	103
76	273
88	274
83	285
68	444
52	449
83	112
78	102
82	288
62	109
62	110
67	110
74	448
70	95
55	98
64	112
63	111
72	131
36	96
77	105
63	109
64	119
71	117
71	443
89	110
78	124
87	105
86	91
85	90

79	280
67	279
88	274
64	99
63	96
78	349
54	355
84	339
47	281
56	303
52	298
58	283
59	303
53	297
40	306
37	318
52	285
30	264
40	306
57	307
65	286
74	346
40	319
46	315
44	310
52	318
39	297
43	306
58	270
49	308
42	289
58	295
40	311
43	316
42	317
47	295
45	303
71	351
29	357
64	209
88	359
53	279
38	283
37	304
67	315
67	299

61	287
57	316
54	289
43	300
39	301
48	234
34	294
30	268
40	309
45	317
43	328
47	299
47	306
44	297
33	319
37	308
38	299
70	351
64	341
34	322
44	312
48	310
50	271
79	334
74	334
69	352
76	352
70	358
45	271
40	321
71	356
42	305
53	305
46	297
49	307
44	299
47	279
59	288
78	351
84	355
86	360
50	322
61	310
47	308
46	299
57	295

67	272
76	280
60	270
88	303
54	436
87	287
88	303
89	294
82	104
60	107
63	168
46	317
39	123
52	125
52	114
61	112
67	127
71	139
59	90
65	116
70	112
49	106
70	107
66	112
76	128
88	90
66	93
63	134
65	**103**

Planos A2

Buzamiento	Dirección
55	110
53	114
49	109
45	115
45	102
53	121
57	121
48	115
58	128
40	112
49	119
79	266
56	122
47	45
42	114
82	93
63	251
42	84
28	115
70	254
88	276
71	267
41	109
48	43
44	103
80	264
55	261
59	39
55	269
58	274
53	266
50	259
62	267
74	41
59	46
71	33
60	289
66	80
73	260
66	56
64	257
73	264
60	256
49	121
59	101
50	84
43	129
62	115
59	263
56	111
48	112
54	122
68	260
38	65
68	133
64	270
56	118
75	270
48	114
45	93
44	118
80	93
66	266
60	263
58	262
53	261
60	260
53	276
55	262
68	262
83	269
58	263
68	260
81	255
89	263
72	265
62	268
54	264
62	259
65	260
41	142
74	267
46	121
50	112
51	130
84	93
48	126
39	132
47	100
34	65
67	129
66	132
67	129
52	87
60	90
63	113
61	140
68	133
72	147
70	137
68	129
58	130
49	97
57	98
63	164
82	130
40	115
56	120
55	123
45	84
55	111
59	257
61	258
59	243
62	262
61	267
60	266
60	256
71	270
77	265
75	262
57	261
59	267
48	251
81	270
81	256
80	257
87	94
57	262
56	250
70	275
63	128
61	99
65	87

44	114	81	265	79	134
72	249	61	254	65	99
62	259	67	111	52	117
87	331	72	282	45	80
62	265	88	100	84	95
66	251	83	92	36	59
48	119	30	306	74	274
45	117	65	263	71	148
53	117	73	262	82	131
45	260	76	272	74	287
81	241	86	260	86	92
83	259	72	270	48	263
70	69	88	259	68	269
73	296	64	267	63	268
89	255	57	263	69	269
66	262	58	270	75	150
68	268	75	83	50	113
60	248	60	258	56	250
57	267	61	255	62	257
64	261	58	119	56	277
55	251	77	263	79	259
64	113	68	262	64	264
62	122	48	70	58	254
64	116	74	130	74	253
59	71	68	149	60	272
48	104	65	156	67	269
56	79	59	278	84	93
85	126	54	263	84	274
74	137	54	274	79	97
74	135	65	262	85	279
89	91	56	269	57	263
75	263	85	116	63	258
54	257	68	281	64	265
74	259	66	264	63	270
57	258	74	284	68	252
67	262	59	258	66	261
61	264	50	271	73	276
57	262	52	255	68	257
63	265	73	136	74	256
40	52	84	273	69	263
52	122	53	289	63	270
46	117	75	135	67	270
89	265	89	271	81	268
43	113	35	98	58	263
60	107	38	74	75	266
69	293	47	83	77	90

76	75	72	356	58	63
57	120	76	2	30	84
59	128	73	348	38	68
58	112	81	350	64	241
75	262	49	169	58	45
75	264	78	181	72	43
82	168	64	182	64	79
79	166	76	175	39	74
81	157	64	167	27	72
68	131	53	175	33	80
69	144	88	145	56	113
77	168	64	113	36	97
87	344	77	110	36	88
42	161	75	134	54	84
40	152	88	322	29	111
75	150	54	134	44	108
80	146	61	156	54	107
75	147	76	49	46	119
71	146	73	142	58	88
70	144	71	33	69	106
66	149	69	47	57	118
80	162	64	27	70	258
83	173	65	40	58	59
81	168	75	55	22	85
76	139	75	37	31	77
78	166	57	257	51	131
83	141	75	259	36	113
37	66	51	107	66	132
77	342	47	110	73	98
69	145	47	111	62	100
82	288	46	116	49	114
53	302	49	94	49	119
43	135	47	104	71	116
50	136	53	102	68	313
71	150	50	112	63	115
45	117	26	80	60	106
85	332	67	342	40	45
83	140	78	9	76	137
55	319	40	53	41	67
79	338	39	101	84	73
89	342	26	138	50	104
63	330	69	63	39	101
84	204	25	108	51	66
73	359	32	79	84	122
82	352	41	66	76	129
68	136	20	93	46	261

61	271	54	122	60	128
66	102	65	114	55	17
76	49	49	116	62	269
69	278	56	123	55	78
43	92	87	155	58	263
55	282	81	339	56	289
43	136	86	311	76	290
74	253	72	259	73	270
83	255	56	107	54	125
56	57	48	255	51	71
48	81	78	295	72	326
35	93	89	105	68	35
43	123	75	279	48	41
36	53	86	93	37	238
59	73	53	105	67	267
64	262	50	111	70	260
66	255	52	256	79	259
75	78	53	110	63	257
68	262	61	127	69	266
31	90	62	267	66	266
56	53	82	274	83	137
50	90	39	115	80	313
76	110	55	80	64	262
82	247	49	107	69	259
85	106	79	257	56	261
65	80	50	109	64	259
38	94	52	93	51	99
49	110	85	257	53	114
72	128	50	68	57	106
70	137	52	57	78	277
50	79	42	108	65	117
67	129	57	59	54	121
63	133	45	98	56	117
65	129	44	89	42	111
55	109	74	261	51	106
54	146	83	316	43	129
65	140	68	88	89	119
51	81	88	110	59	106
60	107	83	76	52	113
51	85	49	89	43	103
66	133	83	289	47	111
67	137	81	108	51	131
50	122	26	70	46	277
54	117	51	120	85	107
74	95	37	87	58	277
45	122	61	78	66	254

63	121
59	129
63	123
61	126
61	126
58	121
60	126

Planos A3

Buzamiento	Dirección
72	277
73	271
76	273
74	273
73	274
76	277
74	273
73	266
72	271
77	270
75	271
72	274
75	267
69	268
85	250
72	268
72	271
73	273
81	275
74	271
74	265
75	270
76	251
72	275
73	270
67	272
75	267
72	269
75	272
73	267
72	270
72	268
77	424
69	262
89	425
68	252
89	232
80	241
88	429
85	255
76	265
73	267
77	272
66	272
69	258
65	265
77	267
68	272
72	270
67	267
71	269
74	261
76	272
72	276
72	272
77	270
81	255
81	273
75	269
75	270
71	271
72	272
69	278
73	275
75	272
70	265
84	254
86	432
79	255
84	240
65	262
67	280
70	280
70	276
62	259
71	270
86	292
76	284
88	431
79	278
73	281
69	276
82	245
89	251
84	247
72	258
88	439
77	260
85	268
82	103
78	238
78	247
85	100
64	230
86	260
75	241
70	268
71	272
75	251
81	270
77	269
85	264
80	267
80	241
70	267
79	255
80	244
85	255
81	260
84	240
74	277
74	273
80	260
77	267
85	259
79	269
60	231
74	444
78	263
81	274
81	100
85	92
81	270
87	282
71	252
68	239
78	276
73	274
76	267
84	263
84	245
80	276
89	234
75	267
85	249

85	263	59	255	57	108
71	262	82	243	87	263
86	228	73	228	49	370
76	243	88	432	48	372
86	240	80	261	48	374
88	243	79	263	50	373
55	239	84	430	51	384
85	243	81	276	54	380
88	239	82	269	71	388
72	247	84	257	56	386
84	426	86	276	76	414
57	206	79	246	46	374
89	415	64	228	43	374
81	254	74	272	60	364
87	268	66	235	41	380
83	92	88	427	44	379
78	274	78	233	47	370
69	268	82	224	50	367
72	95	69	230	59	373
72	261	84	241	48	375
80	273	68	270	84	210
71	276	72	268	49	402
81	275	71	275	75	406
78	264	72	277	61	367
77	246	73	277	52	370
86	263	85	264	89	160
84	414	79	261	61	414
79	243	82	253	84	382
79	254	83	264	68	362
89	249	52	243	54	381
75	238	76	259	75	379
73	249	64	239	50	365
83	273	88	418	61	365
70	215	81	237	70	372
76	257	71	264	59	369
89	415	69	280	45	381
84	266	84	254	80	414
84	251	70	272	68	352
88	236	78	256	65	384
86	263	71	270	57	367
80	230	67	269	88	358
77	244	86	426	35	391
84	417	73	256	37	380
83	248	73	242	87	374
58	244	82	255	72	371
85	428	54	93	58	376

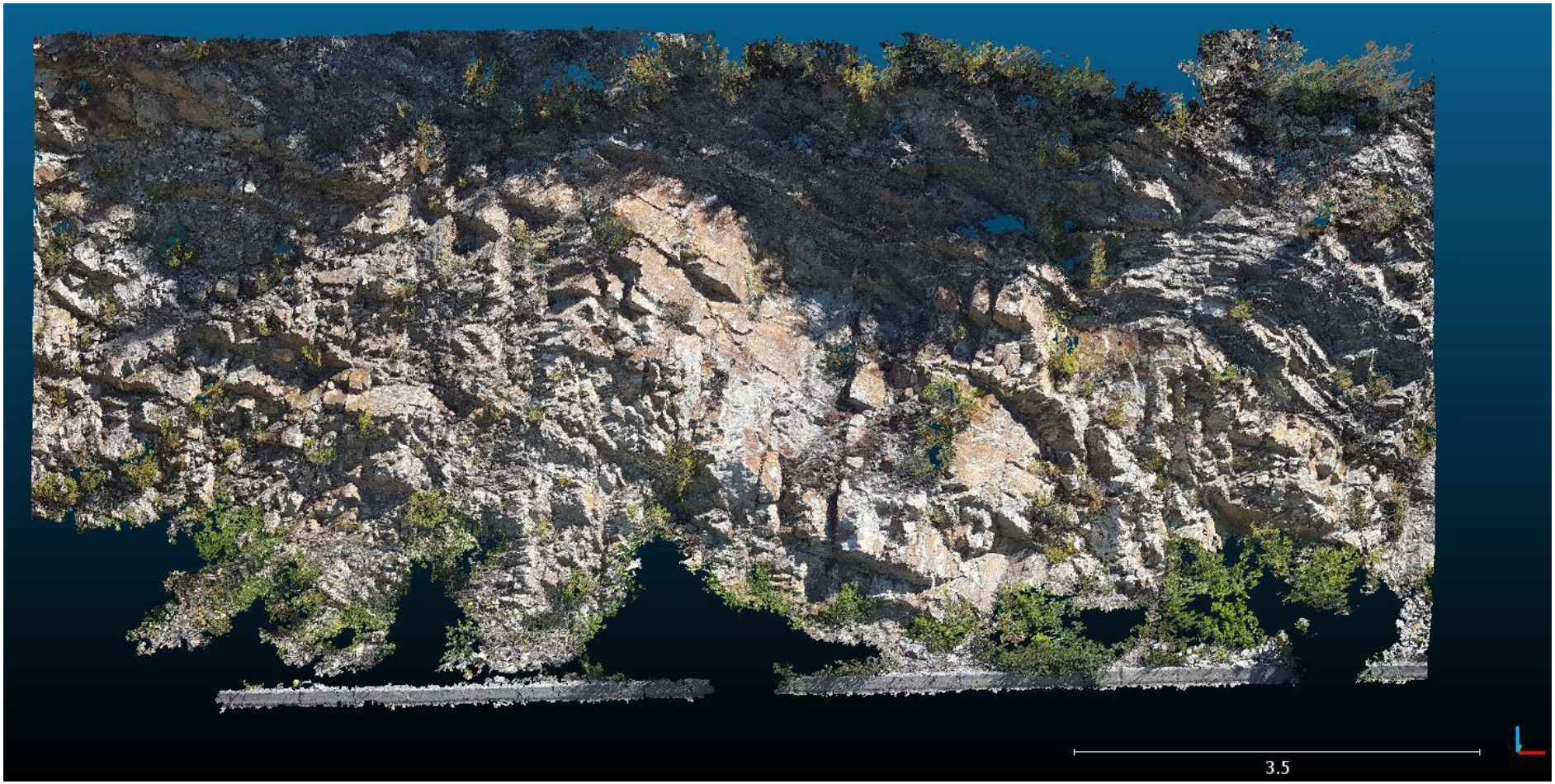
74	226	57	368	82	237
79	225	70	372	86	375
60	373	60	374	71	361
49	380	41	374	48	391
50	374	54	368	51	373
60	370	56	361	60	391
72	376	72	244	66	383
50	363	51	385	74	216
54	360	64	374	59	440
60	366	45	365	58	206
55	366	73	373	74	372
64	374	71	394	63	365
57	367	80	413	55	370
70	368	56	369	56	393
60	375	51	369	82	239
53	381	58	378	67	230
74	370	53	365	60	375
60	364	52	370	64	381
79	360	43	377	56	375
47	376	49	382	60	373
61	403	49	384	82	251
82	195	41	385	48	381
78	236	63	392	88	427
36	222	56	200	56	215
67	396	87	414	61	191
83	379	42	191	64	193
60	369	46	199	60	367
64	402	58	199	87	250
81	225	70	215	87	252
82	224	58	233	88	231
82	250	49	370	63	385
63	367	46	387	73	223
61	396	44	406	70	212
56	355	51	239	85	217
56	381	57	221	61	227
53	367	84	241	83	411
44	376	85	248	89	414
55	374	52	374	49	374
43	365	53	375	32	193
87	423	67	391	36	197
54	218	65	376	67	220
88	243	88	245	59	214
89	235	62	388	47	374
50	218	75	206	43	385
45	366	42	379	89	254
56	371	66	395	86	422

85	429	59	445	71	402
71	182	57	433	40	369
42	194	64	423	57	396
60	382	69	115	65	93
79	363	37	99	60	395
53	210	61	427	68	423
76	218	31	394	60	396
61	380	62	98	61	114
80	386	52	421	54	400
77	238	56	448	59	244
63	213	88	425	44	112
84	214	80	104	48	384
51	225	34	394	68	443
81	262	58	95	62	125
80	242	65	427	44	434
80	241	86	428	84	256
84	242	50	386	22	400
73	269	76	244	47	428
73	271	24	403	54	446
66	270	47	416	77	440
71	272	46	408	88	422
72	276	74	108	63	368
9	368	45	381	59	391
13	404	69	411	59	436
62	440	88	293	87	280
27	389	70	110	78	240
12	418	72	104	82	434
46	364	77	102	73	269
56	361	76	104	82	270
57	373	87	255	84	225
52	436	88	433	78	117
64	376	56	388	68	90
45	92	44	403	70	281
60	435	76	276	73	273
59	119	55	369	68	276
59	117	76	274	17	389
81	131	71	272	70	251
48	118	67	286	83	264
33	412	73	270	55	239
28	119	57	102	66	233
86	428	60	387	83	253
66	92	22	409	76	258
42	414	89	315	89	241
53	434	39	379	60	361
87	240	68	412	87	197
25	435	61	271	81	433

85	248
80	241
82	240
81	242
77	242
77	242
78	242
79	243
79	243
79	242
81	243

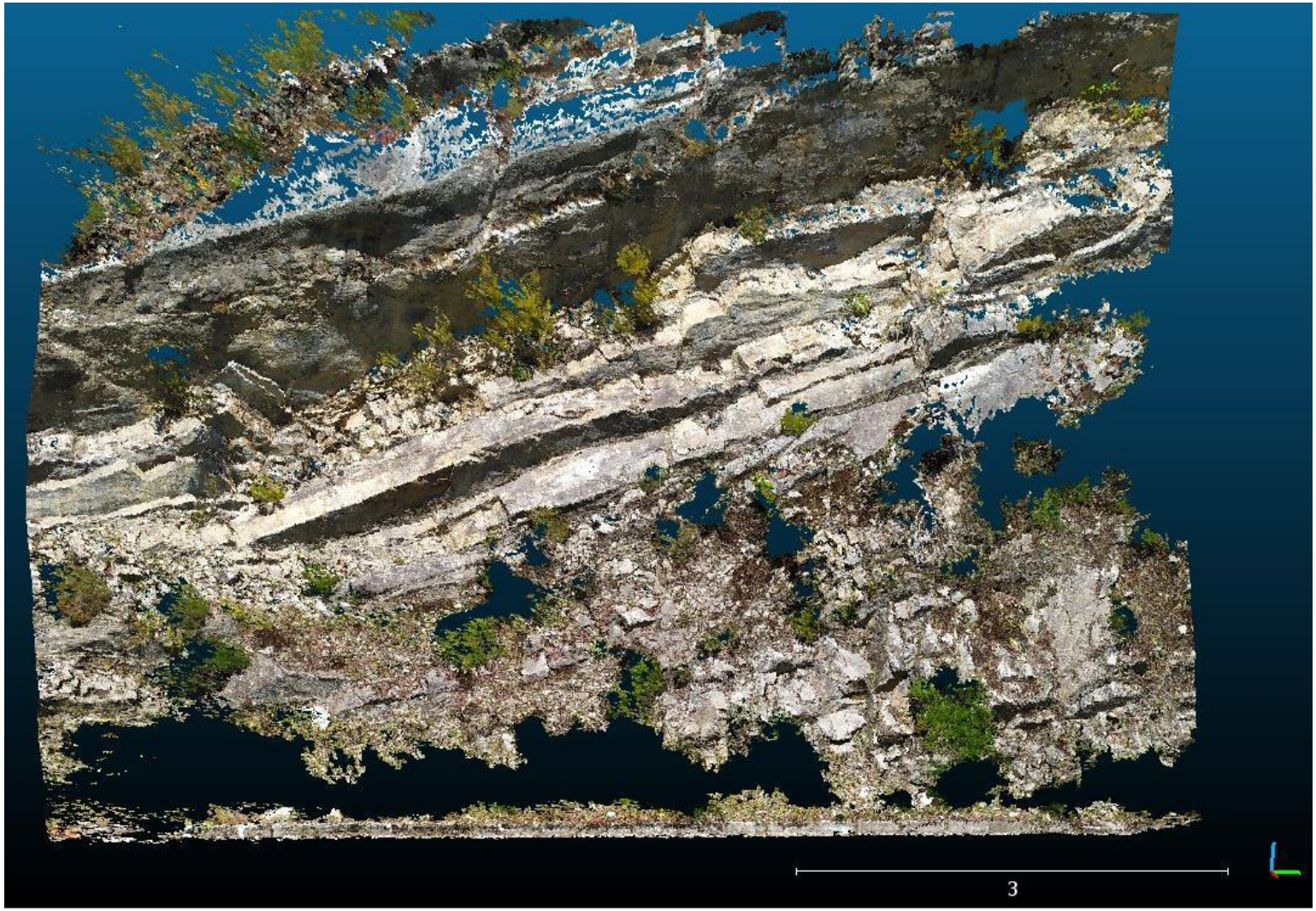
ANEXO III.- MODELOS DIGITALES DE AFLORAMIENTO

Estación geomecánica 1 (A1)



Modelo 1.- MDA del talud A1. Se presenta la escala del afloramiento y la orientación 3D. Modelo obtenido con CloudCompare (v. 2.11.3)

Estación geomecánica 2 (A2)



Modelo 2.- MDA del talud A2. Se presenta la escala del afloramiento y la orientación 3D. Modelo obtenido con CloudCompare (v. 2.11.3)

Estación geomecánica 3 (A3)

Modelo 3.- MDA del talud A3. Se presenta la escala del afloramiento y la orientación 3D. Modelo obtenido con CloudCompare (v. 2.11.3)