

ZUBÍA	13	9-32	Logroño	1995
-------	----	------	---------	------

LA FRACTURACIÓN TERCIARIA EN LA FORMACIÓN DE ARNEDO (CUENCA DEL EBRO, LA RIOJA): CONSECUENCIAS GEOTÉCNICAS*

Antonio M. Casas-Sainz**
 José E. Pitarch-Archelós***
 Teresa Román-Berdiel****

RESUMEN

Se ha analizado desde un punto de vista geotécnico la fracturación de escala mesoestructural (deca a hectométrica) de las areniscas oligocenas de la Formación de Arnedo (Cuenca del Ebro, La Rioja), en un tramo de la nueva variante de la carretera comarcal LR-123 Arnedo-Logroño. Del análisis de la orientación de los planos de falla se han obtenido tres familias de fracturación dominantes, con orientación media N115E, 50 S; N155E, 60 W y N025E, 60 W. La dirección de estas familias de fallas coincide con las de la fracturación hecto a kilométrica determinada a partir del estudio fotogeológico. El tamaño de las fracturas en afloramiento presenta un máximo absoluto en torno a 3-4 metros. La densidad de la fracturación en el sector estudiado es muy alta: el espaciado medio entre fracturas, también a escala de afloramiento, presenta una distribución bimodal con máximos de 20 y 45 cm. El ángulo de fricción de la mayor parte de las fracturas sin relleno arcilloso está comprendido entre 30 y 35°. A partir de la orientación de las fracturas y el ángulo de rozamiento de las mismas se ha determinado la existencia de varios tipos de discontinuidades planares y cuñas potencialmente inestables según la orientación y pendiente de las fallas, que coinciden con los importantes deslizamientos en roca que tuvieron lugar durante la construcción de la nueva carretera. La meteorización y la penetración de agua en las grietas abiertas ha jugado un papel determinante en la inestabilidad de los taludes.

Palabras clave: fracturación, talud, macizos rocosos, análisis de estabilidad, Depresión de Arnedo.

We analyze, from a geotechnical point of view, the mesostructural fracturing in the Oligocene sandstones of the Arnedo Formation (Ebro Basin, La Rioja) along the new road LR-123 (Arnedo-Logroño). From the analysis of fracture orientation we have obtained three sets of

* Recibido el 28 de marzo de 1994. Aprobado el 7 de diciembre de 1994.

El estudio presentado en este artículo ha sido financiado por el proyecto CICYT GEO91-0924.

** Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Zaragoza. 50009 Zaragoza.

*** Alios, S.C. Amanecer, 5. 50005 Zaragoza.

**** Laboratoire de Tectonique. Université de Rennes 1. Beaulieu. Rennes Cedex.

planes: N110E, 55 S; N150E, 60 W and 010, 60 W. The strikes of these three main sets of faults coincide with the orientation of larger scale fracturing obtained by photogeologic analysis. The size of fractures measured in the outcrops show an absolute maximum about 3-4 m. The density of fracturing is very high, with two maxima in 20 and 45 cm. The friction angle of most fractures is comprised between 30 and 35°. From the orientation of fractures and their friction angle we have determined the stability conditions of the massif and the existence of several types of planar and wedge slidings that agree with field observation. Weathering and penetration of water into fractures have been very important factors that control the slopes instability.

Key words: fracturing, slope, rock masses, stability analysis, Arnedo Basin.

0. INTRODUCCIÓN

En los macizos rocosos la estabilidad de los desmontes y taludes naturales está controlada fundamentalmente por las discontinuidades, su disposición dentro del macizo, y las propiedades mecánicas de las mismas. La fracturación de un macizo, debida fundamentalmente a la historia de los esfuerzos sufridos por el mismo, reviste, pues, especial relevancia en relación a la predicción y prevención de problemas de estabilidad tanto en taludes y laderas naturales como en desmontes realizados con motivo de obras lineales. En este sentido la orientación y distribución espacial de la deformación frágil reviste una especial importancia como control fundamental de la estabilidad. La metodología de análisis de discontinuidades en macizos rocosos ha sido expuesta por numerosos autores (fundamentalmente Hoek y Bray, 1977; pueden verse resúmenes de los estudios realizados en Salcedo, 1978; ITGE, 1987; Alonso y Gili, 1989). Todos ellos coinciden en dar una gran importancia a la orientación y distribución espacial de la fracturación como elementos determinantes en el análisis. Además, existen otras variables que condicionan la estabilidad como: la resistencia de la roca; ángulo de rozamiento de las fracturas; rugosidad de las mismas; tamaño y espaciado, y presión de agua en el interior de las grietas.

Entre los años 1986 y 1987 se desarrollaron los trabajos de construcción de la nueva variante de la carretera comarcal 123, entre Arnedo y el Villar de Arnedo (La Rioja), en el tramo que atraviesa el paraje conocido como Alto de las Tres Tetas. Este relieve constituye el umbral geográfico que separa la Hoya de Arnedo del sector riojano de la Depresión del Ebro propiamente dicha. A lo largo del proceso de excavación aparecieron problemas de índole geotécnica relacionados con la fracturación a escala meso y macroestructural (se incluyen aquí fallas cuya dimensión está comprendida entre varios decímetros y varios centenares de metros). Los taludes excavados entonces siguen siendo inestables hoy en día. En el presente trabajo se aborda el análisis geotécnico de estos taludes, con el objetivo de reconocer las causas directas de los deslizamientos producidos, de modo que se puedan aportar datos interesantes tanto para la caracterización geotécnica de la formación rocosa, de cara a obras que se realicen en ella, como para el estudio en general de los desmontes en macizos rocosos.

La metodología utilizada en la elaboración de este estudio combina técnicas puramente geológicas con otras más relacionadas con la mecánica de rocas. Los pasos seguidos han sido: 1) la realización de una cartografía geológica de detalle para determinar la localización de las principales fracturas de escala hectométrica que afectan a los materiales estudiados; 2) el estudio de las fallas a escala de afloramiento, para determinar la orienta-

ción, espaciado, tipo de relleno y condiciones de inestabilidad real debida a las mismas; 3) ensayos para determinar las propiedades geotécnicas (cohesión y ángulo de fricción) tanto de la roca intacta como de los principales tipos de fracturas. Con el conjunto de estos datos se ha realizado un análisis de la estabilidad actual y futura de los taludes existentes, considerando además la posible influencia de la alteración, tanto del material intacto como de las fracturas, debida a aguas meteóricas. Los resultados obtenidos muestran la alta fiabilidad de estudios previos sobre zonas fracturadas, la potencia de los métodos geológicos simples (cartografía, observación de afloramientos y análisis de orientaciones) y su capacidad de predicción en relación a la estabilidad de futuros taludes en obras lineales.

1. SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y GEOLÓGICA

La zona estudiada está situada en el sector riojano de la Cuenca del Ebro, en el límite N de lo que geográficamente constituye la Depresión de Arnedo (Gonzalo Moreno, 1979). Esta forma un sector deprimido de contorno elíptico cuyos ejes presentan unas dimensiones de 12 x 5 km, drenado por el río Cidacos, que discurre de W a E. La Depresión de Arnedo se encuentra limitada hacia el S y hacia el W por el frente norte de las sierras de Cameros (sierras de Yerga, Peña Isasa y Lahez) y hacia el N y el E por los relieves en cuesta que forman los conglomerados y areniscas terciarios. El clima en este sector de la Depresión del Ebro es de tipo mediterráneo continentalizado, con precipitaciones que apenas superan los 400 mm/año.

Desde el punto de vista estructural la Depresión de Arnedo constituye un gran anticlinal de dirección E-W. En su flanco N, que presenta buzamientos comprendidos entre 40 y 70°, se sitúa la zona estudiada (figura 1). Este flanco N presenta algunas complicaciones locales, como son algunas fallas direccionales dextrales, con orientación NNW-SSE, y, dentro del área estudiada (ver figura 2), un sistema de pliegues anticlinal-sinclinal de dirección WNW-ESE, con buzamientos en sus flancos de hasta 30°. Existen también numerosas fallas direccionales y normales de escala hectométrica (Casas Sainz, 1992).

Todos los materiales aflorantes en la Depresión de Arnedo forman parte del Terciario continental de la cuenca del Ebro, con edades que van desde el Eoceno hasta el Mioceno inferior (Muñoz, 1991). Castiella et al. (1975) definen para la Depresión de Arnedo 5 unidades litoestratigráficas que son las Formaciones de Turruncún (conglomerados fundamentalmente), Arnedo (conglomerados y areniscas), Autol (yesos y calizas), Alfaro (arcillas fundamentalmente) y Yerga (conglomerados).

Los materiales que atraviesa la carretera comarcal 123 en el tramo estudiado corresponden a la Fm. de Arnedo (unidad A-2 de Muñoz, 1991 y Muñoz et al., 1987) y son areniscas rojizas de grano medio y grueso, con algunos niveles de cantos. Aparecen bien estratificadas, con numerosas estructuras de bioturbación; la potencia de los estratos varía entre 50 cm y varios metros. Presentan cemento carbonatado, con grado de cementación muy variable. Además de los materiales terciarios, afloran en el sector estudiado varios niveles de sistemas glacia-terrazas cuaternarios. El más alto (correspondiente al nivel Q-3 de la cartografía de la figura 2) se sitúa al N de Arnedo, y forma una banda de dirección aproximada E-W. En la margen derecha del río Cidacos aparecen también extensos glacia correspondientes al nivel Q-2, y por último la parte más baja, incluida dentro de la llanura de inundación y el lecho actual del río se incluyen en los niveles Q-1 y Q-0 respectivamente. El relieve es relativamente accidentado, con un desnivel máximo de 280 m, desde el alto de las Tres Tetas (cota 681) hasta el cauce del río Cidacos (cota 400).

Figura 1: Situación geológica del área de estudio, dentro del contexto del anticlinal de Arnedo

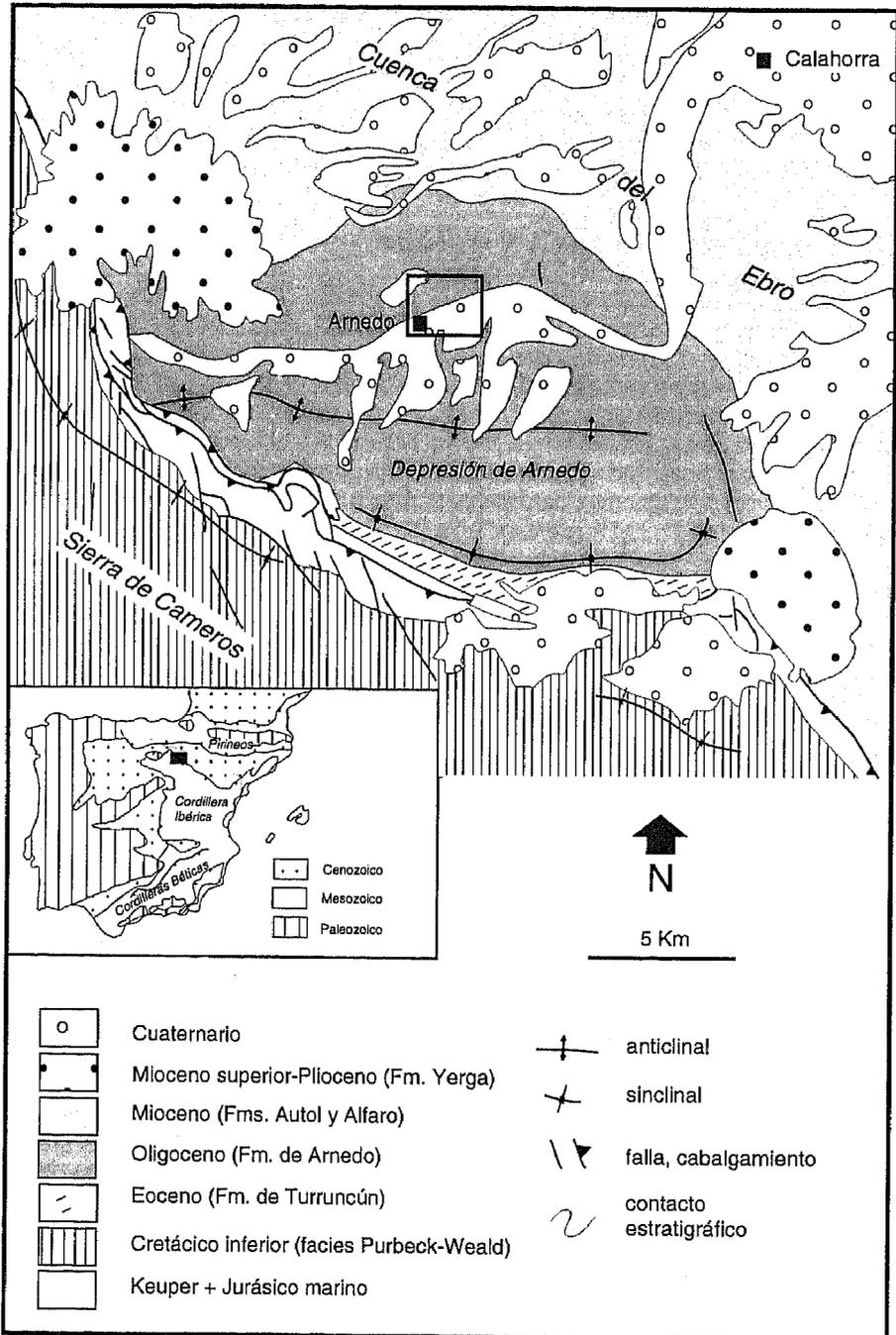
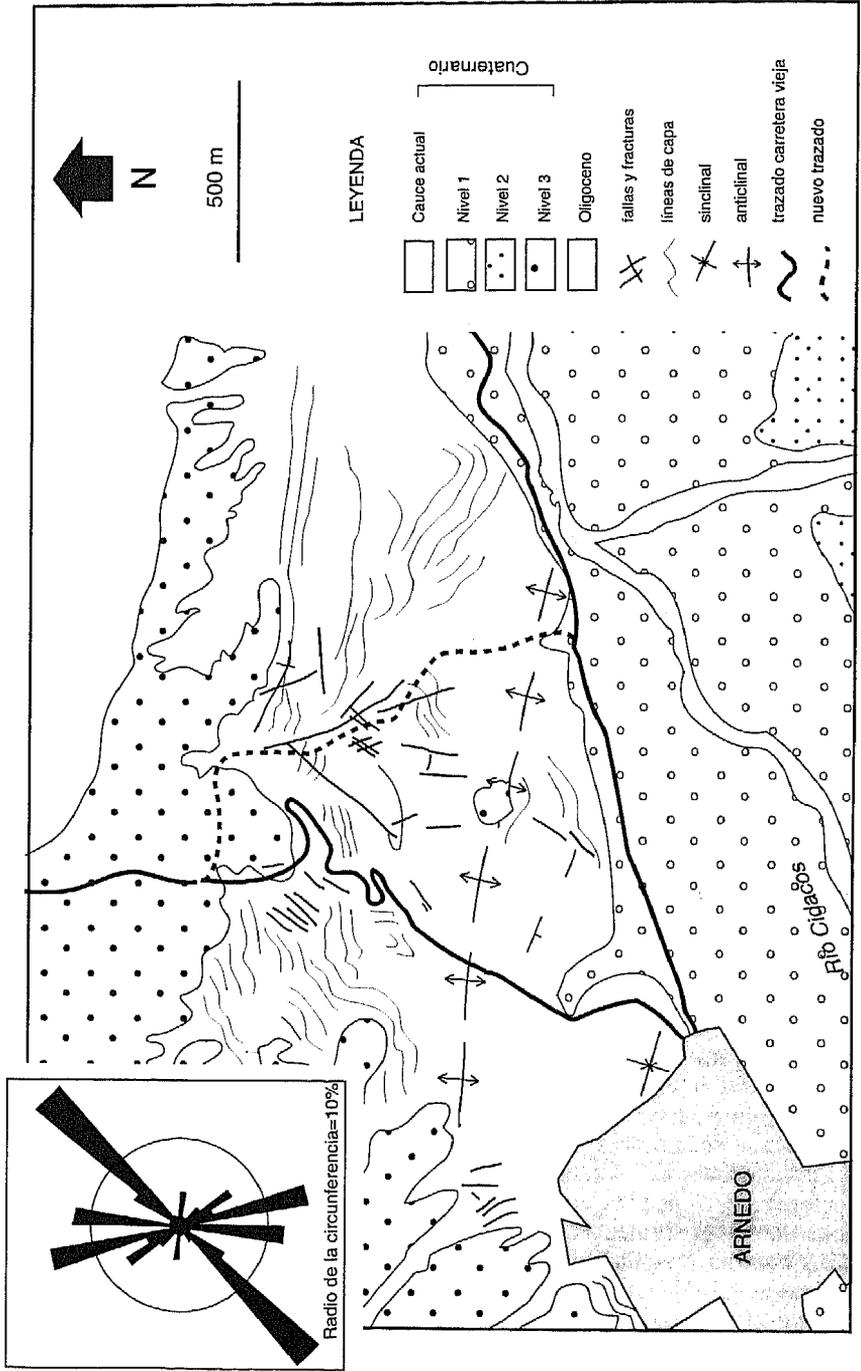


Figura 2. Esquema fotogeológico de detalle en el que pueden observarse las principales fracturas de escala cartográfica existentes en el entorno del trazado de la carretera nueva de Arnedo. Arriba, a la izquierda, diagrama en rosa de orientaciones de fracturas de escala cartográfica; se ha realizado tomando en cuenta tanto el número de fracturas como las longitudes de cada una de ellas



Las fallas de escala mesoestructural que aparecen en el flanco N del anticlinal de Arnedo se formaron durante el Oligoceno superior-Mioceno inferior, antes, durante y después de la formación del anticlinal principal y sus pliegues asociados. Su génesis está relacionada con una compresión de dirección NNW-SSE a N-S, de acuerdo con un modelo simple de Anderson (1951): las familias de planos NE-SW y NNW-SSE a N-S forman un sistema conjugado en cuya bisectriz aguda se sitúa el eje de máxima compresión horizontal, y en la bisectriz obtusa el de mínima compresión (ver fotografía de la figura 8). La línea de intersección entre las dos familias principales de planos, correspondiente al eje de esfuerzos intermedio, se encuentra inclinada y es perpendicular al plano de estratificación medio (Casas Sainz, 1992).

2. GEOMETRÍA Y DISTRIBUCIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES EN EL MACIZO ROCOSO

Los planos de estratificación son discontinuidades penetrativas a la escala del macizo rocoso, y muestran dirección y buzamiento bastante constantes. La orientación de estos planos, con superficies irregulares (paleocanales, bioturbación), varía en el entorno de la carretera hasta la población de Arnedo debido a la existencia de dos pliegues (sistema anticlinal-sinclinal) laxos de orientación WNW-ESE (figura 2). A lo largo del trazado de la nueva carretera las capas presentan direcciones que varían desde 070 hasta 130, y el buzamiento se mantiene en torno a 30° N. Salvo casos muy aislados los planos de estratificación no han funcionado como plano de deslizamiento.

Las discontinuidades más importantes que aparecen en la arenisca de Arnedo son las fallas mecánicas estriadas formadas durante la compresión terciaria. Se han medido las orientaciones de 138 planos de fractura a lo largo de aproximadamente 1 Km del trazado de la nueva carretera. Durante el proceso de toma de datos se ha anotado para cada fractura, además de la orientación, las dimensiones visibles, el tipo de relleno que presentan, el espaciado entre fallas de la misma orientación y si la discontinuidad ha funcionado como plano de deslizamiento, con el tipo de geometría de este, planar o en cuña. Para su estudio se ha dividido el trazado de la nueva carretera en dos sectores (figura 2). El sector 1 comprende los 650 m del trazado situados más al norte; se caracteriza por la existencia de varios planos de falla de escala hectométrica. El sector 2 comprende los últimos 350 m del trazado y en él se localizan numerosos planos de falla, pero en general de menor escala que en el sector 1. A continuación se describen brevemente las características generales de la fracturación en función de los parámetros que hemos apuntado:

a) Orientación. A pesar de la distribución aparentemente irregular de la orientación de las fracturas en el estereograma de polos (figura 3), en los diagramas de densidad de la misma figura puede verse que existen varias familias de orientaciones preferenciales, que se resumen en la tabla 1. A la hora de considerar el estudio estadístico de los espaciados y las dimensiones de las fallas, hemos considerado que algunas familias de fracturas en los sectores 1 y 2 pueden ser consideradas como las mismas debido a su orientación, de acuerdo con la siguientes equivalencias: Familia 1.1= Familia 2.1, Familia 1.2= Familia 2.2 y Familia 1.3= Familia 2.3 (figura 4). Obsérvese que los máximos de direcciones obtenidas a partir de medidas en afloramiento concuerdan bastante bien con los derivados del estudio fotogeológico (ver diagrama en rosa de la figura 2). El aspecto de las discontinuidades en el macizo rocoso puede verse en la fotografía de la figura 8. En cualquier caso, llama la atención la constancia de la distribución espacial de la fracturación, consecuencia a

Figura 3. Diagramas de polos y de densidad de discontinuidades, en los dos sectores por separado, del trazado de la nueva carretera, y para el conjunto total de las mismas. Proyección de Schmidt, hemisferio inferior

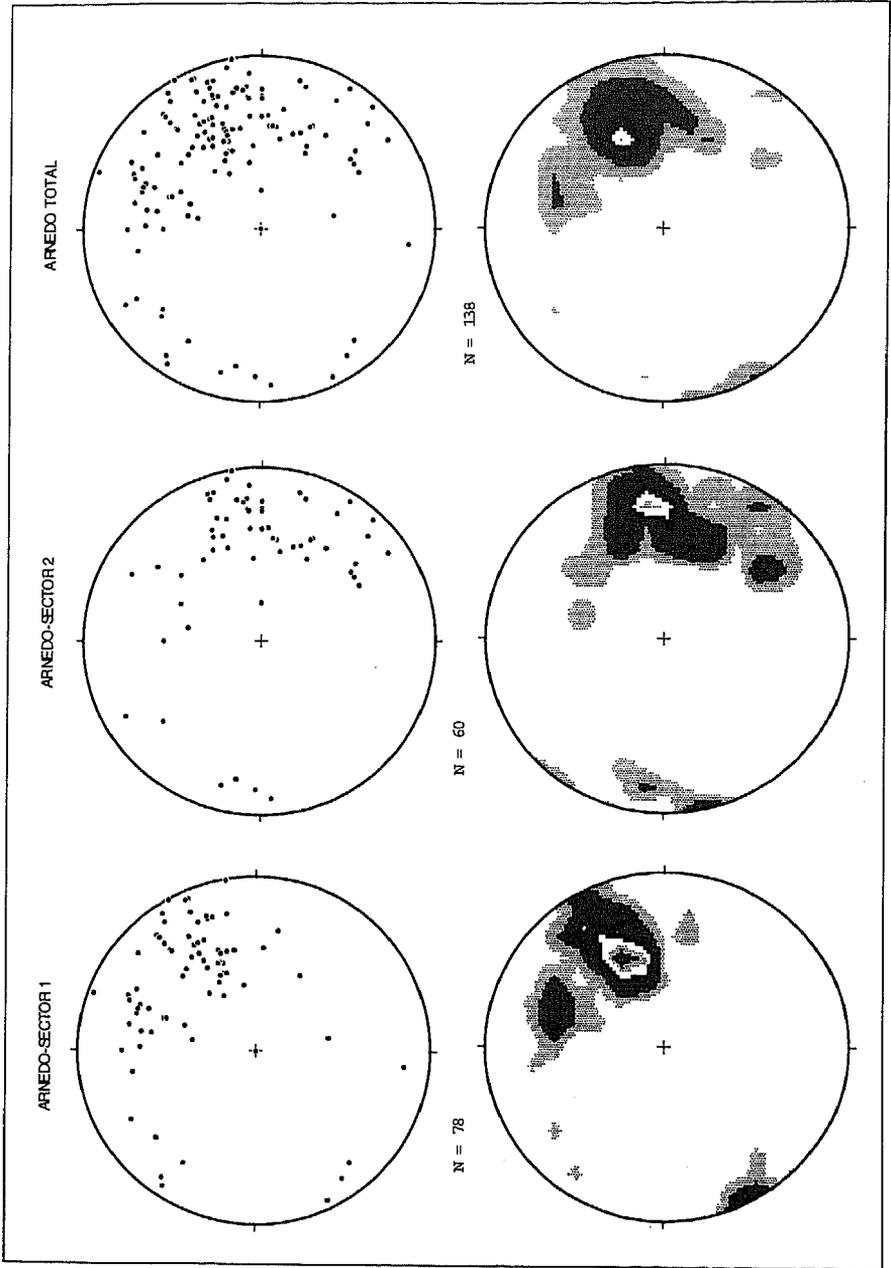
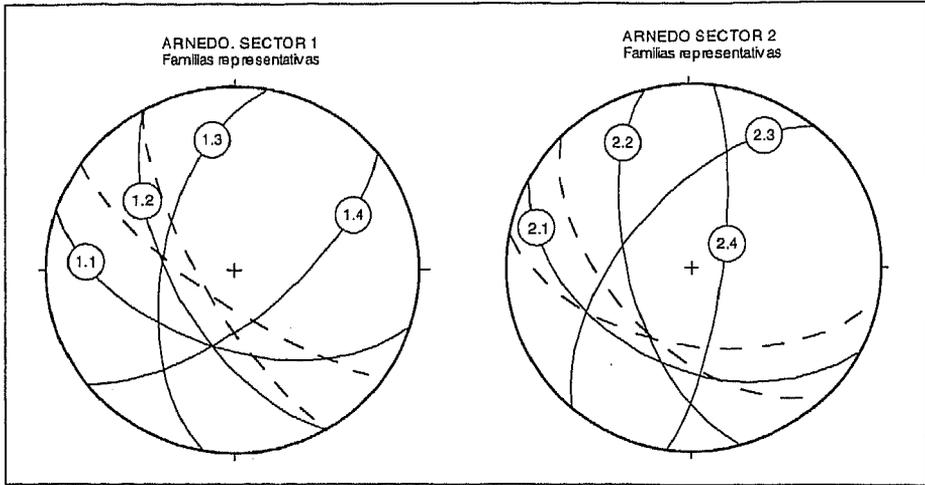


Figura 4: Estereograma que muestra la orientación de las principales familias de discontinuidades (ciclográficas con línea continua) y su relación con los taludes existentes en la nueva carretera (ciclográficas con línea a trazos). Proyección de Schmidt, hemisferio inferior



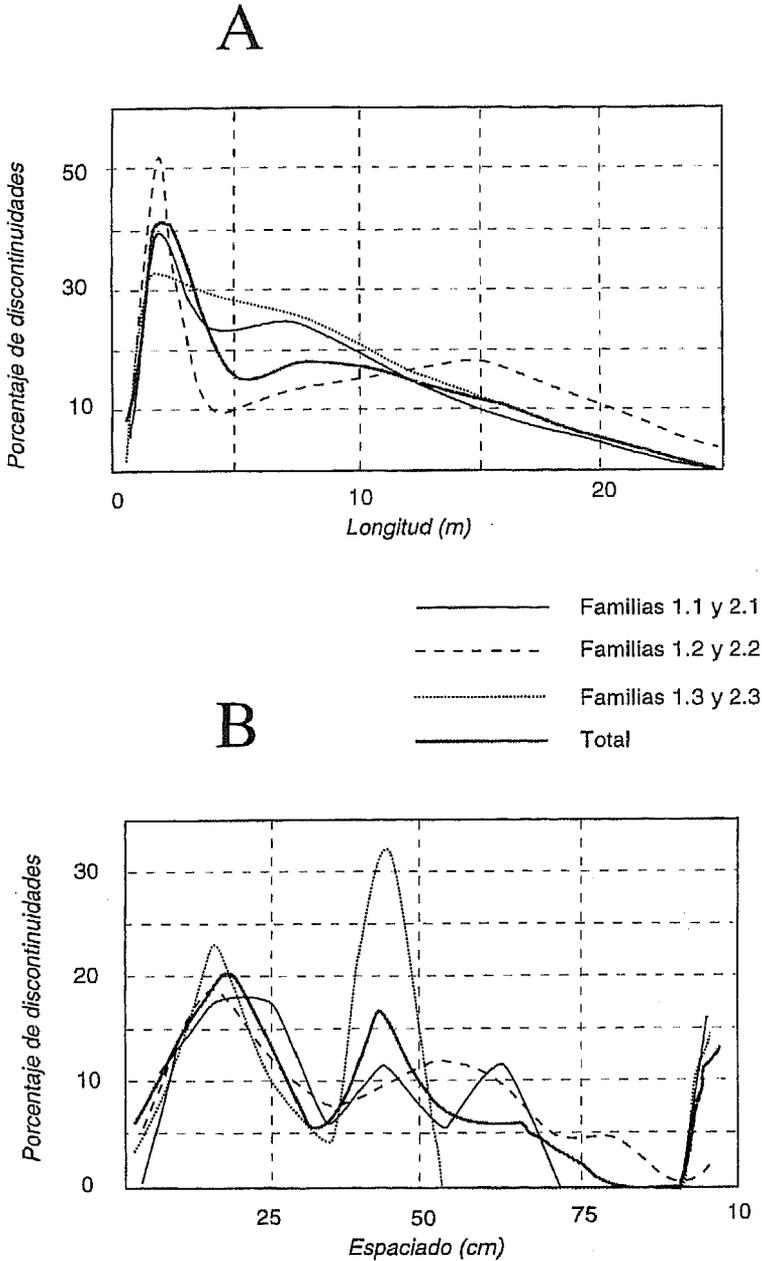
su vez de los esfuerzos compresivos N-S durante el Oligoceno en este sector de la Cuenca del Ebro. Esta relación entre orientación de los esfuerzos y orientación de la fracturación permite realizar predicciones sobre el comportamiento de los materiales en el conjunto de la Formación de Arnedo, que se extiende por todo el flanco N del anticlinal (ver figura 1). En numerosos afloramientos a lo largo de este flanco se mantiene aproximadamente el patrón geométrico de la fracturación descrito para el sector cercano a Arnedo (Casas Sainz, 1992).

Tabla 1: Orientación de las principales familias de fracturas en cada uno de los dos sectores estudiados

Sector 1	Sector 2
Taludes: 125, 60 W a 150, 50 W	Taludes: 100, 55 S a 135, 55 S
Familia 1.1: 109, 54 S	Familia 2.1: 118, 45 S
Familia 1.2: 151, 63 W	Familia 2.2: 165, 62 W
Familia 1.3: 010, 58 W	Familia 2.3: 040, 60 W
Familia 1.4: 034, 79 E	Familia 2.4: 007, 76 E

b) Tamaño. El tamaño de las fracturas se ha determinado tanto mediante observaciones en los desmontes artificiales como a partir del estudio de la fotografía aérea. Los datos no son plenamente fiables en muchos de los casos, ya que en los taludes artificiales no pueden observarse las fallas en toda su extensión; no obstante, sirve al menos como indicador del tamaño que pueden tener los bloques en un deslizamiento potencial. Existe un número importante de fracturas de escala hectométrica (entre 100 y 500 m de longitud), con orientación dominante NE-SW y NNW-SSE (ver esquema cartográfico de la figura 2). De acuerdo con la cartografía de detalle, la falla de mayor longitud es de dirección práctica-

Figura 5: A. Curvas de frecuencia del tamaño de las discontinuidades observables a escala de afloramiento en la Arenisca de Arnedo. Se han representado por separado las distintas familias de discontinuidades medidas y la curva media para el conjunto total de las mismas. B. Curvas de frecuencia del espaciado de las fracturas



mente paralela al trazado de la nueva carretera y aparece muy cercana a esta. Además, existen gran cantidad de planos de falla de escala decamétrica. Del estudio estadístico de sus dimensiones, realizado por separado para las tres familias (figura 5.A) se deduce que existe un máximo absoluto de fallas con dimensiones comprendidas entre 1 y 2.5 m, y que no hay una relación clara entre tamaño y orientación de las discontinuidades. En la curva que representa toda la población de fallas se apunta una cierta bimodalidad de tamaños, con un máximo relativo en torno a 7.5 m.

c) Espaciado. El espaciado entre discontinuidades con igual orientación varía desde unos pocos centímetros hasta 5 metros. En general no se observa una relación clara entre la orientación de las familias de fallas y su espaciado (figura 5.B). Los tres grupos de fracturas muestran una distribución estadística bimodal del espaciado, con máximos en torno a 10-30 y 50-70 cm; esta distribución bimodal es también reflejada por la curva que representa el conjunto total de fallas. La escala del espaciado en relación al tamaño muestra la excepcionalmente alta densidad de la fracturación en algunos sectores dentro de la zona estudiada, sobre todo si tenemos en cuenta que el espesor de los estratos no supera los dos metros. La relación espaciado entre las fracturas frente al espesor de las capas es algo menor que la que aparece con más frecuencia en los ejemplos presentados por otros autores, al menos en la Cuenca del Ebro (Arlegui, 1991; Narr y Suppe, 1991; Rives et al., 1992).

d) Rellenos. Existen dos tipos fundamentales de fallas: aquellas que no presentan relleno de diferente litología en el plano, y por tanto en los dos bloques de la discontinuidad el material es el mismo, normalmente con rugosidad escasa; y aquellas que presentan relleno de costras calcáreas de espesor en torno a 1-2 mm o relleno de varios cm de material arcilloso muy compacto y con esquistosidad debida al movimiento de las fallas durante su formación. El relleno no ha facilitado los deslizamientos ya que el material se encuentra compactado y costrificado. Por ello, la resistencia a la fricción (aunque no ha podido ser evaluada mediante ensayos debido a su carácter intermedio entre roca y suelo) de las fracturas rellenas es mayor que en las fracturas no rellenas.

e) Estado de estabilidad/inestabilidad real. No todas las fracturas con la misma orientación y con el mismo tipo de relleno presentan el mismo estado de inestabilidad. Hay que considerar además tanto su posición relativa con respecto al talud en cada punto como el grado de cohesión entre los dos bloques de la falla. Existen numerosos casos en los que aparecen fracturas con espaciados pequeños con un alto grado de cohesión, similar o incluso mayor al de la roca intacta, debido a la existencia de costras carbonatadas, y que, por tanto, no dan problemas de inestabilidad.

3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA ARENISCA DE ARNEADO

Para la caracterización geotécnica de la arenisca de Arnedo y de las fracturas del macizo rocoso se han llevado a cabo una serie de ensayos tanto sobre probetas de roca intacta como sobre bloques fracturados.

3.1. Línea de resistencia intrínseca

Se han realizado tres ensayos de compresión simple sobre probetas cilíndricas extraídas de varias muestras de arenisca de los taludes estudiados. Una de las muestras de roca de la cual se extrajeron las probetas presenta abundantes discontinuidades cementadas con arcilla o costras carbonatadas. Las probetas fueron extraídas de forma que sus ejes mayores forman diferentes ángulos con el plano de estratificación. Los resultados muestran que

existen diferencias importantes de una de las muestras de roca con respecto a las otras dos, debido fundamentalmente al menor grado de cementación que presenta. Las tres probetas presentan un diámetro basal de 69 mm y alturas respectivas de 105, 154 y 200 mm. La resistencia máxima a la compresión simple fue de 23.2 MPa para la probeta A-1, 29.6 MPa para la A-2 y 12 MPa para la A-3, con acortamiento máximo de 9.57×10^{-3} , 6.6×10^{-3} y 5×10^{-3} respectivamente.

En el caso de la probeta A-1 la parte basal está formada por arcilla. Las discontinuidades previas formaban un ángulo de 50° con la vertical (dirección de la compresión simple) y durante la ruptura no hubo reactivación de las mismas. Las fracturas originadas durante el ensayo presentaban ángulos de 25° con la vertical en la arenisca y de unos 32° en el tramo arcilloso. En la probeta A-2 la familia principal de discontinuidades preexistentes, todas ellas con cemento carbonatado, formaba un ángulo de 22° con el eje de la compresión. Durante la fracturación aparecieron dos familias de fracturas, con disposición en reloj de arena, a 18° y 26° de la vertical y una tercera familia subvertical. Las fracturas por las que se rompió la probeta no correspondieron en ningún caso a planos de discontinuidad cementados. En la probeta A-3 no existían discontinuidades previas.

Para trazar con precisión la curva de resistencia intrínseca de la arenisca de Arnedo se han realizado asimismo dos ensayos de resistencia al corte directo en roca, mediante la misma prensa utilizada para los ensayos de compresión uniaxial, añadiéndole un dispositivo que permite romper las probetas por un plano paralelo a la dirección de compresión (figura 6). Aunque la comparación de los datos resultantes de este tipo de manipulaciones con los ensayos triaxiales estándar no ha sido realizada todavía por dificultades técnicas, sus resultados han de ser equivalentes a los derivados de los dispositivos descritos por Hoek y Bray (1977), bajo esfuerzos normales muy pequeños o nulos. En cualquier caso, la coherencia de estos datos con los resultantes de los ensayos uniaxiales es indicativa de su fiabilidad. El diámetro de las probetas rotas, obtenidas a partir de las muestras A-1 y A-2 de los ensayos de compresión simple, fue de 6.90 cm y la máxima resistencia al corte obtenida para las mismas de 11.03 y 10.69 MPa respectivamente.

Figura 6: Esquema simplificado del dispositivo acoplable a la prensa de compresión simple empleado para ensayar la resistencia al corte directo, con esfuerzo normal nulo, de probetas cilíndricas de roca

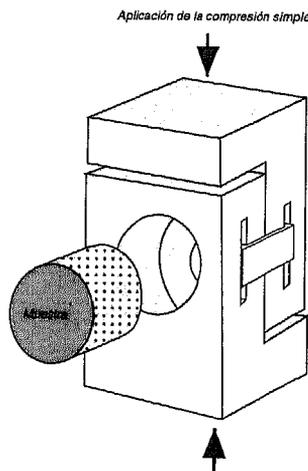
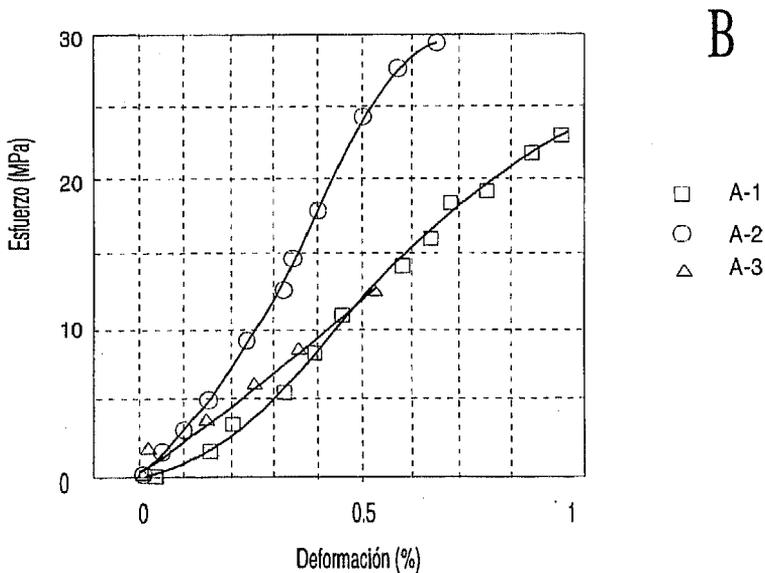
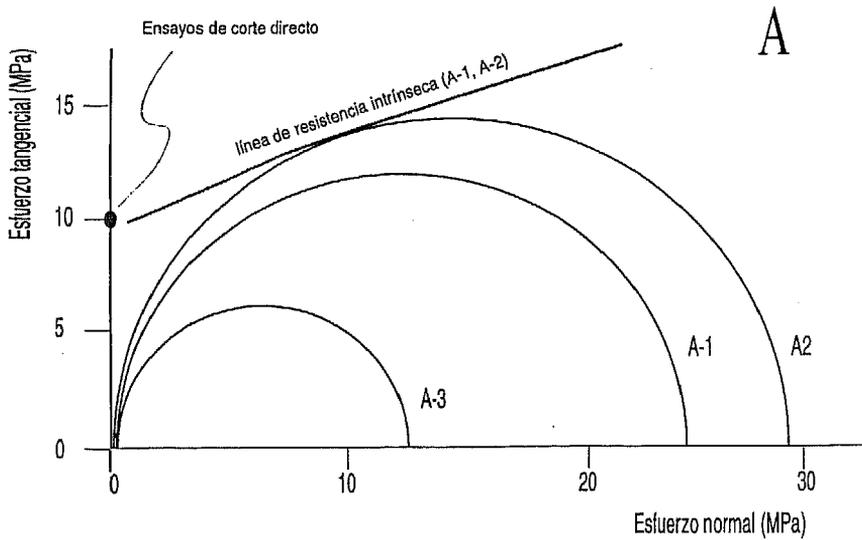


Figura 7: A. Representación en círculo de Mohr de los ensayos de compresión simple de las tres probetas cilíndricas de la arenisca de Arnedo, y de los puntos correspondientes a los ensayos de corte directo sin esfuerzo normal (los dos ensayos dan prácticamente la misma resistencia). Se ha trazado también la línea de resistencia intrínseca obtenida a partir de ellos. B. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas para los ensayos de compresión simple de las tres muestras citadas



A partir de estos datos se ha trazado la curva de resistencia intrínseca a la compresión de la arenisca de Arnedo (figura 7.A) para las muestras bien cementadas (A-1 y A-2). Puede observarse una diferencia clara con respecto a la arenisca poco cementada (muestra A-3) que presenta valores de resistencia muy inferiores. De esta última no se tienen datos suficientes para trazar dicha curva. En la figura 7.B aparecen las curvas esfuerzo-deformación para los tres ensayos de compresión simple realizados.

3.2. Resistencia de las fracturas a la fricción

Con el fin de determinar el ángulo de rozamiento de las fracturas que no presentan ningún tipo de relleno, se han realizado 10 ensayos aplicando un esfuerzo tangencial sobre fracturas naturales sometidas a distintas cargas normales. El instrumento de medida utilizado ha sido un anillo dinamométrico, mediante un dispositivo similar al aparato de corte directo portátil descrito por Hoek y Bray (1977). Las muestras de fracturas tomadas en el campo corresponden a partes de los dos bloques en contacto. Con el fin de verificar los resultados obtenidos, se han hecho también pruebas de corte con cargas normales bajas (ensayo de "tilt-test" descrito por Barton, 1971) sobre las mismas fracturas. Todos los valores obtenidos se encuentran comprendidos entre 30 y 35° con un máximo en torno a 32°.

Hay que resaltar, no obstante, el hecho de que en fracturas que todavía no han sufrido ningún tipo de meteorización ni de entrada de agua en la grieta los valores son mucho más altos debido a la rugosidad de las superficies en contacto. En cambio, en fracturas que han sufrido la penetración de agua meteórica, la arenisca, que presenta cemento carbonatado, se disgrega rápidamente en las zonas adyacentes a la fractura con lo que el efecto de las rugosidades disminuye rápidamente y el ángulo de rozamiento baja hasta los valores normales que acabamos de describir.

4. ANALISIS GEOMETRICO SIMPLE DE LAS CONDICIONES DE ESTABILIDAD. FALLAS PLANARES Y TIPOS DE CUÑAS

Se ha tomado la orientación de las familias en los dos sectores citados en el apartado anterior. En una primera aproximación (estereograma de la figura 4) puede verse claramente que existe posibilidad de falla planar a lo largo de las familias 1.1, 1.2 y 2.3 y que prácticamente todas las familias de fracturas tomadas dos a dos (excepto las intersecciones 2.1X2.2 y 2.2X2.4) pueden dar cuñas cinemáticamente inestables.

A partir de las ecuaciones de Hoek y Bray (1977) para el análisis de estabilidad en cuñas de roca se ha desarrollado un programa de ordenador que permite calcular los factores de seguridad, en seco y con saturación en agua, de las cuñas formadas por dos discontinuidades a partir únicamente de las orientaciones de las fracturas y la cohesión y ángulo de rozamiento de cada una de ellas (Apéndice I). El programa también realiza el cálculo de estabilidad de las discontinuidades planares que resulten cinemáticamente inestables, añadiendo para ello los datos de altura del talud, distancia del borde del talud a la grieta de tracción y altura de la columna de agua dentro de la discontinuidad. Se han realizado los cálculos de estabilidad a partir de este programa y se han obtenido los factores de seguridad recogidos en la tabla 2. Los valores obtenidos en esta tabla resultan de considerar la cohesión despreciable, la densidad de la roca seca 2.2 g/cm³ y de la roca saturada 2.3 g/cm³ (medidas a partir de muestras reales), el ángulo de fricción de las fracturas 32° (consideramos pues que existe un cierto grado de meteorización dentro de las fallas, ver apartado 5),

y, en el caso de las fallas planares se ha establecido la altura media del talud en 10 m. Puesto que los factores de seguridad de las cuñas varían en función de la orientación del talud, se han realizado varias pruebas contando con ese posible margen de variación; en la tabla 2 aparece el valor medio del factor de seguridad. No se ha considerado la aceleración sísmica como factor de inestabilidad añadido, aunque teniendo en cuenta este elemento los factores de seguridad tenderían a ser aún más bajos.

Tabla 2: Factores de seguridad (Fs) obtenidos para las discontinuidades planares y cuñas en los dos sectores estudiados (los resultados que faltan corresponden a valores negativos del factor de seguridad)

Discontinuidad	FS(seco)	Fs(grieta rellena de agua)
<i>Sector 1</i>		
Familia 1.1 (falla planar)	0.45	0.01
Familia 1.2 (falla planar)	0.318	-
Cuña 1.1X1.2	0.4	-
Cuña 1.1X1.3	0.6	-
Cuña 1.1X1.4	0.5	-
Cuña 1.2X1.3		
Cuña 1.2X1.4	0.7	-
Cuña 1.3X1.4	2.9	1.7
<i>Sector 2</i>		
Familia 2.1 (falla planar)	0.62	0.01
Familia 2.3 (falla planar)	0.36	-
Cuña 2.1X2.2	0.6	-
Cuña 2.1X2.3	1	0.12
Cuña 2.1X2.4	1	0.13
Cuña 2.2X2.4	3.17	1.68

Como puede deducirse de la observación de la tabla 2, en el sector 1 el riesgo de deslizamientos tanto a lo largo de las fallas planares como en cuñas es muy alto, dada la orientación absolutamente desfavorable de los nuevos taludes abiertos en la carretera. En el sector 2 la orientación de las fracturas principales son algo diferentes y el riesgo de deslizamiento a lo largo de fallas individuales es menor, aunque en algunos casos se ha visto que forma un ángulo relativamente bajo con el talud. La posibilidad de formar cuñas inestables también es sensiblemente menor que en el sector 1, debido a la relación angular entre cuñas y taludes.

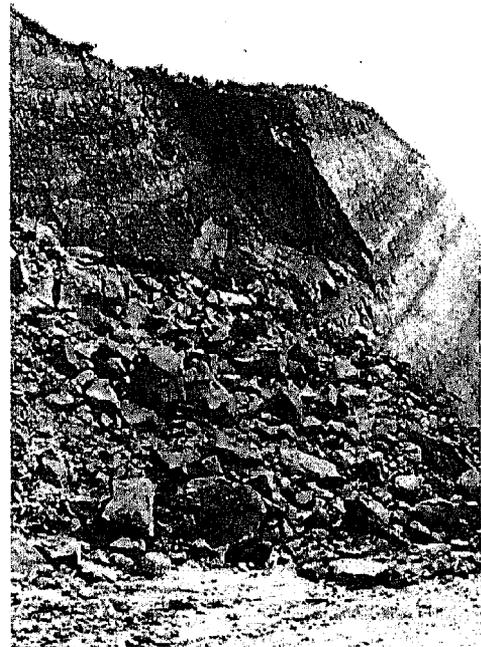
Como balance de estos resultados se comprueba que los parámetros con los que se han realizado los cálculos responden a los reales, ya que la mayor parte de los deslizamientos observados se han producido como fallas planares a lo largo de discontinuidades de menor buzamiento que la pendiente del talud, y limitadas lateralmente por otras fracturas (figura 9).

Otro aspecto a considerar, desde un punto de vista teórico, es la posible ruptura de la roca intacta debida a la carga vertical del propio macizo rocoso. Aunque es una forma de inestabilidad improbable en macizos rocosos, creemos interesante incluir aquí esta consideración, debido a las especiales características del macizo y sus taludes: grandes fallas paralelas a los taludes que separan bloques paralelepípedicos de gran altura. Teniendo en cuenta que la resistencia a la compresión simple está comprendida entre 12 y 25 MPa, para

Figura 8: Fotografía de dos de las principales familias de fracturas vistas sobre el plano de estratificación. Puede verse cómo las familias de fallas mayoritarias forman un ángulo de unos 30° cuya bisectriz aguda aparece en dirección N-S, de acuerdo con el modelo de Anderson (1951). Longitud total de la fotografía: 15 m.



Figura 9: Aspecto de uno de los deslizamientos en roca producidos en la carretera nueva Arnedo-Logroño; el deslizamiento está limitado lateralmente por dos discontinuidades y en la parte trasera por una falla importante de orientación NNW-SSE; su límite inferior es una falla con la misma dirección que la falla principal pero buzamiento algo menor. Longitud de la fotografía: 10 m.



cumplir las condiciones de este tipo de ruptura se tendría que verificar la igualdad (para un paralelepípedo de roca de longitud unidad, altura h y espesor l):

$$\rho g h / l = 12 \cdot 25 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

con lo que h/l debería estar comprendido entre 500 y 1000, relación improbable en taludes reales.

Por último, existe un tipo de cuña no predecible mediante los métodos de análisis simple que hemos utilizado, y de los cuales se han observado algunos ejemplos. Son las cuñas tetraédricas limitadas por planos de estratificación, normalmente de pequeño tamaño (figura 10), y cuya facilidad para deslizar depende de las irregularidades en el plano de estratificación.

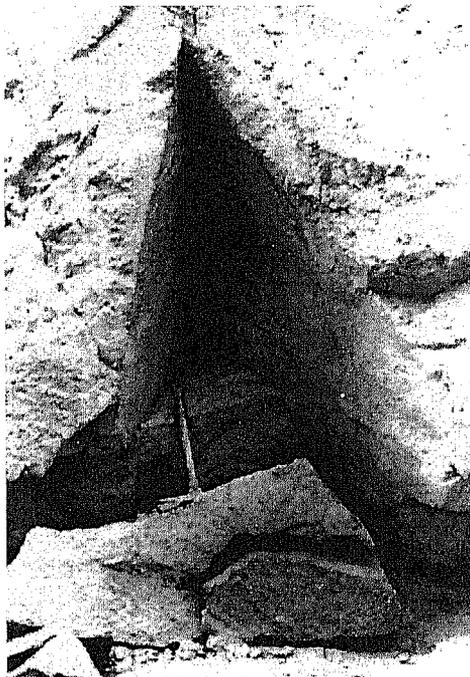


Figura 10: Cuña tetraédrica de pequeño tamaño limitada en su parte basal por el plano de estratificación y dos fracturas correspondientes a las familias principales

5. EFECTO DE LA METEORIZACIÓN Y DISGREGACIÓN

Como ya hemos mencionado en el apartado 4, existe una gran influencia de la penetración del agua meteórica en las fracturas para el cambio de sus condiciones de resistencia a la fricción. Esto se debe a la disolución del cemento calcáreo y la disgregación de la roca en los dos labios de la falla. El efecto se ve disminuido en el caso de las fracturas que presentan relleno arcilloso, lo que puede explicar el hecho de que presenten menores índices de deslizamiento real que las fracturas sin relleno.

¿Hasta qué punto ha influido la construcción de la nueva carretera en las condiciones de deslizamiento potencial (inestabilidad dinámica) de las fracturas? Quizá el único ele-

mento a tener en cuenta en este sentido es que el cambio de la microrred de drenaje, por creación de taludes y depósitos nuevos de alta porosidad, puede favorecer la infiltración de agua en fracturas que antes permanecían secas, en un área donde las precipitaciones son escasas y concentradas en dos máximos en primavera y otoño. En este sentido hay que señalar que las fallas comenzaron a funcionar como deslizamientos desde el primer momento de apertura de los taludes (finales de otoño de 1986) y que se han mantenido como inestables desde entonces.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A partir del presente estudio se ha comprobado la capacidad de los métodos geológicos simples para investigar y predecir la estabilidad presente y futura de taludes artificiales en roca. En el caso de la carretera de Arnedo la inestabilidad real de los taludes ha estado condicionada fundamentalmente por la orientación altamente desfavorable del trazado de la nueva carretera, paralela a algunas de las direcciones preferentes de fracturación del macizo rocoso. Es conveniente resaltar el hecho de la escasa incidencia de los deslizamientos en roca a lo largo de la antigua carretera que une Arnedo con el alto de las Tres Tetras, debido tanto a su trazado sinuoso, en el que no existen apenas tramos con orientación NNW a NNE, como a la escasa altura de los desmontes que en ella aparecen.

Gran parte de las cuñas cinemáticamente inestables con factor de seguridad bajo (en la mayoría de ellas no alcanza el valor de 1), determinado a partir de los métodos de Hoek y Bray (1977) han funcionado como deslizamientos. La geometría de las cuñas de roca está fuertemente condicionada por la existencia de un plano principal, que corresponde a la cara mayor de las cuñas, y otros planos menores que las limitan lateralmente.

Las propiedades mecánicas de la arenisca de Arnedo varían considerablemente en el entorno de la zona estudiada, debido fundamentalmente al diferente grado de cementación que presenta la roca. La resistencia a la compresión simple varía desde 12 hasta casi 30 MPa. A partir de los ensayos sobre roca intacta se ha comprobado también las diferencias de comportamiento entre fracturas preexistentes en la roca: algunas de ellas presentan alta resistencia, bien debido a su cementación o bien a la presencia de relleno arcilloso con esquistosidad, y no han funcionado como plano de deslizamiento.

Finalmente, queda patente la importancia de la meteorización y penetración de agua en las grietas, como factor de disgregación de la roca en las fracturas y favorecer consiguientemente la eliminación de las rugosidades y con ello los deslizamientos.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores muestran su agradecimiento a la Consejería de Obras Públicas del Gobierno de la Rioja, por la información suministrada. A los Servicios de apoyo a la investigación (Mecánica de Precisión y Preparación de rocas y materiales duros) de la Universidad de Zaragoza, en concreto a Rafael Lana y Manuel Tricás por las sugerencias y apoyos prestados. A Félix Pérez-Lorente y dos revisores anónimos por sus sugerencias y su detallada corrección del manuscrito. Este trabajo ha sido financiado por el proyecto CYCIT GEO91-924 de la Dirección General Científica y Técnica.

8. REFERENCIAS

- Alonso Pérez de Ágrede, E. y Gili Ripoll, J.A. (1989). El projecte de desmunts als massissos rocosos. *Espais*, 16, pág. 42-56
- Anderson, E.M. (1951). *The dynamics of faulting and dyke formation with application to Britain*. Oliver & Boyd Ed., 206 pág.
- Arlegui, L.E. (1991). *Sistemas de diaclasas y campo de esfuerzos Neógeno-Cuaternario en la Cordillera Ibérica y Cuenca del Ebro*. Mem. Inédita. Instituto de Estudios Altoaragoneses, 90 pág.
- Barton, N.R. (1971). A relationship between joint roughness and joint shear strength. Proc. Symposium on Rock Fracture, Francia, Paper 1-8.
- Casas Sainz, A. M. (1988). El estado de esfuerzos durante el Terciario en la Depresión de Arnedo (La Rioja). *Acta Geol. Hisp.*, 23 (3), pág. 223-231.
- Casas Sainz, A.M. (1992). *El frente Norte de las Sierras de Cameros: estructuras cabalgantes y campo de esfuerzos*. Zubía, monográfico 4. Instituto de Estudios Riojanos.
- Castiella, J.; Soler, J. y Villalobos, L. (1977). *Mapa Geológico de España a escala 1:50.000. Hoja nº 243, Calahorra*. ITGE. 27 pág. y un mapa.
- Gonzalo Moreno, A.N. (1979). *La Rioja. Análisis de Geomorfología estructural*. Instituto de Estudios Riojanos. 508 pág. y 20 mapas.
- Hoek, E. and Bray, J.W. (1977). *Rock Slope Engineering*. The Institution of Mining and Metallurgy, 402 pág.
- ITGE (edit.) (1987). *Manual de Ingeniería de Taludes*. Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, 456 pág.
- Narr, W. and Suppe, J. (1991). Joint spacing in sedimentary rocks. *Journal of Struct. Geol.*, 13(9), pág. 1037-1048
- Muñoz Jiménez, A. (1992). *Análisis tectosedimentario del Terciario del sector occidental de la Cuenca del Ebro (Comunidad de la Rioja)*. Instituto de Estudios Riojanos, 347 pág.
- Rives, T.; Razack, M.; Petit, J.P. and Rawnsley, K.D. (1992). Joint spacing: analogue and numerical simulations. *Journal of Struct. Geol.*, 14(8/9), pág. 925-937
- Salcedo Rodríguez, D. (1978). *El uso de las proyecciones hemisféricas como técnica de predicción y análisis de problemas relativos a la estabilidad de taludes en macizos rocosos*. Universidad Central de Venezuela, 78 pág.

APÉNDICE I:

Programa para analizar la estabilidad de taludes en macizos rocosos a partir de la orientación de las discontinuidades, de acuerdo con el procedimiento de Hoek y Bray (1977)

```

REM PROGRAMA PARA ANALIZAR ESTABILIDAD DE TALUDES EN MACIZOS ROCOSOS
DIM DIS(10,5),D$(10),FC(10,3),MAX(10,3),UNOINTX(10),UNOINTY(10)
DIM DID(10,5),DID$(10)
DIM UNOINTZ(10,10),DOSINTX(10),DOSINTY(10),DOSINTZ(10),IVX(10)
DIM IVY(10),IVZ(10),CUAINTX(10),CUAINTY(10),CUAINTZ(10)
DIM CININTX(10,10),CININTY(10,10),CININTZ(10,10)
2 PRINT "TIPEAR 1 SI SE VAN A EMPLEAR DATOS DE UN FICHERO"
  PRINT "TIPEAR 2 SI SE VAN A INTRODUCIR DATOS"
  INPUT ULO
  IF ULO<1 AND ULO<=2 THEN 2
5 INPUT "NOMBRE DEL FICHERO PARA ABRIR O GUARDAR LOS DATOS";FICH$
  INPUT "NOMBRE DEL FICHERO PARA RESULTADOS";FICHOUT$
  IF ULO=1 THEN 20 ELSE IF ULO=2 THEN 30

20 OPEN FICH$ FOR INPUT AS #1
  INPUT #1, E$,MDIR$
  INPUT #1, GAMMA, GAMMAW, H
  WHILE NOT EOF(1)
  I=I+1
  INPUT #1, DIS(I,1),DIS(I,2),D$(I),COH(I),ANG(I)
  WEND
  NDIS=I-2
  GOTO 80

30 OPEN FICH$ FOR OUTPUT AS #2
  INPUT "NOMBRE DE LA ESTACION";E$
  INPUT "DENSIDAD DE LA ROCA";GAMMA
  INPUT "DENSIDAD DEL AGUA";GAMMAW
  INPUT "ALTURA DE LA CUNA";H
41 INPUT "DIRECCION DEL TALUD";DIS(1,1)
  IF DI<0 OR DI>180 THEN PRINT "ERROR, VALORES ENTRE 0 Y 180": GOTO 41
52 INPUT "PENDIENTE DEL TALUD";DI2
  IF DI2<0 OR DI2>180 THEN PRINT "ERROR, VALORES ENTRE 0 Y 90": GOTO 52
  DIS(1,2)=DI2
53 INPUT "SENTIDO DE LA PENDIENTE";D$(1)
  IF D$(1)<>"N" AND D$(1)<>"S" AND D$(1)<>"E" AND D$(1)<>"W" THEN PRINT
    "ERROR. INTRODUCIR N,S,E,W"
54 INPUT "DIRECCION DE LA SUPERFICIE DEL TERRENO";DIDI2
  IF DIDI2<0 OR DIDI2>180 THEN PRINT "ERROR. VALORES ENTRE 0 Y 180": GOTO 54
  DIS(2,1)=DIDI2
55 INPUT "PENDIENTE DE LA SUPERFICIE DEL TERRENO";DIS(2,2)
  IF DIS(2,2)<0 OR DIS(2,2)>90 THEN PRINT "ERROR. VALORES ENTRE 0 Y 90": GOTO 55
  IF DIS(2,2)=0 THEN D$(2)="E":GOTO 56
56 INPUT "SENTIDO DE LA PENDIENTE";D$(2)
  IF D$(2)<>"N" AND D$(2)<>"S" AND D$(2)<>"E" AND D$(2)<>"W" THEN PRINT
    "ERROR. INTRODUCIR N,S,E,W":GOTO 56
556 INPUT "NUMERO DE DISCONTINUIDADES";NDIS
  DIS(1,3)=0:DIS(1,4)=0:DIS(2,3)=0:DIS(2,4)=0

```

```
PRINT #2, E$; ", "; MDIR$
PRINT #2, GAMMA; ", "; GAMMAW; ", "; H
```

```
PRINT #2, DIS(1,1); ", "; DIS(1,2); ", "; D$(1); ", "; DIS(1,3); ", "; DIS(1,4)
PRINT #2, DIS(2,1); ", "; DIS(2,2); ", "; D$(2); ", "; DIS(2,3); ", "; DIS(2,4)
```

```
FOR I=3 TO NDIS+2
```

```
61 PRINT "DIRECCION DE LA DISCONTINUIDAD"; I-2: INPUT DIDS
IF DIDS<0 OR DIDS>180 THEN PRINT "ERROR. VALORES ENTRE 0 Y 180": GOTO 61
DIS(I,1)=DIDS
62 PRINT "PENDIENTE DE LA DISCONTINUIDAD"; I-2: INPUT DIS(I,2)
IF DIS(I,2)<0 OR DIS(I,2)>90 THEN PRINT "ERROR. VALORES ENTRE 0 Y 90": GOTO 62
63 PRINT "SENTIDO DE LA PENDIENTE DISC"; I-2: INPUT D$(I)
IF D$(I)<>"N" AND D$(I)<>"S" AND D$(I)<>"E" AND D$(I)<>"W" THEN PRINT "ERROR.
INTRODUCIR N,S,E,W": GOTO 63
INPUT "COHESION DE LA DISCONTINUIDAD"; COH(I)
64 INPUT "ANGULO DE FRICCION"; ANG(I)
IF ANG(I)<0 OR ANG(I)>90 THEN PRINT "ERROR. VALORES ENTRE 0 Y 90": GOTO 64
IF MDIR$="A" THEN 66 ELSE IF MDIR$="C" THEN 65
65 PRINT #2, DID(I,1); ", "; DID$(I); ", "; DIS(I,2); ", "; D$(I); ", "; COH(I); ", "; ANG(I): GOTO 67
66 PRINT #2, DIS(I,1); ", "; DIS(I,2); ", "; D$(I); ", "; COH(I); ", "; ANG(I): GOTO 67
67 NEXT I
CLOSE 2
```

```
80 OPEN FICHOUT$ FOR OUTPUT AS #3
PRINT #3, "***** ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES *****"
PRINT #3, "***** EN MACIZOS ROCOSOS *****"
PRINT #3, PRINT #3, PRINT #3, PRINT #3, PRINT #3, PRINT #3, "ESTACION: "; E$
PRINT #3, PRINT #3, "DENSIDAD DE LA ROCA"; GAMMA; " Kg/m3": PRINT #3,
PRINT #3, "ORIENTACION DEL TALUD: "; PRINT #3, DIS(1,1); PRINT #3, ";
DIS(1,2); D$(1)
PRINT #3, PRINT #3, "ORIENTACION DE LA SUPERFICIE DEL TERRENO: "; PRINT #3,
DIS(2,1);
95 PRINT #3, ", "; DIS(2,2); ", "; D$(2): PRINT #3, PRINT #3, PRINT #3,
FOR P=3 TO NDIS+2
PRINT #3, "DISCONTINUIDAD "; P-2; ", "; "ORIENT. "; PRINT #3, DIS(P,1); ", ";
PRINT #3, ", "; DIS(P,2); ", "; D$(P); " COHESION: "; COH(P); "ANG.FRIC. ";
ANG(P)
PRINT #3,
NEXT P
PRINT #3, PRINT #3,
PI=3.141592
FOR I=1 TO NDIS+2
RDIS(I,1)=DIS(I,1)*PI/180: RDIS(I,2)=DIS(I,2)*PI/180: RANG(I)=ANG(I)*PI/180
IF RDIS(I,1)=0 AND D$(I)="E" THEN 100
IF RDIS(I,1)>=0 AND RDIS(I,1)<PI/2 AND D$(I)="W" THEN RDIS(I,1)=
RDIS(I,1)+PI: GOTO 100
IF RDIS(I,1)>=0 AND RDIS(I,1)<PI/2 AND D$(I)="N" THEN RDIS(I,1)=RDIS(I,1)+PI: GOTO
100 IF RDIS(I,1)>=PI/2 AND RDIS(I,1)<PI AND D$(I)="E" THEN RDIS(I,1)=RDIS(I,1)+PI:
GOTO 100
IF RDIS(I,1)>=PI/2 AND RDIS(I,1)<PI AND D$(I)="N" THEN RDIS(I,1)=RDIS(I,1)+PI
100 REM CONTINUE
IF RDIS(I,2)=0 THEN FC(I,1)=0: FC(I,2)=0: FC(I,3)=-1: GOTO 101
```

```

IF RDIS(I,2)=PI/2 THEN FC(I,1)=-COS(RDIS(I,1)):FC(I,2)=SIN(RDIS(I,1)):FC(I,3)=0:
  GOTO 101
FC(I,1)=-COS(RDIS(I,1))*SIN(RDIS(I,2))
FC(I,2)=SIN(RDIS(I,1))*SIN(RDIS(I,2))
FC(I,3)=-COS(RDIS(I,2))
101 NEXT I

REM 1. CONDICIONES DE FALLA PLANAR
FOR I=3 TO NDIS+2
  ANGCOS=(FC(1,1)*FC(I,1)+FC(1,2)*FC(I,2))/(SQR(FC(1,1)^2+FC(1,2)^2)*
  SQR(FC(I,1)^2+FC(I,2)^2)
  IF ANGCOS<COS(15) THEN 126
  MAX(I,1)=COS(RDIS(I,1))*COS(RDIS(I,2))
  MAX(I,2)=-SIN(RDIS(I,1))*COS(RDIS(I,2))
  MAX(I,3)=-SIN(RDIS(I,2))
  ZAUX1=(-FC(1,1)*MAX(I,1)-FC(1,2)*MAX(I,2))/FC(1,3)
  IF ABS(ZAUX1)<=ABS(MAX(I,3)) THEN 126
  IF DIS(I,1)>=0 AND DIS(I,1)<90 AND DIS(1,1)>=0 AND DIS(1,1)<90 AND
D$(I)="N" AND D$(1)="E" THEN 126
  IF DIS(I,1)>=0 AND DIS(I,1)<90 AND DIS(1,1)>=0 AND DIS(1,1)<90 AND D$(I)="E"
AND D$(1)="N" THEN 126
  IF DIS(I,1)>=0 AND DIS(I,1)<90 AND DIS(1,1)>=0 AND DIS(1,1)<90 AND D$(I)="S"
AND D$(1)="W" THEN 126
  IF DIS(I,1)>=0 AND DIS(I,1)<90 AND DIS(1,1)>=0 AND DIS(1,1)<90 AND D$(I)="W"
AND D$(1)="S" THEN 126
  IF DIS(I,1)>90 AND DIS(1,1)>90 AND D$(1)="N" AND D$(I)="W" THEN 126
  IF DIS(I,1)>90 AND DIS(1,1)>90 AND D$(1)="W" AND D$(I)="N" THEN 126
  IF DIS(I,1)>90 AND DIS(1,1)>90 AND D$(1)="S" AND D$(I)="E" THEN 126
  IF DIS(I,1)>90 AND DIS(1,1)>90 AND D$(1)="E" AND D$(I)="S" THEN 126

  PRINT "HAY POSIBILIDAD DE FALLA PLANAR SEGUN DISC";I-2
  PRINT #3, "HAY POSIBILIDAD DE FALLA PLANAR SEGUN DISC";I-2:PRINT #3,
140 PRINT "QUIERE ANALIZAR LA FALLA PLANAR SEGUN LA DISC";I-2;"? S/N"
  INPUT FP$
  IF FP$="N" THEN 126 ELSE IF FP$="S" THEN 141 ELSE IF FP$<<"N" AND FP$<<"S"
  THEN 140

141 REM FACTOR DE SEGURIDAD FALLA PLANAR
  PETAL=RDIS(1,2):PEDIS=RDIS(I,2):HTAL=H:DELTA=RDIS(2,2):C=COH(I):PHI=RANG(I)
  INPUT "DISTANCIA DE LA GRIETA DE TRACCION AL BORDE";DG
  INPUT "ALTURA DEL AGUA EN LA GRIETA DE TRACCION";HGW
  INPUT "ACELERACION SISMICA";AC SIS
  INPUT "FUERZA DE ANCLAJE";T
  INPUT "ANGULO DE INCLINACION DE ANCLAJE";ITHETA:THETA=ITHETA*PI/180
  RAIZ=(COS(PETAL)/SIN(PETAL))*(SIN(PEDIS)/COS(PEDIS))
  HHG=HTAL*(1-SQR(RAIZ))
  W=GAMMA*HTAL^2*.5*((1-(HHG/HTAL)^2)*(COS(PEDIS)/SIN(PEDIS))-
(COS(PETAL)/SIN(PETAL)))
  A=HTAL/SIN(PEDIS)-HHG/SIN(PEDIS):U=.5*GAMMAW*HGW^2:V=GAMMAW*HGW^2
  *.5
  FS=W*AC SIS:ANCL=T*COS(THETA)
  OPO=C*A+(W*COS(PEDIS)+AC SIS*SIN(PEDIS)-U-V*SIN(PEDIS)+ANCL)*TAN(PHI)
  FAV=W*(SIN(PEDIS)+AC SIS*COS(PEDIS))+V*COS(PEDIS)-ANCL

```

```

FS=OPO/FAV
PRINT "FACTOR DE SEGURIDAD PARA LA DISCONTINUIDAD";I-2;PRINT "CON AC.
    SISMICA";
PRINT USING "###.##";AC SIS
PRINT "ALTURA DE AGUA EN LA GRIETA DE TRACCION";HWG
PRINT "Y UNA FUERZA DE ANCLAJE";T;"QUE FORMA UN ANGULO";THETA
PRINT "FS=";PRINT USING "###.###";FS
PRINT #3, "FACTOR DE SEGURIDAD PARA LA DISCONTINUIDAD";I-2;PRINT #3,
PRINT #3, "ACELERACION SISMICA ";PRINT #3, USING "###.###";AC SIS;PRINT #3,
PRINT #3, "ALTURA DE AGUA EN LA GRIETA";HWG;PRINT #3,
PRINT #3, " FUERZA DE ANCLAJE";T;" CON UN ANGULO";ITHETA;PRINT #3,
PRINT #3,"FS=";PRINT #3,USING "###.###";FS;PRINT #3,
126 NEXT I

REM 2. CALCULO DE LOS VECTORES INTERSECCION DE LAS DISCONTINUIDADES
FOR I=3 TO NDIS+1
FOR J=4 TO NDIS+2
IF DIS(I,1)=DIS(J,1) THEN PRINT #3,"CUNA ";I-2;"x";J-2;"ESTABLE":PRINT
#3,;GOTO 500
IF DIS(I,1)=90 AND DIS(J,1)=90 THEN 500
CININTX(I,J)=FC(I,2)*FC(J,3)-FC(I,3)*FC(J,2)
CININTY(I,J)=-FC(I,1)*FC(J,3)+FC(I,3)*FC(J,1)
CININTZ(I,J)=FC(I,1)*FC(J,2)-FC(I,2)*FC(J,1)
IF CININTZ(I,J)>0 THEN CININTZ(I,J)=-CININTZ(I,J);CININTX(I,J)=CININTX(I,J);
CININTY(I,J)=-CININTY(I,J)
MCININT=SQR(CININTX(I,J)^2+CININTY(I,J)^2+CININTZ(I,J)^2)
MCINHOR=SQR(CININTX(I,J)^2+CININTY(I,J)^2)
INMCININT=MCINHOR/MCININT
INMC=(ATN(SQR(1-INMCININT^2)/INMCININT))*180/PI
XAUX2=FC(1,3)*CININTX(I,J)
YAUX2=FC(1,3)*CININTY(I,J)
ZAUX2=(-FC(1,1)*CININTX(I,J)-FC(1,2)*CININTY(I,J))
IF ZAux2>0 THEN ZAux2=-ZAux2;XAUX2=-XAUX2;YAUX2=-YAUX2
MAUX2=SQR(XAUX2^2+YAUX2^2+ZAUX2^2)
INMAUX2=ABS(SQR((XAUX2^2+YAUX2^2)/MAUX2))
INAU=ABS((ATN(SQR(1-INMAUX2^2)/INMAUX2))*180/PI)
IF SGN(CININTX(I,J))<>SGN(XAUX2) AND SGN(CININTY(I,J))<>SGN(YAUX2) THEN 190
IF INMAUX2<INMCININT THEN 200 ELSE 190
190 PRINT "CUNA (";I-2;"x";J-2;");"ESTABLE"
PRINT #3, "CUNA (";I-2;"x";J-2;");"ESTABLE": PRINT #3,;GOTO 500
200 PRINT #3, "HAY POSIBILIDAD DE INESTABILIDAD EN LA CUNA (";I-2;"x";J-2;")":
PRINT #3,
PRINT "HAY POSIBILIDAD DE INESTABILIDAD EN LA CUNA (";I-2;"x";J-2;")"
REM DEFINICION DE LOS VECTORES INTERSECCION DE PLANOS
UINTX(I)=FC(I,2)*FC(1,3)-FC(I,3)*FC(1,2)
UINTY(I)=-FC(I,1)*FC(1,3)+FC(I,3)*FC(1,1)
UINTZ(I)=FC(I,1)*FC(1,2)-FC(I,2)*FC(1,1)
IF UINZ(I)>0 THEN UINX(I)=-UINX(I);UINY(I)=-UINY(I);UINZ(I)=-UINZ(I)
DINTX(J)=FC(J,2)*FC(1,3)-FC(J,3)*FC(1,2)
DINTY(J)=-FC(J,1)*FC(1,3)+FC(J,3)*FC(1,1)
DINTZ(J)=FC(J,1)*FC(1,2)-FC(J,2)*FC(1,1)
IF DINTZ(J)>0 THEN DINTX(J)=-DINTX(J);DINTY(J)=-DINTY(J);DINTZ(J)=-DINTZ(J)
IVX (I) =FC(I,2)*FC(2,3)-FC(I,3)*FC(2,2)

```

```

IVY (I) =-FC(I,1)*FC(2,3)+FC(I,3)*FC(2,1)
IVZ(I)=FC(I,1)*FC(2,2)-FC(I,2)*FC(2,1)
IF IVZ(I)>0 THEN IVX(I)=-IVX(I);IVY(I)=-IVY(I);IVZ(I)=-IVZ(I)
CUAINTX(J)=FC(J,2)*FC(2,3)-FC(J,3)*FC(2,2)
CUAINTY(J)=-FC(J,1)*FC(2,3)+FC(J,3)*FC(2,1)
CUAINTZ(J)=FC(J,1)*FC(2,2)-FC(J,2)*FC(2,1)
IF CUAINTZ(J)>0 THEN CUAINTX(J)=-CUAINTX(J);CUAINTY(J)=-
CUAINTY(J);CUAINTZ(J)=-CUAINTZ(J)
REM ANGULOS ENTRE VECTORES
MODNA=SQR((FC(I,1))^2+(FC(I,2))^2+(FC(I,3))^2)
MODNB=SQR((FC(J,1))^2+(FC(J,2))^2+(FC(J,3))^2)
ECOSNANB=(FC(I,1)*FC(J,1)+FC(I,2)*FC(J,2)+FC(I,3)*FC(J,3))/(MODNA*MODNB)
ESINNANB=SQR(1-ECOSNANB^2)
MOD1=SQR(UINTX(I)^2+UINY(I)^2+UINZ(I)^2)
ECOS1NB=(UINX(I)*FC(J,1)+UINY(I)*FC(J,2)+UINZ(I)*FC(J,3))/(MOD1*MODNB)
THETA1NB=ATN((SQR(1-ECOS1NB^2)/ECOS1NB))
MOD2=SQR(DINTX(J)^2+DINTY(J)^2+DINTZ(J)^2)
ECOS2NA=(DINTX(J)*FC(I,1)+DINTY(J)*FC(I,2)+DINTZ(J)*FC(I,3))/(MOD2*MODNA)
THETA2NA=ATN((SQR(1-ECOS2NA^2)/ECOS2NA))
MOD4=SQR(CUAINTX(J)^2+CUAINTY(J)^2+CUAINTZ(J)^2)
ECOS24=(DINTX(J)*CUAINTX(J)+DINTY(J)*CUAINTY(J)+DINTZ(J)*CUAINTZ(J))/(MOD2*
MOD4)
ESIN24=SQR(1-ECOS24^2)
MOD5=SQR(CININTX(I,J)^2+CININTY(I,J)^2+CININTZ(I,J)^2)
ECOS45=(CUAINTX(J)*CININTX(I,J)+CUAINTY(J)*CININTY(I,J)+CUAINTZ(J)*CININTZ(I,J
))/(MOD4*MOD5)
ESIN45=SQR(1-ECOS45^2)
MOD3=SQR(IVX(I)^2+IVY(I)^2+IVZ(I)^2)
ECOS13=(UINX(I)*IVX(I)+UINY(I)*IVY(I)+UINZ(I)*IVZ(I))/(MOD1*MOD3)
ESIN13=SQR(1-ECOS13^2)
ECOS35=(IVX(I)*CININTX(I,J)+IVY(I)*CININTY(I,J)+IVZ(I)*CININTZ(I,J))/(MOD3*M
OD5)
ESIN35=SQR(1-ECOS35^2)
ESINPSI5=ABS(CININTZ(I,J)/SQR(CININTX(I,J)^2+CININTY(I,J)^2+CININTZ(I,J)^2))
REM FUNCIONES
A=(COS(RDIS(I,2))-COS(RDIS(J,2))*ECOSNANB)/(ESINPSI5*ESINNANB^2)
B=(COS(RDIS(J,2))-COS(RDIS(I,2))*ECOSNANB)/(ESINPSI5*ESINNANB^2)
X=ESIN24/(ESIN45*ECOS2NA)
Y=ESIN13/(ESIN35*ECOS1NB)
FSAT=((X*3*COH(I)+(Y*3*COH(J))/(GAMMA*H))+TAN(RANG(I))*(A(X*GAMMAW)/(2*
GAMMA))+TAN(RANG(J))*(B-((GAMMAW*Y)/(2*GAMMA)))
PRINT #3, "FACTOR DE SEGURIDAD PARA LA CUNA (";I-2;"x";J-2;");"EN COND.
SATURADAS=";
PRINT #3, USING "###.###";FSAT:PRINT #3,
PRINT "FACTOR DE SEGURIDAD PARA LA CUNA (";I-2;"x";J-2;");"EN COND.
SATURADAS=";
PRINT USING "###.###";FSAT:PRINT #3,
FSEC=((X*3*COH(I))/(GAMMA*H))+((Y*3*COH(J))/(GAMMA*H))+(A*TAN(RANG(I)))+(B*
TAN(RANG(J)))

```

```
PRINT "FACTOR DE SEGURIDAD EN SECO PARA LA CUNA (";I-2;"x";J-2;)"
PRINT USING "###.###";FSEC
PRINT #3, "FACTOR DE SEGURIDAD EN SECO PARA LA CUNA (";I-2;"x";J-2;)" =";
PRINT #3,USING "###.###";FSEC:PRINT #3,;PRINT #3,
500 NEXT J
NEXT I
CLOSE
END
```