



Universidad de Oviedo



Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Trabajo Fin de Máster

Eduardo Gómez Calvo

Junio 2018

Máster Universitario en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica



Máster en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

Universidad de Oviedo



D. Eduardo Gómez Calvo, autor del Trabajo Fin de Máster titulado “Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)”, confirma que es un trabajo original y solicita su presentación en el Máster Universitario Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 15 de junio de 2018

Fdo. Eduardo Gómez Calvo

El Dr. Luis Alberto Pando González, Profesor Contratado Doctor del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo, confirma que ha tutelado el trabajo “Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)”, realizado por D. Eduardo Gómez Calvo, y autoriza su presentación y defensa como Trabajo Fin de Máster en el Máster Universitario en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 15 de junio de 2018

Fdo. Luis Alberto Pando González

A mis abuelos.

AGRADECIMIENTOS

Este Trabajo de Fin de Máster se ha conseguido realizar gracias al apoyo de diferentes personas, facilitándome los medios necesarios para poder llevarlo a cabo; y también, ya que sin ellas hubiese resultado imposible hacerlo de la manera tan completa como finalmente se ha conseguido:

- Primeramente agradecerle a Luis Alberto Pando González, Profesor del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo, por cumplir de manera muy amplia su labor de tutor, por la organización, su inestimable ayuda y su completa disposición para resolverme las dudas.
- A Vicente Gómez Ruiz de Argandoña, Profesor del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo, por su perseverante ayuda para la realización de ensayos de laboratorio.
- A Carlos López Fernández, Profesor del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo, por acompañarnos a campo para la instrucción del levantamiento de estaciones geomecánicas y la recogida de muestras.
- A Sergio Llana Fúnez, Profesor del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo e Investigador Principal del Grupo de Investigación Geocantábrica, por los gastos económicos asociados a las pruebas realizadas durante este trabajo.
- A Víctor Cárdenes Van den Eynde, investigador del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo por su colaboración en las pruebas de ultrasonidos y sus consejos para el día de mañana.
- A Jorge Fuertes Blanco, compañero de Máster, por su ayuda en el desplazamiento y compañía a los afloramientos.
- Finalmente, a mis amigos y a mi familia, que mostraron su apoyo durante la realización de todo el Máster, especialmente a mis padres que me dieron la oportunidad de poder venir a hacerlo.

¡Muchas Gracias a todos!

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	5
1.1.- ANTECEDENTES	5
1.2.- MARCO GEOLÓGICO	7
1.2.1.- Generalidades.....	7
1.2.2.- Estratigrafía.....	9
1.2.3.- Estructura	13
1.2.4.- Hidrogeología	15
1.2.5.- Interés extractivo.....	15
1.3.- Objetivos	19
2.- METODOLOGÍA	20
2.2.- Trabajo de campo	22
2.2.1.- Procedimientos.....	23
2.2.2.- Estaciones geomecánicas	25
2.3.- Trabajo de laboratorio	29
2.3.1.- Preparación de las muestras	30
2.3.2.- Ensayos	32
2.4.- Gabinete	34
3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
3.1.- Recopilación de datos	38
3.1.1.- Propiedades de la roca matriz	38
3.1.1.1.- Parámetros de identificación y estado	38
3.1.1.2.- Parámetros mecánicos	38
3.1.2.- Propiedades del macizo.....	38
3.2.- Caracterización del macizo rocoso	39
3.2.1.- Matriz rocosa	39
3.2.1.1.- Grado de meteorización.....	39
3.2.1.2.- Resistencia mecánica.....	39
3.2.2.- Análisis de discontinuidades	40
3.2.2.1.- Disposición.....	40
3.2.2.2.- Espaciado	53
3.2.2.3.- Continuidad	53
3.2.2.4.- Abertura.....	54
3.2.2.5.- Rugosidad.....	55

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

3.2.2.6.- Rellenos.....	56
3.2.3.- Densidad de fracturación.....	57
3.2.3.1.- Discontinuidades por unidad de volumen (J_v).....	57
3.2.3.2.- RQD.....	58
3.2.4.- Clasificación de macizos.....	59
3.2.4.1.- Calidad de los macizos.....	59
3.2.4.2.- Relaciones empíricas.....	59
3.2.5.- Parametrización de macizos.....	61
3.2.5.1.- Deformabilidad.....	61
3.2.5.2.- Criterio de rotura.....	63
3.3.- Caracterización de laboratorio.....	64
3.3.1.- Descripción e identificación.....	64
3.3.1.1.- Aspecto macroscópico.....	64
3.3.1.2.- Composición.....	65
3.3.1.3.- Aspecto microscópico.....	66
3.3.2.- Densidad y porosidad.....	69
3.3.3.- Rotura bajo carga puntual.....	70
3.3.4.- Velocidad de propagación de las ondas P.....	72
3.4.- Evaluación geotécnica.....	74
3.4.1.- Excavabilidad.....	74
3.4.2.- Estabilidad de taludes.....	75
4.- CONCLUSIONES.....	78
5.- BIBLIOGRAFÍA.....	81

RESUMEN

Ante la deficiencia de estudios científicos de carácter técnico para tratar exclusivamente las características geomecánicas y geotécnicas de la Formación Naranco, se realizó este Trabajo Fin de Máster como un estudio introductorio de investigación. Esta formación perteneciente al Devónico medio, aparece en el centro de Asturias y es fácilmente reconocible en campo debido al bandeo rojiblanco que presenta. Litológicamente está compuesta por una alternancia de areniscas y pizarras, centrándonos en este trabajo en las primeras.

Para llevar a cabo este trabajo, siguiendo una metodología reproducible en trabajos de más detalle que se puedan realizar de manera posterior, se tuvo que realizar inicialmente una revisión bibliográfica de antecedentes. De manera posterior se realizó el trabajo de campo para levantar las estaciones geomecánicas, aportando una novedad en este tipo de trabajos, que fue el de realizar la toma de fotos y su posterior procesado para la realización de modelos digitales de afloramientos. Se recogieron las muestras pertinentes y fueron trasladadas a laboratorio para la realización de diversos ensayos, primeramente para una identificación más precisa y seguidamente para su caracterización geomecánica tanto a escala de macizo rocoso, como a escala de roca matriz, observando que se podían diferenciar tres litotipos. Se calificaron según las clasificaciones geomecánicas más utilizadas y se evaluaron geotécnicamente.

ABSTRACT

Given the lack of technical scientific studies that would allow for an exclusive study of the geomechanical and geotechnical characteristics of the Naranco rock formation, this dissertation was carried out as an introduction to the investigation. This rock formation, formed during the Middle Devonian, is located in the heart of Asturias and can be easily recognised due to its red and white stripes. Lithologically speaking, the rock formation is made of alternating sandstone and slate rock. This study will focus on sandstone.

In order to carry out this study, a revision of previous literature had to be carried out first. The studies were carried out using an easily-replicated methodology that may be used in future, more detailed studies. After revising the literature, field research was carried out at the geomechanical stations. This research introduced a new methodology, which consists of taking photos and then processing these to create digital models of the outcroppings. The appropriate samples were collected and taken to the laboratory, where various studies were carried out. Firstly, they were identified more precisely. After this, they were classed according to their geomechanical properties on the rock mass scale as well as the rock matrix level. Three lithotypes were identified. They were classified following the most commonly used geomechanical classifications and they were geotechnically tested.

1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1.- ANTECEDENTES

Este manuscrito forma la memoria del Trabajo Fin de Máster (TFM) del Máster Universitario en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica que se imparte en la Facultad de Geología de la Universidad de Oviedo. En él se desarrollará un estudio introductorio sobre las propiedades geomecánicas y geotécnicas de la Formación Naranco (Fig. 1.1). Esta unidad ha sido estudiada desde muy variados puntos de vista, como puede ser el estratigráfico, mineralógico, económico, paleontológico, hidrogeológico, etc.; pero apenas ha sido tratada sobre sus características geomecánicas desde un punto de vista científico-técnico.



Figura 1.1.- Aspecto en campo de la Formación Naranco en la carretera que sube al monte Naranco (Oviedo).

Este trabajo abarca varios métodos de estudio, desde un recopilación bibliográfica que trate de las propiedades más puramente geológicas como puede ser características litológicas, estructurales, mineralógicas, hidrogeológicas; además de la localización de los afloramientos de la formación; para de manera posterior, desplazarse a esos afloramientos con el objetivo de levantar estaciones geomecánicas para la recogida de datos y la caracterización de los macizos rocosos, así como la recogida de muestras. Con ellas se realizan una serie de estudios, los cuales nos puedan aportar información, tanto su estudio microscópicamente, como su comportamiento frente a diversos ensayos geomecánicos. Y finalmente se realiza una

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

discusión de los resultados y evalúan de una manera geotécnica las posibles aplicaciones de los datos obtenidos.

La Fm. Naranco aflora en la parte central del Principado de Asturias. Aquí, el conocimiento sobre los valores y características geomecánicas de las litologías, tanto de las que afloran, como de las que se encuentran en el subsuelo, tienen un valor científico y económico muy importante debido a la orografía que presenta la zona. Esta, al lucir altas cumbres y angostos valles, la realización de obras públicas lineales, superficiales y subterráneas, para el desarrollo de vías de comunicación es muy compleja ya que se deben realizar túneles y viaductos, en cuyas obras de ejecución es crucial conocer las características de las litologías presentes.

1.2.- MARCO GEOLÓGICO

Es muy importante conocer en qué contexto geológico se encuentra la litología a estudiar, ya que con ello, se consigue una buena base con la que empezar a trabajar. No ha sido difícil acceder a la información ya existente sobre la formación, ya que hay multitud de estudios que tratan de esta litología a diferentes escalas. Al igual que llegar a este tipo de información no ha resultado difícil, sí que lo ha sido la síntesis de tanta información. Así como de acceder a los conocimientos más actuales.

Como se comentaba anteriormente, hay diferentes puntos de vista de estudio que hay que abordar en relación con esta litología, las cuales son las siguientes: temporal, en la que se realizará un breve repaso a los diferentes eventos por los que ha transcurrido la zona estudiada; tectónicamente, a lo largo del tiempo se han producido diferentes acontecimientos, los cuales son fruto de estudio; espacial, ya que la litología no aflora en sitios puntuales, sino que sigue una traza cartográfica debido a la tectónica; estratigráficamente, para saber qué relación tiene esa formación con las que tiene situadas a su base y a su techo; hidrogeológico, como ya se verá más adelante, es interesante saber desde este punto de vista este tipo de características, por si puede actuar como un nivel acuífero o como un nivel impermeable; y debido a su mineralogía, su interés extractivo como una litología de la cual se explotaba hierro.

En los siguientes subapartados, se tratará de exponer toda esta información, para tener un conocimiento bastante bueno de partida y poder comprender los resultados para su posterior discusión y obtener unos buenos resultados.

1.2.1.- Generalidades

La Fm. Naranco se encuentra en la zona central de Asturias, donde hay dos grandes grupos de rocas que se pueden diferenciar, por su edad y por su modo de afloramiento (Bastida y Aller, 1995): las primeras, paleozoicas, concretamente hasta las de edad prepérmica, las cuales ocupan zonas extensas que se caracterizan por afloramientos alargados y sinuosos que se ven afectados por frentes de cabalgamientos y pliegues; y las segundas, pérmicas, mesozoicas y cenozoicas, caracterizadas por afloramientos continuos que afloran en la cuenca de Gijón y Villaviciosa, están menos deformadas aunque presentan fallas de gran entidad. El grupo de rocas paleozoicas prepérmicas forman parte del Macizo Ibérico que fue intensamente deformado produciendo fallas y pliegues, además de metamorfismo y magmatismo, durante la orogenia Varisca en el Carbonífero, debido a la colisión de antiguas placas tectónicas dando lugar a Pangea. Este Macizo Ibérico está dividido en 5 partes (Lotze, 1945): Zona Cantábrica, Zona Asturoccidental-leonesa Zona Centroibérica, Zona de Ossa Morena y Zona Surportuguesa.

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

La zona de estudio se sitúa en el núcleo del “Arco Astúrico”, el cual se localiza en la Zona Cantábrica. Esta se caracteriza por tener los rasgos típicos de la zona externa de una cordillera, que son la deformación solo en los niveles más superficiales de la corteza, produciendo grandes cabalgamientos de “piel fina”, sin procesos de magmatismo ni metamorfismo. Estratigráficamente, se comprende como una alternancia de capas siliciclásticas y carbonatadas, que aunque presente algunas lagunas estratigráficas, es una serie bastante completa. Para poder observar la zona interna de la cordillera nos tenemos que desplazar hasta la Zona Asturoccidental-leonesa y la Zona Centroibérica. En ellas la deformación se produce en niveles más profundos, alterando la microestructura de las rocas, producido por fenómenos de magmatismo y metamorfismo importantes.

De manera más concreta, nos situamos en la Zona Cantábrica, la cual está dividida en varias zonas que presentan características geológicas diferentes (Julivert, 1967): Región de Pliegues y Mantos, Cuenca Carbonífera Central, Región de Mantos o Región del Manto, Picos de Europa y Región del Pisuerga-Carrión (Fig. 1.2). Y dentro de la Región de Pliegues y Mantos se distinguen, además, varias Unidades separadas por cabalgamientos, las cuales son: Unidad de Somiedo-Correcilla, Unidad del Sobía-Bodón y Unidad del Aramo. La Fm. Naranco se encuentra dentro de la Unidad de Somiedo, la cual se sitúa estratigráficamente entre la Fm. Caliza de Moniello, en la base (Emsiense-Eifeliense); y la Fm. Caliza de Candás, en el techo (Givetiense-Frasniense). La mayoría de los afloramientos devónicos se localizan en la parte central de la región formando una banda curvada de aproximadamente unos 30 km. de ancho, debido a la tectónica de la zona, marcando claramente el “Arco Astúrico”. Hacia el interior de este, la Fm. Naranco no está completa debido a la erosión.

Sobre estos materiales paleozoicos prepérmicos, se apoyan los materiales pertenecientes al Pérmico, Mesozoico y Cenozoico, los cuales representan la cobertera sobre los materiales de la etapa varisca, que se localizan en la parte central de Asturias. En el basamento varisco es difícil diferenciar la deformación varisca de la deformación alpina, pero no así en la cobertera, en la que se pueden distinguir dos fases. La primera fase, distensiva, comienza en el Pérmico y se prolonga durante el Mesozoico. Paleogeográficamente, se aísla la Placa Ibérica, y se produce la apertura del océano Atlántico, el golfo de Vizcaya y el mar Mediterráneo occidental. Como consecuencia, se generó una cuenca marina en la parte septentrional de la Península. La segunda fase, compresiva, se produce a lo largo del Cenozoico, debido a la colisión entre la Placa Ibérica con Europa. En la zona estudiada esto crea importantes fallas y la reactivación de algunas fallas variscas. Esto a su vez, produjo la desnivelación de bloques, lo que originó cuencas, principalmente lacustres. Esto provocó la generación de dos cuencas: la cuenca del Duero (cuenca de antepaís) y la Cuenca de Oviedo, esta última por la inversión tectónica de una de las fallas extensionales mesozoicas, la Falla de Llanera (Alonso y Pulgar, 1995).

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

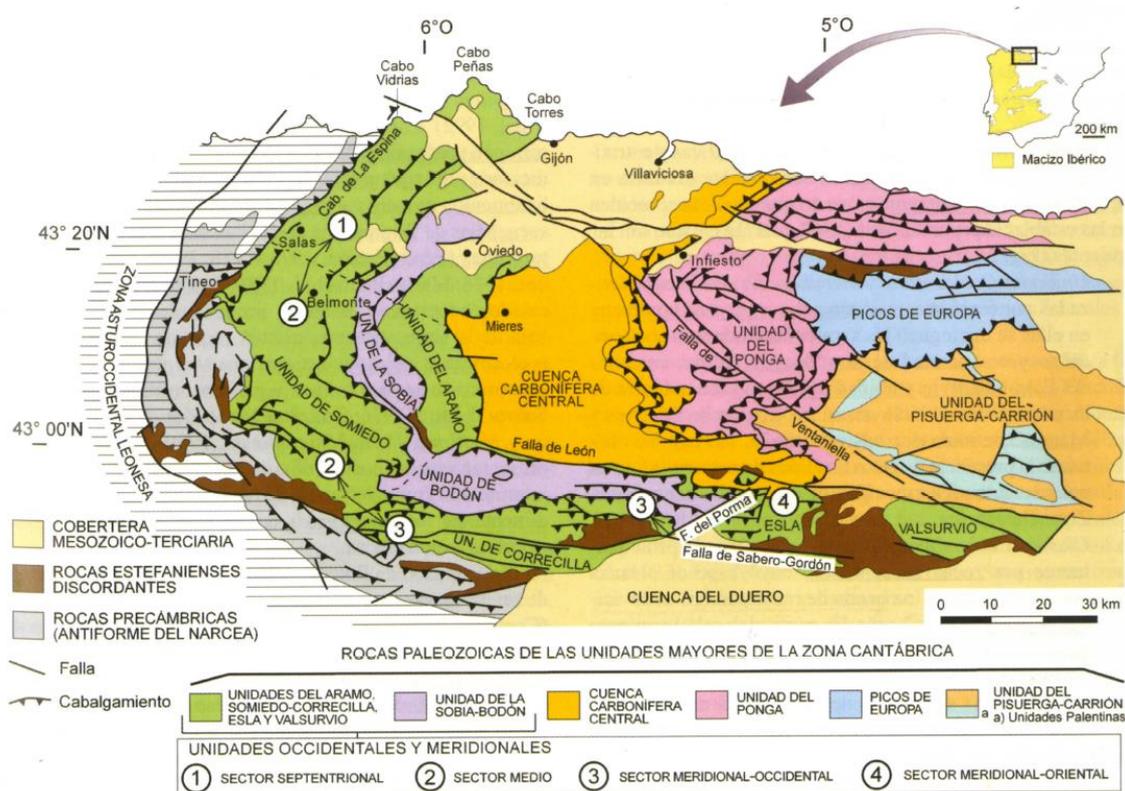


Figura 1.2.- División de la Zona Cantábrica (tomado de Vera, 2004).

1.2.2.- Estratigrafía

El origen del término Fm. Naranco se fecha en 1882, aunque no con esa denominación, fue Barrois quien dio el nombre de “Arenisca de *Gosseletia*”, siendo estudiada en la costa. Más de 30 años después, Adaro y Junquera (1916), modificaron el nombre a “Areniscas del Naranco” siendo definido el estratotipo en el monte del Naranco; aunque de manera equívoca, la adjudican una edad Femaniense del Devónico superior (Gutiérrez Claverol y Torres Alonso, 1995). Finalmente, Delepine (1928, 1932), le atribuyó la edad de Eifeliense-Givetiense del Devónico medio, gracias a la presencia de braquiópodos de dicha edad (Julivert *et al.*, 1974; Gervilla *et al.*, 1974). En la actualidad es llamada Fm. Naranco, aunque García-Alcalde (1995), señala que: “el nombre de esta formación es bastante equivoco, debido a que en la sierra del Naranco, al norte de Oviedo, solo aflora en parte, careciendo de techo”.

En el Devónico se producen grandes variaciones ambientales a escala global que provocaron importantes cambios en el nivel del mar, que se pueden conocer a través del estudio estratigráfico de las formaciones devónicas. Todos estos cambios que se van explicar a continuación, están representados en la Figura 1.3. Hacia el techo de la Fm. Nieva, correspondiente al inicio del Devónico inferior, se puede reconocer el “evento *Praguense*”, el cual consiste en un cambio de coloración de rocas oscuras a claras, lo que refleja una disminución de la materia orgánica; este evento se reconoce en otras partes del mundo. De

manera contemporánea, se produjo una renovación faunística, apareciendo calizas bioclásticas y parches arrecifales. Estos cambios hacen indicar un descenso rápido del nivel del mar. Posteriormente, a lo largo del Devónico inferior, se produce una transición litológica de dolomías de la Fm. Bañugues a calizas y pizarras de la Fm. La Ladróna, lo que hace indicar un periodo transgresivo, alcanzado la máxima profundidad durante el “evento *Daleje*”. La transición del Devónico inferior al Devónico medio, se produce mediante un cambio litológico de las calizas de la Fm. Moniello a las areniscas y pizarras de la Fm. Naranco, estas últimas, se sitúan hacia el techo de la formación. A escala global, en el mismo periodo, se produce la aparición de las pizarras negras, lo cual está enmarcado en el “evento *Jugleri*”. Cabe pensar que se produce un cambio de zonas arrecifales a zonas de transición, representadas por las areniscas, y de manera posterior a zonas profundas. Según el autor, la Fm. Naranco representa depósitos de tormenta entre las Fms. Moniello y Candás (representando, quizás, trazas de huracanes, ya que esta parte de la Península Ibérica, se encontraba en la zona tropical), que son plataformas carbonatadas y grandes edificios arrecifales. Inmediatamente después, en la parte superior del Devónico medio, se produce el “evento *Kacak-Otomari*”, el cual implica la transición de las pizarras de la parte superior de la Fm. Naranco a las calizas de la Fm. Candás. Esto implica un descenso de la diversidad orgánica existente. Hacia la mitad de la Fm. Candás, en la parte final del Devónico medio, se produce uno de los periodos transgresivos más importantes de este periodo, el cual se produjo dentro del “evento *Taghanico-Pharciceras*”. Ya en el Devónico superior, con la presencia de las areniscas de la Fm. Piñeres, y sobre todo con la brusca aparición de las pizarras en la parte superior de esta Formación, se sitúa el “evento *Kellwasser*”, el cual es un evento anóxico. De este evento no se puede lograr gran información, ya que por encima de la Fm. Piñeres se encuentra la laguna estratigráfica de edad prefameniense superior (García-Alcalde, 1995, 1996).

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

Estratigrafía del Devónico					
SERIE	PISO	LITOLOGÍA	COLUMNA	FORMACIÓN	NOTAS
	Devónico superior	Frasense	[Litología: Areniscas y pizarras]	Pirenes	Laguna estratigráfica Evento Kellwasser (evento anóxico) Evento Taghanico-Phaceloceras Transgresión Evento Kocak-Otomari (disminución diversidad org.)
	Devónico medio	Givetense	[Litología: Areniscas]	Candás	
	Eifelense	[Litología: Areniscas]	[Litología: Areniscas]	Naranco	Evento Jugleri (depósitos de tormenta)
	Devónico inferior	Emsense	[Litología: Areniscas]	Monistio	Calizas, calizas arcillosas y finos niveles pizarrosos
	Praguense	[Litología: Areniscas]	[Litología: Areniscas]	La Ladróna	Evento Daleje Transgresión
	Lochkoviense	[Litología: Areniscas]	[Litología: Areniscas]	Blafugues	Evento Praguense (disminución mat. org.) Regresión
				Nieva	Alterancia de calizas, dolomías y pizarras

Figura 1.3.- Columna estratigráfica del Devónico. La altura de las formaciones es aproximada a su espesor máximo. Basada en García-Alcalde (1995).

Según Gutiérrez Claverol y Torres Alonso (1995), la Fm. Naranco pertenece a los pisos del Eifelense y en menor medida al Givetense, representada por areniscas mayoritariamente, con pequeñas intercalaciones de niveles pizarrosos, que cada vez se vuelven más numerosos llegando a ser la parte más representativa hacia el techo de la formación. Presenta una potencia variable, alcanzando niveles máximos cercanos a los 500 metros; en los primeros centenares de metros, las areniscas presentan un color rojizo, mientras que hacia techo presentan colores verdosos debido a la clorita y a la palagonita, vidrio volcánico alterado.

Hacia la base, la formación refleja un bandeo característico de tonos rojizos y tonos claros, el cual fue denominado como “tigreado” por Llopis Lladó; estos primeros niveles presentan, además, crinoideos y braquiópodos. Según se sube hacia el techo de la formación, se van intercalando niveles pizarrosos de colores verdes, con los niveles areniscos previamente descritos, aunque con mayor fracción de granos de cuarzo. Presenta niveles muy

ferruginosos, lo que da color rojizo, y los niveles donde se concentra la mineralización pueden ser explotados. La textura de la mineralización es granular, los granos de cuarzo están envueltos por capas de hematites, y pudiendo llegar a crear oolitos ferruginosos debido a que algunos granos de cuarzo alcanzan grandes tamaños. También la textura observada puede ser pizarrosa, formando pequeñas láminas y escamas. Los fósiles encontrados en esta formación son: el lamelibranchio *Gosseletia devonica*, identificado por Barrois; los braquiópodos *Euryspirifer aff. supraspeciosus* por Lotze; *Euryspirifer paradoxus* y *Euryspirifer intermedius* por Schlotheim; *Cyrtina heteróclita* por Defrance; además de corales rugosos y crinoideos.

A la hora de definir la edad del estratotipo de la formación, gracias a los registros fósiles, se hace posible las dataciones relativas y la correcta adjudicación de las facies a sus formaciones. Esto sucede, con la Fm. Naranco en la Zona Cantábrica, concretamente en el Manto de Bodón, como se explica en el estudio de Alonso *et al.* (2008), el cual atribuye unas facies a la Fm. Naranco que anteriormente eran pertenecientes a la Fm. Nocedo y a la Fm. Ermita, del Devónico Superior. Los restos fósiles encontrados en las facies de plataforma somera corresponden icnofósiles de gusanos (*Planolites*, *Chondrites*) y artrópodos (*Teichichnus*, *Cruziana*); además de capas delgadas que contenían *ripples*.

Estas facies representan depósitos de playa, en los que aparecen intercalados depósitos de plataforma. Su ordenación no es aleatoria, sino que se caracteriza por parasecuencias de somerización de escala métrica, aunque también se pueden observar periodos de regresión. Hacia el techo de la formación se interpreta, en un nivel pizarroso, como la facies más profunda de manera relativa, la cual se formó por debajo del nivel de base del oleaje. Esto se deduce gracias a una macrofauna de Fenestélidos (briozoos), y en menor proporción braquiópodos y crinoideos. Estas oscilaciones transgresivos-regresivas pueden reflejar los ciclos astronómicos de Milankovitch de oblicuidad o precesión de los equinoccios, ya que corresponden con los máximos desarrollos arrecifales. Estos ciclos podrían observarse en la parte inferior de la Fm. Naranco (García-Alcalde, 2015).

Anteriormente, García-Ramos (1976 y 1977), mediante la definición de 24 icnogéneros obtuvo datos hidrodinámicos, batimétricos y paleoecológicos, además de la relación entre las distintas facies sedimentarias. El estudio se realizó en los acantilados de la región de Cabo Peñas, en los afloramientos nombrados “Moniello-Punta de la Cava” y “El Tranqueru”. También, concluye que el ambiente representado se sitúa por debajo del nivel de base del oleaje, debido a la presencia de icnogéneros tales como *Nereites*, *Helminthopsis*, *Gordia*, etc., los que indican ambientes más profundos (facies tipo *Flysch*).

Este mismo autor, García-Ramos (1978), diferencia dos modelos de sedimentación diferentes los cuales se superponen en la vertical. El primero de ellos es el de una sedimentación de una plataforma marina, en la cual se produce la llegada de materiales

siliciclásticos de zonas emergidas; debido al intenso oleaje las estructuras sedimentarias encontradas son barras arenosas y bioclásticas. El segundo modelo señala una menor cantidad y tamaño en los aportes recibidos de la zona emergida; se interpreta como una costa baja fangosa, debido a una intensa influencia de la marea, dejando tras de sí bancos arenosos.

En gran medida, todos los autores y sus estudios llegan a la misma conclusión con respecto a las facies que representa la Fm. Naranco, aunque presenten pequeñas diferencias.

1.2.3.- Estructura

La configuración estructural de las unidades que afloran en la zona de estudio está caracterizada por numerosos pliegues y cabalgamientos (Bastida y Gutiérrez, 1989). Los pliegues se pueden dividir en dos grupos: los primeros, más frecuentes, tienen un trazado longitudinal a los cabalgamientos donde frecuentemente los flancos orientales de los anticlinales son cortados por los cabalgamientos, indicando que son pliegues que se asocian a rampas frontales; y los segundos, los pliegues transversales, hacen que las capas y los cabalgamientos presenten cambios bruscos en sus direcciones. Así mismo, los cabalgamientos también se pueden dividir en dos grupos: el primero, los cuales son más numerosos y presentan un mayor desplazamiento, llegando a poner materiales cámbricos sobre materiales carboníferos; y el segundo grupo, son cabalgamientos tardíos y fuera de secuencia.

La Zona Cantábrica se localiza en el núcleo del “Arco Astúrico”, que marca las trazas cartográficas en el sector. Según Alonso y Pulgar (1995), la deformación producida por la orogenia Varisca se acomodó mediante cabalgamientos controlados por la heterogeneidad de las litologías, creando así niveles de despegues entre una litología y otra. Asimismo, también se crean rampas, cortando de manera oblicua a la estratigrafía. Este tipo de deformación recibe el nombre de “*thin-skinned*” o piel fina, anteriormente comentado, creando una geometría de escalera (pequeñas rampas y amplios rellanos). Esto, a su vez, genera pliegues asociados a estas rampas y rellanos, llamados “pliegues de flexión de falla”, creando así varios mantos los cuales se sitúan sobre cabalgamientos, como pueden ser: Manto de Somiedo, Manto de la Sobia, Manto del Aramo, Manto del Ponga (todos ellos frontales), Manto de Bodón, Manto de Correcilla (mantos laterales) donde se pueden apreciar en la Figura 1.4. Todos estos cabalgamientos parten de un mismo cabalgamiento basal, mostrando cabalgamientos imbricados; aunque también se desarrollan “*dúplex*”. Estos cabalgamientos presentan la dirección de transporte hacia el núcleo del “Arco Astúrico”, mostrando un desplazamiento acumulado de la unidad alóctona sobre la autóctona superior a los 150 km (Pérez-Estaún *et al.*, 1988).

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

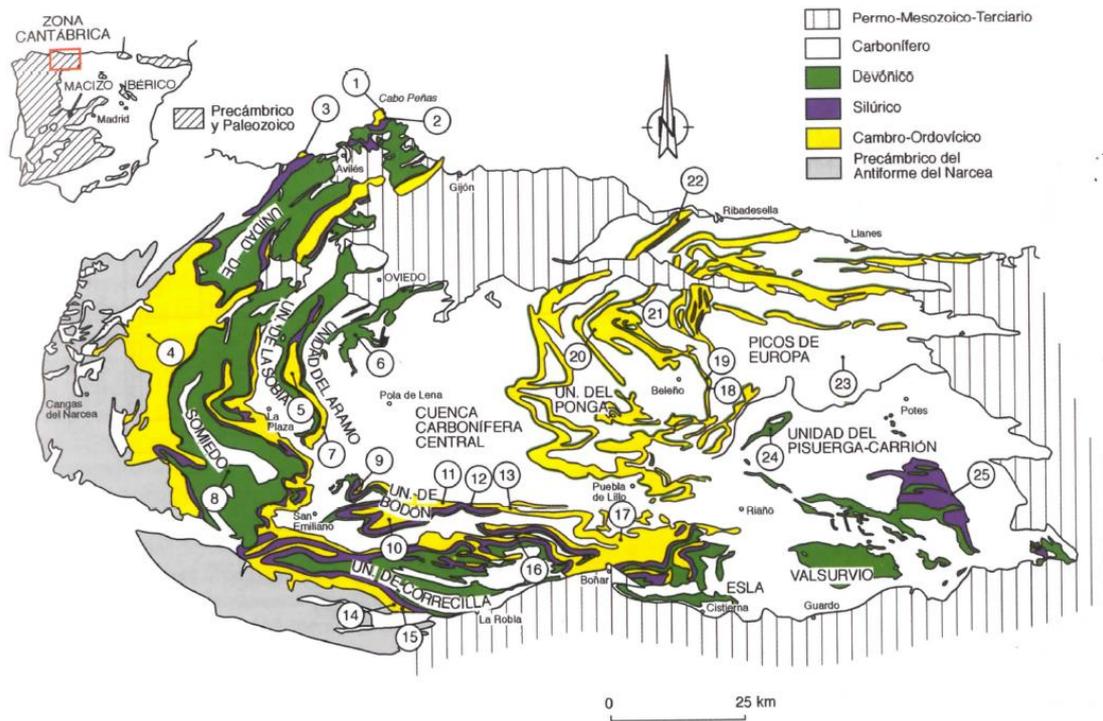


Figura 1.4.-Estructura y secuencia preorogénica en la Zona Cantábrica (Vera, 2004).

Posteriormente, durante la orogenia Alpina, se produce la elevación de la Cordillera Cantábrica debido a un cabalgamiento basal produciendo un pliegue de “flexión de falla”. Aunque este cabalgamiento no aflora en superficie, sí que es visible mediante perfiles sísmicos profundos. En el basamento se produjo una deformación interna que consistió en la reactivación de anteriores estructuras prealpinas, las cuales sufrieron un intenso reapretamiento de los pliegues haciendo que estos se verticalizaran, y una inversión tectónica de las antiguas fallas que se comportaban de manera extensional, y debido a esta etapa de deformación compresiva, pasaron a jugar de manera inversa, produciendo así un levantamiento, dando lugar a la Cordillera Cantábrica y un acortamiento en torno al 20%. La reactivación de las estructuras prealpinas se ve favorecida por la presencia de litologías competentes en el basamento; sin embargo, en aquellas zonas donde domina el basamento pizarroso, de menor competencia, se desarrollan pliegues por un proceso de “*buckling*”, de escala kilométrica. (Pulgar *et al.* 1999).

En menor medida se desarrollaron nuevas estructuras, las cuales consisten en fallas inversas que aparecen sobretudo en la parte frontal de la cordillera. Esto es debido a que las estructuras tectónicas prealpinas están dispuestas con un rumbo E-O perpendicularmente a la dirección de los esfuerzos, N-S (Espina *et al.*, 1996).

Otros estudios, como el de ya mencionado, Alonso *et al.* (2008), buscando las implicaciones paleogeográficas de la Fm. Naranco en el Manto de Bodón, aportan datos muy interesantes de la forma de apoyarse de la Fm. Naranco sobre la Fm. Moniello. Esta se

dispone con geometría de cuña, con 0,6° de acuñaamiento, presentando una potencia máxima cercana a los 500 metros en el extremo occidental de la Zona Cantábrica, la cual disminuye progresivamente hasta los 120 metros en el Anticlinal de Villasecino, y desaparece a unos 12 km en dirección NE, debido a la discordancia de la Formación Ermita, del Devónico Superior.

1.2.4.- Hidrogeología

Otra parte importante de estudio relacionada con la geología es la relación que tiene esta con el agua, es decir, la hidrogeología. Climatológicamente, nos encontramos en una zona cuya precipitación media anual se sitúa en 960 mm/año (medido en la ciudad de Oviedo) con temperaturas medias que oscilan entre 9,1 y 17,4°C; y 1062 mm/año (medido en el aeropuerto) con temperaturas comprendidas entre 9,9 y 17,1°C pudiéndose observar que las lluvias se reparten uniformemente a lo largo del año. Estos datos son extraídos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y son resultado de las medias entre los años de 1981 hasta el año 2010.

Ya dentro del Devónico como se comentó anteriormente, se comprende de una alternancia de calizas y dolomías, donde las calizas presentan una permeabilidad media, mientras que las areniscas, entre ellas la Fm. Naranco, se comporta como una litología impermeable a efectos prácticos (IGME, 1989).

1.2.5.- Interés extractivo

Haciendo un breve repaso a la historia mineral, el hierro ha sido extraído, y no solo en la Fm. Naranco, desde tiempos prehistóricos en Asturias, hecho que se sabe debido a los descubrimientos de utensilios, tales como puntas de lanzas, flechas, puñales, etc., en Caravia, Oscos y Coaña. También, gracias a la localización de escombreras y hornos se puede deducir una amplia distribución por todo el Principado: Navia, Lluarca, Vegadeo, Los Oscos (en la parte occidental), Quirós, Naranco, Llumeres (en la parte central), Covadonga y Sierra del Cuera (en la parte oriental). Fue en 1781, cuando Jovellanos y el Conde de Toreno, en su discurso a la “Real Sociedad Económica de Asturias” avisan de manera pionera y fehaciente sobre el desarrollo industrial y de la expansión de las ferrerías, y por tanto, de la minería del hierro. En el año 1835, se produce de manera oficial, la primera solicitud para la explotación de hierro en San Martín de Oscos, siendo Guillermo Schulz el encargado. Es a partir de entonces cuando se instalan más industrias siderúrgicas en la zona. Este gran desarrollo prosigue hasta alcanzar su máximo en las dos primeras décadas del s. XX, contemporáneamente a la Primera Guerra Mundial, alcanzo un pico máximo en el año 1910 de 215.196 toneladas de hierro extraído. De manera posterior, en la década de los 60, se produce otro pico de extracción algo mayor, concretamente en 1962, cuando se extrajeron 241.138 toneladas. Finalmente, es en el año 1978, cuando la última mina de hierro asturiana clausura, siendo la mina de Somiedo, a orillas del lago La Cueva, en Saliencia. En total, entre

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

los años 1861 y 1978, la producción mineral superó los 14 millones de toneladas (Gutiérrez Claverol y Luque Cabal, 2010).

Y en concreto la formación objeto de estudio ha sido explotada en numerosas localizaciones, las cuales son recogidas en la Tabla 1.1 (Fernández, 2013). Hay varias tipologías de génesis que se pueden relacionar con la Fm. Naranco, las cuales son las siguientes: de origen sedimentario pudiendo formar lo que se denomina “*ironstones*” u “*oolitic iron stones*”, que son depósitos sedimentarios oolíticos de hierro relacionado con las areniscas; y/o niveles estratoligados, relacionados con metamorfismo de contacto, afectando a niveles sedimentarios ricos en Fe (Gutiérrez Claverol y Luque Cabal, 2010; Gutiérrez Claverol y Torres Alonso, 1995).

Tabla 1.1- Explotación de Fe en la Fm. Naranco (Fernández, 2013).

Estación	Hoja 1:50.000	Huso	UTM X	UTM Y	Nombre de la explotación/ Paraje	Sector
452	14	30	274600	4833500	Mina La Mineral/ Luanco	E del Cabo Peñas
453	14	30	273520	4832150	Mina Montes de Nembro/ La Vellera	
454	14	30	275150	4829500	Mina El Regueral/ Regueral	
455	14	30	272050	4825250	Mina La Barrera/ La Barrera	
456	14	30	274000	4827950	Mina Piedeloro/ Raitán	
457	14	30	275650	4828250	Mina de Llavio/ Llavio	
458	14	30	277000	4826850	Mina Pinzales/ Prendes	
459	28	30	261520	4809020	Fuente del Hierro	Monte Naranco
460	28	30	264200	4810350	Brañes	
461	28	30	265200	4807400	La Peña	
462	28	30	267700	4807800	Naranco/ Pico Paisano	
463	29	30	270450	4809000	Mina Rescatada	
464	29	30	270000	4808850	Mina Abundancia	
465	29	30	269750	4808700	Mina Javonera	
466	13	30	260280	4823555	Orbón	Pillarno - Corias
467	13	29	740020	4822930	Serrona	
468	28	29	738180	4818540	Valdemora	
469	28	29	737340	4817300	Valdemora	
470	28	29	737340	4816750	-	Arlós - Otero
471	28	30	260200	4813300	Santullano	
472	28	30	259700	4814600	La Cabaña	
473	28	30	264450	4817600	Grupo Minero Recuerdo	
474	28	30	266250	4818450	Conchita/ El Carbayón	El Caleyó - Labarejos
475	52	30	263200	4799950	Monte Cerrado/ El Arbeyal	
476	52	30	264800	4800250	La Mina/ La Costera	
477	52	30	265100	4800450	Las Bornaes	
478	52	30	262250	4799250	El Rebollar/ El Charquín	Otros
479	52	30	267300	4799050	La Peña	
480	52	30	265100	4798350	Minas de Argame/ El Nacial	
481	52	30	258370	4795070	Las Xanas/ Cueva del Agua	
482	28	29	736600	4810150	Picaroso	

García-Ramos *et al.* (1987), afirma que: “*el hierro procede, mediante un proceso de meteorización subaéreo, de rocas volcánicas coetáneas de carácter básico. (...) Esto es debido a que el Cr posee contenidos anormalmente altos para una roca detrítica, y que exista una correlación positiva muy neta entre el Cr y el Fe*”.

Algunas de las que más impacto tuvieron fueron las Minas del Naranco, debido a su proximidad a la capital del Principado de Asturias, como según recoge Gutiérrez Claverol y Torres Alonso (1995), desde el siglo XVII, el monte Naranco ha sido objeto de estudio de interés minero, cuando los capitanes Jorge Ferrás de Vega y Alonso Balbin obtuvieron la licencia de Felipe IV para explotar plata, cobre y plomo. En el año 1874, se ve incrementada la extracción del hierro asturiano, cuyas minas activas eran, aparte de la del Naranco, las siguientes: Tapia, Artedo, Cabo de Peñas y Quirós. Posteriormente, en el año 1879, gracias a la creación de *Fábrica de Mieres, S.A.* impulsó la explotación de la mina del Naranco. En 1880, se inauguró un ferrocarril para ayudar al transporte del mineral con una longitud de 7,5 km desde la zona de Villapérez hasta San Pedro de los Arcos; junto con un ramal de 720 metros de longitud que comunicaba esta vía principal con la explotación de la mina del Naranco (Fig. 1.5). Los recursos extraídos durante los primeros 15 años de explotación, desde 1900 a 1915, fue de 426.000 toneladas.

A su vez, se puede diferenciar dos grupos mineros principales. El primero, el grupo del Naranco, en la que había tres explotaciones, que se situaban muy cerca del Pico Paisano (Fig 1.5). Los niveles donde se concentra el hierro son horizontales y fueron explotados mediante el método de cámaras y pilares. Es en 1902, cuando empieza a ser beneficiosa, explotando en la capa "Naranco" con un espesor de 1 a 1.5 metros y leyes entre el 38 y el 41% en Fe y un 35% en SiO₂. Finalmente, en 1916 cesa su producción. Se situaba alrededor de "El Pevidal-fuente Los Pastores". El segundo, el Grupo de Villapérez o Villaperi, donde la actividad extractiva fue más intensa. La formación se dispone de manera subvertical y fue explotado a través de varias galerías. Se comenzó a explotar de manera ilegal desde 1858, y de manera regulada desde 1879. La principal capa de explotación, se denominó "Piquete" que presenta una potencia de 1 a 2,5 metros con leyes entre el 40 y el 42%. Posteriormente se abandonó en 1907.

1.3.- OBJETIVOS

El objetivo principal de esta memoria es abordar la Fm. Naranco desde un punto de vista geológico-geotécnico, para determinar de manera introductoria las propiedades geomecánicas que la caracterizan.

De manera más detallada, los objetivos que se tratan de buscar en este proyecto son:

- Recopilar toda la información posible sobre datos geomecánicos que se hayan obtenido previamente a este trabajo sobre la Fm. Naranco.
- Explicar y llevar a cabo un metodología durante todo el trabajo fácilmente reproducible para que pueda repetirse en futuras investigaciones.
- Realizar trabajo de campo para caracterizar los macizos rocosos de la formación mediante el levantamiento de estaciones geomecánica para tener una fuente de información directa y realizar una tarea novedosa en este tipo de estudios como es el de crear modelos digitales de afloramientos. A su vez, recoger muestras en campo para poder estudiarla más en detalle.
- Realizar trabajo de laboratorio y gabinete con el fin de realizar una identificación más profunda mediante pruebas de identificación visual, tanto macroscópicas como microscópicas; además de obtener el quimismo gracias a la realización de fluorescencia y difracción de rayos X. También adquirir toda la información posible mediante ensayos de para determinar, densidad, porosidad, la resistencia bajo carga puntual y la velocidad de propagación de las ondas P. De esta manera se podrá diferenciar posibles litotipos dentro de la formación.
- Evaluar geotécnicamente los distintos macizos estudiados y aportar información sobre el comportamiento frente a la excavabilidad y estabilidad de taludes.
- Obtener una serie de conclusiones que se apoyen en toda la serie de estudios para que se puedan correlacionar entre sí.

2.- METODOLOGÍA

La metodología establecida para la realización de esta memoria involucra una serie de trabajos que implican, ordenados cronológicamente, los siguientes: (a) revisión de antecedentes sobre la zona de estudio; (b) búsqueda y recopilación de datos geotécnicos sobre la Fm. Naranco; (c) trabajo de campo; (d) trabajo de laboratorio; y (e) gabinete, realizando un análisis y discusión sobre los resultados obtenidos. A continuación, se desarrollará las tareas y los procedimientos seguidos.

A lo largo de este apartado se explicarán los procedimientos y métodos empleados para obtener los datos de análisis necesarios y para posteriormente tratarlos con el fin de obtener las conclusiones oportunas y así cumplir con los objetivos fijados de este proyecto. Como trabajo científico, se detalla todo el transcurso de la labor realizada de forma que resulte fácilmente reproducible.

La revisión de antecedentes sobre la zona de estudio y la búsqueda y recopilación de datos geotécnicos sobre la Fm. Naranco, se ha buscado en numerosos artículos científicos, trabajos académicos y libros que tratan sobre la unidad y su contexto; así como en diferentes informes geológico-geotécnicos para la obtención de datos sobre la formación.

En cuanto al trabajo de campo, corresponde también previamente, la búsqueda de posibles afloramientos susceptibles donde levantar las estaciones geomecánicas. Una vez hallados estos afloramientos, se obtendrán de ellos todos los datos en cuanto a caracterización geomecánica se refiere. Esta consiste en tomar datos acerca de sus características físicas básicas, como por ejemplo del frente rocoso, su identificación, el grado de alteración que presenta, además de las otras observaciones. También, habrá que tomar nota de la resistencia mecánica que presenta el afloramiento por los indicios que se muestran en el campo y gracias a un esclerómetro. Como último paso, se recoge en un estadillo todas las discontinuidades observadas y las características que presenten. Y a su vez, se seleccionan las estaciones geomecánicas más favorables para la recogida de muestras.

Con las muestras recogidas en campo, se les realizarán una serie de ensayos para obtener datos de diversas fuentes, lo que nos proporcionará un estudio más significativo, además de diferentes tipos de datos que se complementarán entre sí. Estos ensayos serán de carácter mecánico, además de analíticos para una mejor descripción de las muestras.

Una vez recopilados todos los datos, el trabajo de gabinete consistirá en conectar todos ellos. Con este paso se busca su comparación, dado que proceden de diferentes zonas que presentan distintas características. Además, será una manera de facilitar la comprensión de nuestra información. Finalmente, se sintetizarán unas conclusiones, gracias a los cálculos directos como a los análisis estadísticos, en cuanto a la calidad de la formación desde el punto de vista geotécnico, así como la posible problemática que presentaría en cada caso.

2.1.- REVISIÓN DOCUMENTAL

Inicialmente, se ha de disponer de información orientativa sobre las características de la Fm. Naranco. La revisión documental consiste en buscar y recopilar todos aquellos datos ya generados con antelación por otras personas o instituciones, de acuerdo a los objetivos que han sido planteados. Hay que distinguir dos tipos de revisión documental, una de carácter más geológico, apoyándonos en estudios de centros de investigación científica, como el IGME o la Facultad de Geología de la Universidad de Oviedo y otra de carácter más geotécnico, recurriendo a informes geotécnicos.

El primer tipo de recopilación se ha basado en innumerables artículos de revistas, numerosos libros y cuantiosas tesis doctorales; con el objetivo de informarse del contexto geológico donde se encuentra la Fm. Naranco: la estratigrafía, la tectónica en la que se ve envuelta, la estructura con la que aflora, su comportamiento hidrogeológico y su interés extractivo debido a la mineralización de hierro que posee.

El segundo tipo de revisión bibliográfica ha consistido en el intento de recopilación de datos previos de parámetros geomecánicos de la Fm. Naranco en diversos informes geotécnicos tanto para edificación, como para obras de ingeniería civil. Apenas se pudo recoger parámetros sobre esta formación, ya que como se especificó en el apartado de objetivo, este trabajo busca dar estos parámetros para así cubrir esta carencia existente. Se obtuvo un dato de resistencia a la compresión uniaxial de la roca, y con él, el método de excavación idóneo en la zona de emboquillado y el método de perforación del túnel correspondiente al “Estudio geológico-geotécnico para el anteproyecto de un túnel (La Medina)”. También, en el “Estudio geológico-geotécnico del término municipal de Santo Adriano. Memoria de investigación”, se obtienen valores medios del golpeo con martillo Schmidt (resistencia al rebote) y resistencia a la compresión simple. Con esto se dispone de unos valores de referencia acerca de la formación y se buscará una futura correlación con los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio.

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

2.2.- TRABAJO DE CAMPO

Para la caracterización de macizos rocosos en afloramientos de la Fm. Naranco, se ha llevado a cabo el levantamiento de varias estaciones geomecánicas siguiendo los procedimientos habituales de toma de datos de campo. Para ello, primeramente, mediante software SIG (ArcGIS) se cruzó información de las carreteras y la cartografía geológica de la Fm. Naranco. Después, observando en que tramos de las carreteras coincidían con la formación, se hizo uso de servicio online *Google Street View*, para juzgar la calidad de los afloramientos. Se seleccionaron de manera previa un total de hasta 40 afloramientos potenciales de ser estudiados, pero finalmente fueron escogidos 10, y en 3 de ellos se levantaron 2 estaciones geomecánicas, debido a que el volumen rocoso aflorante era lo suficientemente grande como para levantar más de una estación geomecánica, teniendo así un total de 13 macizos investigados (Tabla 2.1).

Tabla 2.1.- Datos generales de las estaciones geomecánicas levantadas.

Estación geomecánica	Coordenadas UTM		Localización	Concejo
	X	Y		
EG-4	257069	4811030	Carretera AS-234, desvío a Pereda	Las Regueras
EG-4 (2)	256995	4811081	Carretera a Pereda	Las Regueras
EG-7	274845	4833501	Calle Peroño, Gozón	Gozón
EG-10	260644	4826847	Carretera a Ferralgo, desde N-632	Castrillón
EG-11	259284	4821544	AS-237, al paso por Viescas	Illas
EG-11 (2)	259319	4821553	AS-237, al paso por Viescas	Illas
EG-14	252104	4818365	Cruce de AS-315 con AS-316	Candamo
EG-15	251791	4817825	AS-315, km 3	Candamo
EG-20	244523	4807769	AS-15, al paso por Santiago de la Barca	Salas
EG-26	263191	4797564	Estribo oeste de la presa de los Alfilorios	Morcín
EG-26 (2)	263166	4797523	Estribo oeste de la presa de los Alfilorios	Morcín
EG-39	264977	4798073	MO-5 hacia la presa de los Alfilorios	Morcín
EG-40	269138	4807520	Carretera del Naranco	Oviedo

Las localizaciones de estas estaciones geomecánicas se escogieron en función de varios criterios. El primero de ellos fue el factor litológico; debido a que la Fm. Naranco está representada, en líneas generales, por areniscas y pizarras, este trabajo se centra en la parte areniscosa. Otro factor fue el de la aptitud para poder levantar en ellos las estaciones geomecánicas, buscando así macizos con el mayor volumen rocoso aflorante. La accesibilidad que presentaban estos afloramientos fue otro factor a tener en cuenta, así como los demás factores en relación a la logística, como puede ser la capacidad de trabajo que se pueda tener en los afloramientos, ya que todos ellos se encontraban en taludes de carreteras y en algunos de ellos eran imposible estudiar el afloramiento debido a la gran afluencia de vehículos.

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

En la Figura 2.1, se expone en un mapa donde quedan representadas las localizaciones de los puntos donde se levantaron las estaciones geomecánicas. Como se puede observar en la figura, las estaciones cubren la parte centro-norte de Asturias.

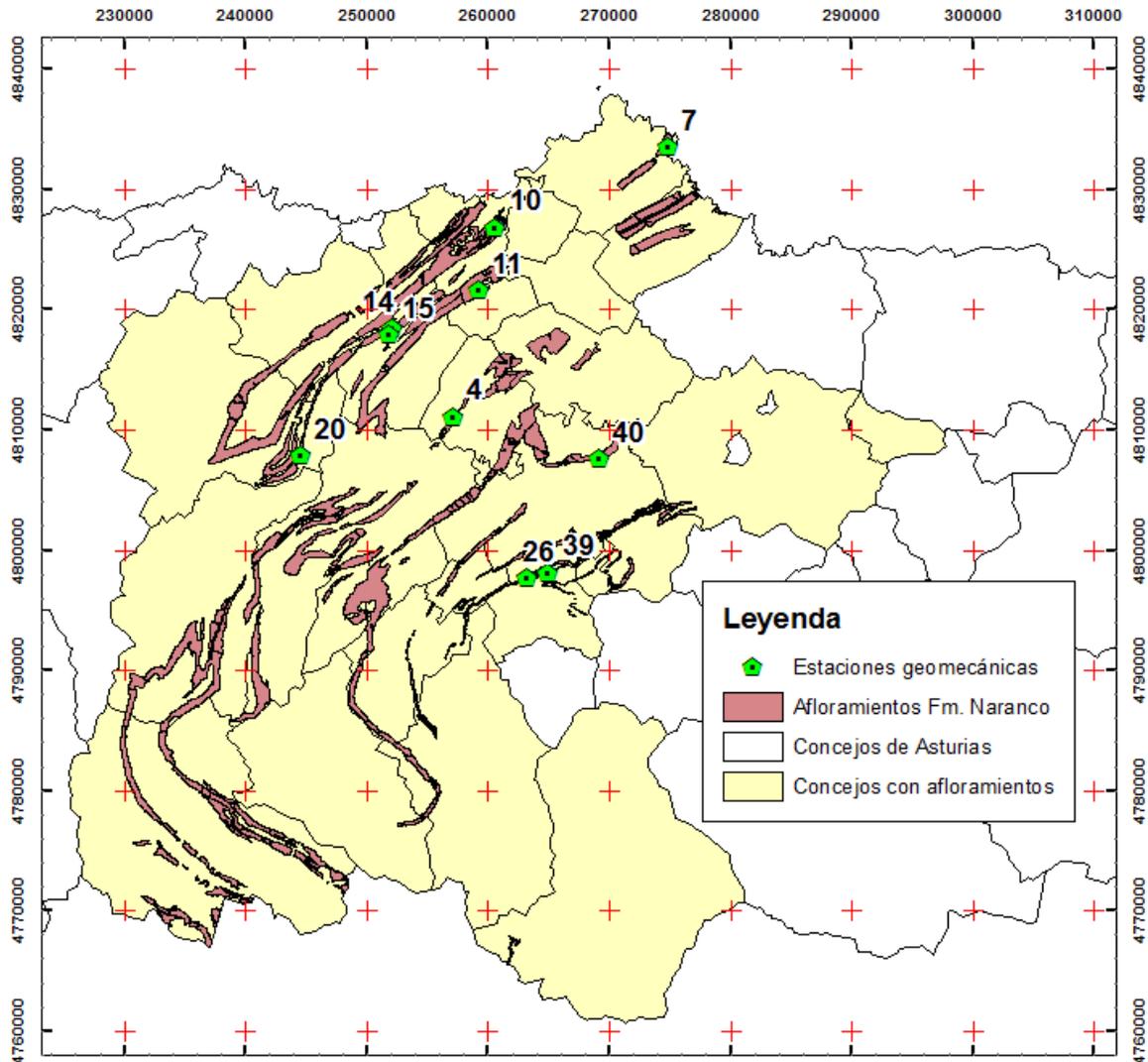


Figura 2.1.- Mapa donde se observa los afloramientos de la Fm. Naranco y las estaciones geomecánicas levantadas.

2.2.1.- Procedimientos

En cada una de las estaciones geomecánicas se realizaron las observaciones pertinentes y fueron tomadas diversas medidas, convenientemente anotadas en estadillos preparados para ello, en los que se tomaron los siguientes datos:

- Datos principales: estación, fecha, horario y condiciones meteorológicas.
- Localización: coordenadas UTM, cota, datum, huso y hoja MTN50.
- Frente rocoso: tipología, orientación, pendiente, altura, anchura y signos de inestabilidad.

- Recubrimiento: naturaleza, espesor y vegetación.
- Toma de imágenes: panorámica general 360°, fotografía convencional, pares estereoscópicos y adquisición para MDA.
- Identificación: litologías principal y secundarias, fábrica y naturaleza, anisotropía y orientación, apreciación de color y código según la carta de color Munsell.
- Alteración: grado de meteorización de la matriz rocosa según las clases de referencia que establece la ISRM (1981), presencia y tipo de meteorización física y/o química.
- Determinación indirecta de la resistencia a compresión simple de la roca matriz de dos formas:
 - Cualitativa, utilizando el martillo de geólogo en función de la necesidad del número de golpes necesarios para fragmentar la roca.
 - Cuantitativa, mediante el golpeo con un martillo Schmidt de tipo L. Se procede efectuando 20 impactos sobre una superficie de roca no alterada, estando separados los puntos de golpeo al menos una distancia de ancho equivalente al diámetro del émbolo. De los valores de rebote obtenidos, posteriormente se calcula el máximo, mínimo, promedio, mediana y moda. Con el valor promedio del rebote permite, junto con el peso específico de la roca, estimar un valor de resistencia a compresión uniaxial de manera gráfica (Miller, 1965) o mediante la siguiente fórmula matemática:

$$\log \sigma_{ci} = 0.00088 \times \varepsilon \times R \times \gamma + 1.01$$

Siendo σ_{ci} = resistencia a compresión simple de la roca matriz (MPa); ε = constante de humedad (0,96 en muestra seca y 1,00 para muestra húmeda); R = índice de rebote; γ = peso específico de la roca (kN/m^3).

- Descripción de las discontinuidades identificadas:
 - Tipo de plano (estratificación, diaclasa, falla, etc.).
 - Medida de orientación y buzamiento de las discontinuidades.
 - Espaciado, continuidad, abertura, rugosidad (JRC), rellenos (composición y resistencia), meteorización, filtraciones y resistencia de la pared (JCS) para cada discontinuidad.
- Medida de la fracturación:
 - Número de discontinuidades por unidad de volumen (J_v).
 - *Rock Quality Designation* (RQD) obtenido indirectamente a partir de J_v mediante la expresión de Palmström (2005):

$$\text{RQD} = 110 - 2,5 \cdot J_v \text{ para } 4 \leq J_v \leq 44$$

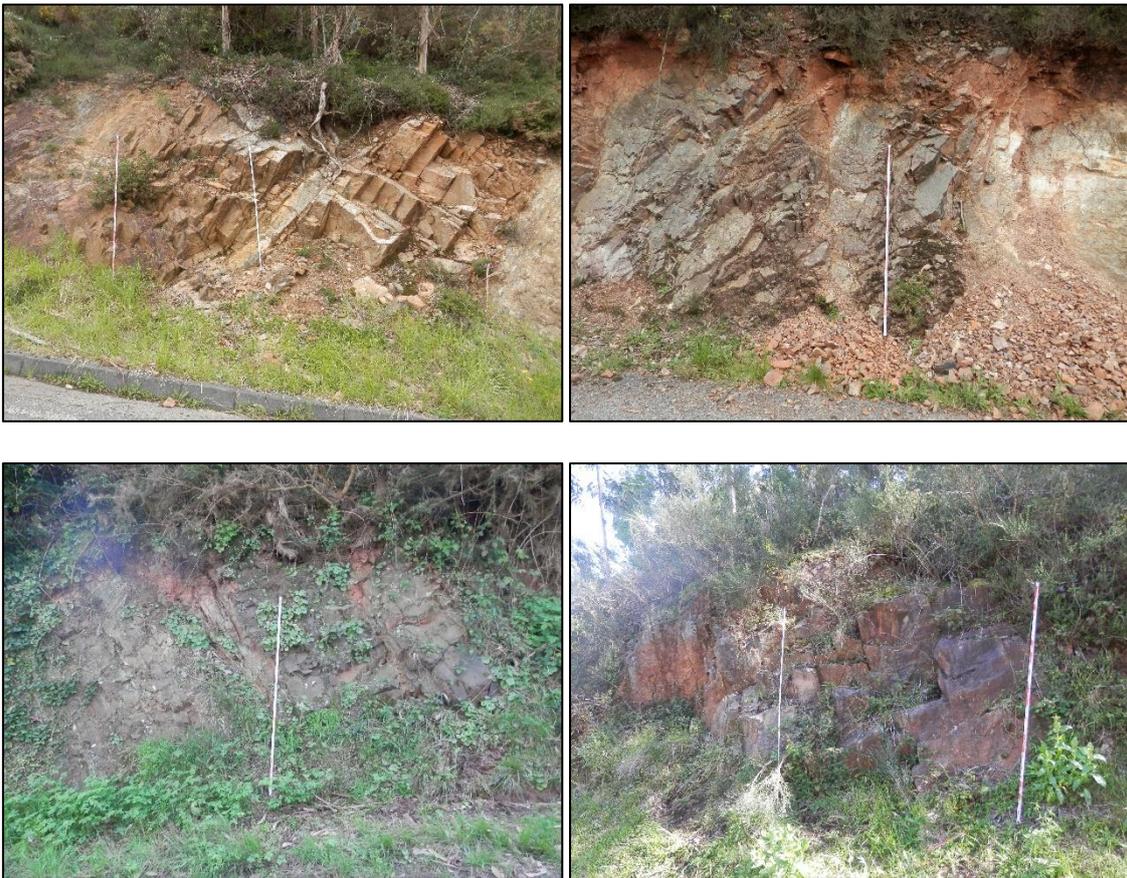
Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

- Cuantificación de la calidad del macizo rocoso según las clasificaciones:
 - *Geological Strength Index* o GSI (Marinos y Hoek, 2000).
 - *Rock Mass Rating* o RMR (Bieniawski, 1989).
 - Q (Barton *et al.*, 1974).

2.2.2.- Estaciones geomecánicas

Una vez seleccionados los distintos afloramientos de la Fm. Naranco, se fue a campo a la localización de cada uno de ellos para así levantar en ellos las estaciones geomecánicas. Las coordenadas UTM fueron obtenidas mediante la aplicación para *Smartphone* GPS Status & Toolbox (v. 8.0.170) A su vez, se recogieron muestras, se etiquetaron y se coleccionaron debidamente para evitar su extravío, con el fin de poder estudiarlas en laboratorio. Los afloramientos donde se han llevado a cabo cada una de las estaciones geomecánicas se pueden observar en la Figura 2.2. Estas imágenes corresponden a las fotografías convencionales y nos dan unas primeras impresiones del aspecto del macizo rocoso de la Fm. Naranco.



Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica





Figura 2.2.- Afloramientos donde se han llevado a cabo el levantamiento de estaciones geomecánicas. Ordenadas por el número de la estación de izquierda a derecha y de arriba abajo. La escala de referencia tiene 2 m.

Además de fotos convencionales, se efectuó en todos los afloramientos una panorámica general de 360°, mediante la aplicación para *Smartphone* Google Cámara Cardboard (v. 1.0.0.185305832) para ilustrar mejor la ubicación del afloramiento en el entorno. También, se hizo captura con pares estereoscópicos mediante la aplicación para *Smartphone* 3DSteroid (v. 3.41) para poder visualizar el afloramiento con apariencia tridimensional de forma rápida en gabinete. Y el paso más innovador es el de realizar un Modelo Digital de Afloramiento (MDA) y para ello se empleó la técnica fotogramétrica *Structure From Motion* (SfM). Consiste en realizar un número elevado de fotografías horizontales y enfocando todas al mismo punto, pero tomadas en semicírculo alrededor del frente rocoso. La metodología en este caso ha sido el de hacer dos semicírculos, uno más cercano y el otro más lejano al afloramiento, para así obtener más definición y a la vez cubrir más volumen rocoso. Cada semicírculo, dependiendo del tamaño del afloramiento, conlleva un total de alrededor de 20 fotografías tomadas por una cámara compacta Olympus modelo SZ-14 y una resolución de 14 Mpx, por lo que en total cada MDA está compuesto de unas 40 fotografías. Con este material se construye posteriormente la nube de puntos.

Para posteriormente poder escalar y orientar los MDA, en las fotografías ha de colocarse un jalón que nos indique la escala vertical, y conocer una distancia en escala

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

horizontal y el rumbo de la medida. Para ello se ha utilizado siempre un flexómetro de escala de 2 metros de longitud que se colocaba de manera vertical, y en caso de que no se pudiese colocar en esta posición, se medía la inclinación y el rumbo. Anotando estos datos, y creando los MDA, que se tratará en su apartado correspondiente, se corroborará que el modelo creado está correctamente escalado.

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

2.3.- TRABAJO DE LABORATORIO

En total se recogieron 7 bloques de roca (Fig. 2.3): 3 procedentes de la EG-4, 2 de la EG-14 y 2 de la EG-26. De este material se obtuvieron las muestras destinadas a pruebas de identificación y ensayos mecánicos. Primeramente se llevó a cabo un reconocimiento macroscópico mediante lupa binocular, y fue posible examinar 6 láminas delgadas (grosor de 30 μm) para su observación mineralógica y textural mediante microscopía óptica (Tabla 2.2).



Figura 2.3.- Material rocoso extraído de los afloramientos. De izquierda a derecha y de arriba abajo: bloque 1, bloque 2, bloques 3 y 4, y bloques 5, 6 y 7. La regla de las fotos inferiores tiene una longitud de 40 cm.

Tabla 2.2.- Probetas sacadas para cada estudio realizado en laboratorio.

	Localización	Testigos $\varnothing 35\text{mm}$	Carga Puntual		Láminas delgadas	Densidad y porosidad	Difracción y Fluorescencia	Notas
			Bloque	Testigo				
Bloque 1	EG-26	12	24	36	4	3	2	
Bloque 2		9		22		3		
Bloque 3	EG-14							Muy fracturado
Bloque 4		1		1		4	1	
Bloque 5	EG-4	9		25	1			
Bloque 6		3		7		3		
Bloque 7		6		15	1			

Además como se detalla en la tabla, se consideró conveniente determinar la composición química de las muestras espectrometría de fluorescencia de rayos X con un equipo Philips PW2404; también se investigó la mineralogía a través de difracción de rayos X con un equipo Philips X' PERT PRO. Los estudios fueron llevados a cabo en las instalaciones del Departamento de Geología y los Servicios Científico-Técnicos de la Universidad de Oviedo.

2.3.1.- Preparación de las muestras

Como se planificó la realización de ensayos de carga puntual, también conocido como PLT, en la modalidad de romper bloques, se procedió a la preparación de las muestras. Mediante sierra de corte, se cortaron prismas de roca de manera que fueran adecuados a las dimensiones relativas que exige la norma UNE 22950-5:1996, procurando obtener así, el mayor número posible de bloques para cada muestra (Fig. 2.4). Después se introdujeron en estufa a 60 °C durante al menos 24 horas para eliminar la humedad que pudieran presentar, sobretudo la aportada por el agua de refrigeración durante el corte. En total, fueron preparadas 24 muestras, y antes de ensayarlas se midieron sus dimensiones y se pesaron, obteniéndose unas medidas alrededor de 40x30x25 mm dando un volumen promedio de 30 cm³, para calcular de manera orientativa su densidad; con todas las medidas se calculó un valor promedio de 2,40 g/ cm³.



Figura 2.4.- Probetas tipo bloque para carga puntual. Escala: 40 cm.

De la misma manera para el mismo ensayo, se procedió a la preparación de muestras ejerciendo la modalidad de testigos en carga de tipo axial. Con los bloques recogidos en campo se perforaron testigos con corona de 35 mm de diámetro y en algunos de estos bloques se tuvo que realizar un corte para poder crear un superficie lo suficientemente plana para que

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

la máquina sacatestigos pudiera atacar lo más perpendicular a esta. Las probetas se obtuvieron dividiendo mediante la sierra de corte los testigos, con las medidas oportunas para el cumplimiento de la norma UNE 22950-5:1996. Después se tomaron las medidas y se pesaron en condiciones ambientales para calcular su densidad para posteriormente meterlas en un horno a 60°C durante al menos 24 horas, para eliminar la humedad que pudieran presentar y una vez secas, se volvieron a pesar con el objetivo de poder estimar la densidad en condiciones secas. En total se obtuvieron 40 testigos de alrededor de 8 cm de largo, de los cuales 28 se obtuvieron perpendiculares a la estratificación y 12 se obtuvieron paralelos a la estratificación (bloque 1). En total se consiguieron sacar 106 probetas, 70 perpendiculares a la estratificación y 36 paralelas a esta (Fig. 2.5).



Figura 2.5.- Probetas pertenecientes al bloque 1 preparadas para el ensayo de carga puntual tipo testigo (ensayo axial).

También se prepararon muestras para la determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total según la norma UNE-EN 1936. Para ello se cogieron un total de 12 muestras que fueron secadas al horno de 60 °C durante al menos 24 horas y luego pesadas, comparando este peso con uno tomado en los días posteriores para poder comprobar si las muestras han perdido toda la humedad y su peso se ha estabilizado. Además fue necesario obtener mediante molido 3 muestras de 10 g cada una para completar el ensayo mediante el método del picnómetro (Fig. 2.6). Estas tres muestras corresponden al bandeo blanco y al bandeo rojo característico de la Fm. Naranco, y a una tercera muestra donde no se aprecia el bandeo.



Figura 2.6.- Picnómetros con las muestras molidas para determinar la densidad real y la porosidad total.

2.3.2.- Ensayos

Como se comentó en el apartado anterior, tras haber eliminado la humedad de las muestras mediante el secado en horno, dado que es un dato interesante y utilizable numéricamente como referencia, se estimó la densidad seca de las muestras; a pesar de que se dispuso de ensayos específicos bajo norma para su determinación. Para su realización se utilizó la volumetría, anteriormente citada, de los bloques y mediante una báscula digital (con precisión de miligramos) se calculó su masa. Además para contar con mayor precisión se realizó el ensayo de la densidad real y aparente, el cual también nos aporta la porosidad abierta y total. Para ello, hubo que meter las muestras en una cámara de vacío para extraer de ellas todo el aire y a continuación, siguiendo en condiciones de vacío, introducir agua destilada para que se introdujera en los poros (Fig. 2.7a). A continuación se realiza la pesada hidrostática y el peso saturado de las rocas, y a través de unas formulas, se calculan los parámetros a determinar.

Antes de cortar los testigos para preparar las probetas destinadas a los ensayos de carácter destructivos, se realizaron medidas con un equipo de ultrasonidos Proceq Pundit PL-2 (v. 200), al objeto de obtener las velocidades de llegada de las ondas P. Estas medidas se realizaron en condiciones de humedad ambiental y en condiciones secas, después de haber estado en un horno a 60 °C durante al menos 24 horas, para poder obtener las medidas y observar si hay alguna diferencia entre ellas (Fig. 2.7b). Para realizar las pruebas se coloca cada transductor (500 KHz) en cada cara plana de los testigos y se mide el tiempo que tarda en llegar las ondas para cada testigo. Sabiendo las longitudes de estos, se puede conocer las velocidades de propagación de las ondas P para cada testigo.



*Figura 2.7a (izquierda).- Muestras en agua destilada en condiciones de vacío.
Figura 2.7b (derecha).- Equipo de ultrasonidos junto con los testigos obtenidos.*

Las pruebas de punzonamiento se llevaron a cabo con un equipo de carga puntual digital Controls 45-D0550/D bajo la norma UNE 22950-5:1996 (Fig. 2.8). Antes de

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

ensayarlas, se anotó en cada muestra las posibles discontinuidades que presentaban y pudiesen favorecer la rotura, y se ensayaban perpendiculares a la estratificación. En la base y en el techo de cada muestra se dibujaba la mediatriz como referencia para colocar las puntas.



Figura 2.8.- Máquina de carga puntual con una probeta tipo bloque.

2.4.- GABINETE

Como último paso en lo que a metodología se refiere, se integran todos los datos bibliográficos recopilados y los datos de laboratorios obtenidos sobre la roca matriz, todo ello junto con la información obtenida de los valores de las caracterizaciones de campo, con el fin de determinar las correlaciones entre las variables y los parámetros resistentes a escala de macizo rocoso para que sirvan como referencia representativa de los macizos estudiados.

El trabajo a realizar en el gabinete presenta varios frentes que hay que abordar en los que destacan dos. El primero de ellos es el proceso de elaboración de los MDA, cuyo objetivo es el de la aplicación de las nuevas técnicas a este tipo de trabajos y poder comprobar las medidas tomadas en campo con los resultados obtenidos mediante estos modelos. Y el segundo, realizar las proyecciones estereográficas de las discontinuidades medidas en los afloramientos estudiados en campo.

En cuanto a la proyección estereográfica, se utiliza el programa Rocscience Dips (v. 6.0) para representar todas las discontinuidades medidas en las estaciones geomecánicas. Gracias a este programa se pueden observar y distinguir de manera muy visual qué discontinuidad pertenece a cada familia, ya que en campo a pesar de que la mayoría de las discontinuidades son muy ortogonales entre sí, en algunos casos costaba discernir a que familia pertenecía cada junta. Para cada estación geomecánica, se representa una proyección estereográfica particular diferenciando en todas ellas la estratificación de las diferentes familias de diaclasas; excepto en dos, en la EG-11 y en la EG-39, debido a que estaban más o menos brechificados y no se podía observar ni distinguir los planos de la estratificación de los planos de las diaclasas.

Con respecto a la elaboración de los MDA conlleva varios pasos. El primero de ellos es el de crear una nube de puntos para virtualizar el afloramiento. Para ello se empleó el programa VisualSFM (v.0.5.26) (Fig. 2.9a). Después con el archivo generado por este programa, se utiliza el software Meshlab (v. 2016.12) para editar la nube de puntos (Fig. 2.9b). Esto consiste en primer lugar en comprobar que se ha generado correctamente, y tras ello recortar las zonas con anomalías y la vegetación presente en este. Una vez eliminados los puntos que no interesan y delimitado espacialmente el MDA, se efectuó el escalado del modelo tomando como referencia el jalón. Posteriormente se orientó cada modelo en el espacio, para lo cual se tuvo en cuenta la posición relativa de los jalones en el campo. Finalmente, con el programa VGRS (v. 2.10), se pueden realizar medidas de distancia, medidas de planos indicándonos dirección de buzamiento y buzamiento (Fig. 2.9c). Una vez realizado este paso, se pueden representar los resultados en proyección estereográfica y compararlos con las proyecciones realizadas con Rocscience Dips.

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

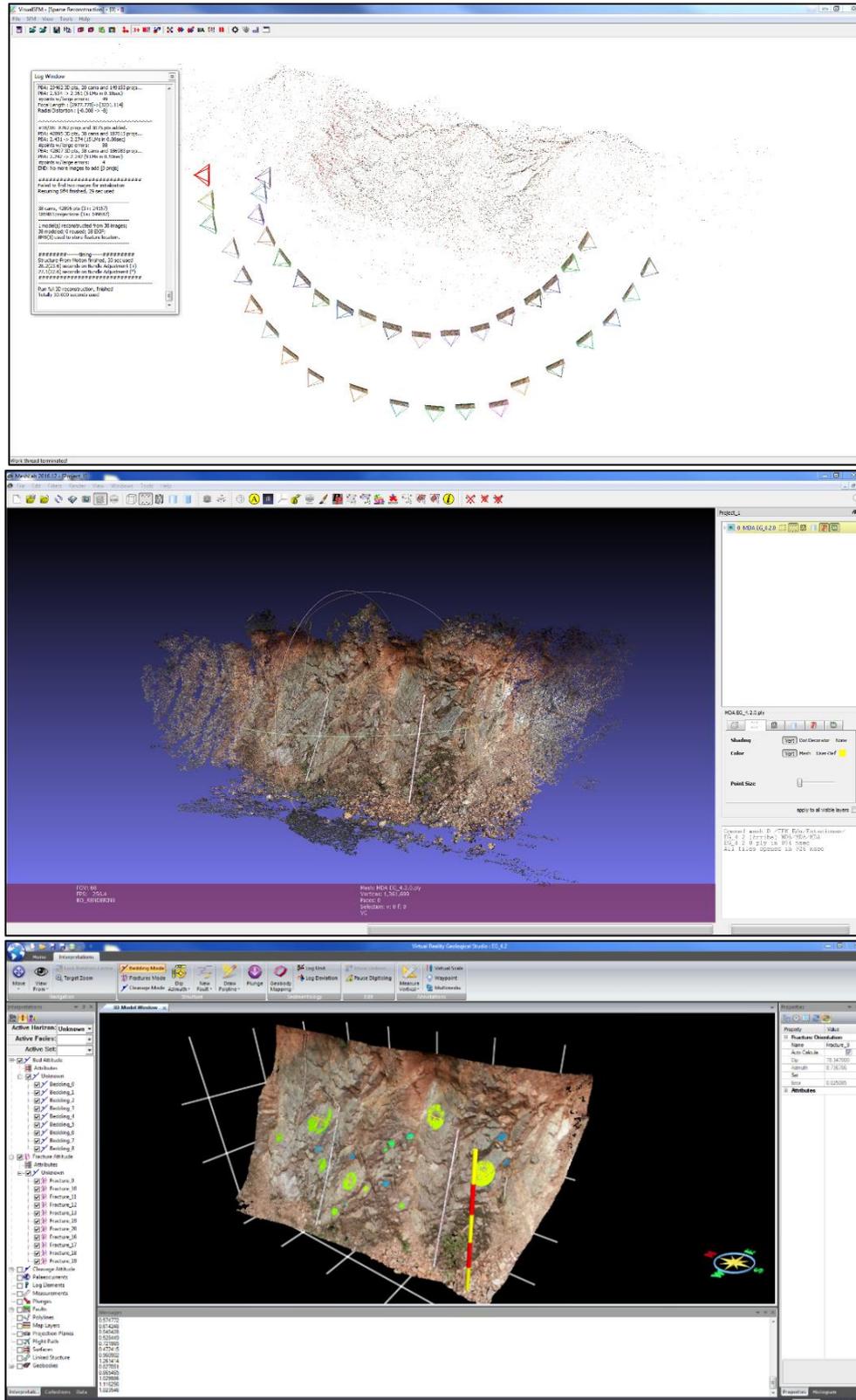


Figura 2.9a (arriba).- Captura de pantalla del programa VisualSFM. Se puede apreciar la nube de puntos creada y las localizaciones desde donde se tomaron las fotografías en campo.

Figura 2.9b (medio).- Captura de pantalla del software Meshlab. Se puede apreciar ya el MDA en un paso previo al recorte de zonas sin interés para el estudio.

Figura 2.9c (abajo).- Captura de pantalla del programa VGRS. Puede apreciarse el MDA recortado y orientado. Se aprecia también las medidas realizadas sobre el propio MDA y una escala virtual (2 m).

Finalmente, para la parametrización geomecánica de los macizos rocosos se recurre a diversas propuestas recogidas en la bibliografía técnica, y al software Rocscience RocLab (v. 1.033), que hace uso del ampliamente utilizado criterio de rotura de Hoek & Brown (Hoek *et al.*, 2002) para correlacionar los datos obtenidos. La obtención de los parámetros por diferentes vías y procedimientos permite además la comparación de manera numérica, actuando con mayor criterio en el momento de utilizar esta información.

Simultáneamente, se abordan las cuestiones básicas relativas a la aplicación directa de los parámetros geotécnicos obtenidos, tanto de la roca matriz como de los macizos rocosos. Estos parámetros son: la excavabilidad de los macizos rocosos y la estabilidad de los taludes en roca en los afloramientos investigados de acuerdo con los mecanismos de rotura habituales evaluados mediante proyección estereográfica.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez recopilados todos los datos obtenidos de las diversas fuentes, tanto bibliográficos como los propios realizados en campo y en laboratorio, se exponen en este apartado con el objetivo de buscar valores estadísticos relevantes. Y de manera posterior, poder realizar una discusión entre ellos para los futuros resultados.

Debido a que la cantidad de datos geotécnicos obtenidos a partir de la recopilación bibliográfica son mínimos, solo los podremos utilizar como datos de referencia y su comparación con los datos obtenidos. El siguiente apartado se centrará en la exposición de los resultados obtenidos mediante la labor en campo, detallando todos los apartados y componentes de las estaciones geomecánicas que se han realizado en cada uno de los afloramientos inspeccionados. En la tercera parte de este apartado se centrará en la exposición de los resultados obtenidos de los ensayos realizados en el laboratorio, donde en su correspondiente sub-apartado se detallarán los valores obtenidos. A partir de estos, ya en la última parte, se estiman unos valores de manera propia de la resistencia y de la capacidad de aguantar esfuerzos de la matriz rocosa de la Fm. Naranco para cada uno de los afloramientos.

Con este trabajo se tiene la finalidad, gracias a través de la recopilación como de la generación de nueva información, con la idea de que ambas metodologías sirvan para lograr un trabajo más completo, de obtener un documento que actúe como guía para cualquier persona o entidad que necesite información sobre esta formación (hasta ahora carente), de gran importancia geotécnica para la región. Es por ello que con los datos obtenidos se ha interpretado posibles aplicaciones geotécnicas como la excavabilidad o la estabilidad de taludes.

3.1.- RECOPIACIÓN DE DATOS

La recopilación de los datos previos puso de manifiesto desde el principio la escasez de datos geotécnicos disponibles para esta formación, ya que solo se pudo contar con dos estudios geotécnicos en los que se trataba la Fm. Naranco. Además esta, al presentar dos tipos litológicos como pizarras y areniscas, y en los documentos investigados no especificar muy bien a cuál de ellos pertenecen los datos, resulta aún más difícil su interpretación. Se describen a continuación los parámetros analizados, centrándonos primeramente en las propiedades de la roca matriz.

3.1.1.- Propiedades de la roca matriz

Este subapartado recoge la información recopilada de la Fm. Naranco sobre las propiedades de la roca matriz, centrándonos primeramente en los parámetros de identificación y estado y posteriormente en los parámetros mecánicos.

3.1.1.1.- Parámetros de identificación y estado

En uno de estos dos estudios se trata los ensayos de identificación, pero no se puede saber con certeza cuáles de ellos se han realizado para la Fm. Naranco, ya que no se especifica y además, se citan ensayos tanto para suelos como para rocas. Estos son: petrografía, rayos X, porosidad, densidad, absorción y compresión simple. En el otro estudio en el que se aporta información sobre la caracterización geomecánica no se comenta nada de la identificación.

3.1.1.2.- Parámetros mecánicos

Se adquirieron un total de 10 datos de resistencia a compresión simple, que van desde 5,00 hasta 107,87 MPa obteniéndose un promedio de 50,75 MPa. Además, los valores promedios obtenidos de rebote esclerométrico de tres series son: 48,7, 50,8 y 41,5.

3.1.2.- Propiedades del macizo

Las recomendaciones dadas por los estudios de donde se ha recopilado esta información dice, en uno de ellos, que el método óptimo de excavación en la zona de emboquillado estudiada sea mediante perforación y voladura. Por su parte, el otro estudio, que el método óptimo para la perforación del túnel sería mediante tuneladoras, minadores y/o perforación y voladura. Estos materiales pueden presentar problemas de desprendimientos en la clave y de deslizamientos en los hastiales dependiendo del buzamiento, suelen presentar circulaciones de agua fisurales y su abrasividad es de media a elevada. Se determina además, que la capacidad portante es de alta a muy alta y que la pendiente de los taludes que se puedan generar en esta formación sea de 1H/5V.

3.2.- CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO

En los siguientes subapartados se detallarán y discutirán todos los resultados obtenidos a partir de la toma de datos en campo en los macizos rocosos estudiados. Primeramente nos centraremos en la matriz rocosa, el análisis de discontinuidades, la densidad de estas, la clasificación del macizo y su parametrización.

3.2.1.- Matriz rocosa

En esta primera parte del estudio entramos a analizar las características concretas del material que conforma el macizo rocoso, centrándonos en el grado de meteorización y la resistencia mecánica que presenta, con el fin de aportar una valoración inicial de su calidad geotécnica.

3.2.1.1.- Grado de meteorización

Utilizando la clasificación del grado de meteorización de la ISRM (1981), la roca matriz de los macizos investigados varía entre los grados II (ligeramente alterado) a IV (altamente meteorizado). Este grado de meteorización va asociado sobre todo a la densidad de fracturación; en general, los grados más bajos destacan por tener menos fracturas en comparación con la estación geomecánica que presenta el mayor grado de meteorización, ya que este se encontraba más brechificado.

3.2.1.2.- Resistencia mecánica

Como anteriormente se comentó en el apartado de metodología, la resistencia que presenta la roca matriz en los diferentes afloramientos estudiados se calificó mediante dos procedimientos. Como se puede comprobar existe correspondencia entre el golpeo con el martillo de geólogo y los resultados del rebote del esclerómetro (Tabla 3.1). Las matrices rocosas, quedan por tanto divididas en 4 categorías, desde roca blanda (que se quedan marcas al rayar con el martillo) hasta roca muy dura (se fractura con muchos golpes de martillo).

Tabla 3.1.- Resistencia de la roca estimada en las estaciones geomecánicas.

		EG-10	EG-20	EG-26	EG-26 (2)	EG-4	EG-39	EG-4 (2)	EG-7	EG-11 (2)	EG-14	EG-15	EG-40	EG-11
Apreciación cualitativa		Muy dura (muchos golpes)	Dura (+ 1 golpe)				Mod. Dura (1 golpe)						Blanda (punta de martillo)	
Martillo Schmidt	Rebote (R)	50	47	45	47	43	43	33	32	29	45	45	42	20
	σ_c (Mpa)	101	88	80	88	72	74	47	44	39	82	81	69	26
	ISRM (1981)	II (ligeramente alterado)				III (moderadamente meteorizado)						IV (altamente meteorizado)		

3.2.2.- Análisis de discontinuidades

En esta segunda parte de los resultados de los estudios geomecánicos de campo se exponen las descripciones de las discontinuidades encontradas de todos los afloramientos estudiados en su conjunto. Analizaremos la disposición, el espaciado, la continuidad, la apertura, la rugosidad y los rellenos de estas.

3.2.2.1.- Disposición

En total en todas las estaciones geomecánicas levantadas se tomaron más de 200 medidas de orientación y buzamiento de las discontinuidades encontradas. Como se comentó anteriormente, para cada estación geomecánica, se realizó una proyección estereográfica diferenciando la estratificación de las diaclasas, excepto en dos estaciones que no se pudieron distinguir. Por regla general, las medidas obtenidas para cada familia son muy parecidas entre sí, facilitando de esa manera la adjudicación de cada discontinuidad con la familia a la que pertenece. Y en las que no eran así, gracias a la proyección estereográfica, queda de manera evidente, diferenciadas. En las siguientes figuras están representadas las proyecciones generadas mediante el programa Rocscience Dips además de las que se realizaron con VRGS a partir de los MDA, pudiéndose observar que en líneas generales encajan (Figs. 3.1 a 3.13).

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

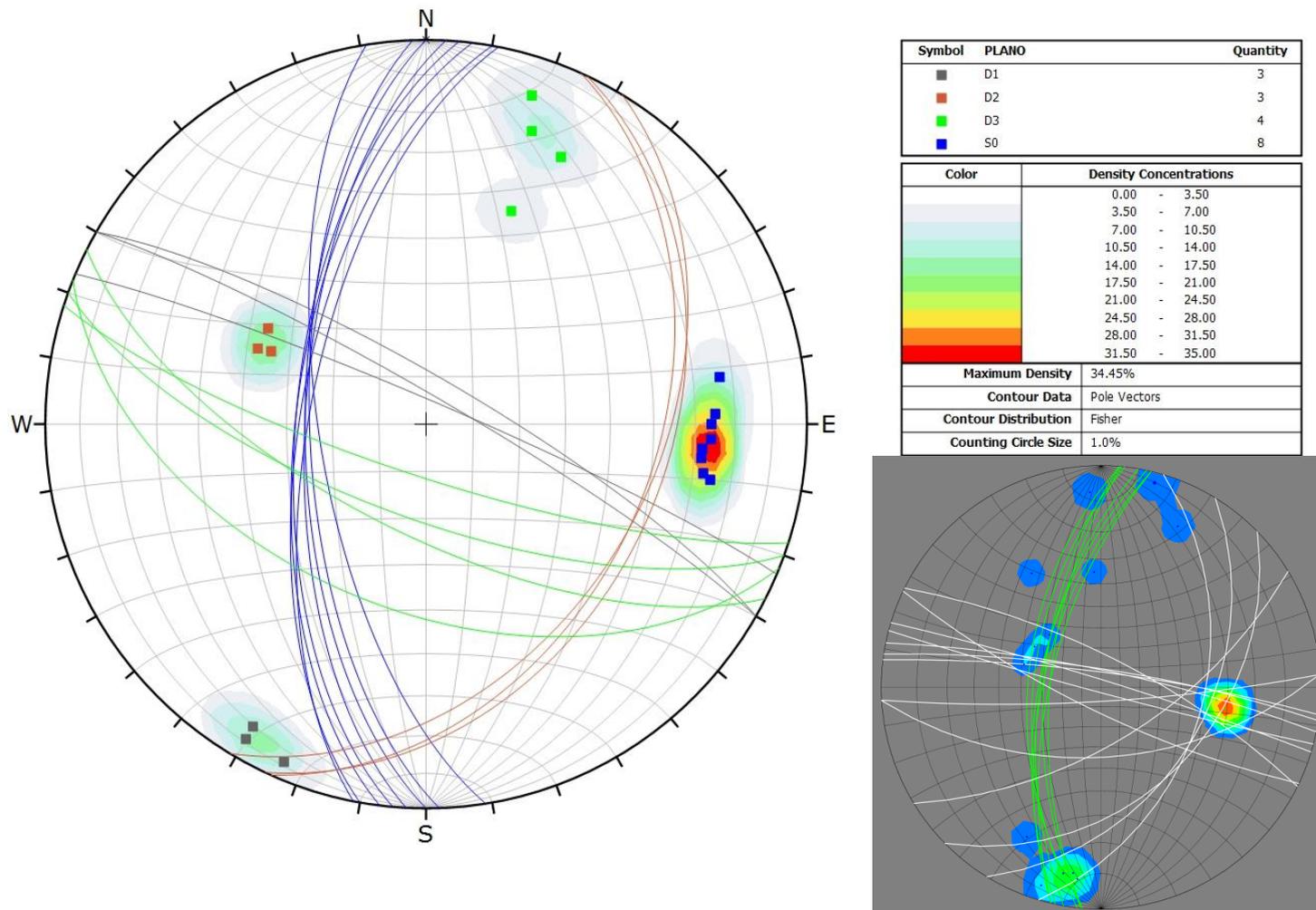


Figura 3.1.- Proyección estereográfica de la EG-4, y su comparación con la proyección estereográfica realizada con las mediciones del MDA.

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

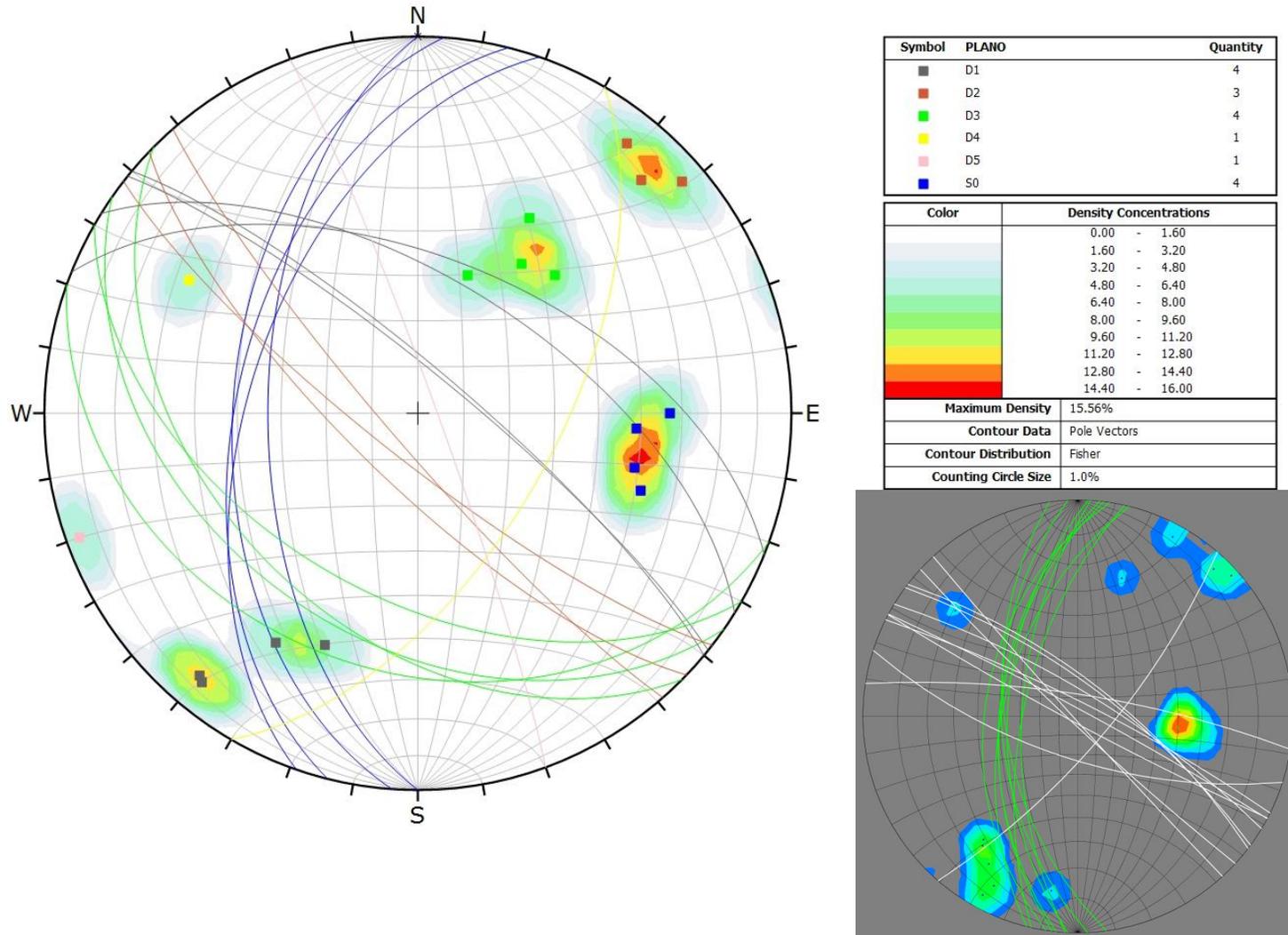


Figura 3.2.- Proyección estereográfica de la EG-4.2 y su comparación con la proyección estereográfica realizada con las mediciones del MDA.

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

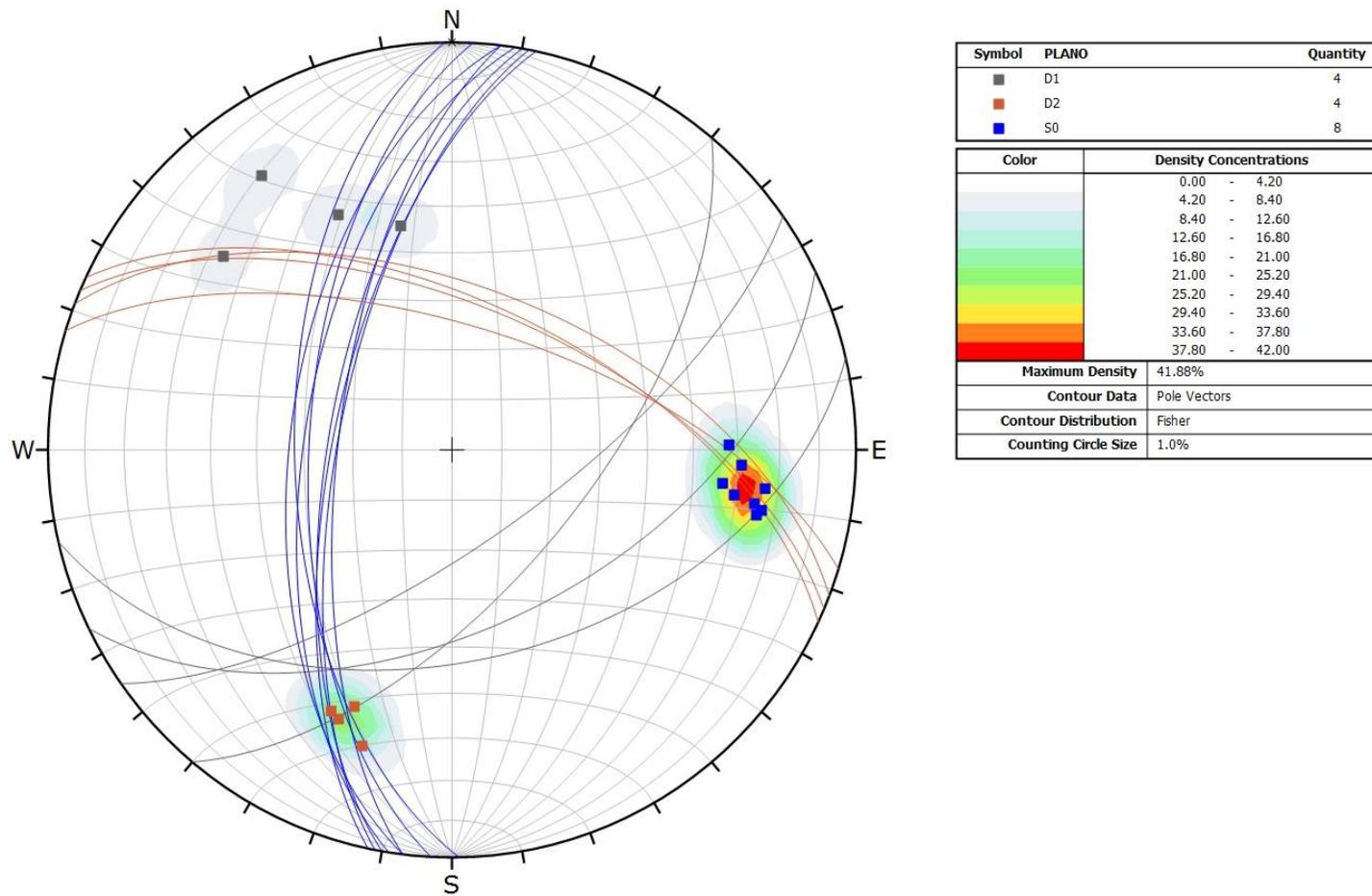


Figura 3.3.- Proyección estereográfica de la EG-7.

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

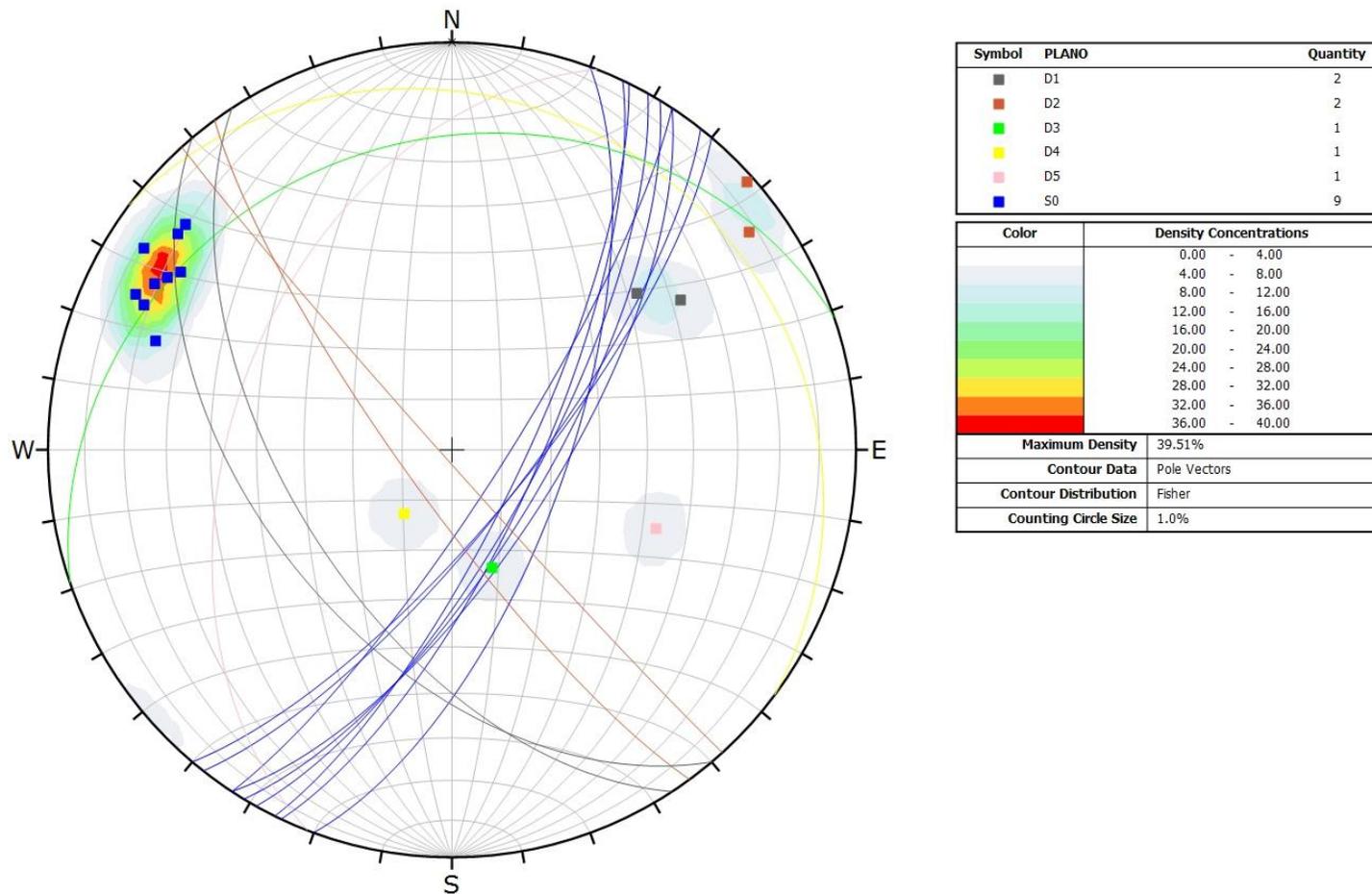


Figura 3.4.- Proyección estereográfica de la EG-10.

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

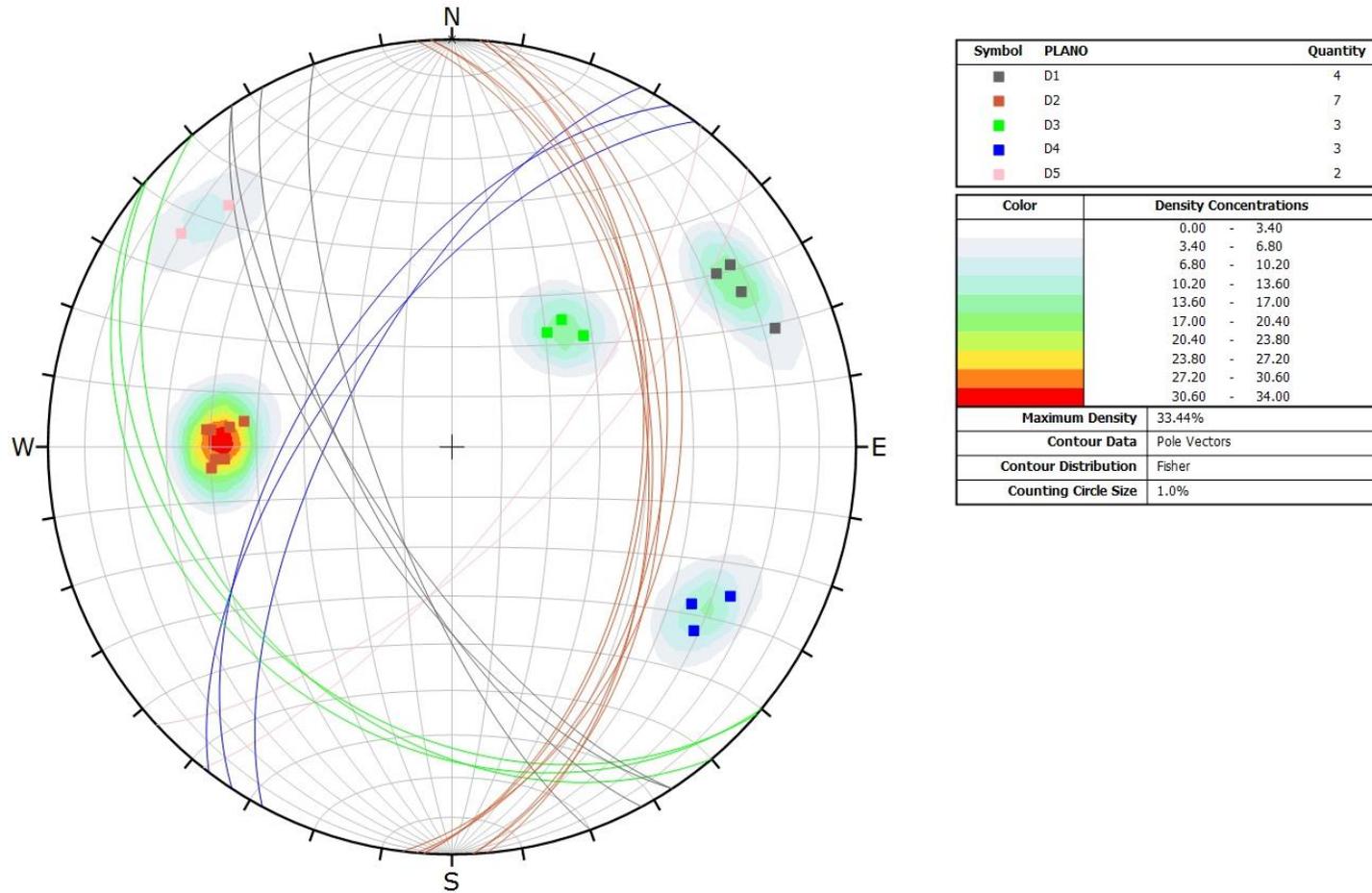


Figura 3.5.- Proyección estereográfica de la EG-11.

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

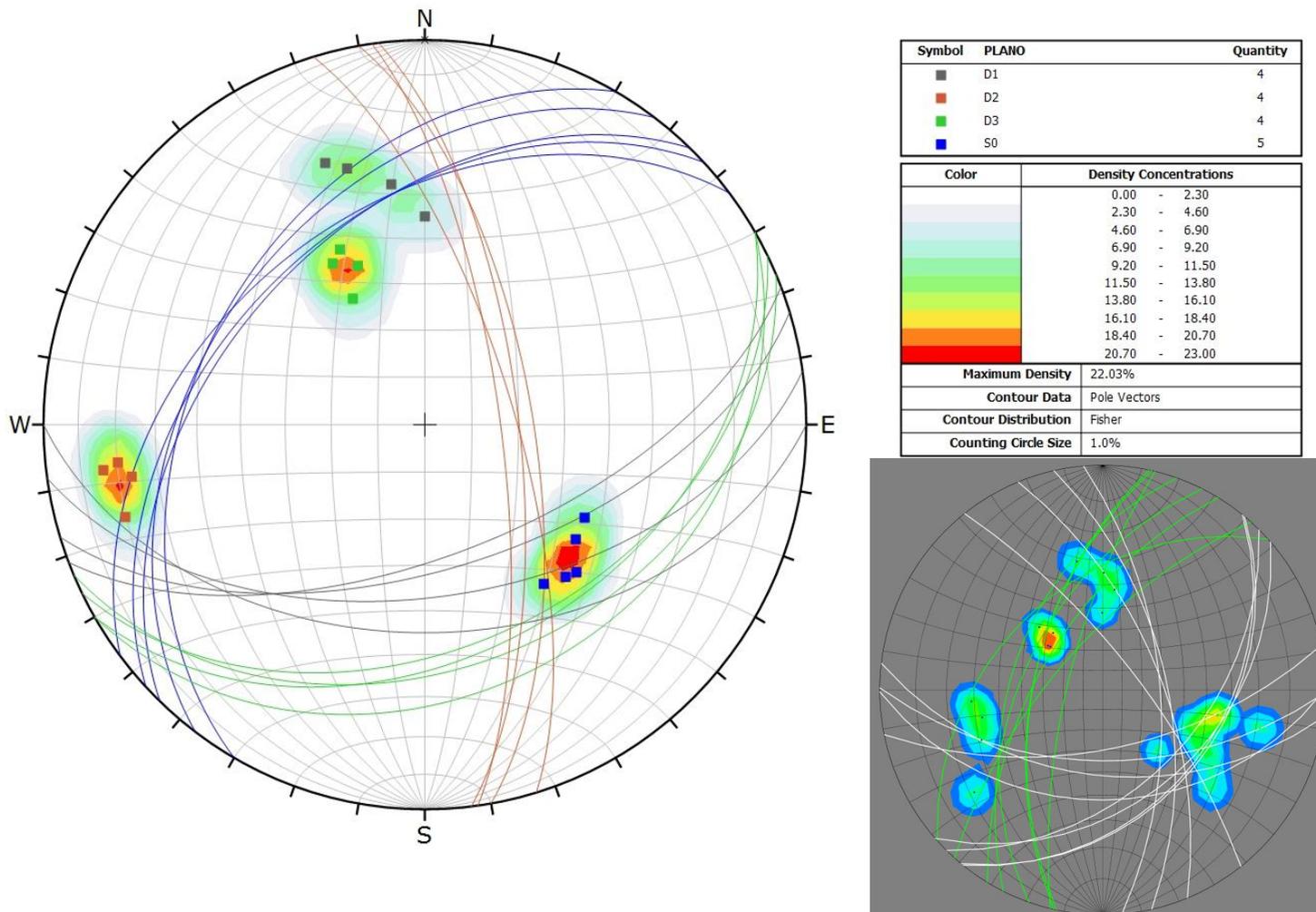


Figura 3.6.- Proyección estereográfica de la EG-11.2 y su comparación con la proyección estereográfica realizada con las mediciones del MDA.

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

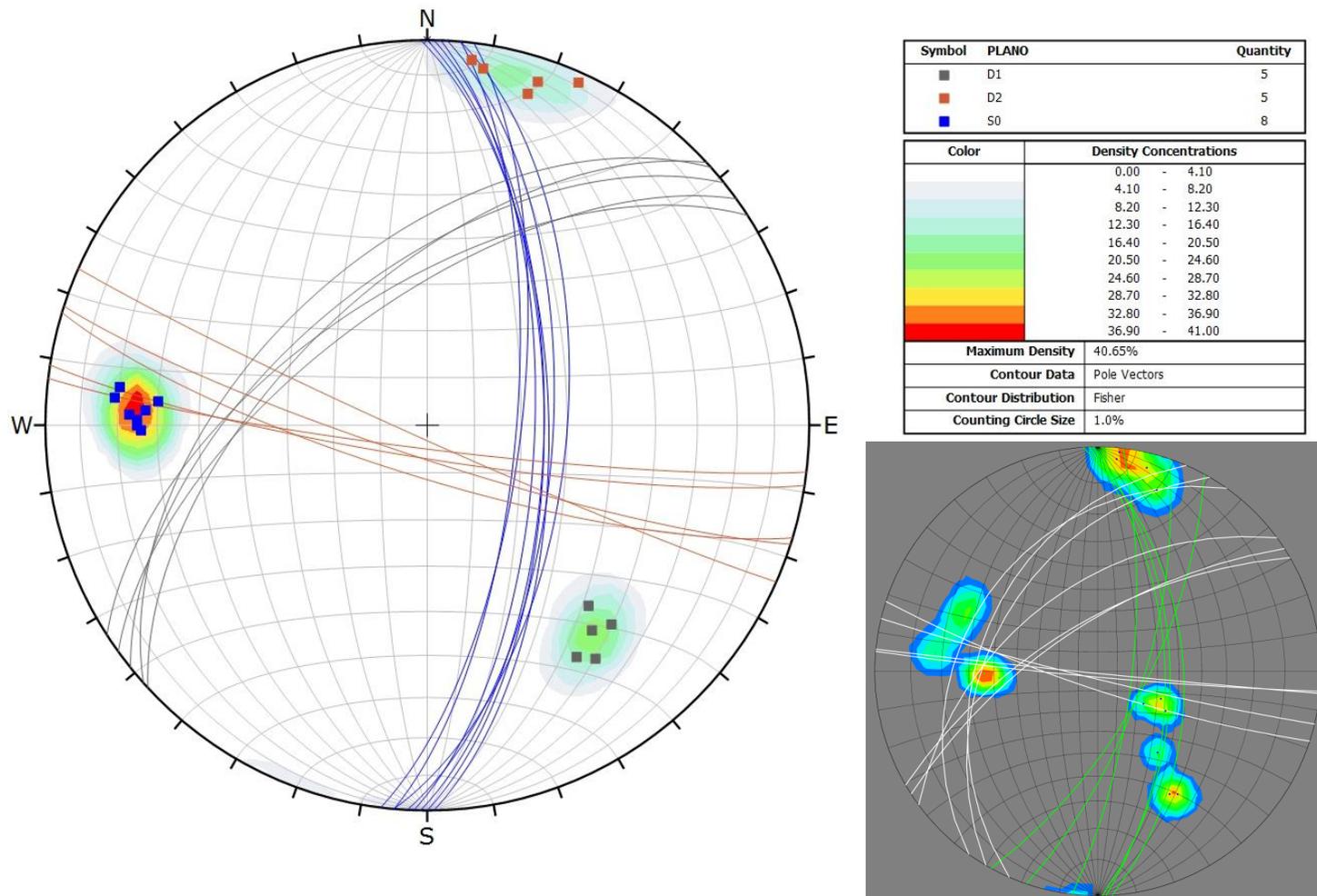


Figura 3.7.- Proyección estereográfica de la EG-14 y su comparación con la proyección estereográfica realizada con las mediciones del MDA.

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

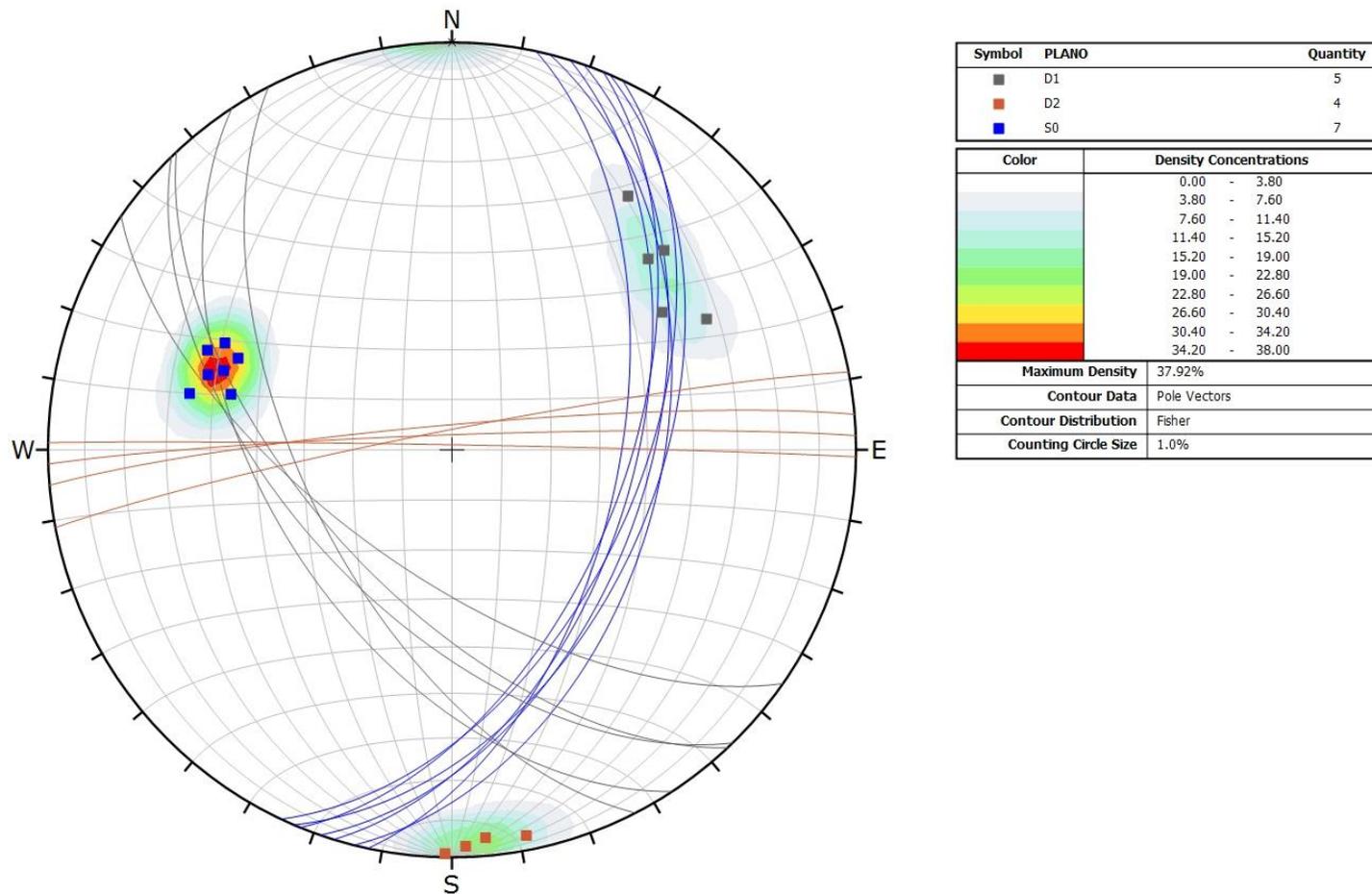


Figura 3.8.- Proyección estereográfica de la EG-15.

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

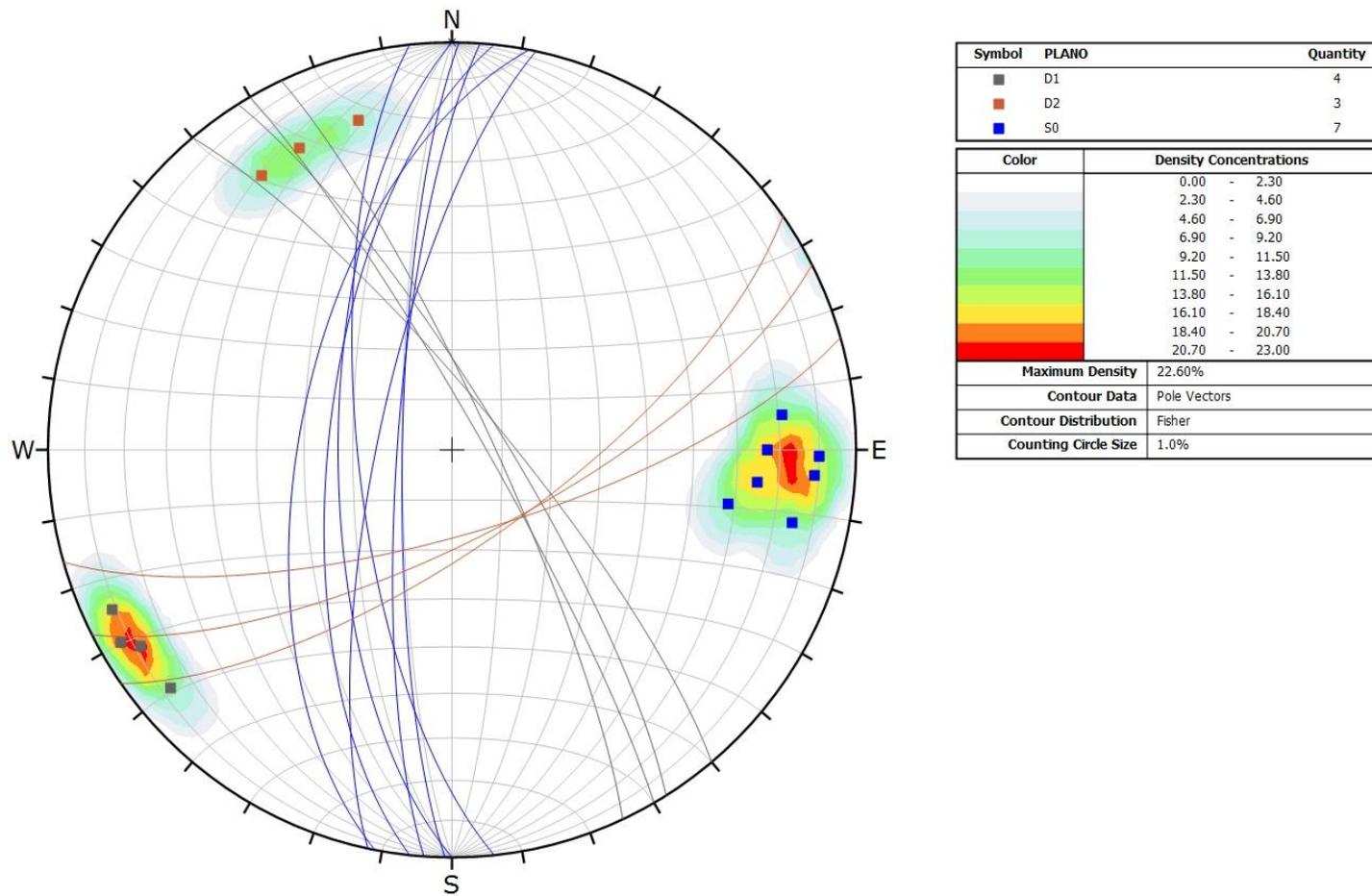


Figura 3.9.- Proyección estereográfica de la EG-20.

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

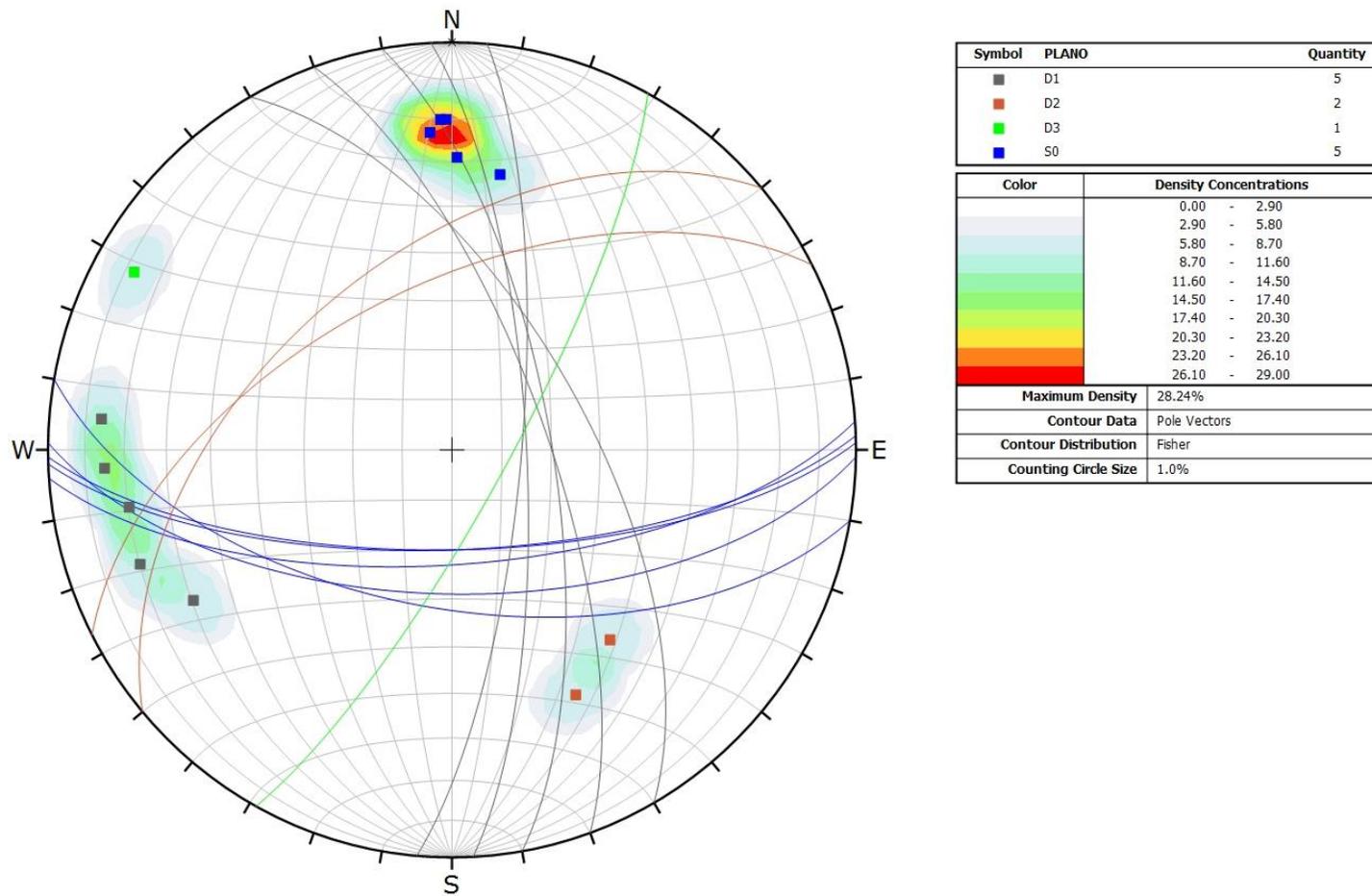


Figura 3.10.-Proyección estereográfica de la EG-26.

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

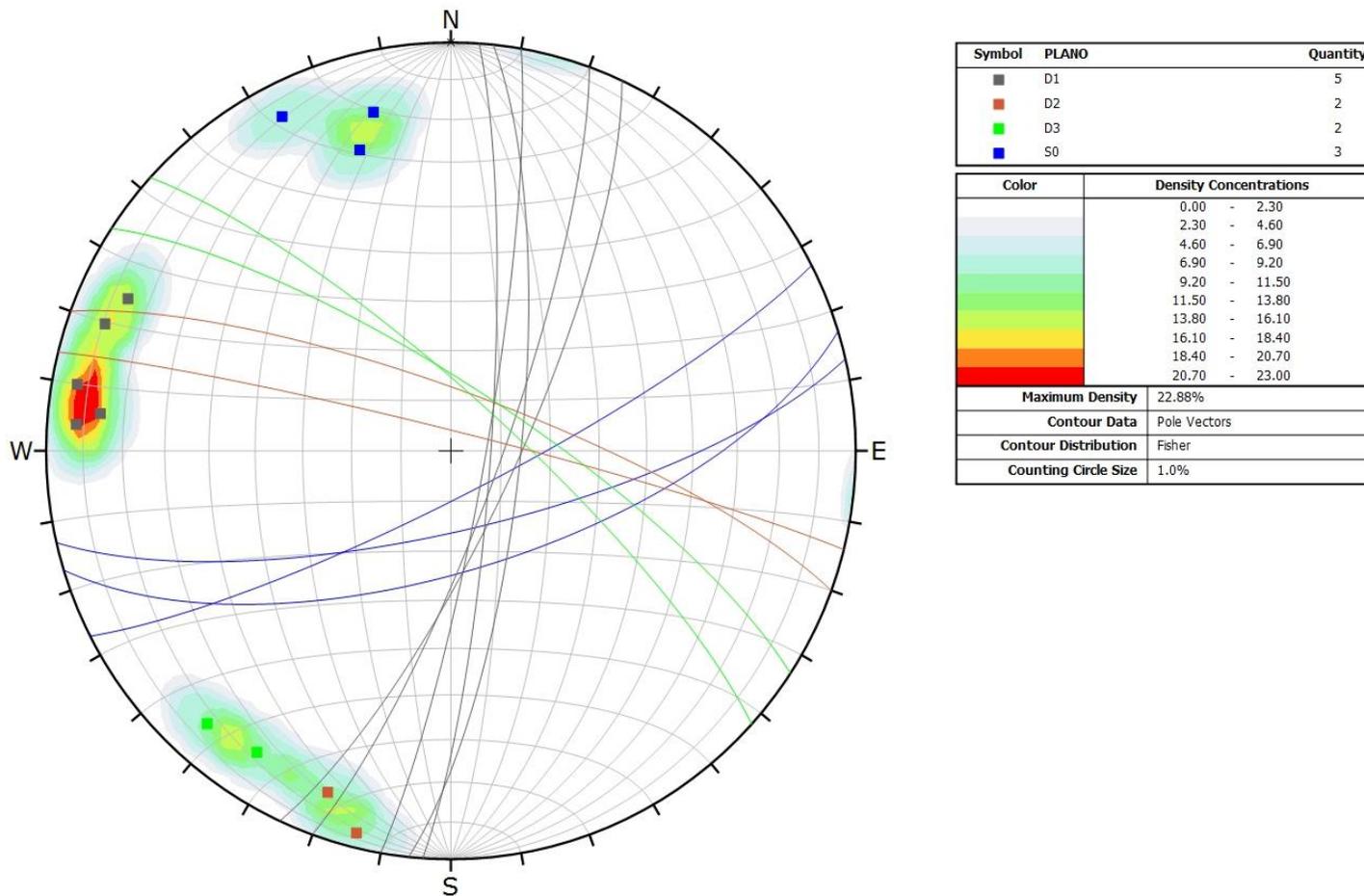


Figura 3.11.- Proyección estereográfica de la EG-26.2.

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

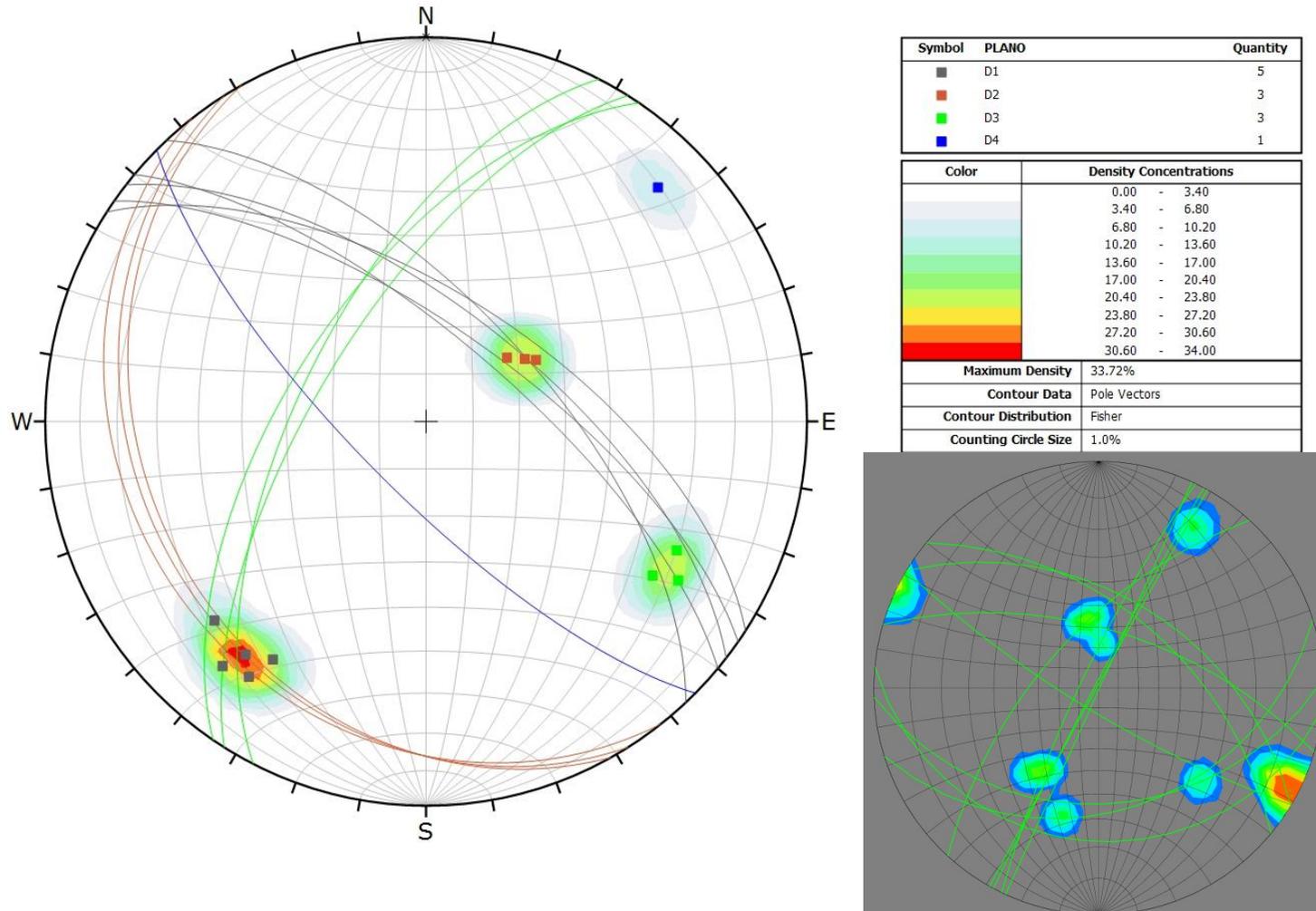


Figura 3.12.- Proyección estereográfica de la EG-39 y su comparación con la proyección estereográfica realizada con las mediciones del MDA.

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

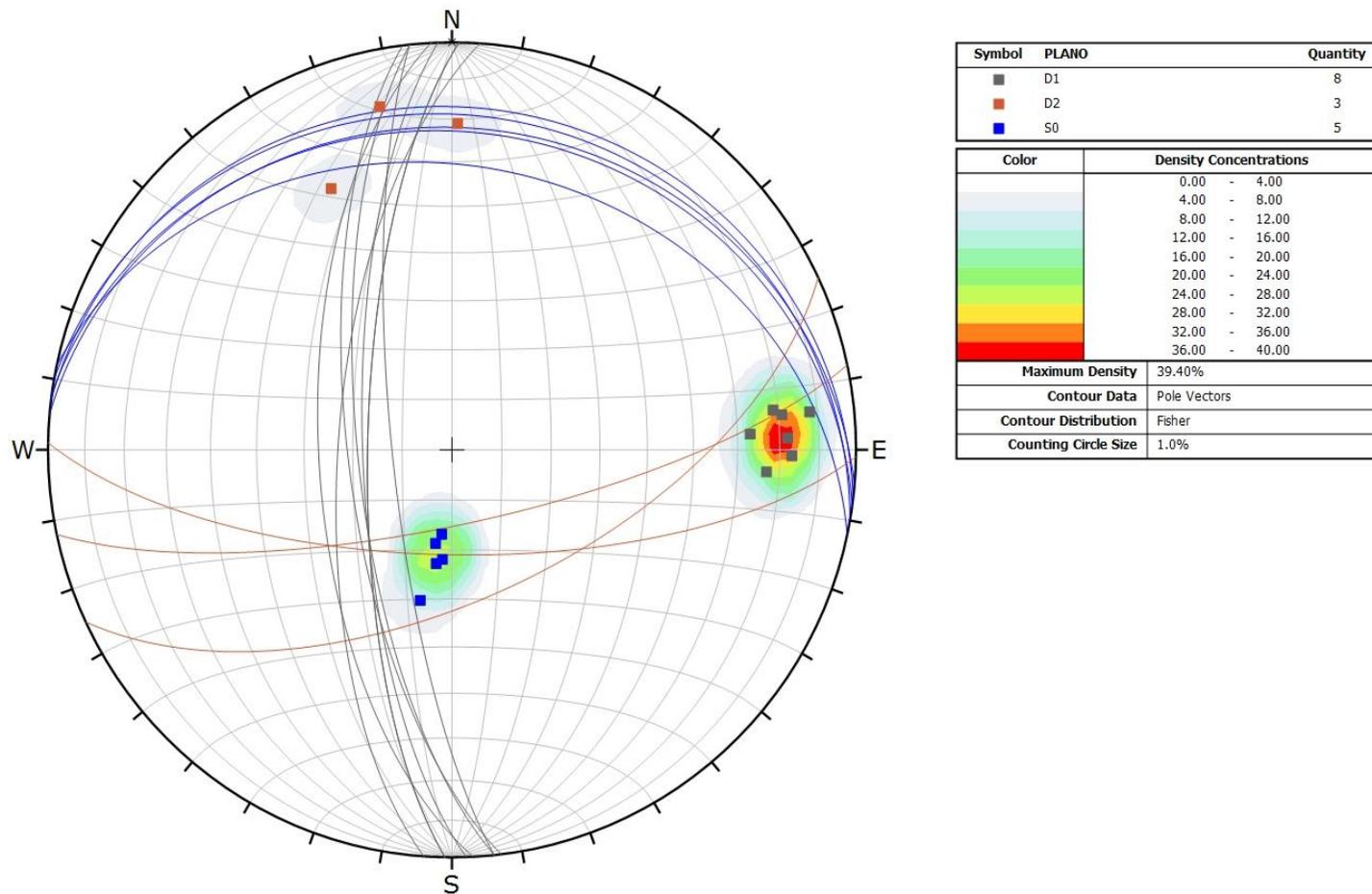


Figura 3.13.-Proyección estereográfica de la EG-40.

3.2.2.2.- Espaciado

Como se puede apreciar en la Figura 3.14, hay un gran rango de espaciado de las discontinuidades que va desde “extremadamente junto” hasta “separado”. Pero se observa que las categorías más numerosas son la correspondiente a “junto” (43,28%) y a “moderadamente junto” (31,34%). También se puede apreciar un pico en la categoría “muy junto” debido a que este corresponde con la EG-11, el cual se encontraba brechificado, debido al gran número de familias y al poco espaciado de estas.

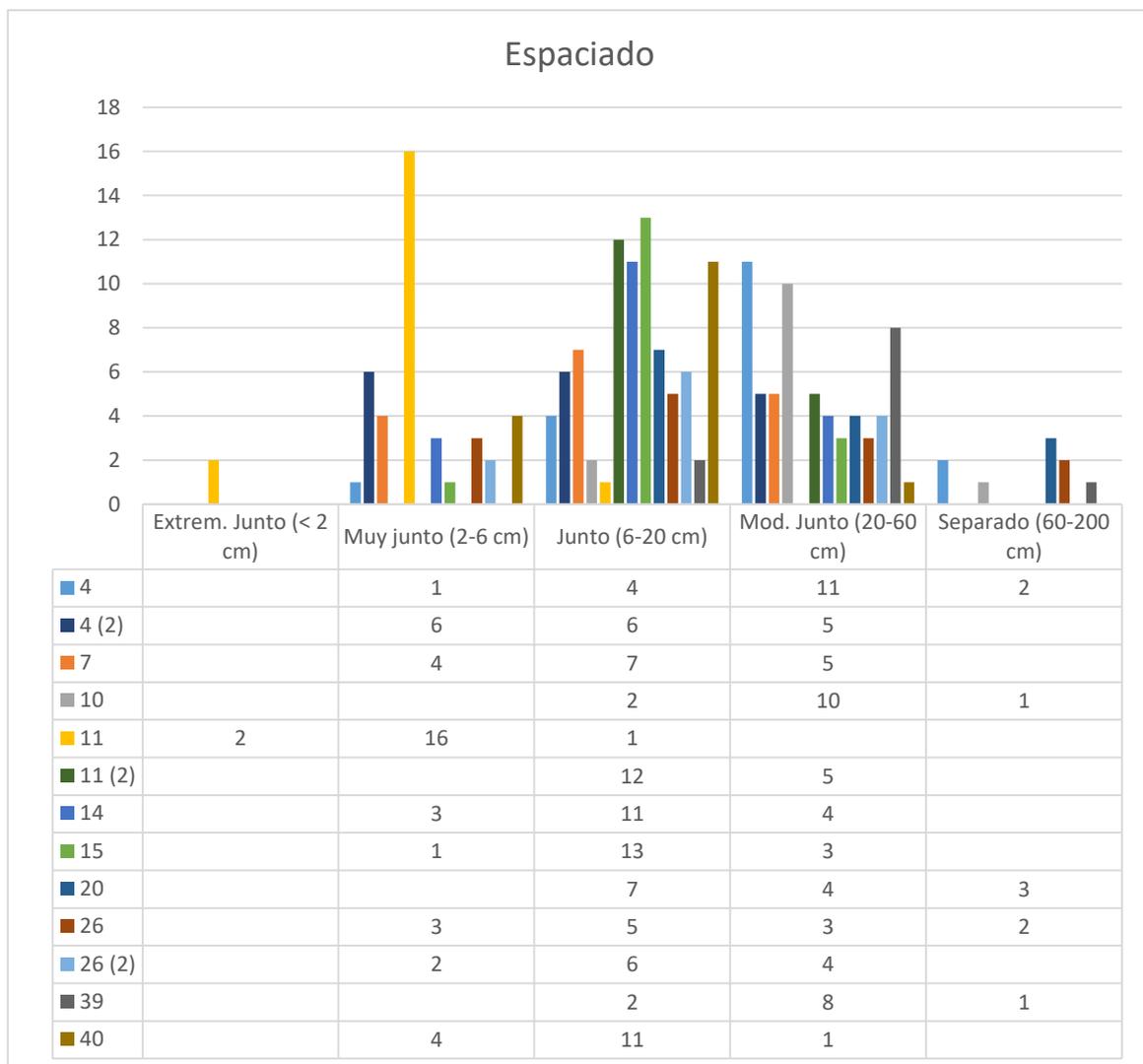


Figura 3.14.- Representación gráfica del espaciado de las discontinuidades.

3.2.2.3.- Continuidad

En cuanto a la continuidad en términos generales, es relativamente baja, presentando un 37,56% de los valores dentro del rango “muy baja” y un 40,98% en “baja”. Estos porcentajes están influenciados por el tipo de afloramiento estudiado, ya que en la mayoría de ellos la estratificación, que supone las continuidades más elevadas, se disponía de manera subvertical y la altura de estos no era más 3 metros y la capacidad visual de poder apreciar esta

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

continuidad estaba limitada por esta razón. Y por ello resalta en el rango de “alta” el valor de la EG-40, ya que en este afloramiento la estratificación se disponía de manera subhorizontal y se podía ver ampliamente su continuidad (Fig. 3.15).

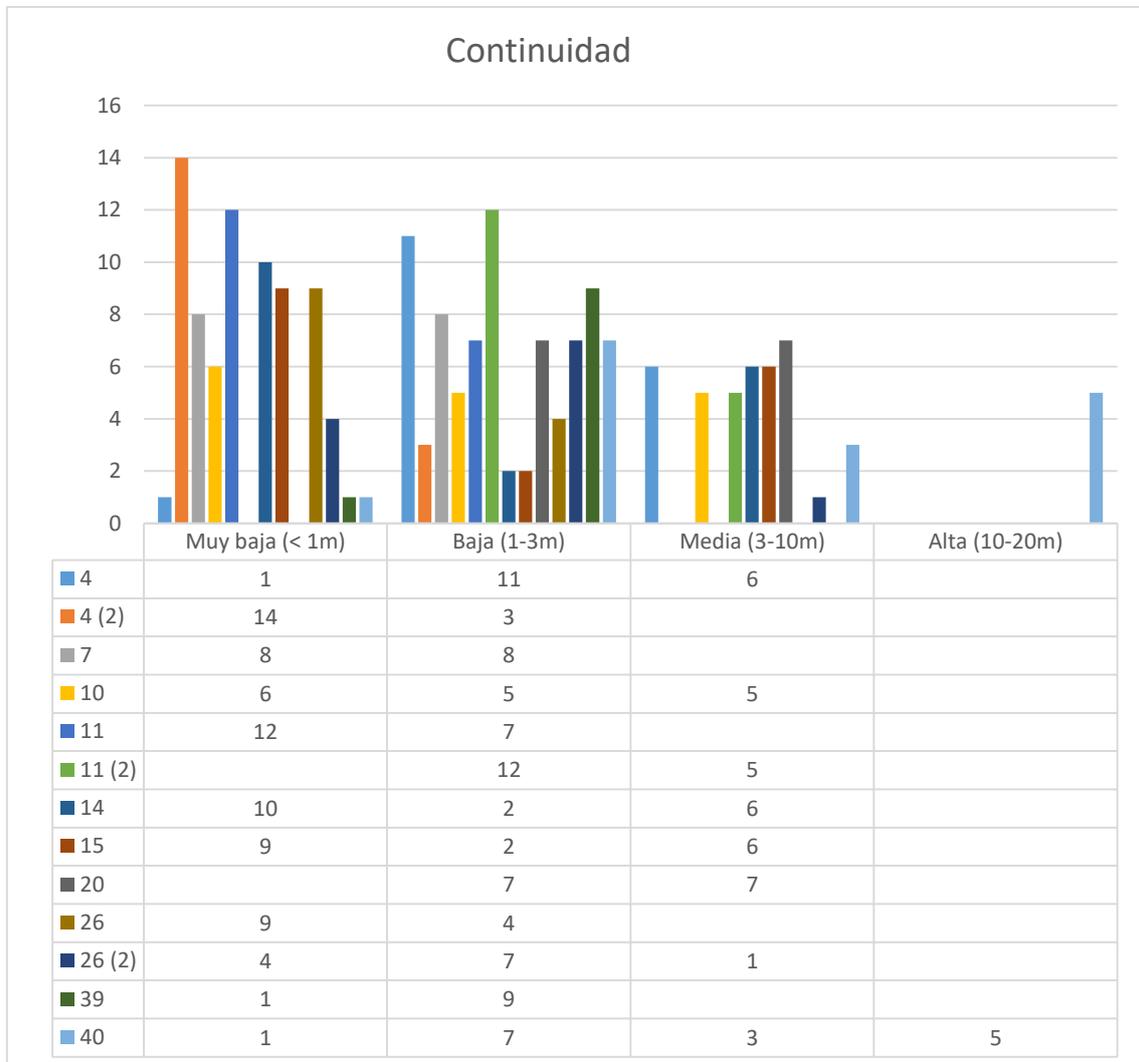


Figura 3.15.- Representación gráfica de la continuidad de las discontinuidades.

3.2.2.4.- Abertura

Con relación a la abertura (Fig. 3.16), esta presenta un margen que va desde “cerrada” hasta “ancha”. Es muy homogénea y casi en la totalidad estos datos se concentran en los rangos de “parcialmente abierta” (29,85%), “abierta” (40,80%) y “moderadamente ancha” (19,90%).

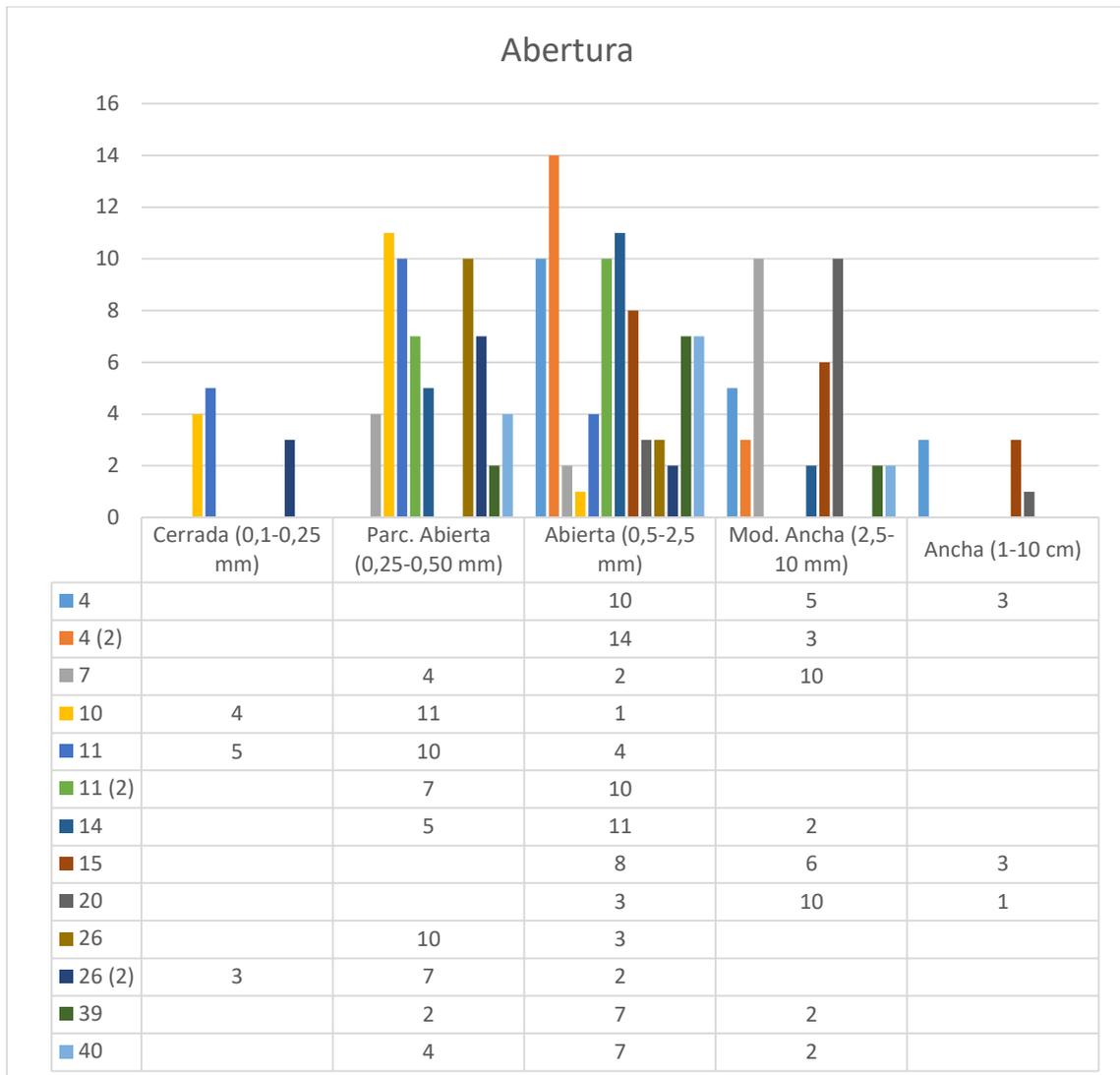


Figura 3.16.- Representación gráfica de la abertura de las discontinuidades.

3.2.2.5.- Rugosidad

Como se puede observar en la Figura 3.17, la rugosidad presenta un amplio margen, al igual que pasa con el espaciado. Los rangos van desde “escalonada rugosa” hasta “plana plana”. Destacan por encima del resto las superficies que presentaban una rugosidad “ondulada rugosa” (23,65%), “ondulada plana” (27,59%) y “plana rugosa” (23,65%). Y se puede apreciar además, la poca representatividad de las superficies pulidas.

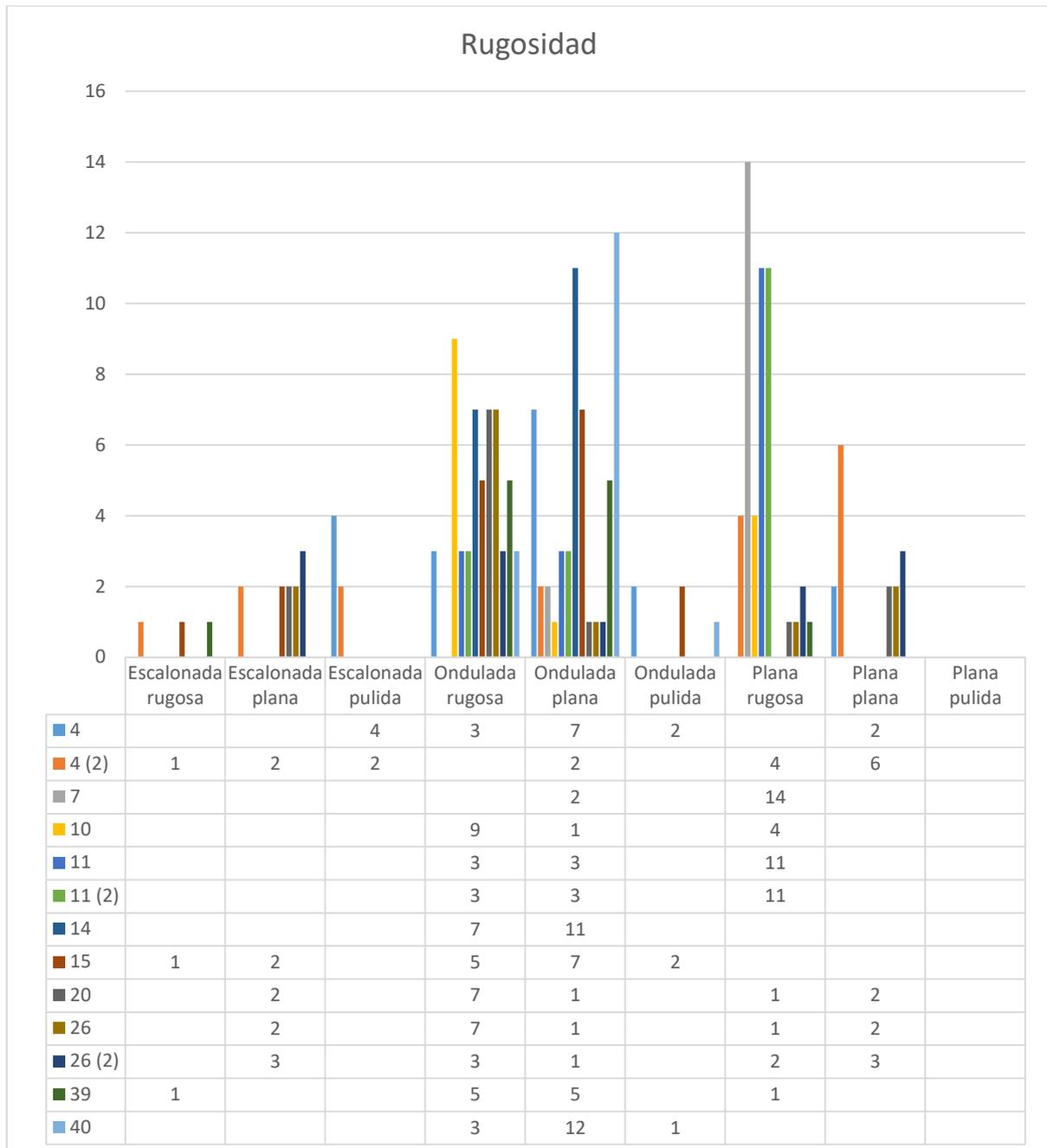


Figura 3.17.- Representación gráfica de la rugosidad de las discontinuidades.

3.2.2.6.- Rellenos

Finalmente en cuanto a las características de los rellenos, se abordan tres cuestiones: la meteorización que presentan las paredes (según ISRM), las filtraciones y la resistencia de los rellenos. La primera de ellas, presentan sobretodo un grado de meteorización III y de manera menos característica, un grado II. En cuanto a las filtraciones, la inmensa mayoría estaban secas, pero no ocurre lo mismo con la EG-7 y la EG-20, las cuales presentaban cierto grado de humedad e incluso alguna de ellas goteaba. Esto es debido a que el día anterior al que se levantaron dichas estaciones geomecánicas estuvo lloviendo. Y sobre la resistencia de los rellenos, excepto en la EG-14 que el relleno era fundamentalmente de arena y de ahí su

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

resistencia dura, las demás eran de arcillas. Estas arcillas estaban más o menos blandas debido a la abertura de la junta en la que se encontraban, presentando una resistencia media en las aberturas más cerradas (Fig. 3.18).

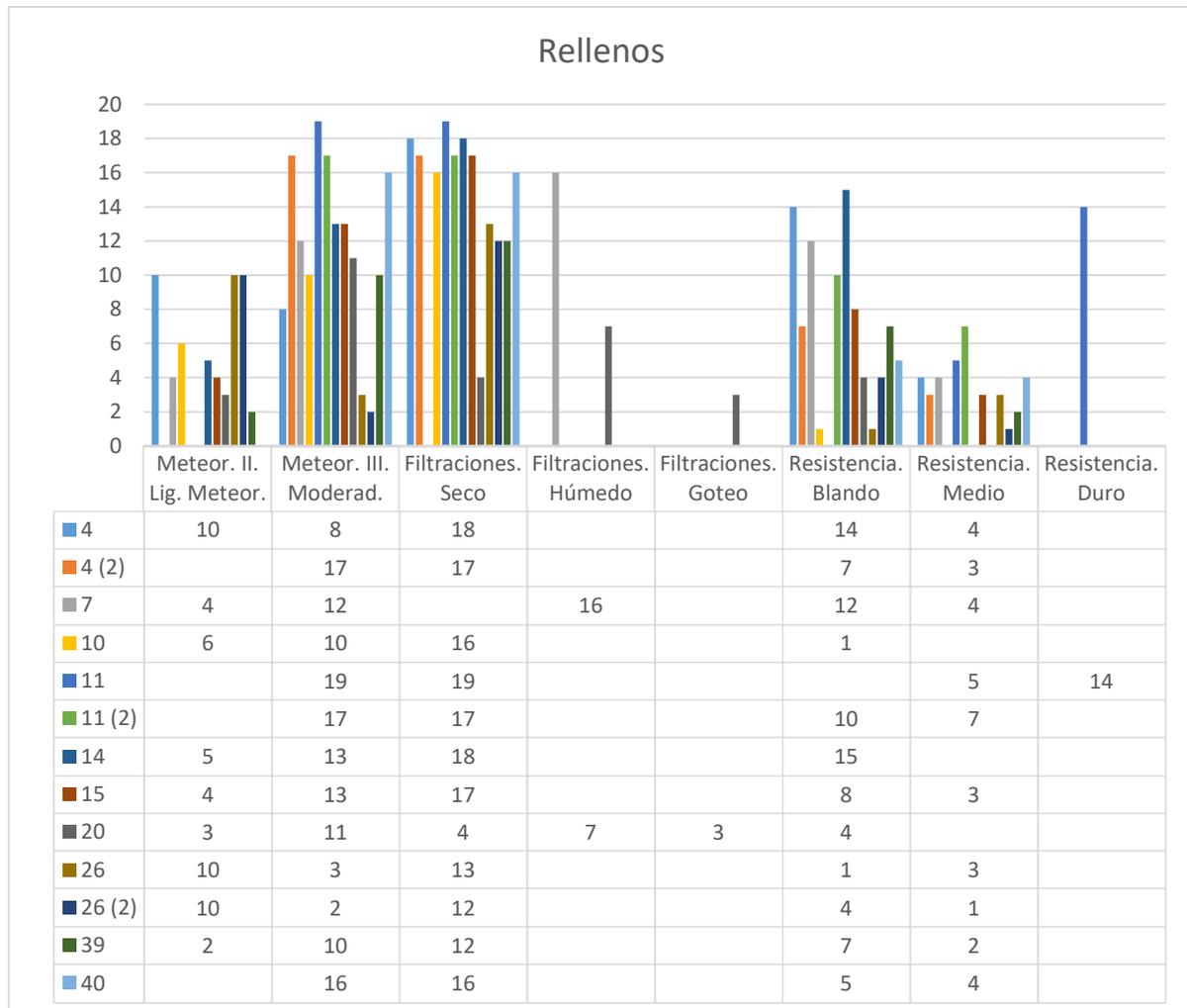


Figura 3.18.- Representación gráfica de los rellenos de las discontinuidades.

3.2.3.- Densidad de fracturación

En esta parte del estudio analizamos la cantidad de discontinuidades que se han encontrado en el macizo rocoso. Para ello nos valdremos de las discontinuidades por unidad de volumen (J_v) y del RQD. Con estos datos obtendremos una idea de en qué medida se encuentra fracturado el macizo rocoso, que supone un dato fundamental para entender el comportamiento geotécnico que presenta.

3.2.3.1.- Discontinuidades por unidad de volumen (J_v)

Considerando todas las familias de discontinuidades en su conjunto para cada una de las estaciones geomecánicas levantadas se diferencian 4 rangos de resultados. La EG-4 y la EG-20, que pertenecen al primer rango el cual representa los macizos más compactos, tienen un

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

valor de J_v de 11 y 12, respectivamente. El segundo rango comprende a EG-4 (2), EG-10, EG-14, EG-26 EG-26 (2) cuyos valores se encuentran entre 15 y 18. El tercer rango que se puede discernir el que comprende a EG-7, EG-15, EG-39 y EG-40 los cuales están entre 20 y 25. Y por último, EG-11 y EG-11 (2), presentan unos valores de J_v de 42 y 30 respectivamente, representando a los macizos más fracturados (Fig. 3.19).

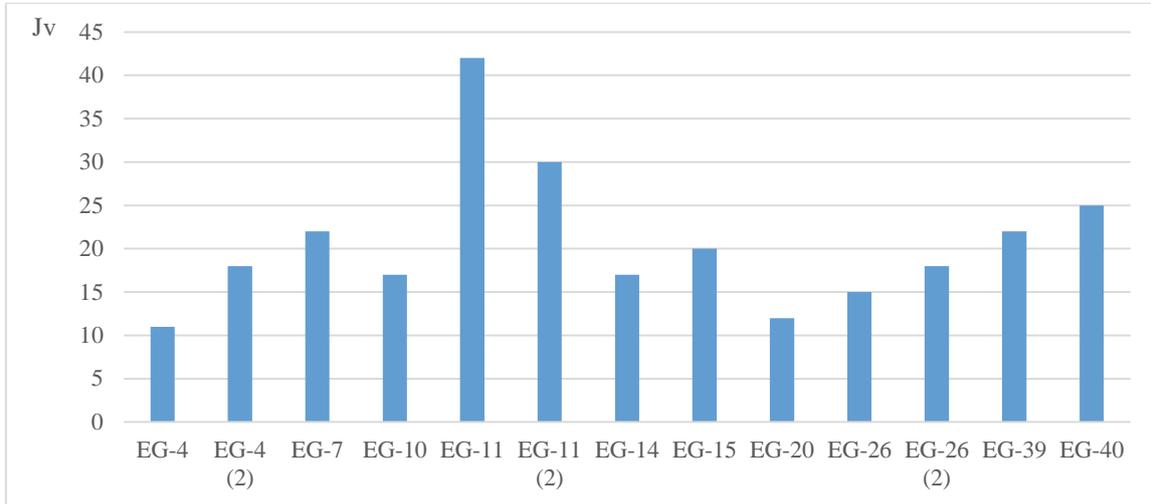


Figura 3.19.- Representación gráfica de los valores de J_v de las estaciones geomecánicas.

3.2.3.2.- RQD

El valor de RQD estimado a partir de la densidad de discontinuidades por unidad de volumen, también se puede dividir en los mismos 4 rangos. El primer rango, de macizos con menor fracturación comprende un RQD de entre 80 y 82,5; el segundo presenta valores de entre 65 y 72,5; el tercer rango entre 47,5 y 60; y el último rango, macizos más fracturados, valores que van desde 5 hasta 35 (Fig. 3.20).

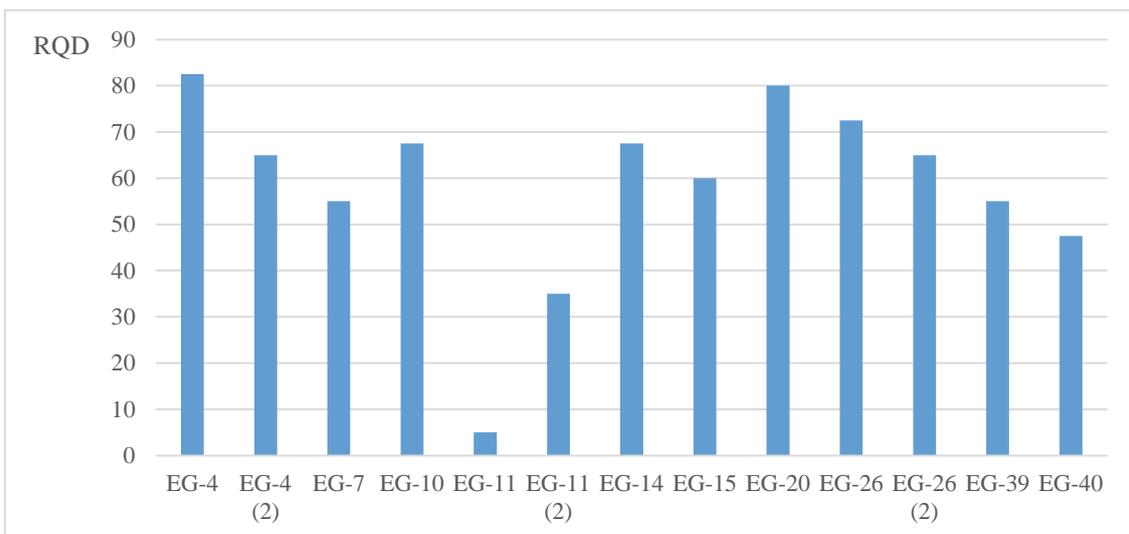


Figura 3.20.- Representación gráfica de los valores de RQD de las estaciones geomecánicas.

3.2.4.- Clasificación de macizos

En este apartado se exponen los resultados de la última labor realizada que se llevó a cabo en campo para terminar de completar esta parte del estudio. Una vez que se han recogido todos los estudios, se ha de proceder a la clasificación de estos para lograr un reconocimiento completo de los macizos rocosos. Y de posteriormente, realizar unas relaciones empíricas entre las distintas clasificaciones.

3.2.4.1.- Calidad de los macizos

Aplicando a las estaciones geomecánicas estudiadas las clasificaciones más frecuentemente utilizadas se obtienen resultados complementarios entre sí. Los macizos se agrupan en tres categorías según GSI, RMR y Q (Tabla 3.2).

Tabla 3.2.- Clasificación de las estaciones geomecánicas según GSI, RMR y Q

		EG-11	EG-11 (2)	EG-7	EG-40	EG-4 (2)	EG-20	EG-15	EG-39	EG-4	EG-26 (2)	EG-26	EG-14	EG-10
GSI	Rango	30-35	35-40	40-45	45-50	45-50	50-55	45-50	55-60	55-60	55-60	55-60	60-65	55-60
	Calidad	Malo	Medio						Bueno					
RMR	Valor	39	46	47	46	51	54	56	60	60	60	60	62	69
	Clase	IV	III										II	II
	Descripción	Malo	Medio										Bueno	
Q	Valor	0,03	0,44	0,91	1,05	1,62	1,33	1,83	1,37	2,06	2,16	2,41	2,23	1,68
	Calificación	Extr. Mala	Muy mala		Mala									
	Qc	0,0086	0,17	0,4	0,63	0,76	1,17	1,48	0,85	1,48	1,53	1,56	1,85	1,71

Aunque los límites de las categorías no coinciden entre las clasificaciones, sí que se puede observar una cierta correlación entre ellos. Esto es debido a la manera en que se calcula cada uno de ellos, dando mayor peso a unas características que a otras. Donde sí que se puede observar una buena correlación es entre GSI y RMR. Para terminar de completar esta clasificación se ha determinado también el valor Q_C (Barton, 2002). Esta modificación de la Q clásica fue pensada para introducir como una variable más un parámetro intrínseco de la roca matriz como es la resistencia a compresión simple, siendo $Q_C = Q \cdot (\sigma_{ci} / 100)$.

3.2.4.2.- Relaciones empíricas

Ya que lo habitual para abordar las correlaciones entre clasificaciones con un buen ajuste es basarla en decenas de macizos rocosos, con el limitado número de estaciones geomecánicas disponibles se ha intentado confrontar los datos disponibles para al menos comprobar las tendencias. En primer lugar se evaluó la conocida correlación lineal entre RMR y GSI (Hoek *et al.* 1995), la cual muestra para los macizos estudiados también una tendencia lineal y de pendiente muy similar (Fig. 3.21).

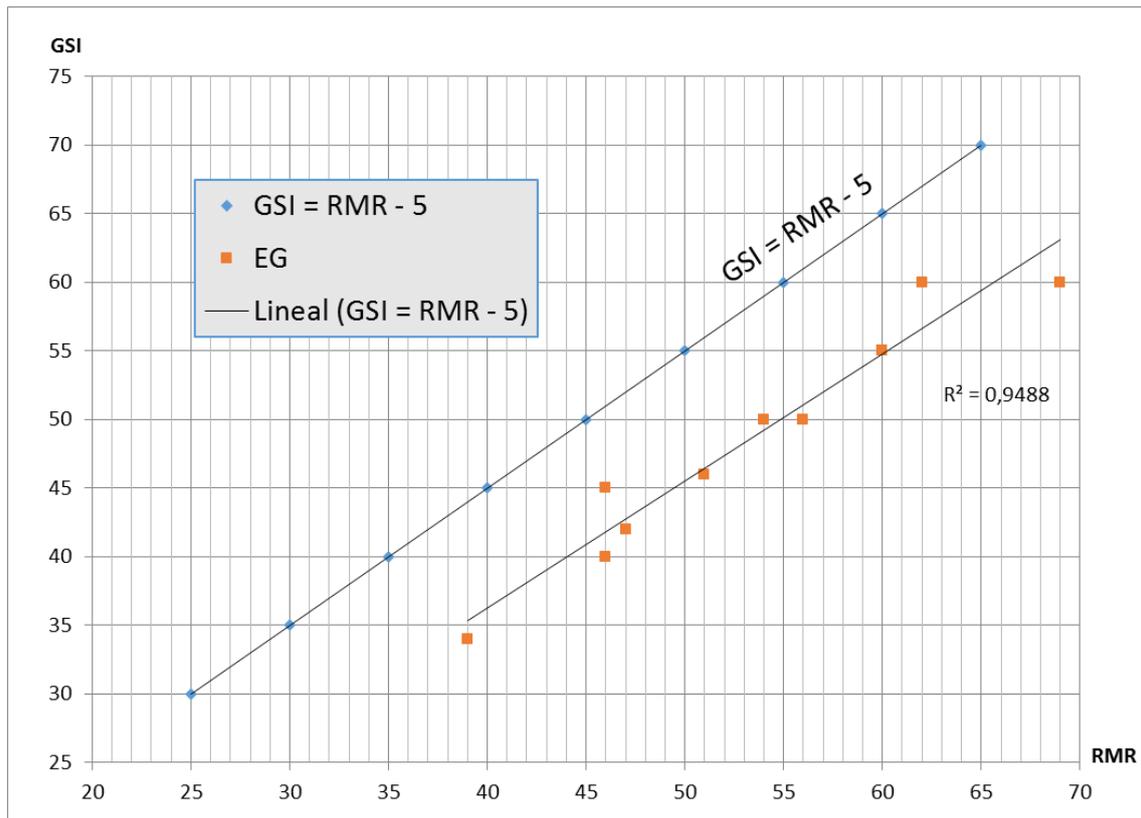


Figura 3.21.- Correlación entre RMR y GSI.

Como se puede observar, RMR y GSI se relacionan bastante bien, excepto en las EG-40, EG-14, en las cuales el GSI sobreestima la calidad del macizo con respecto al RMR; y en la EG-10, donde pasa el caso contrario, RMR sobreestima la calidad del macizo con respecto a GSI.

Por otra parte, es habitual intentar encontrar una relación entre RMR y Q, algo para lo que existen diversas propuestas de diferentes autores. En este trabajo se ha investigado si el ajuste se parece a relaciones planteadas en la bibliografía, pero debido al limitado número de estaciones geomecánicas levantadas, no permite conseguir conclusiones al respecto; tan solo que existe un ajuste exponencial (Fig. 3.22). Esto es debido a que la clasificación según la Q de cada estación geomecánica levantada, infravalora el macizo con respecto a RMR y GSI. Esta infravaloración por parte de la Q puede ser porque en el primer cociente para calcularlo, asociado al tamaño de bloques, da mucho mayor peso que las otras clasificaciones, y no hay ningún factor asociado con σ_c .

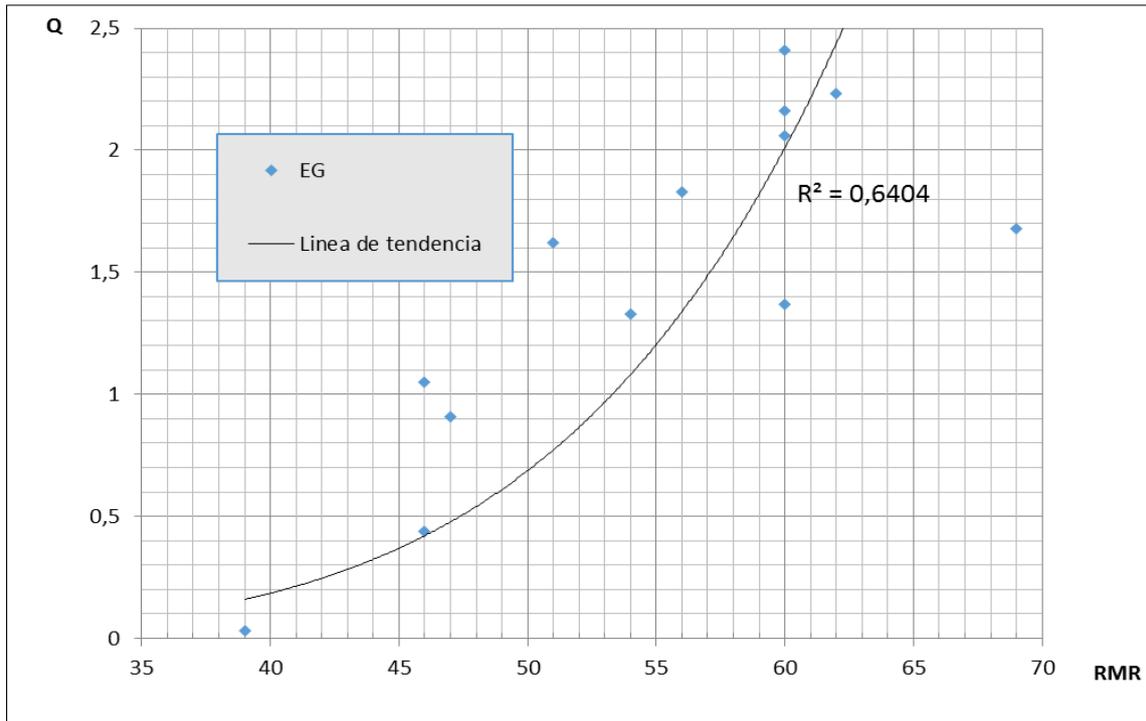


Figura 3.22.- Correlación gráfica de RMR y Q.

3.2.5.- Parametrización de macizos

Finalmente, en este último apartado se exponen los parámetros calculados a partir de los datos obtenidos que nos sirven para la caracterización geomecánica de los afloramientos de manera más precisa. El fin de esta parametrización es el de lograr un reconocimiento total de los macizos rocosos.

3.2.5.1.- Deformabilidad

Debido a la complejidad que resulta de obtener el módulo de deformación del macizo rocoso (E_m) de manera directa mediante métodos sísmicos o a través de ensayos específicos, y debido a que es un parámetro muy útil para poder cuantificar la deformabilidad del macizo, numerosos autores a lo largo del tiempo han propuesto diversas formas indirectas de determinarlo. Estas formas indirectas parten habitualmente de las clasificaciones tradicionales de la calidad del macizo rocoso como las que se han realizado en este trabajo (GSI, RMR y Q), además de tomar en consideración parámetros intrínsecos de la roca matriz como es el módulo de elasticidad (E_i), para el cual se utilizó la fórmula propuesta por Katz *et al.* (2000):

$$\ln E = - 8,967 + 3,091 \cdot \ln R$$

- Siendo R, el valor promedio de los valores obtenidos por el esclerómetro

Las estimaciones realizadas para obtener el módulo de deformación en este trabajo mediante diferentes fórmulas son las siguientes:

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

$$E_m \text{ (GPa)} = 0,0736 \cdot e^{0,0755 \cdot \text{RMR}} \quad (\text{Gokceoglu et al., 2003})$$

$$E_m \text{ (GPa)} = 0,1451 \cdot e^{0,0654 \cdot \text{GSI}} \quad (\text{Gokceoglu et al., 2003})$$

$$E_m \text{ (GPa)} = 9 \cdot 10^{-7} \cdot \text{RMR}^{3,868} \quad (\text{Khabbazi et al., 2012})$$

$$E_m \text{ (GPa)} = e^{\frac{\text{RMR}-35}{18}} \quad (\text{Muñiz Menéndez et al., 2013})$$

$$E_m \text{ (GPa)} = 10 \cdot Q^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Barton, 1995})$$

$$E_m \text{ (GPa)} = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\frac{\text{GSI}-10}{40}} \quad (\text{Hoek y Brown, 1997})$$

Los valores obtenidos para cada estación geomecánica calculados a partir de cada propuesta quedan representados en la Figura 3.23. Puede apreciarse que para las estaciones geomecánicas más deficientes geotécnicamente, Barton (1995) sobrestima la calidad del macizo rocoso. Y para las estaciones geomecánicas que presentan los valores más altos, Muñiz Menéndez *et al.* (2013) infravalora el macizo rocoso; al contrario que Hoek y Brown (1997), que los sobrestima.

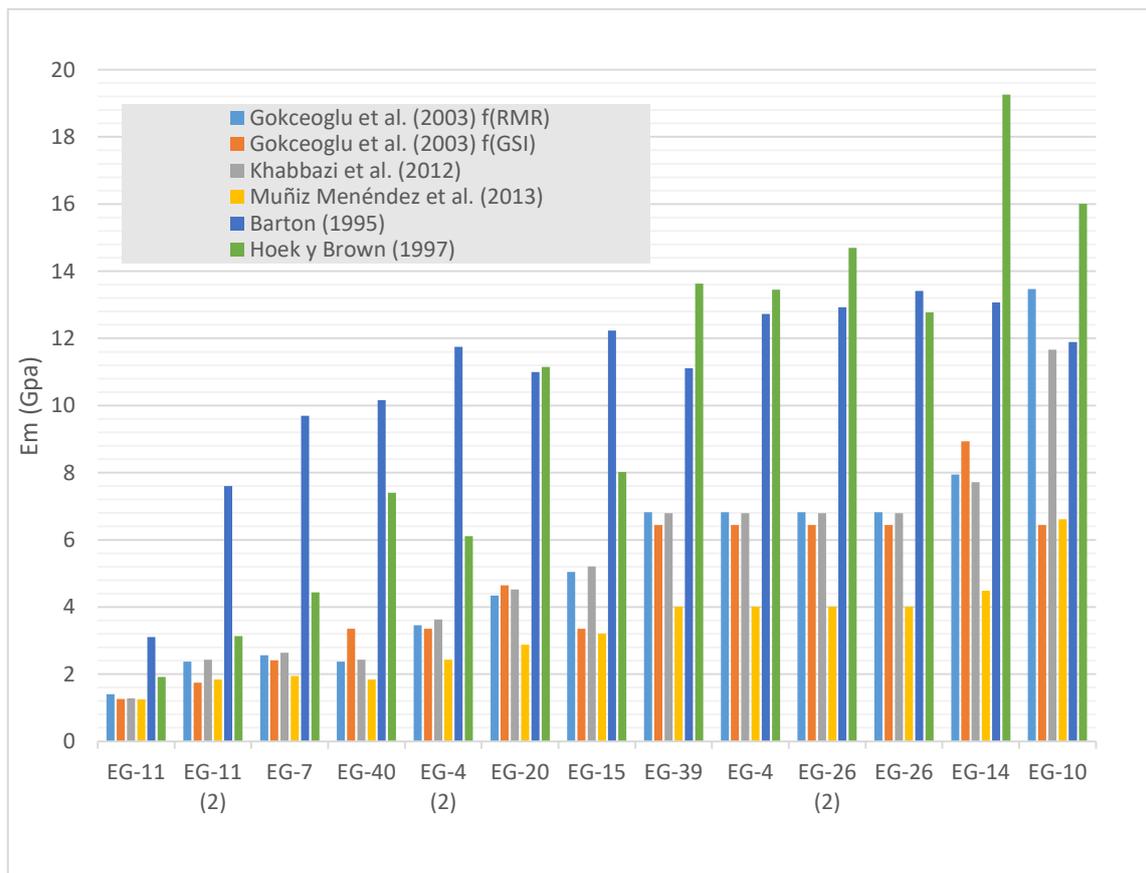


Figura 3.23.- Módulos de deformación calculados según diferentes autores para las estaciones geomecánicas.

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

La media aritmética del módulo de deformación calculados a partir de las formulas propuestas por los autores previamente citados para cada estación geomecánica queda representada en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3.- Media de los módulos de deformación calculados (GPa).

EG-11	EG-11 (2)	EG-7	EG-40	EG-4 (2)	EG-20	EG-15	EG-39	EG-4	EG-26 (2)	EG-26	EG-14	EG-10
1.702	3.187	3.948	4.594	5.120	6.421	6.177	8.136	8.374	8.616	8.376	10.231	11.014

3.2.5.2.- Criterio de rotura

Los valores obtenidos del módulo de elasticidad (E_i) son utilizados por el software Rocscience RocLab (v. 1.033) que emplea el criterio de rotura de Hoek & Brown (Hoek *et al.*, 2002). Este paso nos permite aproximarnos a los parámetros de comportamiento mecánico de los macizos (Tabla 3.4).

Tabla 3.4.- Resultados obtenidos con el software Roclab.

		EG-11	EG-11 (2)	EG-7	EG-40	EG-4 (2)	EG-20	EG-15	EG-39	EG-4	EG-26 (2)	EG-26	EG-14	EG-10
Entrada de datos	σ_{ci} (MPa)	26	39	44	69	47	88	81	74	72	86	65	83	102
	GSI	33	38	43	48	48	53	48	58	58	58	58	63	58
	m_i	17												
	D	0												
	E_i (MPa)	1.34	4.23	5.73	13.28	6.30	18.80	16.43	14.28	14.28	18.80	16.43	16.43	22.76
Criterio	mb	1.553	1.857	2.22	2.654	2.654	3.173	2.654	3.793	3.793	3.793	3.793	4.535	3.793
	s	0.0006	0.001	0.0018	0.0031	0.0031	0.0054	0.0031	0.0094	0.0094	0.0094	0.0094	0.0164	0.0094
	a	0.518	0.513	0.509	0.507	0.507	0.505	0.507	0.503	0.503	0.503	0.503	0.502	0.503
Mohr-Coulomb	c (MPa)	1.167	1.904	2.322	3.919	2.67	5.371	4.601	4.855	4.724	5.643	4.265	5.869	6.692
	ϕ (°)	29.93	31.45	32.97	34.48	34.48	35.99	34.48	37.49	37.49	37.49	37.49	38.98	37.49
Parámetros de macizo rocoso	σ_t (MPa)	-0.01	-0.021	-0.035	-0.08	-0.055	-0.15	-0.094	-0.183	-0.178	-0.213	-0.161	-0.3	-0.253
	σ_c (MPa)	0.549	1.138	1.749	3.696	2.517	6.309	4.339	7.067	6.876	8.213	6.208	10.526	9.741
	σ_{cm} (MPa)	4.036	6.793	8.546	14.892	10.144	21.078	17.482	19.686	19.154	22.878	17.292	24.595	27.135
	Erm (GPa)	0.13	0.59	1.12	3.6	1.71	6.88	4.46	6.78	6.78	8.92	7.8	9.66	10.8

Comparando los módulos de deformación calculados por Roclab con los obtenidos anteriormente, se puede apreciar que en las estaciones geomecánicas que presentan los valores más reducidos no se corresponden exactamente; pero para aquellas en las que el módulo de deformación es mayor, la diferencia es pequeña.

3.3.- CARACTERIZACIÓN DE LABORATORIO

En este apartado se exponen las observaciones y los datos obtenidos durante la labor de laboratorio de las muestras que se han extraído de los afloramientos. Primeramente se centra en una descripción de las muestras, posteriormente se expondrán los resultados del peso específico seco y la rotura bajo carga puntual.

3.3.1.- Descripción e identificación

De manera inicial, se realiza una caracterización de cada una de las muestras tomadas en los afloramientos estudiados y que han sido preparadas para sus respectivos ensayos en laboratorio.

Para ello se dispone de 4 tipo de muestras para realizar una descripción macroscópica de cada una, quedando de la siguiente manera: 2 muestras correspondientes a los bloques 1 y 2 (EG-26), estudiando una cara producida por la sierra de corte y la otra un corte fresco de la roca; dos muestras del bloque 5 y 7, y al igual que en el caso anterior, una para cada tipo de corte de la roca. Además, se dispone de 6 láminas delgadas, que se reparten de la siguiente manera: 4 pertenecientes al bloque 1 (EG-26), donde se pueden diferenciar el bandeado atigrado, el cual diferenciaremos; una lámina del bloque 5 y otra del bloque 7, ambos pertenecientes a la EG-4.

Se hacen estas separaciones ya que se pueden diferenciar 3 litotipos, siendo los siguientes: el primer litotipo corresponde a la parte rojiza del bandeado “atigrado”; el segundo a la parte más blanquecina de la otra parte del “atigrado”; y el tercer litotipo, el cual no presenta este bandeado. Los bloques 1 y 2 presentan el bandeado “atigrado” por lo que componen los dos primeros litotipos, mientras que el resto de bloques no presentan este bandeado, siendo el tercer litotipo.

3.3.1.1.- Aspecto macroscópico

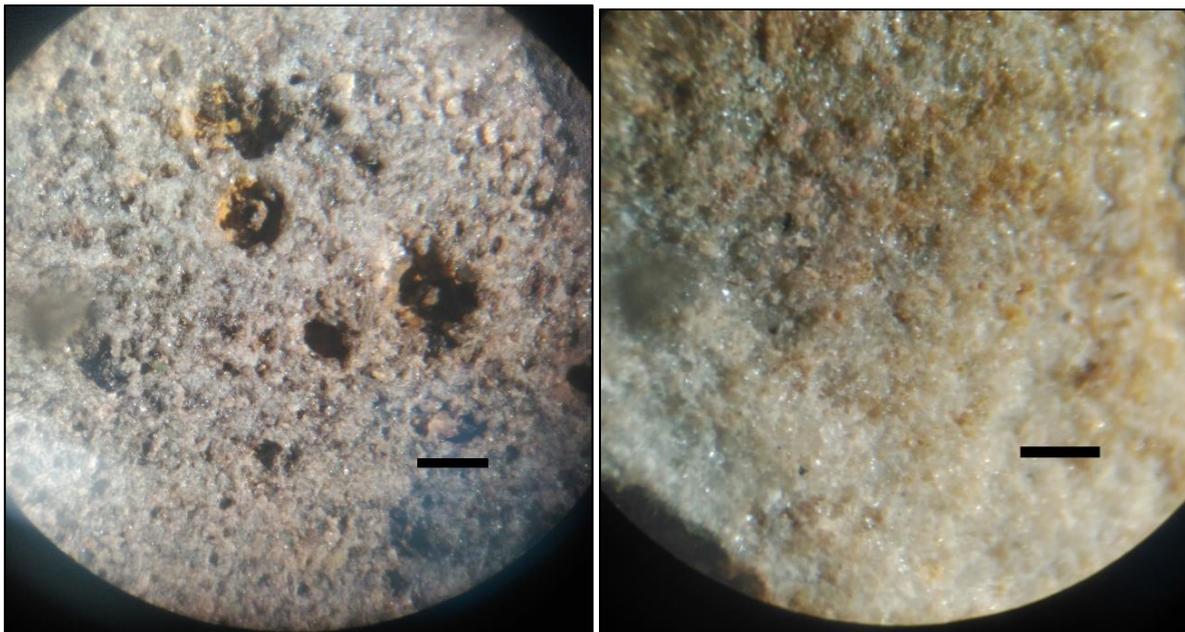
Una vez eliminada la alteración superficial, se realizan las observaciones oportunas para inspeccionar de manera preliminar la matriz rocosa, apoyándonos para un mejor estudio, de una lupa binocular. Los principales rasgos de cada muestra se explican a continuación:

- Muestra tomada en EG-26 (Muestra 1): La superficie de estudio es resultado de la sierra de corte. En ella se puede apreciar que el esqueleto está compuesto mayoritariamente por granos blancos y algunos granos verdes, algo más grandes que los anteriores con tamaños de hasta 0,5 mm. Presenta un bandeado asociado a la matriz que varía entre el color rojizo y el blanquecino de aspecto homogéneo para cada banda y poros que pueden alcanzar tamaños de hasta 1 mm recubiertos por una delegada capa de color pardo-amarillento (Fig. 3.24a).

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

- Muestra tomada en EG-26 (Muestra 2): La superficie estudiada es de un corte fresco de la roca. De tacto rugoso que llega a deshacerse y mancha los dedos. Esqueleto formado por granos blancos dentro de una matriz rojiza, que en algunas partes presenta una pátina de color pardo-amarillento, que puede ir asociado al tipo de fractura estudiada.
- Muestra tomada en EG-4 (Muestra 1): La superficie estudiada es de un corte fresco de la roca. Esqueleto compuesto de granos blancos dentro de una matriz también de color blanco, que presenta un aspecto más cristalino que en los casos anteriores. Esto hace que la porosidad sea menor que en los bloques sacados en la EG-26. Al igual que en los casos anteriores, presenta en algunas zonas una pátina de color pardo-amarillento. (Fig. 3.24b).
- Muestra tomada en EG-4 (Muestra 2): La superficie de estudio es resultado de la sierra de corte. Destaca por su tacto mucho más suave que las anteriores. Presenta un color pardo-amarillento, con zonas más blanquecinas debido al color de los granos que la constituyen.



*Figura 3.24a (izquierda).- Aspecto macroscópico de la muestra correspondiente a EG-26.
Figura 3.24b (derecha).- Aspecto macroscópico de la muestra correspondiente a EG-4. Ambas escalas gráficas: 1 mm.*

3.3.1.2.- Composición

Mediante el análisis de mediante fluorescencia de rayos X se obtuvo la composición química de las muestras. Estas fueron las siguientes: una muestra de cada litotipo del bandeado (roja y blanca) del bloque 1, y una muestra del bloque 4 (litotipo que no presenta el bandeado). Los resultados obtenidos se exponen en la Tabla 3.5.

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

Tabla 3.5.- Resultados de la fluorescencia de rayos X de las muestras analizadas.

Bloque	Litotipo	-SiO ₂ -	-Al ₂ O ₃ -	-Fe ₂ O ₃ -	-MnO-	-MgO-	-CaO-	-Na ₂ O-	-K ₂ O-	-TiO ₂ -	-P ₂ O ₅ -	L.O.I	TOTAL
Bloque 1 (bandeado)	Parte rojiza	76,80	1,73	19,39	0,07	0,10	0,08	0,11	0,32	0,12	0,04	0,48	99,23
	Parte blanca	92,93	1,58	4,23	0,05	0,08	0,02	0,06	0,33	0,12	0,04	0,42	99,85
Bloque 4	Sin bandeado	85,41	6,43	3,13	0,01	0,29	0,02	0,16	2,62	0,16	0,03	1,41	99,66

Como se puede observar, la parte más rojiza presenta hasta casi un 20% de óxido de hierro en comparación con el litotipo blanco del bandeado, que presenta apenas un 4%. También se aprecia, que el sílice es el componente mayoritario de los 3 litotipos, que en la que menos porcentaje presenta es en la parte rojiza del bandeado, teniendo un 76,80%. En la muestra correspondiente al tercer litotipo, la cual no presentaba el bandeado, destaca por tener más óxido de aluminio (6,43%), más óxido de potasio (2,62%) y más L.O.I. con respecto a las muestras del bloque 1.

Para determinar las fases minerales a las que corresponde la composición química se realizaron pruebas de difracción de rayos X (Tabla 3.6). Hay que tener en cuenta que si una fase se encuentra por debajo del 3% no es detectable.

Tabla 3.6.- Resultados de la difracción de rayos X de las muestras analizadas.

Bloque	Litotipo	Fases minerales	
Bloque 1 (bandeado)	Parte rojiza	Cuarzo	Óxido de hierro
	Parte blanca	Cuarzo	Óxido de hierro
Bloque 4	Sin bandeado	Cuarzo	Microclina

Los resultados arrojan que mineralógicamente, ambos litotipos del bandeado “atigrado” están compuestas por lo mismo: cuarzo y óxido de hierro. No ocurre lo mismo con la parte que no presenta el bandeado, perteneciente al bloque 4. En este litotipo los componentes minerales son cuarzo y microclina, un tipo de feldespato rico en potasio, aluminio, silicio y oxígeno. De esta manera concuerda completamente con los datos de la fluorescencia, presentando este último litotipo más concentración de potasio y aluminio en comparación con la parte bandeada.

3.3.1.3.- Aspecto microscópico

En el grupo de láminas delgadas pertenecientes a la EG-26, se pueden diferenciar dos litotipos debido a la anisotropía que presentan, dependiendo de en qué parte del bandeado “atigrado” nos encontremos.

- En el primer litotipo, la parte rojiza del bandeado, el esqueleto está compuesto mayoritariamente (80-85%) por granos de cuarzo, con unos tamaños de entre 0,25 a 0,55 mm de diámetro. Muestra buena granoselección, baja esfericidad y los bordes presentan rangos desde angulosos a subredondeados. La mayoría de estos granos de cuarzo son monocristalinos con extinción ondulante. Alrededor del 5%

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

pertenece a cloritas y otro 5% a feldespatos y minerales opacos. El cemento que presenta esta parte de la muestra es un cemento ferruginoso pelicular que rellena parte de la porosidad, que puede alcanzar hasta el 5% aproximadamente, y en algunas partes muy concretas hasta un 25-30%. La madurez mineralógica es elevada y la madurez textural corresponde a una arenisca madura. La clasificación según Pettijohn *et al.*, (1973) representa una subarcosa (Fig. 3.25).

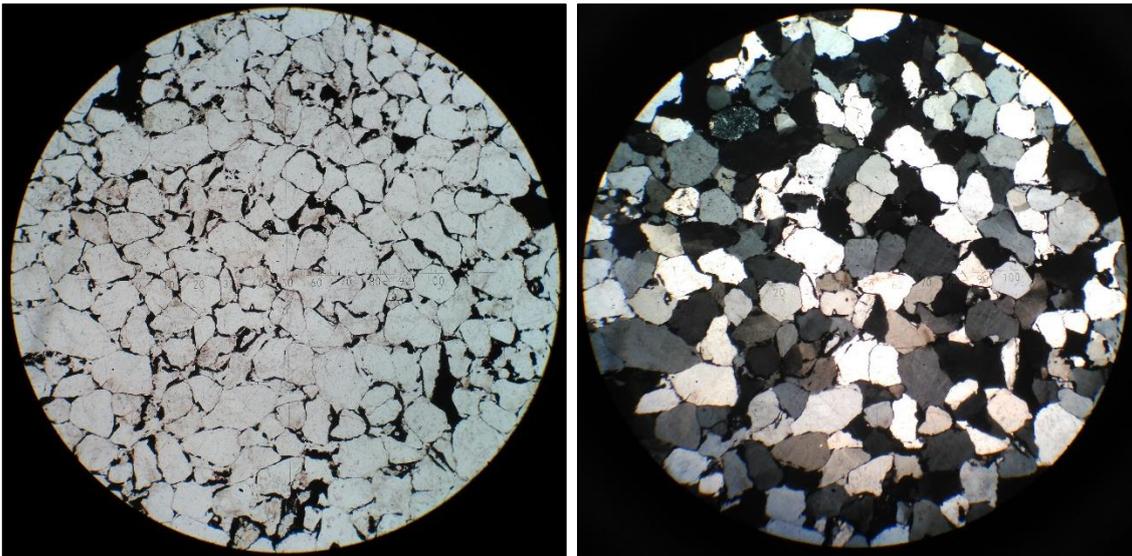


Figura 3.25.- Lámina en nicoles paralelos (izquierda) y nicoles cruzados (derecha). Diámetro del campo de visión: 4,5 mm.

- En cuanto al segundo litotipo, la parte más blanquecina del bandeo, los granos de cuarzo siguen siendo el componente mayoritario del esqueleto (alrededor del 75%) con tamaños que van desde los 0,2 a 1,0 mm. Está un poco peor seleccionado que en el caso anterior, presentan baja esfericidad y los bordes presentan rangos desde angulosos a subredondeados. Asimismo aumenta la proporción de los granos policristalinos, los cuales ya no presentan la extinción ondulante. El resto de componentes del esqueleto son feldespatos (15-20%) y micas (<5%). La porosidad, en general, en esta parte del bandeo supera el 5% y puede alcanzar hasta el 10%; pero en algunas láminas puede representar hasta el 25-30%. Presenta varios tipos de cementos: sigue apareciendo el cemento ferruginoso pelicular, aunque en menor proporción; además de una mezcla entre cemento en mosaico y cemento syntaxial, ambos de cuarzo. La madurez mineralógica es elevada y la madurez textural la define como arenisca submadura-madura; tomando como referencia la clasificación según Pettijohn *et al.*, (1973) la roca representa una subarcosa (Fig. 3.26).

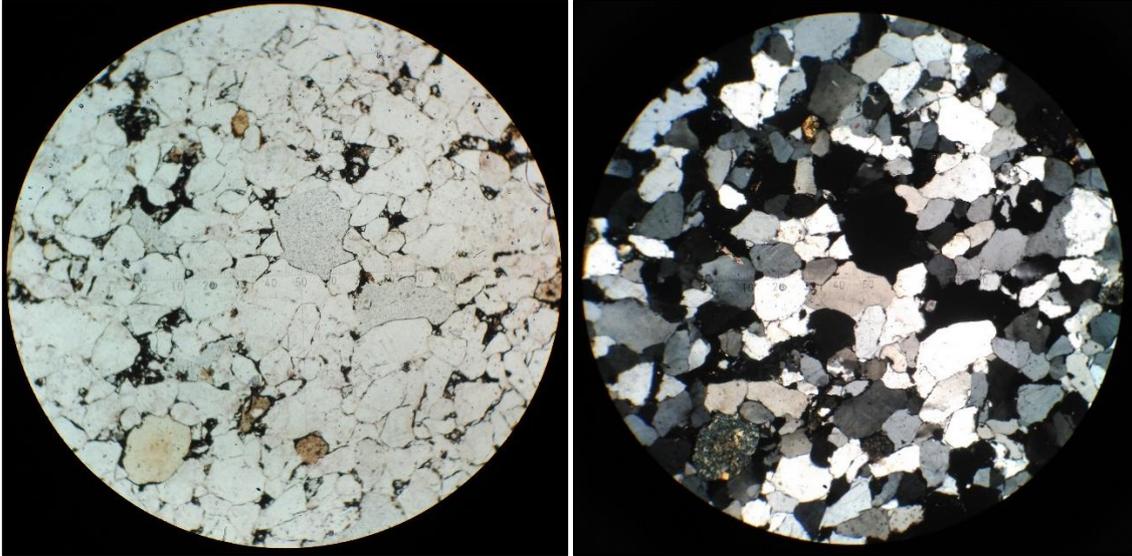


Figura 3.26.- Lámina en nicoles paralelos (izquierda) y nicoles cruzados (derecha). Diámetro del campo de visión: 4,5 mm.

- En el grupo de láminas delgadas pertenecientes a la EG-4, tanto la lámina perteneciente al bloque 5 como al bloque 7 son muy parecidas, representando así el tercer litotipo diferenciado. Estas están compuestas alrededor del 70% por granos de cuarzo mono y policristalinos de extinción no ondulante, con tamaños desde las 75 hasta las 375 micras en el bloque 5, y entre 100 y 550 micras en el bloque 7. Están entre moderadamente y bien seleccionados, presentan baja esfericidad y la redondez se encuentra entre subangular y subredondeado. En muchas ocasiones, estos granos están en contacto unos con otros (contacto saturado). El esqueleto también está compuesto por granos de feldespatos alterados (sobre todo microclina), los cuales representan alrededor del 25%, con unos tamaños comprendidos entre 150 y 250 micras en el bloque 5, y tamaños menos homogéneos en el bloque 7 que se sitúan entre 75 y 375 micras. Ambas están bien seleccionadas, presentan baja esfericidad y son subangulosas. También aparecen micas y granos de clorita, todo ello en muy baja proporción. El resto corresponde a la porosidad (<5%). En cuanto a la fase de unión está caracterizada por cemento sintaxial de cuarzo y muy minoritariamente matriz arcillosa de illita. La madurez mineralógica no es tan elevada como en el caso de los bloques estudiados de la EG-24, y la madurez textural se describe como arenisca madura. La clasificación en este caso según Pettijohn *et al.*, (1973) representa una arcosa (Fig. 3.27).

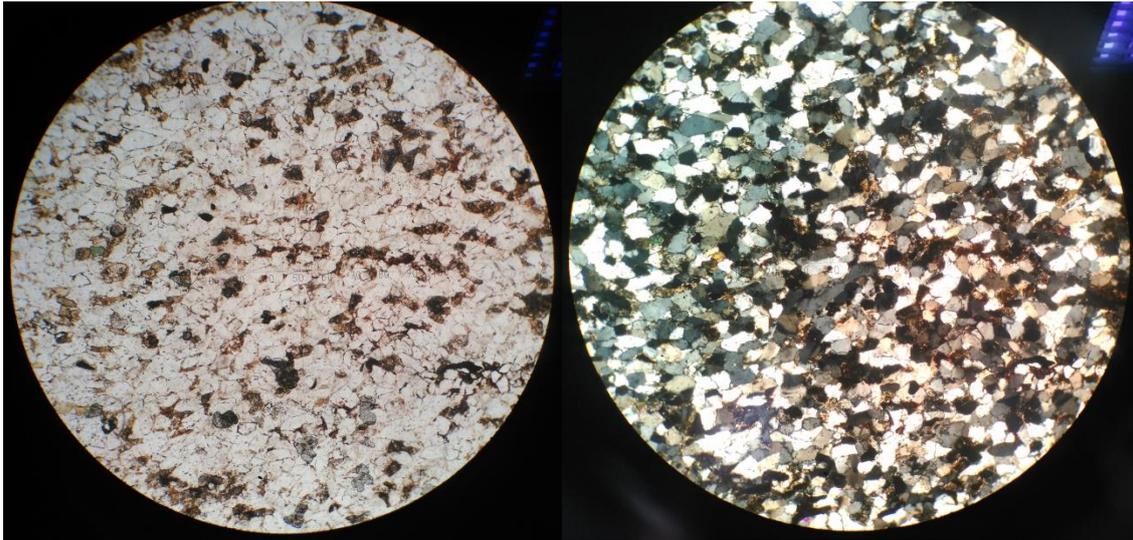


Figura 3.27.- Lámina en nicoles paralelos (izquierda) y nicoles cruzados (derecha). Diámetro del campo de visión: 4,5 mm.

3.3.2.- Densidad y porosidad

Con el ensayo correspondiente se determinó el promedio de la densidad aparente y de la porosidad abierta de los bloques 1 y 2 pertenecientes a los dos primeros litotipos; y bloques 4 y 6, pertenecientes al tercer litotipo. Además de la densidad real de la parte rojiza y blanquecina de la parte bandeada, y de la parte que no presenta el bandeado (Tablas 3.7 y 3.8).

Tabla 3.7.- Densidad aparente y porosidad abierta.

Bloques	Litotipos	Promedio densidad aparente (kg/m ³)	Promedio porosidad abierta (%)	Promedio densidad aparente (kg/m ³)	Promedio porosidad abierta (%)
Bloque 1	1 y 2 (Bandeado)	2464	9,8	2425	10,7
Bloque 2	1 y 2 (Bandeado)	2387	11,6		
Bloque 4	3	2551	3,5	2554	3,2
Bloque 6	3	2557	2,9		

Se puede apreciar que dentro de la parte bandeada, el bloque 2 presenta menos densidad que el bloque 1, ya que presenta más porosidad. Con respecto al bloque 4 y 6, ambas presentan una densidad muy parecida, y mayor con respecto a los anteriores bloques que presentan el bandeado, ya que la porosidad abierta es mucho menor.

Tabla 3.8.- Densidad real, porosidad total y porosidad cerrada.

Litotipos	Densidad real (kg/m ³)	Promedio densidad real (kg/m ³)	Porosidad total (%)	Porosidad cerrada (%)
Parte rojiza (bandeado)	3018	2918	16,8	6,1
Parte blanca (bandeado)	2819			
Parte sin bandeado	2722	2722	6,2	2,9

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

En cuanto a la densidad real, o de los granos minerales, se ha calculado de manera individual los litotipos del bandeado “atigrado”, pudiéndose observar que la parte rojiza presenta un valor mayor con respecto a la parte blanquecina, debido a que contiene más hierro, además se calcula el promedio de las dos partes del bandeado para poder comparar este dato con el promedio de la densidad aparente de los bloques 1 y 2. En cuanto a la porosidad total, no se pudo calcular para cada litotipo, porque sería necesario obtener un bloque rocoso de al menos 60 ml de volumen que solo comprendiese a una parte del bandeado, para cumplir con las normas del ensayo. Sin embargo, se opta por calcular el promedio de los valores calculados, obteniéndose así un valor de 16,78%. Y por tanto se puede calcular el promedio de la porosidad cerrada del bandeado. No ocurre lo mismo con el litotipo que no presenta el bandeado, ya que esta es homogénea, obteniéndose un valor de densidad real menor que en los casos anteriores, ya que está formado por granos de cuarzo y feldespato. Presenta una porosidad total bastante menor, al igual que pasa con la porosidad cerrada.

3.3.3.- Rotura bajo carga puntual

Como corresponde, de los datos obtenidos del ensayo de rotura bajo carga puntual no se tuvieron en cuenta aquellos que según la norma no cumplieron los requisitos de tipo de rotura producida que establece la norma seguida. Tampoco se consideran aquellos resultados anómalos debidos a que la fractura bajo carga se produjo a favor de algún plano de debilidad. Tal como se indicó, las muestras que se ensayaron pertenecían a bloques diferentes extraídos de dos estaciones geomecánicas. Entre ellas había diferencias texturales y de anisotropía debido a la presencia del bandeado “atigrado”. Además se ensayaron con diferentes tipos de muestras, bloque y testigo, y en las dos direcciones de la anisotropía en aquellas que la presentaban, para tratar de identificar si se producían diferencias entre ellas (Tabla 3.9).

Tabla 3.9.- Características de las probetas ensayadas a carga puntual.

Estaciones	Bloques	Probetas	Modalidad	Litotipo	Direc. Carga
EG-26	Bloque 1	M	Bloque	Litotipos 1 y 2	Perpendicular S0
		A	Testigo		Paralelo S0
	Bloque 2	B	Testigo		Perpendicular S0
EG-4	Bloque 5	E	Testigo	Litotipo 3	Perpendicular S0
	Bloque 6	F	Testigo		Perpendicular S0
	Bloque 7	G	Testigo		Perpendicular S0

Para obtener los resultados finales (Fig. 3.28) se tuvieron que hacer los cálculos oportunos que fija la norma correspondiente al ensayo.

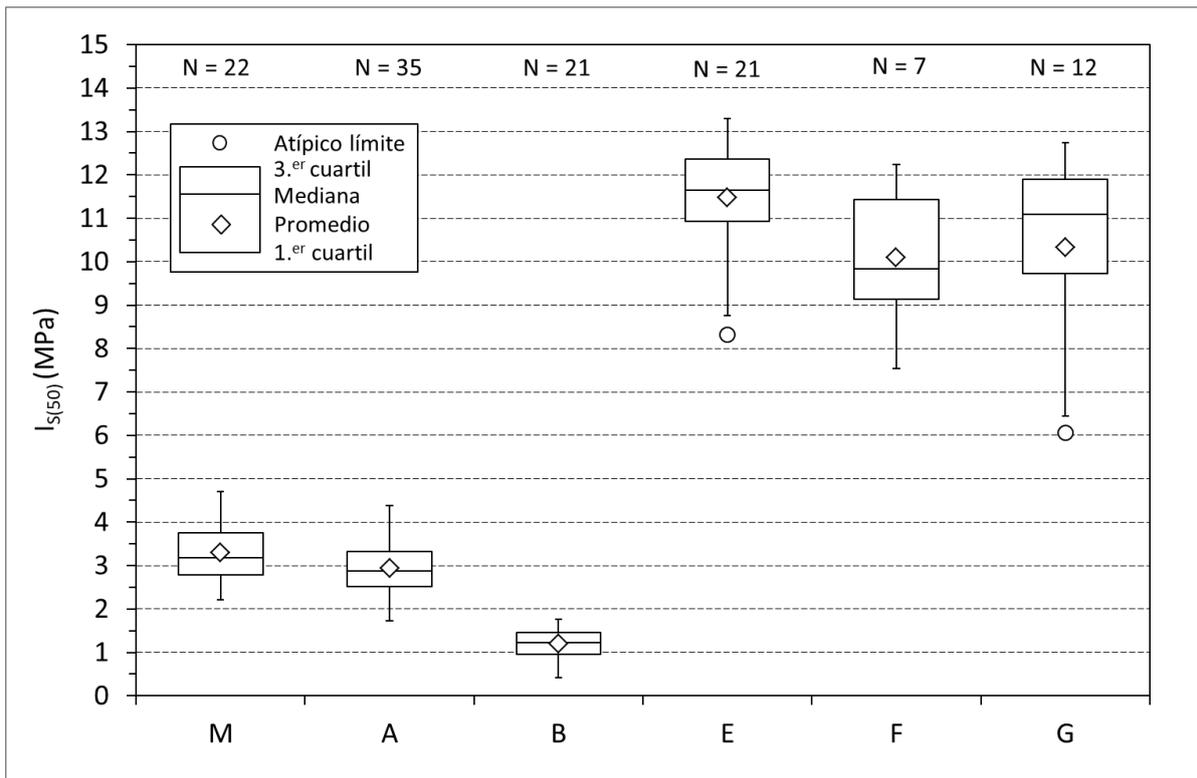


Figura 3.28.- Valores de índice de carga puntual corregido de todas las muestras ensayados.

Los valores obtenidos arrojan una clara diferencia entre los bloques que presentan en bandeado característico de la formación (litotipos 1 y 2), de los que no la tienen (litotipo 3), siendo estos últimos mucho más resistentes. Dentro del primer grupo de bloques que presenta la anisotropía, en bloque 1 representado por las muestras M (bloques y carga perpendicular a la estratificación) y A, (testigos y carga paralela a la estratificación) no muestran apenas diferencias, solamente que M es un poco más elevado que A. Lo que sí muestra diferencia es en la densidad, siendo el promedio de M de 2,37 y de 2,23 la de A (calculadas por medio geométrico y pesadas en seco). Esto debe ser a la porosidad, ya que como se apreció en el aspecto microscópico, había zonas que presentaban hasta un 25% de porosidad. Continuando con las muestras pertenecientes a la EG-24, las muestras B presentan menos resistencia a carga puntual que en los casos anteriores, debido a que tenía una densidad menor; por lo que se supone que habría sufrido una meteorización mayor. Los bloques pertenecientes a la EG-4, muestran resultados mucho mayores, cuyas medianas se sitúan entre 10,10 (muestras F) y 11,47 (muestras G); todas ellas presentan densidades muy parecidas, alrededor de 2,50 g/cm³ (Fig. 3.29).

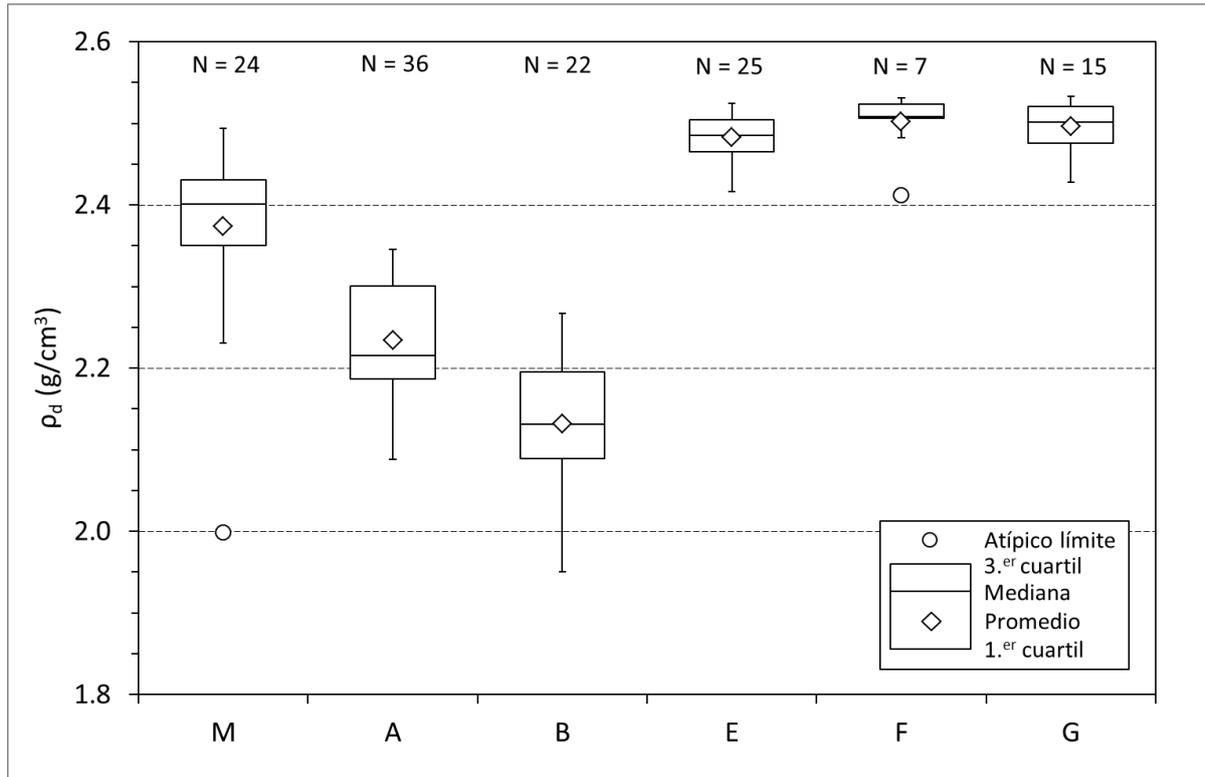


Figura 3.29.- Valores de la densidad calculados por método geométrico de las muestras ensayadas.

Finalmente para completar este ensayo, se realiza un estudio de las fracturas producidas en las probetas ensayadas y se observa en cuantos bloques fracturados se queda cada probeta, quedando resumido en la Tabla 3.10. Se observa que las muestras M, A y B, pertenecientes a los litotipos 1 y 2, presentan menos fracturas y por tanto menos bloques. Al revés de lo que ocurre con las muestras E, F y G, donde se obtienen más bloques al ensayarlos. Esto es debido a que sus roturas son más explosivas, debido a su vez, a su resistencia más elevada.

Tabla 3.10.- Cantidad de bloques obtenidos de cada ensayo

Muestra	Cantidad de bloques fracturados		
	2 bloques	3 bloques	4 bloques
M	20	2	0
A	30	4	1
B	20	1	0
E	8	13	0
F	3	4	0
G	7	5	0

3.3.4.- Velocidad de propagación de las ondas P

Los resultados que se obtienen del equipo de ultrasonidos reflejan una marcada diferencia entre los testigos de los bloques pertenecientes a la EG-24 (bloques 1 y 2) representando los dos primeros litotipos, de los pertenecientes a la EG-4 (bloques 5, 6 y 7)

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

que representa al tercer litotipo. Se omite el resultado obtenido del bloque 4 ya que solo se cuenta con un testigo y este no sería representativo (Tabla 3.11).

Tabla 3.11.- Velocidades de propagación de las ondas P, y su respectivas densidades calculadas por método geométrico.

Litotipo	Bloque	Condiciones secas		Condiciones ambientales	
		Densidad (g/cm ³)	Velocidad (m/s)	Densidad (g/cm ³)	Velocidad (m/s)
Litotipos 1 y 2	Bloque 1	2,25	2761	2,25	2617
	Bloque 2	2,15	1569	2,16	1448
Litotipo 3	Bloque 5	2,49	4419	2,50	4662
	Bloque 6	2,51	4388	2,53	4392
	Bloque 7	2,51	4451	2,52	4651

Las diferencias que hay entre el bloque 1 y 2 (que representan los dos primeros litotipos) son debidas a la dirección de propagación de las ondas, ya que en el bloque 1 se desplazaban paralelas a la estratificación presentando una velocidad alrededor de 2600 m/s, y en el bloque 2 perpendiculares a ella sobrepasando 1400 m/s. Ambas presentan una velocidad mayor, entre un 5 y un 8% respectivamente, en condiciones secas. Al contrario ocurre con los bloques 5, 6 y 7 (tercer litotipo), que presentan velocidades mayores en condiciones ambientales, en torno a 4500 m/s, que en condiciones secas, que están alrededor de 4400, representando hasta un 5%. En general, las velocidades son mucho mayores en el tercer litotipo que en los dos anteriores, debido a que su densidad es mayor y por tanto presentan menos porosidad.

3.4.- EVALUACIÓN GEOTÉCNICA

Una vez realizado todo el proceso de investigación descrito y habiendo obtenido los valores cuantificados de la caracterización geotécnica, una forma de hacerlos útiles es comprobando el comportamiento de los materiales en un escenario real. Para ello, se estudian dos aspectos que se investigan comúnmente en los estudios geológicos-geotécnicos como son la excavabilidad de los materiales y la estabilidad de los taludes.

3.4.1.- Excavabilidad

Para estimar la excavabilidad de los macizos rocosos existen variadas metodologías que toman como referencia diferentes variables: resistencia a compresión simple, meteorización de la roca, espaciado de las discontinuidades, abrasividad, velocidad de las ondas sísmicas, etc. En este estudio se ha escogido la propuesta de Pettifer y Fookes (1994), ya que relaciona y enfrenta una propiedad intrínseca de la roca matriz, la resistencia mecánica; y el grado de fracturación que presentaban los macizos (Fig. 3.30).

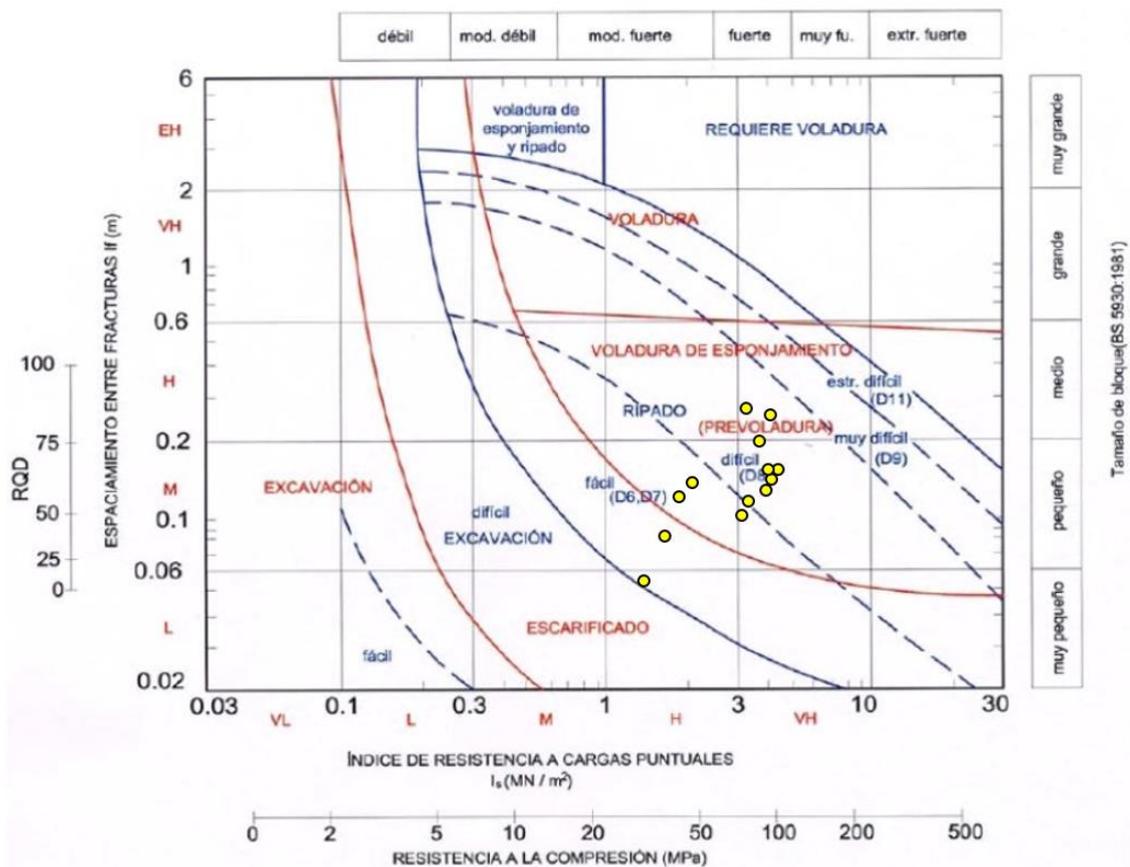


Figura 3.30.- Excavabilidad de los macizos rocosos estudiados.

Se observa una excavabilidad variada para los diferentes macizos rocosos estudiados, donde la mayoría se concentran en un ripado difícil, que tendría que ser resuelto por una prevoladura. Según la gráfica, habría dos macizos que no precisarían de la prevoladura, sino que sería suficiente con un escarificado.

3.4.2.- Estabilidad de taludes

Para evaluar de manera preliminar la estabilidad de los taludes de los macizos rocosos estudiados se han utilizado los datos procedentes del levantamientos de las estaciones geomecánicas. Para ello se utiliza la orientación y la pendiente del frente rocoso, y la disposición espacial de los planos de discontinuidades medidos para cada estación.

El análisis de la estabilidad de los macizos se realizó mediante una evaluación geométrica y cinemática de las inestabilidades mediante análisis en proyección estereográfica con el software Rocscience Dips (v. 6.0). Los distintos tipos de mecanismos de rotura investigados, cuantificados por el porcentaje de los planos críticos son los siguientes: deslizamiento planar, cuñas con intersección de planos, vuelco flexural y vuelco directo (Fig. 3.31).

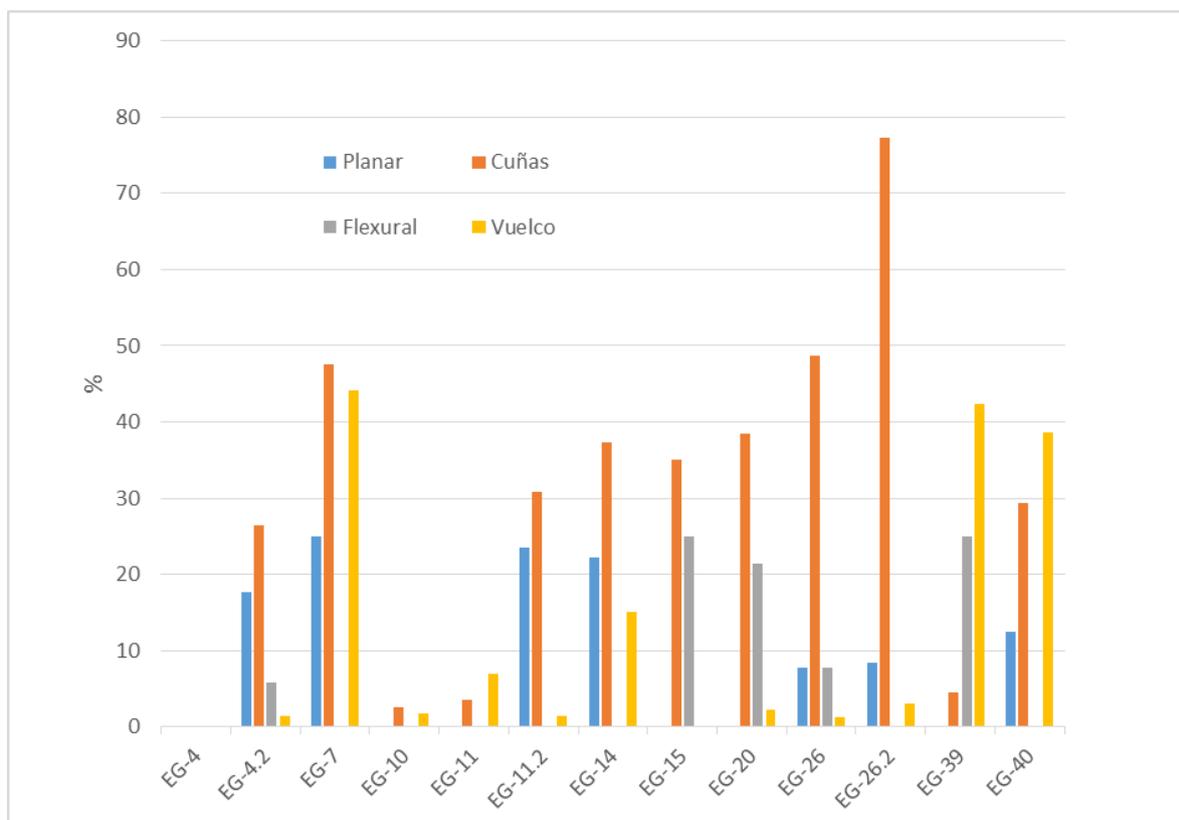


Figura 3.31.- Tipos de procesos de inestabilidad que se pueden producir en los macizos estudiados.

Con el objetivo de obtener unos resultados del lado de la seguridad, el límite lateral que ha de introducirse como dato en el programa para el cálculo en determinados mecanismos se

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

fija en 25° con respecto a la orientación tomada del frente rocoso. Del mismo modo se calcula el ángulo de rozamiento, usando en este caso el ángulo de rozamiento residual para cada estación geomecánica levantada (Tabla 3.12). Hubo dos valores que no pudieron calcularse para cada estación geomecánica, debido a la falta de datos del esclerómetro sobre las paredes de las discontinuidades: EG-11, donde se tomó de la EG-11.2; y en la EG-7, en que se adoptó el valor más bajo calculado.

Para calcularlo se hace uso de siguiente fórmula (Barton y Choubey, 1977):

$$\phi_r = (\phi_b - 20^\circ) + 20^\circ (r / R)$$

donde:

r = valor del rebote del martillo Schmidt sobre la pared de la discontinuidad

R = valor del rebote del martillo Schmidt sobre la matriz rocosa

ϕ_b = ángulo de fricción básico del material. En este caso = 32°

Tabla 3.12.- Porcentajes de tipos de inestabilidades y cálculo del ángulo de rozamiento residual para cada una de las estaciones geomecánicas levantadas.

	Planar	Cuñas	Flexural	Vuelco	Ángulo de rozamiento residual
EG-4	0	0	0	0	31
EG-4.2	17,65	26,47	5,88	1,47	34
EG-7	25	47,5	0	44,17	24
EG-10	0	2,5	0	1,67	30
EG-11	0	3,51	0	7,02	29
EG-11.2	23,53	30,88	0	1,47	29
EG-14	22,22	37,25	0	15,03	28
EG-15	0	35	25	0	28
EG-20	0	38,46	21,43	2,2	29
EG-26	7,69	48,72	7,69	1,28	32
EG-26.2	8,33	77,27	0	3,03	31
EG-39	0	4,55	25	42,42	33
EG-40	12,5	29,41	0	38,66	24

El tipo de rotura que más probabilidad presenta a la hora de producirse es el de rotura en cuñas, seguido del tipo vuelco directo. Esto es debido a que en la mayoría de los macizos estudiados la estratificación se encuentra subvertical, facilitando este tipo de inestabilidades. Los resultados obtenidos mediante el software son muy similares a las observaciones realizadas en campo, cuya demostración más llamativa se puede encontrar en la EG-26.2, que sobrepasa el 77% de roturas en forma de cuña (Fig. 3.32).



Figura 3.32.- EG-26.2, donde se puede apreciar, gracias a las juntas observadas, que la rotura más probable es mediante cuñas. Escala gráfica: 2 m.

4.- CONCLUSIONES

Las principales conclusiones obtenidas a partir de los datos obtenidos en la parte de trabajo de campo de este Trabajo Fin de Máster son las siguientes:

- En las 13 estaciones geomecánicas levantadas la roca presentó grados de alteración entre II y IV, con unas resistencias mecánicas que se sitúan entre 26 y 101 MPa determinadas con esclerómetro, valores que presentan una buena correlación con la apreciación cualitativa realizada con el martillo de geólogo.
- Las mediciones virtuales en los 5 Modelos Digitales de Afloramientos generados mostraron muy buena correlación con las medidas tomadas en campo, aunque presentan una variedad de planos de discontinuidades mayor.
- El promedio de familias de discontinuidades, incluyendo la estratificación fue de 4, mostrándose muy ortogonales entre sí, y por lo general, presentando los planos poca variabilidad de orientación en cada familia.
- La densidad de la fracturación está más condicionada por la meteorización física que la química, que se limita a crear delgadas películas de óxido de hierro en las fracturas ya creadas.
- El análisis de las discontinuidades muestra varias características: el espaciado presenta un amplio rango pero se agrupa entre “junto” y “moderadamente junto”; la continuidad es “muy baja” y “baja” mayoritariamente; la abertura también presenta unos rangos amplios, pero se concentra entre “parcialmente abierta” y “moderadamente ancha”; la rugosidad también varía mucho, pero los rangos más marcados son “ondulada rugosa”, ondulada plana” y “plana rugosa”; y finalmente en cuanto a los rellenos, la mayoría de ellos tendían un grado de alteración III, estaban secas y la resistencia de los rellenos era “blando” y “medio”.
- El factor J_v marca un rango de 11 a 42, aunque la mayoría de ellos se concentran en el rango de entre 15 y 25, que determina un tamaño de bloque “pequeño”. A su vez el RQD presenta valores entre 5 y 82,5 (mayoritariamente 47,5 a 72,5) representando una calidad “aceptable”.
- Las distintas clasificaciones dividen a las estaciones geomecánicas en tres rangos, pero la Q infravalora los macizos con respecto a GSI y RMR existiendo una buena correlación entre estas dos últimas. Según el GSI establece 1 afloramiento de calidad “mala”, 6 como calidad “media” y 6 como calidad “buena”; el RMR señala 1 afloramiento de calidad “mala”, 10 de calidad “media” y 2 de calidad “buena”. Sin embargo, la Q establece 1 afloramiento como “extremadamente alto”, 2 como “muy malo” y 10 como “malo”.
- La deformabilidad de los macizos calculada para cada estación geomecánica mediante 6 propuestas bibliográficas refleja valores de módulo de deformación comprendidos entre 1,7 y 11 GPa. Los cálculos realizados mediante el software

RocLab definen módulos entre 0,13 y 10,8 GPa. Se observó que las propuestas de algunos autores ajustan mejor en macizos con superiores características geotécnicas; mientras que otras concuerdan más con macizos más deficientes.

Las muestras tomadas en campo representan dos litotipos representativos de la Fm. Naranco: la arenisca ferruginosa 'atigrada' (a su vez formada por niveles rojizos y blanquecinos), y una arenisca blanca sin bandeado. Las principales conclusiones extraídas de la caracterización de estos materiales en laboratorio son las siguientes:

- En la observación macroscópica mediante lupa binocular de la parte bandeada se identifican poros de hasta 1 mm de diámetro, mientras que el litotipo sin bandeado se aprecia más cristalino y sin aparente porosidad.
- La parte rojiza del bandeado presenta cerca del 20% de óxido de hierro, mientras que en la blanca apenas sobrepasa el 4%, lo que explica la coloración. El litotipo sin bandeado solo tiene un 3%, pero muestra más óxidos de aluminio (6,43%) y potasio (2,62%). El contenido de sílice supera el 85% en promedio de todas las muestras.
- Mediante difracción de rayos X se apreció que los componentes mayoritarios de la parte bandeada son el cuarzo y óxido de hierro; en el litotipo sin bandeado las fases mayoritarias son cuarzo y microclina. Esto encaja con los resultados de quimismo obtenidos en la fluorescencia de rayos X.
- Mediante microscopía se observó que el óxido de hierro compone el cemento pelicular entre los granos de cuarzo que componen mayoritariamente el esqueleto (>75%) en ambas partes del bandeado. Este cemento pelicular está mucho más presente y desarrollado en la parte rojiza del bandeado cerrando la porosidad. La parte blanquecina presenta unos tamaños de granos más grandes que la parte rojiza, de hasta 1 frente a 0,5 mm respectivamente (tamaños máximos); y ambas partes presentan tamaños de granos más grandes, con respecto al litotipo sin bandeado, teniendo unos tamaños de hasta 0,375 mm. Este último presenta alrededor del 25% de feldespatos, mayoritariamente microclina y un cemento syntaxial de cuarzo, reduciendo así la porosidad respecto al litotipo bandeada.
- La porosidad abierta calculada para el litotipo bandeado, clasificado como subarcosa, fue del 10,7% y del 3,2% en la roca sin bandeado (arcosa). La densidad los granos minerales de la parte rojiza –más rica en Fe– del bandeado es de 3,01 g/cm³, y de 2,81 g/cm³ en la parte blanca. A su vez al litotipo sin bandeado le corresponde 2,72 g/cm³. La porosidad total del litotipo bandeado llega hasta el 16,8% (deduciendo así que la porosidad cerrada es del 6,1%), mientras que la arenisca sin bandeado tiene un 6,2% de porosidad total y un 2,9 de porosidad cerrada.
- Los ensayos de punzonamiento mostraron la significativa mayor resistencia del litotipo sin bandeado respecto a la roca 'atigrada', presentando valores de mediana

de índices de carga puntal corregidos de 11 frente a los 2 MPa de la subarcosa bandeada.

- Realizados los ensayos de carga puntal tanto perpendicular como paralelamente a la anisotropía que supone el bandeo, apenas se pudieron observar diferencias. Para la primera disposición se obtuvo un resultado de 3,081 MPa y para la segunda de 2,884 MPa.
- Las velocidades de transmisión de las ondas P también son muy distintas entre los dos litotipos objeto de estudio. Las muestras bandeadas presentan diferentes velocidades en función de la dirección de la propagación con respecto a la estratificación; en torno a 2600 m/s en paralelo y 1400 m/s en disposición perpendicular en condiciones ambientales. Cabe señalar que en seco aumenta la velocidad hasta en un 8%. Las velocidades de propagación en las muestras de roca no bandeada tienen velocidades muy superiores, en torno a 4600 m/s.
- La evaluación geotécnica sugiere que, en la mayoría de los casos, la excavabilidad de los macizos estudiados se realice mediante prevoladura, y que el tipo de rotura más probable es mediante cuñas.

5.- BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, J.L. (1989): "Fold reactivation involving angular unconformable sequences: theoretical analysis and natural examples from the Cantabrian Zone (Northwest Spain)". *Tectonophysics*, 170: 57-77.
- Alonso, J.L. y Pulgar, J. A. (1995): La estructura de la Zona Cantábrica. En: *Geología de Asturias*, (Aramburu, C., Bastida, F.) Ed. TREA, S. L., 314 pp.
- Alonso, J.L., Pulgar, J. A., García-Ramos, J. C. y Barba, P. (1995): Tertiary basins and alpine tectonics in the Cantabrian Mountains (NW Spain), en: *Tertiary Basins of Spain. Tectonics, climate and sea-level changes* (P. F. Friend y C. Dabrio, eds. Cambridge University Press).
- Alonso, J.L., García-Alcalde, J.L., Aramburu, C., García-Ramos, J.C., Suarez, A. y Martínez Abad, I. (2008): Sobre la presencia de la Formación Naranco (Devónico Medio) en el Manto de Bodón (Zona Cantábrica): Implicaciones paleográficas. *Trabajos de Geología*, 28: 159-169.
- Aramburu, C. y Bastida, F. (1995): *Geología de Asturias*. Ediciones TREA, S. L., Gijón. 314 pp.
- Barton, N. (1995): The influence of joint properties in modelling rock masses. *Proceedings of 8th Congress on Rock Mechanics*, 3: 1026-1052. Tokio.
- Barton, N. (2002): Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *Int. Journal of Rock Mech & Min Sci*, 39 (2): 185-216.
- Barton, N. y Choubey, V. (1977): The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock mechanics*, 10: 1-54.
- Barton, N., Lien, R. y Lunde, J. (1974): Engineering classification of rock masses for temdesing of tunnel support. *Rock Mech*, 6 (4): 189-236.
- Bastida, F. y Gutiérrez, G. (1989): Síntesis cartográfica de las unidades occidentales de la Zona Cantábrica (NO de España). *Trabajos de Geología*, 18: 117-125.
- Bastida, F. y Aller, J. (1995): Rasgos geológicos generales. En: *Geología de Asturias*, (Aramburu, C., Bastida, F.) Ed. TREA, S. L., 314 pp.
- Bieniawski, Z.T. (1973): Engineering classification of jointed rock masses. *Trans S. Afr. Inst. Civ. Eng.*, 15: 335-344.
- Bieniawski, Z.T. (1989): *Engineering Rock Mass Classifications*. Wiley & Sons, New York.
- Espina, R. G., De Vicente, G. y Muñoz Martín, A. (1996): Análisis poblacional de fallas alpinas en el borde occidental de la Cuenca Vasco-cantábrica (Cordillera Cantábrica, NO de España). *Geogaceta*, 20(4): 936-938.

Caracterización geomecánica preliminar de la Formación Naranco (Asturias)

Máster Universitario Oficial de Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

- García-Alcalde, J.L. (1995): Título del apartado. En: *Geología de Asturias*, (Aramburu, C., Bastida, F.) Ed. TREA, S. L., 314 pp.
- García-Alcalde, J.L. (1996): El Devónico del Dominio Astur-Leonés de la zona Cantábrica (N de España). *Revista Española de Paleontología*, N° Extraordinario: 58-71.
- García-Alcalde, J.L. (2015): La sucesión del Emsiense más alto-Eifeliense basal (Devónico) en el dominio Astur-leonés de la Zona Cantábrica (N de España) y su fauna de braquiópodos. *Trabajos de Geología*, 35: 41-98.
- García-Ramos, J.C. (1976): Morfología de trazas fósiles en dos afloramientos de “Arenisca de Naranco” (Devónico Medio) de Asturias (NO de España). *Trabajos de Geología*, 8: 131-171.
- García-Ramos, J.C. (1977): *Estudio de las series detríticas del Devónico medio en la Cordillera Cantábrica (Asturias y León)*. Tesis Doctoral. Departamento de Geología, Universidad de Oviedo.
- García-Ramos, J.C. (1978): Estudio e interpretación de las principales facies sedimentarias comprendidas en las Formaciones Naranco y Huergas (Devónico medio) en la Cordillera Cantábrica. *Trabajos de Geología*, 10: 195-247
- Gervilla, M., Beroiz, C., Pignateli, R., Baron, A., Coma, E., Felgueroso, C., Ramírez del Pozo, J. y Giannini, G. (1974): Mapa Geológico de España. E. 1:50.000. Hoja 29 (Oviedo), Serie MAGNA. IGME.
- Gokceoglu, C., Sonmez, H. y Kayabasi, A. (2003): *Predicting the deformation moduli of rock masses*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40 (5): 701-710.
- Grimstad, E. y Barton, N. (1993): Updating the Q-System for NMT. Proc. int. symp. On sprayed concrete modern use of wet mix sprayed concrete for underground support. *Fagernes*, 46-66, Oslo.
- Gutiérrez Claverol, M. y Torres Alonso, M. (1995): *Geología de Oviedo: descripción, recursos y aplicaciones*. Ed. Paraiso, Oviedo. 276 pp.
- Gutiérrez Claverol, M. y Luque Cabal, C. (2010): *Riquezas geológicas de Asturias*. Eujoa Artes Gráficas., 419 pp.
- Hoek, E. (1994). Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal*, 2 (2), 4-16.
- Hoek, E. y Brown, E.T. (1997): Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34 (8): 1165-1186.
- Hoek, E., Kaiser, P.K. y Bawden, W.F. (1995): *Support of the underground excavations in hard rock*. Balkema, Rotterdam.

- Hoek, E., Carranza-Torres, C. y Corkum, B. (2002): *Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition*. En: Proceedings of NARMS-TAC 2002, Mining Innovation and Technology (R. Hammah, W. Bawden, J. Curran & M. Telesnicki, Eds.), Toronto, 10 July 2002, University of Toronto, pp. 267-273.
- IGME (1989): Mapa Hidrogeológico de España. E. 1:200.000. Hoja 3 (Oviedo)
- ISRM (1981): *Rock characterization, testing and monitoring. ISRM suggested methods*. Ed. E.T. Brown, Pergamon Press, 211 pp., London. Marinos y Hoek.
- Julivert, M. (1967): “La ventana del Río Monasterio y la terminación meridional del Manto del Ponga”. *Trabajos de Geología*, Univ. de Oviedo, 1: 59-76.
- Julivert, M., Truyols, J., Ramírez del Pozo, J. y Giannini, G. (1974): Mapa Geológico de España. E. 1:50.000. Hoja 14 (Gijón), Serie MAGNA. IGME.
- Katz, O., Reches, Z. y Roegiers J.C. (2000): Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt hammer. *Tech. Note Int. J Rock Mech. Min Sci.* 37: 723-728
- Khabbazi, A., Ghafoori, M., Lashkaripour, G.R. y Cheshomi, A. (2012): Estimation of the rock mass deformation modulus using a rock classification system. *Geomechanics and Geoengineering*, 8 (1): 46-52.
- Lepvrier, C. y Martínez-García, E. (1990): Fault development and stress evolution of the post-Hercynian Asturian Basin (Asturias and Cantabria, northwest Spain). *Tectonophysics*, 184: 345-356
- Lotze, F. (1945): “Zur Gliderung der Varisziden der Iberischen Meseta” *Geotekt. Forsch.*, 6: 78-92.
- Marcos, A. (1973): “Las series del Paleozoico inferior y la estructura herciniana del Occidente de Asturias (NW de España)”. *Trabajos de Geología*, Univ. de Oviedo, 6: 1-113.
- Miller, R.P. (1965): *Engineering classification and index properties for intact rock*. PhD thesis, University of Illinois.
- Muñiz Menéndez, M., Cano Linares, H., Pardo de Santayana Carrillo, F. y Sandoval Montero, N. (2013): *Evaluation of the Deformation Modulus of Algeciras Flysch Unit by means of Pressuremeter Tests: Correlation with RMR* Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Parallel session ISP-6. Paris, Francia.
- Palmström, A. (2005): Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD). *Tunnels and Underground Space Technology*, 20: 362-377.

- Palmström, A. y Singh, R. (2001): The deformation modulus of rock masses – comparisons between in situ test and direct estimates. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16 (3): 115-131.
- Pérez-Estaún, A., Bastida, F., Alonso, J. L., Marquinez, J., Aller, J., Álvarez-Marrón, J., Marcos, A., y Pulgar J. A. (1988): “A thin-skinned tectonics model for an arcuate fold and thrust belt: the Cantabrian Zone”. *Tectonics*, 7: 517-538.
- Pettifer, G.S. y Fookes, P.G. (1994): A revision of the graphical method for assessing the excavatability of rock. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 27: 14-164.
- Pettijohn, F., Potter, P. y Siever, R. (1987): *Sand and sandstone*. New York, Springer-Verlag, 553 p.
- Pulgar, J. A., Alonso J. L., Espina, R. G. y Marín J. A. (1999): “La deformación alpina en el basamento varisco de la Zona Cantábrica”. *Trabajos de Geología*, 21: 283-294.
- Pulgar, J. A., Pérez-Estaún, A., Gallart, J., Alvarez-Marrón, J., Alonso, J. L., Gallastegui, J. y ESCIN Group (1995): The ESCIN-2 deep seismic reflection profile: a traverse across the Cantabrian Mountain and adjacent Duero Basin. *Rev. Soc. Geol. España*, 8 (4).
- Vera, J.A. (editor) (2004): *Geología de España*. SGE-IGME, Madrid.