



Universidad de Oviedo



Facultad de Geología

TRABAJO FIN DE MÁSTER

# **CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FORMACIÓN BARRIOS EN LA ZONA CANTÁBRICA**

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Facultad de Geología

MÁSTER EN RECURSOS GEOLÓGICOS E INGENIERÍA GEOLÓGICA

JULIO - 2018



## AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer de manera sincera la ayuda a las siguientes personas, dado que, sin su inestimable y desinteresada ayuda, no hubiera sido posible la realización de este trabajo:

- En primer lugar, agradecer a mi tutor Vicente Gómez Ruiz de Argandoña por guiarme en la realización del trabajo y los ensayos de laboratorio, tanto en la jornada laboral como en su tiempo libre, y ayudarme a compaginar mi jornada laboral con el Trabajo Fin de Máster.
- A Carlos López Fernández, Profesor Titular del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo, quien me ha ayudado y ha sido clave en mi formación, especialmente durante estos 3 últimos años. Además, ha realizado las funciones de cotutor, aunque no tenga el reconocimiento oficial.
- A Sergio Llana Fúnez, profesor del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo, y al grupo de investigación Geocantábrica, por proporcionarme parte de las muestras ensayadas y colaborar en varios aspectos del trabajo.
- A Luis Alberto Pando González, profesor del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo, por estar siempre predispuesto a ayudarme en cualquier consulta que pudiera hacerle.
- A José María Fernández Alba, jefe del área de Ingeniería del Terreno y RRMM de la empresa Applus + Norcontrol, por facilitarme su ayuda en todo momento que fuera necesario, y concederme días para los imprevistos surgidos en la elaboración del trabajo.
- A Verónica Gómez Vicente y Javier Fernández Fernández, geóloga e ingeniero geológico del departamento de Ingeniería del Terreno y RRMM de la empresa Applus + Norcontrol, por ayudarme y darme consejos en todo momento.
- A Irene Sánchez Cela, por su ayuda en la elaboración de las estaciones geomecánicas, y su apoyo durante la elaboración de todo el trabajo.
- Por último y no menos importante a toda mi familia por animarme y ayudarme siempre para que siguiera adelante en lo que me propusiera.

Muchas gracias a todos.



## FIRMAS

D. Andrés Zaragoza Alonso, autor del Trabajo Fin De Máster titulado “CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FORMACIÓN BARRIOS EN LA ZONA CANTÁBRICA”, confirma que es un trabajo original y solicita su presentación en el Máster Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 16 de Julio de 2018



Fdo: Andrés Zaragoza Alonso

El Dr. Vicente Gómez Ruiz de Argandoña, profesor Titular del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo, confirma que ha dirigido el trabajo “CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FORMACIÓN BARRIOS EN LA ZONA CANTÁBRICA”, realizado por D. Andrés Zaragoza Alonso y autoriza la 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 16 de Julio de 2018



Fdo: Vicente Gómez Ruiz de Argandoña



## INDICE

RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	1
1. INTRODUCCIÓN, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS .....	2
1.1. Uso de la cuarzoarenita (cuarcita) como roca industrial en Asturias .....	4
2. CONTEXTO GEOLÓGICO .....	13
2.1. Zona Cantábrica (ZC).....	14
2.2. Zona Astur-Occidental Leonesa (ZAOL).....	15
2.3. Zona Centroibérica (ZCI).....	16
2.4. Macizo Armoricano.....	16
2.5. Estratigrafía .....	17
3. METODOLOGÍA DE TRABAJO .....	18
3.1. Trabajo de gabinete .....	19
3.2. Trabajo de campo .....	19
3.3. Trabajo de laboratorio .....	22
Preparación de probetas.....	23
Descripción macro y microscópica .....	26
Análisis de la composición química .....	27
Determinación de propiedades físicas elementales .....	28
Procedimientos de los cálculos.....	29
Velocidad de propagación de las ondas P y S y ratio $V_p/V_s$ .....	30
Resistencia a la compresión uniaxial (RCS) .....	30
Ensayo tracción indirecta o ensayo brasileño.....	31
Ensayo de carga puntual.....	32
3.3. Análisis e interpretación de los datos .....	35
4. RESULTADOS .....	35
4.1. Estaciones geomecánicas: caracterización del macizo rocoso .....	35
Análisis de las discontinuidades: disposición.....	37
Continuidad .....	39
Apertura de las discontinuidades.....	40
Rugosidad.....	40
Densidad de fracturación: $J_v$ y RQD.....	41
Clasificación de los macizos rocosos: RMR y Q de Barton.....	43
4.2. Laboratorio .....	43
Estudios petrográficos .....	43
Difracción y fluorescencia de rayos X .....	49
Propiedades físicas elementales .....	52





Velocidad de propagación de las ondas sísmicas .....	54
Resistencia a la comprensión simple .....	58
Ensayo tracción indirecta o ensayo brasileño.....	59
Ensayo de carga puntual.....	62
4.3. Análisis e interpretación de los datos .....	65
Análisis e interpretación de los resultados obtenidos en campo .....	65
Análisis e interpretación de los resultados de laboratorio .....	66
5. CONCLUSIONES.....	68
6. BIBLIOGRAFÍA.....	71

## ANEXOS

Anexo I. Características de las probetas: propiedades físicas elementales y velocidad de propagación de las ondas.

Anexo II. Características de las probetas: resistencia a la comprensión simple, ensayo brasileño y carga puntual.

Anexo III. Datos de obras públicas.





## RESUMEN

Este Trabajo Fin de Máster, tiene como principal objetivo caracterizar y estudiar geotécnicamente las cuarzoarenitas de la Formación Barrios en la Zona Cantábrica. El motivo de la investigación de estos materiales, es que se pueden encontrar en numerosas obras y afloramientos a lo largo de la Península Ibérica y concretamente en la zona que nos concierne. Esta unidad geológica está compuesta fundamentalmente por cuarzoarenitas de edad Ordovícica denominadas coloquialmente “Cuarcita Armoricana” o “Cuarcita de Barrios”, en ocasiones, aparecen intercaladas con pizarras negras o verdes.

Desde un punto de vista geotécnico, la Formación Barrios nunca ha sido objeto de estudio, a pesar de encontrarse en zonas importantes como en el entorno de la línea del Ave de Pajares. En primer lugar, se ha desarrollado un trabajo bibliográfico en busca de parámetros geotécnicos de la Formación Barrios en obras públicas llevadas a cabo en la Península Ibérica. Posteriormente, se ha realizado un estudio exhaustivo mediante ensayos de campo y laboratorio en diversas muestras recogidas en distintos puntos de la Zona Cantábrica. Una vez clasificadas a partir de sus características geomecánicas, se ha llevado a cabo una comparación de los resultados determinados en el presente trabajo, con los parámetros geotécnicos obtenidos de las obras públicas.

## ABSTRACT

The main objective of this Master Final Project is characterize and study geotechnically the quartzites of the Barrios Formation in the Cantabrian Zone. The reason for this investigation of these materials is that they can be found in numerous constructions and outcrops throughout the Iberian Peninsula and specifically in the area that concerns us. This geological unit is composed of Ordovician quartzites, called colloquially "Armorican Quartzite". Sometimes, they appear with black or green shales.

From a geotechnical point of view, the Barrios Formation has never been the object of study, in despite of their locatation in importants contructions as high speed rail line of Pajares. In the first place, a bibliographic work has been developed in search of geotechnical parameters of the Barrios Formation in public works carried out in the Iberian Peninsula. In addition, an exhaustive study was made with field and laboratory tests in various samples collected at different points in the Cantabrian Zone. When the specimens have been classified as of their geomechanical characteristics, it has been made a comparasion of the results determined in the present work, with the geotechnical parameters obtained from public works.



## 1. INTRODUCCIÓN, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

Esta memoria representa el Trabajo Fin de Máster del *Máster oficial en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica* del alumno que la suscribe, Andrés Zaragoza Alonso. El trabajo aborda la caracterización geomecánica de una parte de los materiales de la Formación Barrios en la Cordillera Cantábrica.

Esta unidad, está constituida principalmente por cuarzoarenitas muy duras de tonalidad blanquecina o amarillenta, entre las que se intercalan pizarras grises o verdosas, en ocasiones, muy caoliníticas. Además, en algunos casos, incluye un nivel de conglomerados silíceos con varios metros de potencia y, una capa de caolín derivada de una antigua toba volcánica característica, que presenta una gran continuidad y una potencia media aproximada de 50 cm.

En este punto, es necesario recalcar que esta Formación en algunos lugares ha sufrido un cierto grado de metamorfismo, lo cual comporta que en algunos trabajos, sobre todo antiguos aparezca el término cuarcita. En este sentido, dicho término se ha empleado erróneamente en algunos de los estudios sobre la Formación Barrios que aparecen a continuación.

El espesor de la Formación Barrios en Asturias oscila entre 50 y 1.020 m, con un valor promedio de 500 m. La edad que se le atribuye comprende desde el Cámbrico Medio al Ordovícico Inferior ([Aramburu, 1989](#); [Aramburu y García-Ramos, 1993](#)). Los escasos indicios paleontológicos que contiene, corresponden a diversos tipos de icnofósiles ([cruziana](#) y [Skolithos](#)), que han permitido datar parte de las rocas como Ordovícico Inferior (Arenig).

Uno de los primeros autores que estudió esta Formación fue [Schulz \(1858\)](#), otorgándole su primer nombre, “cuarcita de Cabo Busto”. Posteriormente, [Barrois \(1882\)](#) la denominó “Arenisca de Cué”, y en 1902 “Grés de Cabo Busto”. En 1912, Adaro propuso “Cuarcita de los Cabos” al comprobar que por su mayor dureza los salientes costeros resistían la acción marina ([Adaro y Junquera, 1916](#)). Además de su actual nombre, y el de las variantes de “cuarcita de Cabo Busto”, también ha sido conocida como “Cuarcita Armoricana” o “Gres Armoricana Francesa”, por su similitud litológica y de edad con la Formación así denominada en el Macizo Armoricano de la Bretaña Francesa ([Rouault, 1851](#)). Otro nombre aplicado a esta unidad, aunque menos conocido, es el de “Arenig inferior del País de Gales”.

En los estudios llevados a cabo por [Schulz \(1858\)](#) en el saliente de “El Tangón” (Gijón, Asturias), en la prolongación septentrional de la “Campa Torres”, y en Ribadesella, asignó erróneamente a la Formación Barrios al Carbonífero. La primera referencia a las cuarcitas como edad siluriana (Ordovícico) es de [Quiroga en 1887](#), por el hallazgo de [Skholitos](#) en el oriente de Asturias. En 1916, [Adaro y Junquera](#), confirman dicha afirmación al comparar las muestras con las del occidente de Asturias y Bretaña. El hallazgo de [cruziana](#) y [Skholitos](#) por, [Hernández Sampelayo \(1928 y 1936\)](#), confirmó su pertenencia al Ordovícico inferior.

Posteriormente, [Comte \(1937a, 1937b, 1938, 1959\)](#) estableció las bases estratigráficas del Paleozoico en la vertiente meridional de la Cordillera Cantábrica, definiendo la mayor parte de las unidades estratigráficas utilizadas en la actualidad, entre ellas la denominada “cuarcita de Barrios”. Además, fue [Comte \(1959\)](#), quien atribuyó a la Fm. Barrios al Ordovícico, sugiriendo que la base puede tener una edad variable debido a cambios laterales de facies, y un techo con una edad exclusiva del Arenig (también Tremadoc en su parte inferior). Años después, se desarrollaron numerosos estudios sobre esta formación en la Cordillera Cantábrica, entre los que se pueden citar: [Olele \(1964\)](#), [Julivert \(1967a\)](#), [Pello \(1967\)](#) y [Marcos \(1967\)](#), [Bosh \(1969\)](#), [Gietelink \(1973\)](#), [Baldiwn \(1977\)](#), [García Ramos, Aramburu y Brime \(1984\)](#) [Aramburu y García Ramos \(1988\)](#), [Aramburu \(1989\)](#) y [Aramburu et al., \(2006\)](#).

La Fm. Barrios aflora en amplias zonas de la Península Ibérica (Figura 1-1) dando lugar a relieves muy pronunciados tanto en la zona noreste de España como en el sector central peninsular, donde su extensión y presencia es aún mayor, que en la zona septentrional de la Península ([Hernández Sampelayo, 1942](#)).

Esta Formación, está presente en la serie estratigráfica de prácticamente todas las unidades que forman la Zona Cantábrica del Macizo Ibérico ([Julivert, 1967](#)), dando lugar a numerosos resaltes topográficos y costeros, destacando los amplios afloramientos de los cabos Peñas, Vidrias y Torres. En la vertiente sur de la Cordillera Cantábrica, aparecen importantes afloramientos en la zona de Barrios de Luna, al sureste de Ponferrada y al noroeste de León.

En la parte oriental de Galicia (Figura 1-1), la denominada “cuarcita de los Cabos” ([Loetze 1958](#)), está constituida por areniscas y pizarras que culminan en bancos de cuarcitas blancas, cuyos espesores son menores que en Asturias (entre 30 y 80 m). En zonas más centrales, las capas tienen gran continuidad y una dirección N-S, desde la localidad de Vivero (Lugo), en la costa, hasta la Sierra del Courel (Ourense). Además, en Viana de Bollo (Orense) hay afloramientos con dirección noroeste - sureste, cuyo espesor puede alcanzar los 300 m.

En la zona central de la Península Ibérica, esta Formación aparece constituida por 200 – 400 m de bancos de ortocuarcitas blancas con [cruziana](#) y laminaciones cruzadas, dando lugar a los mayores resaltes topográficos, entre los 500 y 670 m.

Así, en el noroeste de la provincia de Zamora (Figura 1-1) aflora en las proximidades de Puebla de Sanabria, Alcañices y en La Sierra de Culebra, formada por una alternancia de cuarcitas y pizarras negras con intercalaciones de microconglomerados, con un espesor mayor de 600 m y similares a los del occidente de Asturias. En Salamanca y Ávila la Formación Barrios tiene una menor presencia, apareciendo únicamente en pequeños afloramientos aislados. En la zona de Córdoba y Jaén (Andalucía), las capas presentan una gran continuidad, con dirección E-O, a lo largo de la frontera con Extremadura y Castilla y La Mancha, respectivamente.



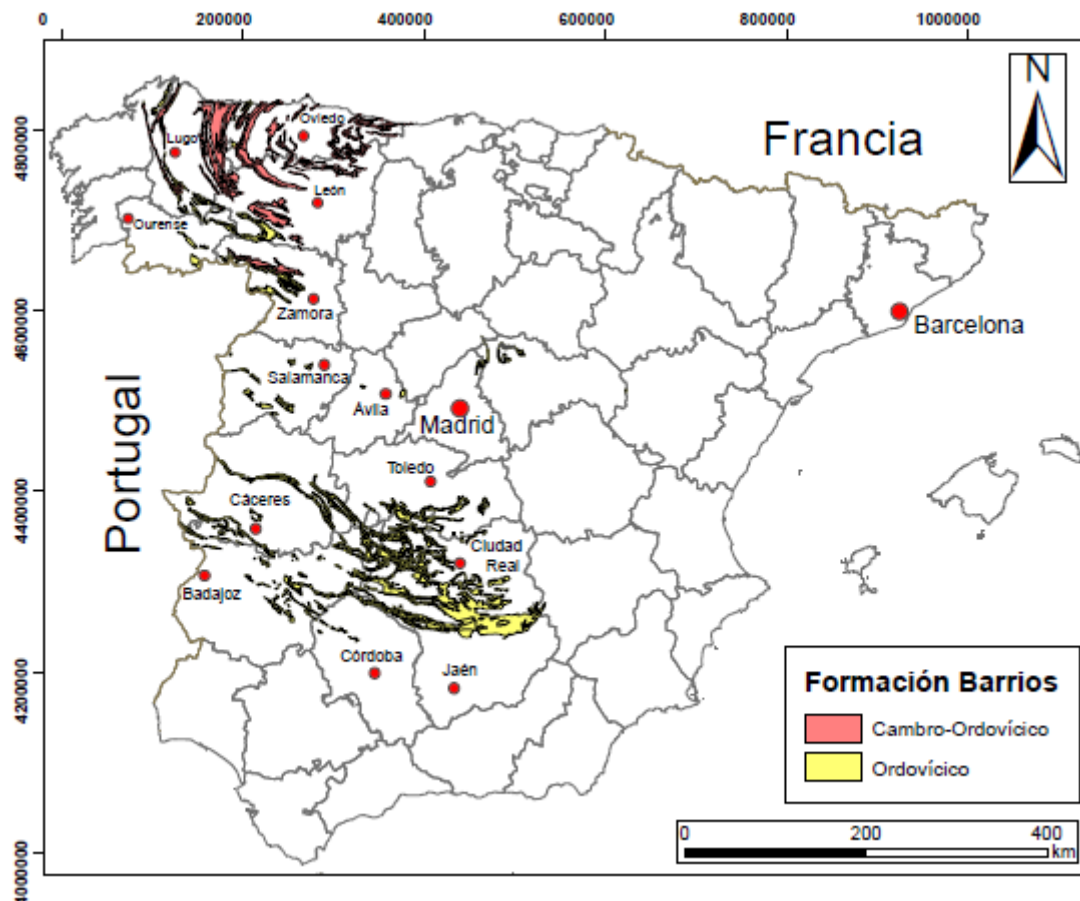


FIGURA 1-1. Afloramientos de la Formación Barrios en la Península Ibérica.

Sobre la Formación Barrios no ha sido abordada una caracterización geomecánica general, existiendo únicamente estudios específicos, generalmente realizados en el marco de proyectos de obras de ingeniería.

En este informe, se ha planteado la recopilación de todos los trabajos y estudios que contengan datos geomecánicos relativos a esta Formación (solo los materiales de grano medio), para elaborar una síntesis sobre su comportamiento geotécnico general. Asimismo, se ha llevado a cabo un trabajo de campo y de laboratorio con el objetivo de recabar datos complementarios para un mejor conocimiento del comportamiento geomecánico de la Formación Barrios.

### 1.1. Uso de la cuarzoarenita (cuarcita) como roca industrial en Asturias

En Asturias, asociada a la Formación Barrios, se pueden encontrar explotaciones tanto de la propia cuarzoarenita (cuarcita) como de yacimientos de minerales no metálicos asociados a esta, como por ejemplo el cuarzo o el caolín.

Sobre la Formación Barrios, se sitúa el mayor número de explotaciones con autorización vigente para cuarzoarenitas en Asturias, mayoritariamente en la zona oriental. Esta Formación, ha sido explotada a lo largo de los años como árido para hormigón, balasto, vidrio, bloques de escollera y a veces como estéril de carbón.

Las explotaciones, generalmente se encuentran en zonas con una elevada fracturación de la roca lo que permite un aprovechamiento de los materiales mediante medios mecánicos, siendo puntual el uso de explosivos. En todas ellas el método de explotación consiste en el banqueo, descendente o ascendente.

Actualmente, de las ocho explotaciones activas, sólo dos se encuentran en la Zona Cantábrica (Tabla 1-1).

Nombre de la explotación	Término municipal	Nº Hoja 1:5000	UTM X	UTM Y	Huso	Estado
Manuela-Julia 2ª ampliación	Grado	28	248613	4809584	30	Explotación Activa
Aboño	Gijón	14	280312	4825769	30	Explotación intermitente

*TABLA 1-1. Datos identificativos y de localización de las explotaciones activas e intermitentes de areniscas y cuarcitas de la Fm. Barrios en la Zona Cantábrica.*

La cantera “Manuela-Julia 2ª Ampliación” (Cabruñana y San Juan de Villapanada), explota las zonas más alteradas y tectonizadas de la cuarcita que aflora en este sector. Actualmente, cuenta con dos frentes de explotación y destina su producción a zahorras y áridos de machaque para la fabricación de hormigones. Destaca, en sus inmediaciones, la presencia de un nivel de caolín de 60 cm de potencia.

La “Cantera de Aboño” (Gijón), se encuentra en suspensión temporal de actividad. La cuarcita explotada aparece muy fracturada y presenta notables signos de oxidación superficial conteniendo gran cantidad de arcillas.

Además, de las dos anteriores, existe un gran número de explotaciones abandonadas sobre las areniscas y cuarcitas de la Fm. Barrios en la Zona Cantábrica, enumeradas en la Tabla 1-2.

Nº	Nombre de la explotación	Término municipal	Nº HOJA 1:5000	UTM			Uso posible	Estado
				X	Y	Huso		
1	La Carrizosa	Cangas del Narcea	76	224979	4773887	30	4-2	EB
2	Alto la Sierra	Belmonte de Miranda	51	233788	4797739	30	3-4	EB
3	La Prueba-Peña de La Forca	Belmonte de Miranda	28	243769	4803438	30	3-4	EB
4	El Veneiro	Grado	52	245863	4797799	30	3-4	EB
5	Veigas	Proaza	52	252490	4793059	30	3-4	EB
6	Las Casas – Puento de Peñañor	Candamo	28	253961	481039	30	3-4	EB
7	La Cortina de Llanumonte	Quirós	52	255807 256183	47839 47840	30	3-4	EB
8	El Carcabón	Quirós	77	256401	4783034	30	3-4	EB
9	Sierra de Bufafaran	Candamo	28	257620	4816830	30	3-4	EB
10	La Reiqada /Illas-Cerro de la Linar	Illas	28	258343	4818515	30	3-4	IN
11		Illas	28	258625	4818290	30	3-4	IN
12	Monte El Acebalin	Lena	77	263958	4766654	30	3-4	EB
13	La Sierra	Corvera de Asturias	13	266110	4823950	30	3-4	EB
14	Monte Pando	Carreño	14	270775	4824739	30	3-4	EB
15	Pavierna	Gijón	14	278924	4823888	30	3-4	EB
16				281208	4827155			
17				281344	4826745			
18				281776	4827246			
19	La Endrina	Sobrescobio	54	299223	4789683	30	3-4	EB
20	Barranco de Anzó		54	302438	4788902	30	3-4	EB
21	Arroyo Los Canales	Piloña	54	303120	48002280	30	4-2	EB
22	El Raposo		54	303174	4798600		3-4	
23	Monte Sellón / Monte de Sellón		54	306005	4794232		3-4	
24	El Calzao		30	307864	4803169		3-4	
25	Mina Rosy /Ferrán		54	308131	4799052		3,4	
26	La Cuesta		54	317048	4799862		4-6	
27	Sierra de la Frecha		54	318544	4800030		3-4	
28	Reborrión		30	318752	4800671		3-4	
29	Chorrón		30	319128	4800694		3-4	
30	Bustiello		Parres	30	320547		4809787	
31	Sierra de Bodes	320926			4801681	30	3-4	EB
32		Ponga	54	320945	4787461	30	3-4	EB
33	El Soto			320990	4788065	30	3-4	IN
34	Trapiella	Parres	30	321391	4810482	30	3-4	EB
35	Las Estacas	Caravia	31	323320	4813015	30	3-4	EB
36	El Duerno	Cangas de Onís	31	326415	4804819	30	3-4	EB
37	Campo de golf de Berbes	Ribadesella	31	326422	4815264	30	3-4	EB

Nº	Nombre de la explotación	Término municipal	Nº HOJA 1:5000	UTM			Uso posible	Estado
				X	Y	Huso		
38		Cangas de Onís	31	327925	4806242	30	3-4	EB
39	Coto Torañó	Parres	31	327938	4808842	30	4-2	EB
40	La Forcada			328475	4808970		3-4	
41	La Cuestina	Cangas de Onís	31	328516	4808551	30	3-4	EB
42	Peña Parda			329512	4806053			
43	El bosque – Narciandi			330966	4800681			
44	El Posadoiro			331017	4804602			
45	Ventaniella			331676	4800351			
46	Piedramala	Ribadesella	31	331900	4811109	30	3-4	EB
47	Mina Milagros			331952	4810767		4-5	
48	La Retuerta	Cangas de Onís	31	332038	4804329	30	3-4	EB
49		Ribadesella	31	333093	4810291	30	3-4	EB
50	El Huertón			333653	4810167		4-2	
51	La Fontana	Allande	31	334153	48003809	30	3-4	EB
52	Collado Zandón	Cangas De Onís	31	335050	4805000	30	3-4	EB
53				336350	4804550			
54	El Torno	Llanes	31	338601	4808217	30	3-4	EB
55	Collado del Torno			338942	4808112			
56	El Jou – Treserps	Onís	31	339193	4801320	30	3,4	EB
57	El Fresnedo	Llanes	31	339274	4807109	30	3-4	EB
58	Los Menores	Onís	31	341875	4801218	30	3-4	EB
59		Llanes	31	342743	4810591	30	3-4	EB
60				343700	1811000			
61	El Requero	Onís	31	344411	4801185	30	3-4	EB
62	Peña Terviña	Cabralas	31	344852	4802276	30	3-4	IN
63	Pedrallada			344923	4801141			EB
64	El Barreru	Llanes	31	347589	4810074	30	3-4	EB
65		Llanes	31	347802	48103320	30	3-4	EB
66	Torrelanegra	Llanes	31	348292	4811655	30	3-4	EB
67	Vega del Monte	Llanes	32	353049	4805892	30	3-4	EB
68		Peñamellera Alta	56	356285	4799492	30	3-4	EB
69	Mesturas		32	357986	4799714			
70	El Cristo	Llanes	32	358233	4807514	30	3-4	IN
71	Sierra plana de Cué			360932	4807830			EB
72	Los Bardales			361783	4804461			EB
73	El Carezal			365862	4803826			EB
74	La Deja			Peñamellera Alta	32			366773
75	Sierra plana de la Borbolla	Llanes	32	367972	4804629	30	3-4	EB

TABLA 1-2. Canteras abandonadas de arenisca y cuarcita de la Fm. Barrios en la ZC. Uso posible: 1: roca ornamental; 2: roca de construcción; 3: áridos naturales; 4: áridos de machaqueo; 5: vidrio; 6: otros // Estado: EB: explotación abandonada; IN: indicio.

El caolín asturiano, aparece en una capa de unos 70 cm de potencia, interestratificada dentro de la parte superior de las cuarcitas de la Fm. Barrios. Los niveles de caolín, se encuentran intercalados en niveles de arcillas y más raramente en pizarras, aunque no todos alcanzan la potencia suficiente como para ser explotados.

En los alrededores de las unidades geológicas del Antiforme del Narcea, Somiedo y La Sobía-Aramo, aparece una capa de gran continuidad (explotada desde 1946).

En la composición mineralógica del caolín, destaca la concentración de caolinita (entorno al 90%), acompañado de cuarzo, pirita, circón, zeolitas y otros tipos de arcillas. Los yacimientos varían de 14 a 50 km longitud y de 0,5 a 1 m de espesor, estimándose sus reservas teóricas en 73 millones de toneladas.

García Ramos et al., (1984) diferencian dos variedades en función de sus características petrográficas y sedimentológicas, denominada Tipo G, para el caolín de grano grueso que aparece en tonalidades más grisáceas en niveles de unos 6 cm en la parte baja de la capa, y Tipo F, para el de grano fino de tonalidades más blancas. La formación de esta capa de caolín, está relacionada con la alteración de una toba de cenizas volcánicas de transporte eólico, interpretada como un “tonstein de caolinita”.

Este tipo de caolín presenta tonalidades grises y blancas, es un material duro y compacto, con fracturas concoideas. Ocasionalmente, aparece con colores amarillentos debidos al ligeramento alto contenido en Fe, además, su composición mineralógica es fundamentalmente caolinita con bajo contenido en hierro y otros materiales fundentes.

En 1987, Vaquero Nazabal et al., diferenciaron una serie de zonas en el sector occidental de Asturias, en función de su localización y del tamaño de los afloramientos (Tabla 1-3 y Figura 1-2):

Zonas Principales	Otras zonas
Cabo Torres - Monte Areo	Tuiza – Pajares
Sierra del Pedroso	Cabo Peñas
Antiforme del Narcea	Cabo Vidio
Belmonte - Genestoso	La cabruñana
Llamoso – Puerto de Ventana	Sierra de Buanga
Valle de Cubia	
Proaza - Quirós	

TABLA 1-3. Afloramientos de caolín en el occidente asturiano.

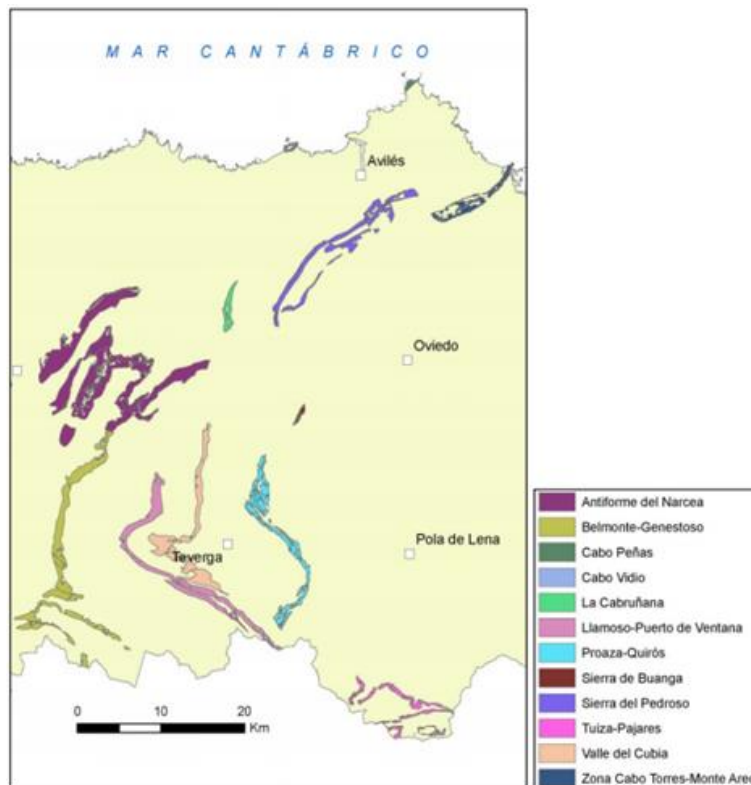


FIGURA 1-2. Localización de los afloramientos de caolín en el occidente asturiano (IGME, 2012).

En la actualidad, existen cinco explotaciones activas, dos de ellas de extracción intermitente (Tabla 1-4). El uso que se le da a este caolín es variado, aunque el principal, es la fabricación de material refractario; otras utilidades, son la fabricación de cemento y de gres cerámico, así como su uso en la industria cosmética, en las que se envía un menor porcentaje de producción.

Nombre de la explotación	Término municipal	Nº Hoja 1:50000	UTM X	UTM Y	Huso	Estado
5ª Ampliación de minerales del Narcea	Salas	27	231303	4809370	30	EI
Consuelo	Salas	27	231806	4810708	30	EI
Nueva Perdiz 2ª Fracción B	Salas	27	231814	4805934	30	EA
Las Colladas	Salas	27	232461	4803901	30	EA
Lo Blanco de Peña Ausén	Salas	27	233406	4808119	30	EA

TABLA 1-4. Datos identificativos y de localización de las explotaciones activas (EA) e intermitentes (EI) de caolín en Asturias.

Asimismo, son numerosas las canteras inactivas de caolín ligadas a la Formación Barrios. En el sector Cabo Torres – Monte Areo se encuentran cuatro antiguas zonas explotadas (Tabla 1-5), así como diversos afloramientos de la capa de caolín sin que se hayan llegado a considerarse indicios.

En el sector de la Sierra del Pedroso, la capa está situada en la parte alta de la formación, donde presenta una potencia en torno a los 60-70 cm, con una gran continuidad lateral y fueron explotadas siguiendo la traza de las capas de cuarcita (Tabla 1-6).

Nombre de la explotación	Término municipal	Nº Hoja 1:50000	UTM X	UTM Y	Huso	Uso posible	Estado
Mina Pastrana / El Montico	Carreño	14	272678	4822214	30	7	EB
Mina La Pina / Pedralva	Carreño	14	274286	4822909	30	7	EB
Minas de Arbesu o Kao-Ling / Monte Area	Carreño	14	275458	4823558	30	7	EB
Mina La LLana	Gijón	14	278720	4824756	30	7	EB

TABLA 1-5. Datos identificativos y de localización de las explotaciones abandonadas de caolín en la Zona del Cabo Torres-Monte Area. Uso posible 7: refractario // EB: explotación abandonada.

Nº	Nombre de la explotación	Término municipal	Nº Hoja 1:50000	UTM X	UTM Y	Huso	Uso posible	Estado
1	Mina Casualidad / La Piña	Grado	28	253901	4810248	30	7	EB
2	Mina Piso Peñafior Casas Eladio	Candamo	28	253935	4810392	30	7	EB
3	Minas Piso Alfaraz El Trabaz – La Peña	Candamo	28	254027	4810771	30	7	EB
4	Mina Campillin Monte El Caleyo	Candamo	28	254058	4811680	30	7	EB
5	Mina Piso Escrita La Escrita	Candamo	28	254301	4811693	30	7	EB
6	Mina Fuentemingo La Llanada	Candamo	28	254627	4812579	30	7	EB
7	Mina El Villar Sirra del Pedregoso	Candamo	28	254807	4813218	30	7	EB
8	Mina Cimero Ancineres-Pico Cimero	Las Regueras	28	255299	4811430	30	7	EB
9	Mina El Pedroso Sierra del Pedroso	Candamo	28	255455	4814136	30	7	EB
10	Mina La Perdiz Campo de la Degollada	Candamo	28	255811	4814913	30	7	EB
11	Mina de la Fuentina Alto de la Degollada	Candamo	28	256347	4815250	30	7	EB
12	Mina Pereda Alto de la Pereda	Las Regueras	28	257064	4811860	30	7	EB
13	Mina Cantabria/Degollada	Candamo	28	257104	4817196	30	7	EB
14	Mina Mariqueta Cerro del Linar	Illas	28	258640	4818288	30	7	EB
15	Mina Landrio Barcena – Molino Padrún	Las Regueras	28	259365	4815470	30	7	EB
16	Mina La Milagrosa Casas de la Sierra	Las Regueras	28	260691	4817150	30	7	EB
17	Mina Gorfoli	Illas	28	262870	4820205	30	7	EB

Nº	Nombre de la explotación	Término municipal	Nº Hoja 1:50000	UTM X	UTM Y	Huso	Uso posible	Estado
18	Mina Inmaculada Cerro de la Peña	Corvera	13	264765	4821572	30	7	EB
19	FFCC Nubledo	Corvera	13	267430	4824100	30	7	EB
20	Mina Diana/La vallina	Carreño	14	270634	4824941	30	7	EB

TABLA 1-6. Datos identificativos y de localización de las explotaciones abandonadas e indicios de caolín en la Zona de Sierra del Pedroso. Uso posible 7: refractario // EB: explotación abandonada.

En el sector noroeste de la zona del Antiforme del Narcea, además de las “Mina Consuelo” y “5ª Ampliación a Minerales del Narcea”, actualmente en explotación, existieron otras cuatro que ahora se encuentran abandonadas (Tabla 1-7). El sector central del antiforme, se encuentra afectado por los grandes plegamientos asociados al Sinclinal de la Barca, donde sus afloramientos tienen una geometría serpenteante. En esta zona son dos minas las que permanecen activas. En el flanco oriental del Sinclinal de la Barca, se localizan dos explotaciones, actualmente abandonadas (Tabla 1-8).

Nombre de la explotación	Término municipal	Nº Hoja 1:50000	UTM X	UTM Y	Huso	Uso posible	Estado
Mina Polita Villanueva de Rañadoiro	Tineo	27	229466	4805842	30	7	EB
María Morron / Idarga	Salas	27	230682	4808312	30	8	EB
Mina Aventura o Nenuco Bodenaya	Salas	27	231520	4810052	30	7	EB
Mina Candamina o Salas	Salas	27	235206	4812288	30	7	EB

TABLA 1-7. Datos identificativos y de localización de las explotaciones abandonadas de caolín en la Zona del Antiforme del Narcea en el Sector Noroeste. Uso posible 7: refractarios; 8: cementos // EB: explotación abandonada.

Nombre de la explotación	Término municipal	Nº Hoja 1:50000	UTM X	UTM Y	Huso	Uso posible	Estado
Mina Paloma o Merillés Redequixu	Tineo	51	228677	4797690	30	8	EB
Mina Ulises o Farandón El Penéo de Llaneces	Tineo	51	228711	4801698	30	8	EB
Mina Arquera/La Arquera	Tineo	51	229319	4803034	30	7	EB
Antigua Mina La Colladas Las Colladas	Tineo	51	230432	4801030	30	8	EB
Mina Conchita o Calabazos Presa de Calabazos	Belmonte	51	232606	4802217	30	7	EB
Mina Loli/Los Crestones	Salas	51	233256	4802906	30	7	EB
Mina Loly/CaserioSilvota	Salas	27	233759	4803758	30	7	EB

TABLA 1-8. Datos identificativos y de localización de las explotaciones abandonadas de caolín en la Zona del Antiforme del Narcea en su Sector Central. Uso posible 7: refractarios; 8: cementos // EB: explotación abandonada.

Sobre el flanco occidental del Sinclinal de la Barca, se ubica la explotación activa “Las Colladas”, que explota un nivel de caolín de dirección 25° N y buzamiento 50° SE.



Nombre de la explotación	Término municipal	Nº Hoja 1:50000	UTM X	UTM Y	Huso	Uso posible	Estado
Mina Asociada – Mina Tabladón El Cauneu	Belmonte	51	235504	4798821	30	7	EB
Mina Barroblanco/El Llano	Belmonte	51	236268	4799751	30	7	EB
El Contín	Belmonte	51	238217	4800192	30	7	IN
Mina Angelines o Berros Las Cuestas	Belmonte	51	240217	4802093	30	7	EB
Mina Miranda /Los Campones	Belmonte	51	240837	4802579	30	7	EB

*TABLA 1-9. Datos identificativos y de localización de las explotaciones abandonadas de caolín en la Zona del Antiforme del Narcea en su Sector Sureste. Uso posible 7: refractarios // EB: explotación abandonada, IN: indicio.*

En las zonas de Belmonte y Llamoso - Puerto de Ventana, únicamente se ubicaron 2 explotaciones (Tabla 1-10).

Nombre de la explotación	Término municipal	Nº Hoja 1:50000	UTM X	UTM Y	Huso	Uso posible	Estado
La Granda	Somiedo	76	235597	4783533	30	8	IN
Campizos	Somiedo	76	237269	4782709	30	8	IN
Forcada	Somiedo	51	237502	4786000	30	8	IN
Mina Fin del Caolín o del Llamoso /Cuesta Los Pisones	Belmonte	51	239420	4790418	30	7	EB
Sin nombre	Teverga	77	253472	4772101	30	7	IN

*TABLA 1-10. Datos identificativos y de localización de las explotaciones abandonadas e indicios de caolín en la Zona Llamoso-Puerto de Ventana. Uso posible, 7: refractarios; 8: cementos // Estado EB: explotación abandonada; IN: indicio.*

En la Zona del Valle del Cubia, que se extiende desde las cercanías de la localidad de Santianes hasta los crestos de Sierra Verde, y luego en dirección sureste hasta Barrio, hubo 5 explotaciones (Tabla 1-11). Tres en el municipio de Grado y dos en Teverga.

Nombre de la explotación	Término municipal	Nº Hoja 1:50000	UTM X	UTM Y	Huso	Uso posible	Estado
Miruxiela	Teverga	77	241815	4782615	30	7	IN
Urría	Teverga	52	243818	4784594	30	8	IN
Mina Aurora/Bustalgües	Grado	52	245188	4794960	30	7	EB
Aurora II. Mina Santina La Llomba	Grado	52	245342	4794140	30	7	EB
Mina Perdida/Soluteiro	Grado	52	245618	47970009	30	7	EB

*TABLA 1-11. Datos identificativos y de localización de las explotaciones abandonadas e indicios de caolín en la Zona Valle del Cubia. Uso posible 7: refractarios; 8: cementos // Estado EB: explotación abandonada; IN: indicio.*

En el sector Proaza - Quirós, únicamente se explotó un yacimiento y dos pequeños afloramientos (Tabla 1-12).

Nombre de la explotación	Término municipal	Nº Hoja 1:50000	UTM X	UTM Y	Huso	Uso posible	Estado
Mina Caranga	Proaza	52	251787	4788222	30	8	EB
La Vallina	Proaza	77	251190	4789937	30	8	EB
Villamarcel	Quirós	77	258000	4781000	30	7	IN

TABLA 1-12. Datos identificativos y de localización de las explotaciones abandonadas e indicios de caolín en la Zona Proaza-Quirós. Uso posible 7: refractarios; 8: cementos // Estado EB: explotación abandonada; IN: indicio.

Otro de los minerales explotados en la Formación Barrios en Asturias es el cuarzo, sus yacimientos se distribuyen en el centro de la provincia, en la explotación denominada “La Sierra” (Tabla 1-6), donde llegó a producir 7000 t/año, y en el oriente, donde se alcanzó una producción anual de 152.000 t, repartidas entre las explotaciones de Infiesto, Arriondas y Llanes.

En cuanto a la composición mineralógica, además de cuarzo, se encontraron minerales pesados como circón, turmalina, rutilo e hiperstena (0,02 – 0,05 %). Los datos sobre las explotaciones de caolín y cuarcita han sido sacados del libro “*Mapa de rocas y minerales industriales de Asturias*” elaborado por el IGME en 2012.

## 2. CONTEXTO GEOLÓGICO

La Formación Barrios, aflora en el denominado Arco Ibero – Armoricano, en Europa Occidental (Figura 2-1), extendiéndose a lo largo de gran parte del Macizo Ibérico (Figura 2-2), por la rama sur del citado Arco. Además, se encuentra en el Macizo Armoricano de la Bretaña Francesa (Figura 2-5), que junto al anterior, pertenecen al Orógeno Varisco europeo.

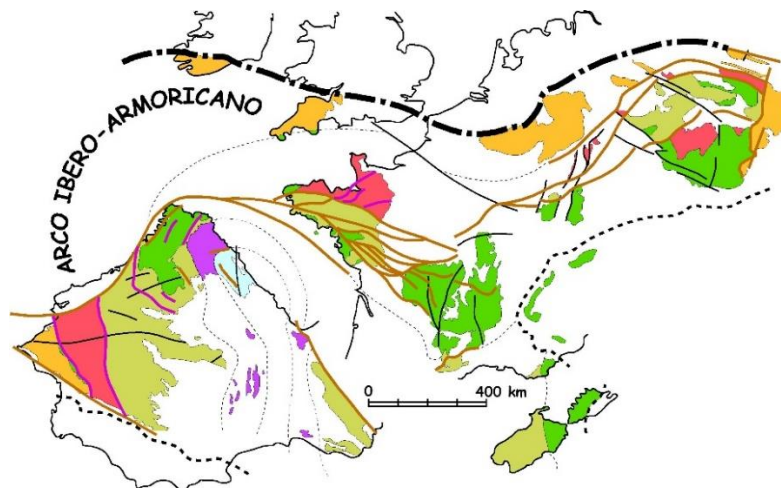


FIGURA 2-1. Contexto geológico de la Formación Barrios en el Arco Ibero-Armoricano, representado en tono verde claro. Elaborada por Gutiérrez-Alonso, G. et al., 2011.

La Formación Barrios aflora a lo largo de la rama septentrional del Macizo Varisco Ibérico (Figura 2-2), a lo largo de la Zona Cantábrica (ZC), Asturoccidental – Leonesa (ZAOL) y Centroibérica (ZCI). Destacando esta última por la extensión y espesor de la Cuarcita Armoricana y, la Zona Cantábrica por ser el lugar donde se ha centrado el presente trabajo.

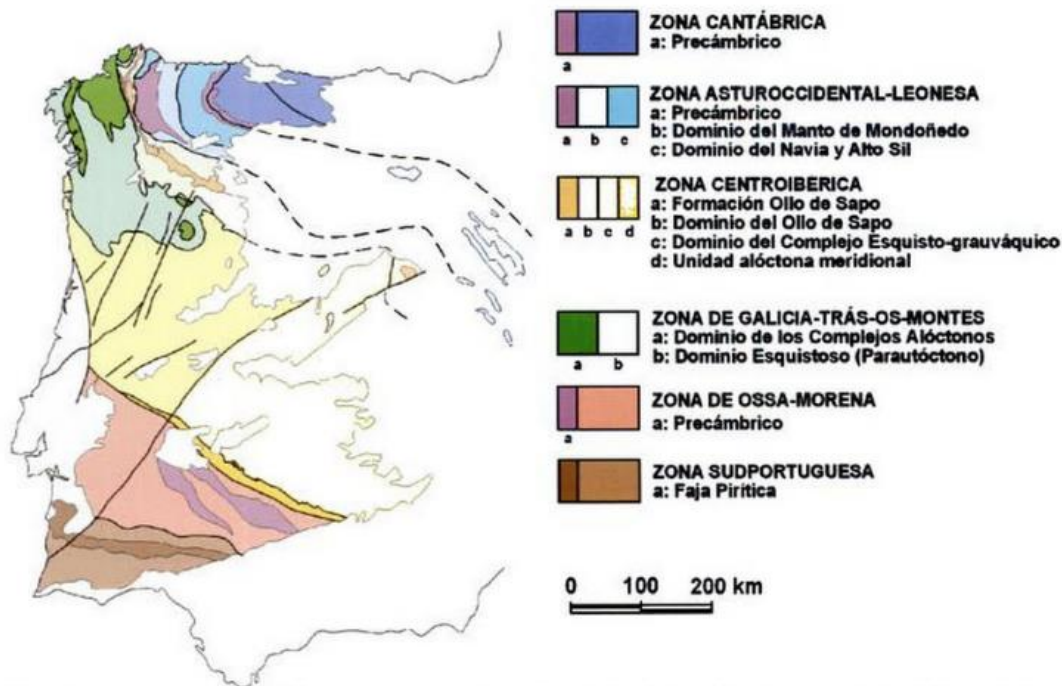


FIGURA 2-2. División del Macizo Ibérico según *Farias et al. (1987)*.

### 2.1. Zona Cantábrica (ZC)

La Zona Cantábrica (Figura 2-3), situada en el noroeste de la Península Ibérica, constituye la parte externa del Macizo Ibérico y el núcleo del Arco Ibérico – Armoricano (o Arco Astúrico). A su vez, se divide en varias unidades: la Región de Pliegues y Mantos (Unidad del Aramo, Unidad Somiedo – Correcilla, Esla - Varsubio y La Sobia - Badón), la Cuenca Carbonífera Central, la Región de Mantos o Manto del Ponga y los Picos de Europa (Julivert, 1967a). La Formación Barrios es, junto con la Formación Oville, las únicas en la secuencia preorogénica que aparecen en prácticamente todas las unidades, excepto en la Unidad de Pisuerga – Carrión.

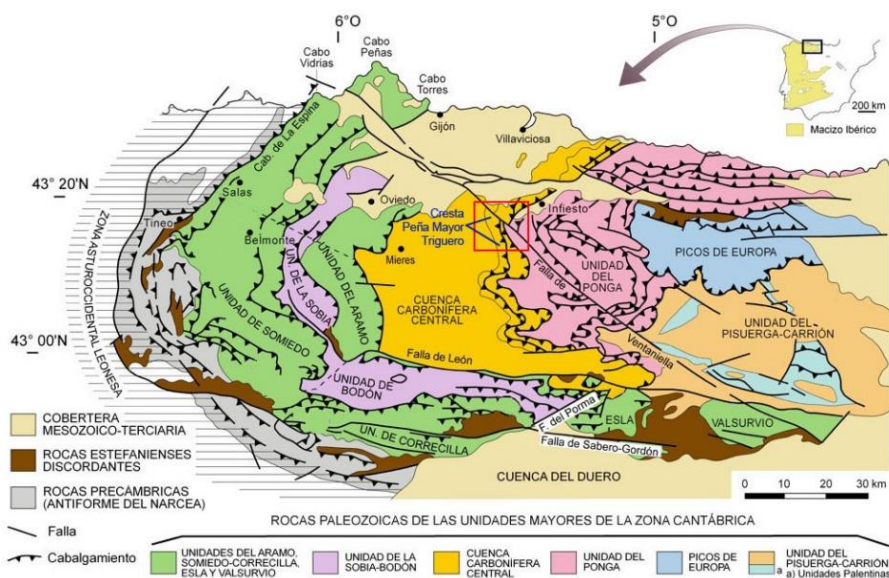


FIGURA 2-3. División de la Zona Cantábrica del Macizo Ibérico (basado en *Julivert, 1971a*).

Estratigráficamente, la Formación Barrios está constituida en la Zona Cantábrica por cuarzoarenitas blancas con intercalaciones pizarrosas y conglomeráticas con un espesor variable, desde los 80 a 1.020 m. En las unidades de Bodón, sector norte de Correcilla y Esla - Varsubio, se intercalan con rocas vulcanoclásticas que rellenan chimeneas volcánicas dentro de la Fm. Barrios (Heinz et al., 1985).

El espesor va disminuyendo hacia el este, mientras que en dirección N-S, se produce un incremento del espesor de toda la sucesión preorogénica que varía, de unos 3.400 m en Barrios de Luna (Unidad de Correcilla) a 6.500 m en el Valle del Narcea – Cabo Peñas (Unidad de Somiedo). El sistema general de cabalgamientos y la secuencia preorogénica dan lugar a una cuña que se adelgaza hacia el este, según el Libro “Geología de España” (Vera, J.A., 2004).

## 2.2. Zona Astur-Occidental Leonesa (ZAOL)

La ZAOL, situada al oeste de la Zona Cantábrica (Figura 2-4), se divide de este a oeste en el Dominio del Navia y Alto Sil y Manto de Mondoñedo, donde aflora una potente secuencia de rocas siliciclásticas de espesor variable (11.000 m.) y edad Cámbrica - Ordovícica. La Fm. Barrios aflora en los dos Dominios, en el miembro superior de la “Serie de los Cabos” (Loetze, 1958), estando formada por cuarcitas blancas, sobre una potente sucesión de areniscas, pizarras y cuarcitas. El mayor espesor de la serie se encuentra en el Dominio del Navia y Alto Sil, 4.500 m en la parte oriental y 3.000 m en la occidental, de los cuales 200 m pertenecen a la cuarcita de Barrios, disminuyendo hacia el occidente a los 50 m. En el Manto del Mondoñedo, la sucesión no pasa de los 2500 m, que en los 200 m superiores se torna más cuarcítica, culminando con un nivel delgado (< 50 m).

En la Figura 2-4, se puede observar el límite de la Zona Cantábrica, situado en el núcleo del Antiforme del Narcea, en el cabalgamiento de la Espina, que representa el tránsito entre la zona externa e interna del Orógeno Varisco del noroeste de la Península. El límite de la ZCI, se encuentra en la Falla de Viveiro, prolongándose hacia el sureste, en los sinclinales de Peñalba y del Courel.

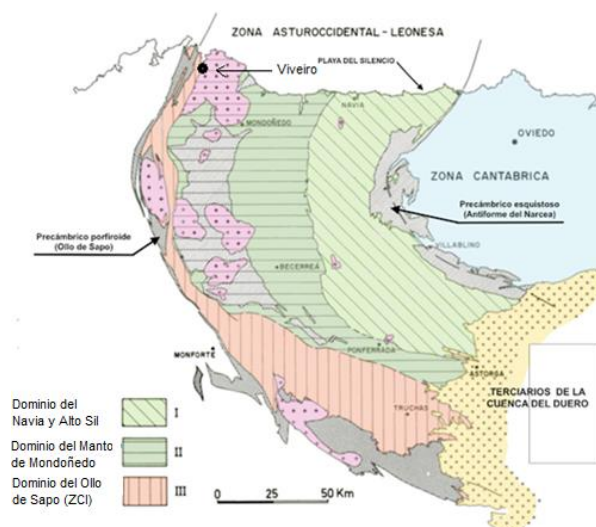


FIGURA 2-4. Dominios de la Zona Asturoccidental-Leonesa. Tomado del Libro Geología de España (Vera, J.A., 2004).

### **2.3. Zona Centroibérica (ZCI)**

La Zona Centroibérica, comprende la parte central del macizo Ibérico ocupando las zonas Galaico - Castellana y Luso oriental. Está dividida en el complejo Esquistoso - grauvaquico, el Dominio del Olló de Sapo, contiguo a la ZAOL, y la Unidad Alóctona - meridional.

La Fm. Barrios alcanza en el Dominio del Olló de Sapo, un espesor que oscila entre 0 y 300 m en Galicia, 200 – 350 m en Sanabria y Alcañices (conocidas localmente como Fm. Culebra y Fm. Peña Gorda respectivamente) y 70 – 200 m en la Sierra de Guadarrama (Fm. Altorey). La cuarcita Armoricana, está presente a lo largo de todo el dominio del Olló de Sapo siguiendo una dirección noroeste - sureste, partiendo desde la costa de Galicia en Vivero hasta el interior de Castilla y León y Castilla y La Mancha.

Así, la cuarcita de Barrios se encuentra en las principales estructuras de la zona, en el anticlinal del Olló de Sapo, sinclinal de Truchas, sinforme de Alcañices y del Sil y en el anticlinal del Piornal. Además, en Castilla y La Mancha, está presente en el antiforme del Cardoso y sinforme de Majaelrayo.

La secuencia ordovícica del complejo esquistoso-grauvaquico, se dispone discordante sobre las rocas infrayacentes. La parte inferior está constituida por conglomerados, areniscas y limos, generalmente alterados a tonalidades rojas o moradas, de edad Arenigiense. Estos materiales tienen un espesor variable (0 - 250 m) y constituyen el inicio de una sedimentación transgresiva, generalizada en toda la Zona Centro Ibérica en el Arenigiense medio, sobre un paleorelieve.

La transgresión está representada por la Cuarcita Armoricana, constituida por 200 – 400 m de ortocuarcitas blancas con cruzianas, laminaciones cruzadas, ripples, marcas de corriente y, pistas, bioturbación y restos de trilobites o braquiópodos.

### **2.4. Macizo Armoricano**

La Formación Barrios, aflora fuera de la Península Ibérica en el sector central y meridional del denominado Macizo Armoricano (Figura 2-5), siguiendo una orientación noroeste – sureste.

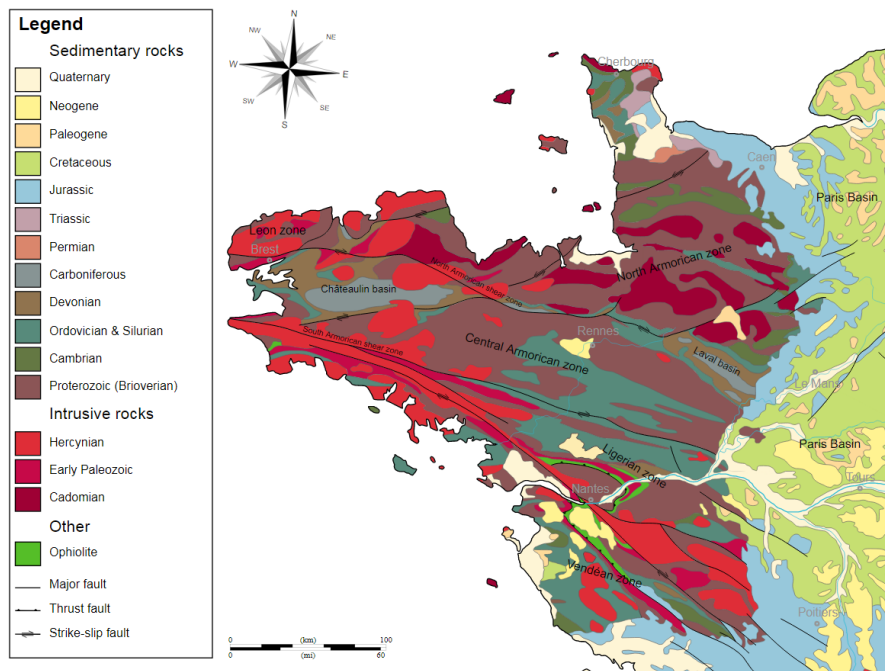


FIGURA 2.5. La Formación Barrios en el Macizo Armórico (Ordovician & Silurian). Tomado de “Service Géologique National (1996)”.

## 2.5. Estratigrafía

Desde un punto de vista estratigráfico, dentro de la Formación Barrios en la Zona Cantábrica se diferencia en tres miembros, separados por una discontinuidad intraformacional; de muro a techo son: Miembro La Matosa, Ligüeira (con poca representación) y Tanes (Aramburu, 1989).

El Miembro La Matosa, está formado por una secuencia granocreciente de gran tamaño que va desde cuarzoarenitas de grano fino en la base a, grano medio - muy grueso e incluso conglomeráticas en el techo, con una potencia de unos 100 – 120 m. Son abundantes las estructuras sedimentarias inorgánicas, por ejemplo, laminaciones horizontales o cruzadas de bajo ángulo y marcas de corriente. En el norte de León, es frecuente en este miembro la presencia de intercalaciones dispersas y con geometría variable de materiales volcánicos, bien como una delgada capa de caolín, o bien como rocas vulcanodetríticas con niveles subordinados de coladas de lavas y de sills traquíticos. A este Miembro se le asigna una edad del Cámbrico Medio y superior, llegando probablemente al Tremadoc (Toyos, J.M. y Aramburu, C., 2014).

El Miembro Tanes presenta litologías similares a las del miembro basal, aunque dispuestas de forma inversa, en una gran secuencia granodecreciente cuya potencia es de 200 m y carácter masivo. En la base aparece un tramo de 35 a 40 m de potencia formado por cuarzoarenitas de grano medio y grueso, microconglomeráticas, tableadas en bancos y estratos gruesos con estratificación ligeramente ondulada. Desde estos materiales al techo, la formación presenta el carácter masivo con ausencia de estructuras sedimentarias orgánicas e inorgánicas.

En el norte de León, son frecuentes las intercalaciones de rocas vulcanoclásticas en la parte superior del Miembro Tanes, al igual que la presencia de horizontes de alternancias con *lingúlidos*, *cruziana* y *skholitos* del Arenig (Toyos, J.M. y Aramburu, C., 2014).

Los sedimentos que dieron lugar a la Formación Barrios, fueron depositados en una amplia llanura deltaica de tipo “delta de llanura trezada” (Aramburu, 1989 y Aramburu y García-Ramos, 1993), comprendiendo facies continentales depositadas por ríos de cauce trezados y de avenidas de inundación que alternan con otras marinas muy someras. El estudio y la distribución de las facies del Paleozoico Inferior, indican que en la Zona Asturoccidental-Leonesa, existía una gran cuenca sedimentaria, propia de un margen continental pasivo, con su zona proximal situada hacia el este (Zona Cantábrica).

### 3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología seguida en la caracterización geomecánica de la Formación Barrios, sintetizada en la Figura 3-1, ha sido la habitual en los estudios geológico-geotécnicos, incluyendo labores de gabinete, campo y ensayos de laboratorio. A continuación, se describen las diferentes etapas del trabajo llevadas a cabo.

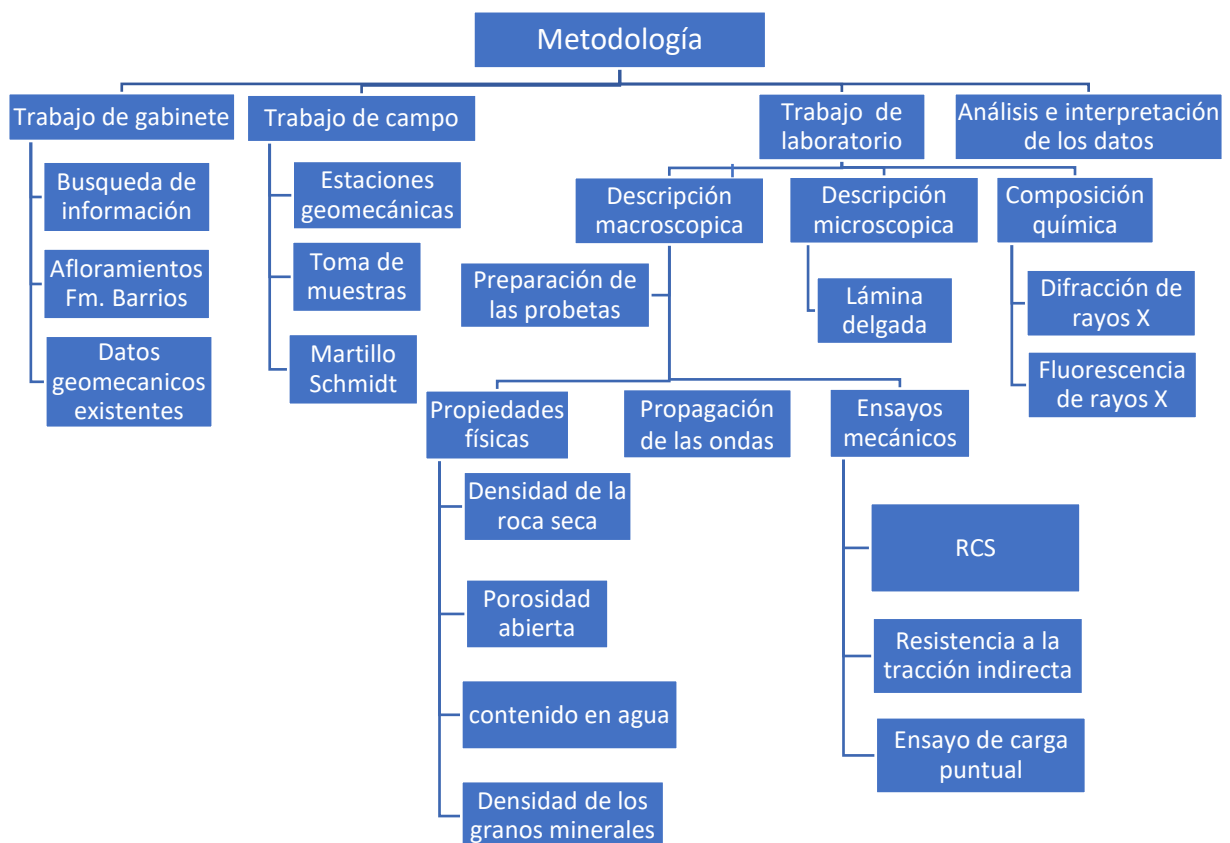


FIGURA 3.1. Síntesis de la metodología seguida en este trabajo para la caracterización de la Formación Barrios.

### 3.1. Trabajo de gabinete

En primer lugar, se ha realizado un estudio y recopilación bibliográfico de la documentación cartográfica (principalmente la elaborada por el *Instituto Geológico y Minero de España*, así como otros trabajos de carácter local) y datos geomecánicos existentes, a partir de los principales proyectos de obras públicas desarrollados dentro del ámbito de estudio. Cabe destacar, en este sentido, la información contenida en los proyectos relacionados en la construcción de la Variante ferroviaria de Pajares (tramo La Robla - Pola de Lena).

Toda la documentación cartográfica fue volcada a una base de datos GIS, para llevar a cabo mediante el software *ArcGis v 10.3*, la figura de situación de los afloramientos de la Formación Barrios en la Zona Cantábrica (Figura 1-1).

Se han revisado un total de 50 proyectos de obras públicas, de los cuales únicamente en 12 se han obtenido datos geomecánicos referentes a la Formación Barrios. Los principales ensayos y parámetros recopilados con interés para el presente proyecto son: 51 resistencias a la comprensión simple, 35 densidades secas, 12 pesos específico, 9 cargas puntuales, 20 tracciones indirectas, 21 martillos Smith, 18 módulos de deformación Young, 9 RMR y 5 RQD.

Asimismo, se ha realizado una selección de potenciales afloramientos en los cuales se podría realizar tanto la toma de muestras, como el levantamiento de estaciones geomecánicas.

### 3.2. Trabajo de campo

La adquisición de nuevos datos se abordó mediante el levantamiento de estaciones geomecánicas en ocho afloramientos preseleccionados a lo largo de la Zona Cantábrica (Figura 3-2). La selección de los afloramientos tuvo en cuenta múltiples aspectos, tales como la ubicación, accesibilidad, posibilidad de toma de muestras, grado de alteración de la roca, etc.





Estación	Ubicación	Coordenadas	
		X	Y
EG-1	Cabo Torres (Gijón)	281.955,80	4.827.757,32
EG-2	Cabo Peñas (Gozón)	270.626,08	4.837.696,91
EG-3	Playa Requexinos (Castrillón)	739.335,90	4.829.337,83
EG-4	El Cogollo (Las Regueras)	257.384,82	4.816.330,17
EG-5	Peñaflor (Grao)	739.689,05	4.809.955,83
EG-6	N-634a P.k. 456 (Salas)	720.747,18	4.818.565,31
EG-7	Embalse Río Seco (Pola Laviana)	298.889,98	4.789.672,36
EG-8	Embalse de Tanes (Sobrescobio)	302.174,02	4.788.706,07

FIGURA 3-2. Ubicación y coordenadas de las Estaciones geomecánicas.

El principal objetivo de estas estaciones, es determinar las características geomecánicas del macizo rocoso, resumidas a continuación:

- Datos generales del afloramiento: naturaleza, formación geológica, depósitos superficiales, fotografía del emplazamiento.
- La dirección y buzamiento de cada una de las discontinuidades, distinguiéndose si pertenece a la estratificación, a la junta o falla, y determinar su continuidad.
- El espaciado entre discontinuidades.
- La apertura y rugosidad de las juntas, clasificada en tres valores: escalonada, ondulada o plana y, subdividida a su vez en: plana o rugosa. Si hay rellenos en las juntas, definiendo su naturaleza y anchura en milímetros.
- La meteorización de la roca y de las discontinuidades, clasificadas en seis categorías (I – VI). La resistencia de la roca matriz y de las discontinuidades.
- La fracturación del medio rocoso ( $J_v$ ), en función del número de juntas por metro cúbico y, por último, la presencia de agua en el macizo. El índice de calidad del macizo rocoso (RQD) a partir del  $J_v$ , mediante la relación:  $RQD = 115 - 3,3 \times J_v$ .

La mayoría de los parámetros anteriormente mencionados, se contemplan en la clasificación geomecánica de [Bieniowski 1989](#), que consiste en un sistema cualitativo y cuantitativo de clasificación del macizo rocoso, que tiene en cuenta la resistencia a compresión uniaxial de la roca matriz, el grado de alteración y, el espaciado, condiciones y flujo de agua de las discontinuidades. Además, como complemento, se ha determinado el índice de calidad del macizo rocoso ([Barton, 1974](#)). La relevancia de dichos parámetros, se cuantifica mediante el índice de calidad del macizo (Rock Mass Rating, RMR), que oscila entre 0 y 100 (Tabla 3-1).

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

TABLA 3-1. Clasificación en función del RMR (Bieniawski, 1989).

En cuanto a la toma de muestras, se han recogido un total de seis bloques de cuarzoarenita, con distinto grado de alteración y tamaño. Los bloques pertenecientes a la localidad de “El Cogollo” (Las Regueras, Asturias), han sido referenciados como B1, B2 y B3, el resto de ejemplares (B4, B5 y B6), proceden del Parque Natural del Ponga (Asturias).

Para determinar la resistencia de las rocas en campo, se ha recurrido al ensayo de dureza al rebote mediante esclerómetro, método indirecto de determinación de la resistencia más habitual para conocer las características geomecánicas de los macizos rocosos. El método del martillo Schmidt (tipo L), ha sido ideado para la estimación de la resistencia a compresión simple en rocas, y consiste en un dispositivo que se presiona sobre la roca registrando el rebote de una barra metálica que mediante un resorte de energía determinada (0,74 Nm), impacta en la superficie de la misma. La altura del rebote, es proporcional a la consistencia de la roca, registrada en una escala con un valor denominado índice de rebote de Schmidt (R). La norma seguida corresponde con la ASTM D5873-05.

Es un ensayo no destructivo muy empleado debido a su fácil y simple manejo, y más importante, por su bajo coste. En cambio, en ocasiones puede ser impreciso y proporcionar resultados con una dispersión elevada, no siendo aconsejable su uso en rocas blandas. Para llevar a cabo el ensayo, se debe eliminar la parte más superficial buscando una zona sana, y realizar un mínimo de 10 medidas en cada punto de reconocimiento, tomando como referencia el índice de rebote (R) de los 5 valores más altos. Hay que mencionar, que pueden sufrir variaciones en función de la posición del martillo respecto a la superficie de la roca, siendo necesario la corrección mediante las tablas de la [ISRM \(1978\)](#), salvo si la dirección es perpendicular.

A partir del índice de rebote (R) y la densidad seca  $\rho_d$  (KN/m<sup>3</sup>), se puede establecer una correlación gráfica para obtener la resistencia a la compresión simple ([Miller, 1965](#)), teniendo en cuenta la posición del martillo (Figura 3-3).

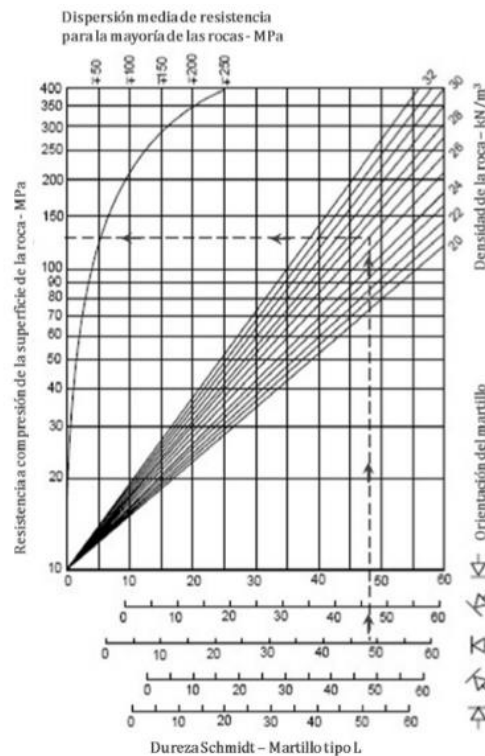


FIGURA 3-3. Correlación entre los resultados del martillo Schmidt y la RCS (Miller, 1965).

### 3.3. Trabajo de laboratorio

Para identificar, clasificar y caracterizar geomecánicamente cada una de las muestras tomadas en campo se llevaron a cabo los siguientes trabajos de laboratorio:

- Preparación de las probetas: extracción, corte y pulido.
- Descripción macro y microscópica.
- Análisis de la composición química: ensayos de fluorescencia y difracción de rayos X.
- Determinación de propiedades físicas elementales: densidad granos minerales, densidad de la roca seca, porosidad abierta y contenido en agua.
- Determinación de propiedades elásticas: velocidad propagación de ondas longitudinales y transversales.
- Determinación de propiedades mecánicas: resistencia a la compresión simple (RCS), resistencia a la tracción indirecta o “brasileño” y resistencia a la carga puntual.

En la Tabla 3-2, se resumen las normas empleadas en los ensayos de laboratorio, siguiendo las pautas marcadas por la *Asociación Española de Certificación y Normalización (Aenor - UNE)*.

Tipo de estudios		Nombre del ensayo	Norma
Descripción macroscópica UNE-EN 932-3	Propiedades físicas	Densidad de la roca	UNE-EN 1936:2006
		Porosidad abierta	UNE-EN 1936:2006
		Contenido en humedad	UNE-EN 1936:2006
		Densidad de los granos minerales	UNE-EN 1936:2006
	Ensayos mecánicos	Resistencia a la compresión simple	UNE-EN 1926:2006
		Resistencia a la tracción indirecta	UNE 22950-2:1990
Ensayo de carga puntual		UNE 22950-5:1996	
Descripción microscópica		Estudio petrográfico	UNE-EN 12407:2001
Análisis composición química		Fluorescencia rayos X	UNE-EN 13925-1:2006
		Difracción rayos X	

*TABLA 3-2. Resumen de las normas de laboratorio seguidas.*

A continuación, se describe la sistemática de trabajo seguida en la fase de laboratorio.

### *Preparación de probetas*

A partir de los 6 bloques obtenidos en campo, se ha llevado a cabo la extracción y preparación de las probetas mediante la máquina “heelt” modelo TCE40 N°348 (Figura 3-4). Para dicho fin, se han utilizado dos coronas de diamante (Figura 3-5A) de distinto diámetro (35 y 50 mm), obteniéndose dos tipos diferentes probetas (Figura 3-5B).



*FIGURA 3-4. Máquina “heelt” empleada en la obtención de probetas a partir de los bloques de roca.*



FIGURA 3-5. Coronas y probetas de 35 (A) y 50 mm (B).

Previamente a la extracción de las probetas, se ha decidido la dirección que se quiere ensayar respecto a la estratificación (paralela o perpendicular), en función de las limitaciones morfológicas de cada bloque: espesor, geometría de las caras (pequeñas o irregulares); en algunos casos, se ha podido trabajar en ambas direcciones.

Posteriormente, en la superficie de los bloques se ha marcado el área que ocuparía cada probeta, para optimizar el espacio, debido a que no se puede aprovechar el 100% de la superficie. A continuación, en dicha área se referencian las muestras con el número de bloque y de probeta (BX-PX).

Es necesario dejar un margen entre cada una de ellas, eliminar las zonas de los bordes y aquellas con fracturas o discontinuidades de gran tamaño, para así, tener más probabilidades de sacar las probetas sanas (Figura 3-6).

El momento de la extracción es el más delicado, dado que las muestras pueden sufrir roturas que conviertan en inservibles a las probetas (Figura 3-7).



FIGURA 3-6. Ejemplo de la distribución de probetas en los bloques 1 y 2 (derecha e izquierda, respectivamente).

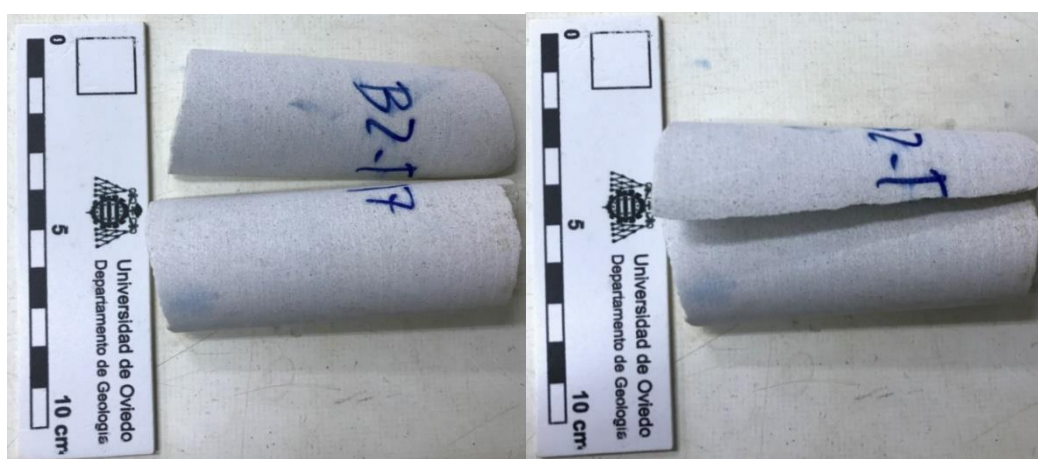


FIGURA 3-7. Ejemplo de rotura de una probeta durante el proceso de extracción.

Una vez se han extraído las probetas y comprobado su validez, se han efectuado unas pequeñas marcas indicando las zonas de corte para eliminar las irregularidades de las caras opuestas.

Además, en el caso de las muestras de 35 mm, se han realizado unas trazas que permiten observar la dirección de rotura en el ensayo de resistencia a compresión uniaxial (Figura 3-8). En las de 50 mm, se han marcado cada 2,5 cm (Figura 3-5B), referencia de corte para hacer las probetas destinadas al ensayo de tracción indirecta.



*FIGURA 3-8. Probeta de 35 mm, marcada para observar la rotura en el ensayo de resistencia a compresión uniaxial.*

Por último, a partir de las marcas, se ha utilizado la cortadora que aparece en la Figura 3-9, para obtener unas caras lisas y paralelas, sin irregularidades. Para concluir con la preparación, se ha anotado en la superficie de cada ejemplar, el nombre y la dirección del techo, recogidas junto a la altura en las tablas de cada ensayo llevado a cabo (Anexo I y II).



*FIGURA 3-9. Equipo empleado en el corte de probetas.*

#### *Descripción macro y microscópica*

Se ha realizado la descripción macro y microscópica siguiendo las Normas: UNE-EN 932-3 y UNE-EN 12407:2001, respectivamente. El estudio petrográfico permite, a partir de una sección bidimensional, definir la composición mineralógica y las características texturales de la roca (Russell, 1927). Se ha utilizado una lupa binocular Leica Wild M10 y un microscopio petrográfico Nikon Labophot-Pol.

Esta descripción, se basa principalmente en los aspectos que pueden influir en el comportamiento mecánico de la roca, cómo pueden ser microfisuras, distribución de minerales, anisotropías, orientación de los cristales y, composición mineralógica y textura. Los porcentajes indicados para cada uno de los componentes de las rocas, corresponden a porcentajes en volumen y se han obtenido por estimación visual. La clasificación petrográfica utilizada ha sido [Pettijohn, Potter y Siever \(1972\)](#).

Los estudios petrográficos se han realizado con el mismo material ensayado, estudiándose 4 láminas delgadas de 30 micras de espesor, pertenecientes a los bloques 2 y 3 (Tabla 3-3).

Muestra	Diámetro	Estratificación
B3-P4-1	50 mm	Perpendicular
B3-P4-2	50 mm	Paralelo
B2-P9	50 mm	Paralelo
B2-P24	50 mm	Paralelo

TABLA 3-3. Muestras utilizadas para el estudio petrográfico.

#### *Análisis de la composición química*

Adicionalmente a los estudios microscópicos, se han realizado estudios de difracción y fluorescencia de rayos X en muestras en polvo, para obtener con mayor exactitud la composición mineralógica de la Formación Barrios. En total, se han estudiado 5 muestras, pertenecientes a 3 bloques, con distinto grado de alteración.

La técnica de rayos X, que permite abordar un análisis mineralógico, se basa en la proyección de las muestras a un haz de rayos X de longitud de onda conocida, para posteriormente, analizar el haz emergente de cada ejemplar, con el objetivo de disponer información de los átomos que se han interpuesto en su camino. La ley de Bragg, permite conocer la distancia interatómica de los planos de la red cristalina.

Para este trabajo, se ha efectuado un difractograma de polvo en 5 muestras, previamente molidas en un mortero hasta alcanzar tamaños inferiores a 50  $\mu$ . Posteriormente, se ha realizado la caracterización de los minerales presentes en función de los efectos de difracción principales, comparándolos con los estándares expuestos en la norma UNE-EN 13925-1:2006.

La técnica de Fluorescencia de Rayos X, se basa en el estudio de las emisiones de fluorescencia generadas después de irradiar una muestra con una fuente de rayos X. La radiación incide sobre la muestra excitando los átomos presentes en la misma, provocando la denominada fluorescencia de rayos X. Esta radiación, incide sobre un cristal analizador (con espaciado interatómico  $d$ ) que difracta en un ángulo ( $\theta$ ) que varía con la longitud de onda (ley de Bragg). Un detector que registra un amplio rango de valores, mide la intensidad de la radiación en un ángulo determinado y para una longitud de onda específica, que es función lineal de la concentración del elemento en la muestra que produce tal radiación de fluorescencia.



### *Determinación de propiedades físicas elementales*

Las propiedades físicas elementales determinadas han sido: contenido en humedad, densidad aparente, porosidad abierta de la roca y la densidad de los granos minerales. El estudio se ha realizado en cuatro grupos (Tabla I-1 del Anexo I), cada uno formado por 6 probetas con un tamaño y volumen mínimo de 6,3 cm y 60 ml, respectivamente. En cambio, para la densidad de los granos minerales se han utilizado las muestras de la Tabla I-2 del Anexo I.

Para la realización de estos ensayos, se ha seguido la norma UNE-EN 1936:2006, resumida a continuación:

Los equipos empleados para realizar los ensayos han sido (Figura 3-10):

- Horno ventilado con temperaturas de servicio continuadas de 70° C.
- Recipiente específico para soportar presiones de 2,0 kPa = 15 mm Hg y para permitir la inmersión gradual de las probetas.
- Balanza de precisión mínima de 0,01 % de la masa.
- Dispositivo de medida de longitud de precisión.
- Picnómetro tipo 3 según la norma ISO 3507 de 50 ml.
- Tamiz de 0,063 mm.
- Desecador con agente desecante.



*FIGURA 3-10. A la izquierda horno de secado; a la derecha, balanza de precisión.*

### Procedimientos de los cálculos

Contenido en humedad, porosidad abierta y densidad aparente:

La humedad natural de la roca ( $W$ ) ha sido calculada, siguiendo la correspondiente norma UNE, a partir de la expresión:

$$W = \frac{M_w - M_s}{M_s} \cdot 100$$

$M_w$  = peso inicial de la muestra natural (húmeda).

$M_s$  = peso de la muestra seca (24 h de secado en estufa a 70°C).

La determinación de la porosidad y la densidad aparente ha precisado el pesado de cada muestra ( $m_d$ ) y la posterior eliminación del aire contenido en los poros. Posteriormente, tras sumergir las probetas a 2 kPa durante 15 minutos y a presión atmosférica durante 24 h, se ha pesado nuevamente cada muestra bajo el agua ( $m_h$ ) y tras un secado rápido se determinó la masa de la probeta saturada en agua ( $m_s$ ).

El volumen de los poros abiertos ( $\text{mm}^3$ ), ha sido calculado mediante la expresión:

$$V_o = \frac{m_s - m_d}{\rho_{rh}} \cdot 1000$$

$m_s$  = masa de la probeta saturada (g)

$m_d$  = masa de la probeta seca

$\rho_{rh}$  = densidad del agua ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

El volumen aparente ( $\text{mm}^3$ ), se determinó de acuerdo a la expresión:

$$V_b = \frac{m_s - m_h}{\rho_{rh}} \cdot 1000$$

$m_s$  = masa de la probeta saturada (g)

$m_h$  = masa de la probeta sumergida en agua (g)

$\rho_{rh}$  = densidad del agua ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

La determinación de la densidad aparente ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), se llevó a cabo aplicando la expresión:

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \cdot \rho_{rh}$$

$m_s$  = masa de la probeta saturada (g)

$m_d$  = masa de la probeta seca

$m_h$  = masa de la probeta sumergida en agua (g)

$\rho_{rh}$  = densidad del agua ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

La porosidad abierta (%), se calculó siguiendo la expresión:

$$\rho_o = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \cdot 100$$

$m_s$  = masa de la probeta saturada (g)

$m_d$  = masa de la probeta seca

$m_h$  = masa de la probeta sumergida en agua (g)

La densidad de los granos minerales, se ha determinado mediante el método picnométrico, de acuerdo al procedimiento fijado en la UNE EN 1936-2006. Mencionar, que para llevar a cabo este ensayo, se han utilizado las probetas que aparecen en la Tabla I-2 del Anexo I.

La densidad real ( $\text{kg/m}^3$ ), se determinó mediante la expresión:

$$\rho_r = \frac{m_e}{m_2 + m_e - m_1} \cdot \rho_{rh}$$

$m_e$  = masa de la probeta triturada y secada (g)

$m_1$  = masa picnómetro lleno con agua + masa triturada

$m_2$  = masa picnómetro lleno con agua (g)

$\rho_{rh}$  = densidad del agua ( $\text{kg/m}^3$ )

#### *Velocidad de propagación de las ondas P y S y ratio $V_p/V_s$*

Las ondas P y S, son dos tipos de ondas sísmicas cuya velocidad depende directamente del estado físico del material por el que se propagan. La estimación de dichas ondas, proporciona información acerca de las propiedades mecánicas del material estudiado (Olona, 2014).

El ensayo de velocidad de propagación de las ondas P y S, se ha llevado a cabo empleando el equipo OYO SONICVIEWER en 37 probetas con distintos grados de alteración y 35 mm de diámetro (paralelas respecto la estratificación), cuya longitud oscila entre 59 y 87 mm (Tabla I-3, Anexo D). La longitud de las muestras, se midió mediante un calibre de precisión de 50  $\mu\text{m}$ .

Para poder llevar a cabo este ensayo, se ha colocado un transductor que emite la señal y otro receptor, cada uno en un lado de la muestra. Emitiendo una señal ultrasónica, se determina el tiempo de propagación de la onda sísmica por la muestra (Olona, 2014). Para la estimación de las ondas P, se han empleado transductores de 54 kHz y 500 kHz, mientras que para las ondas S, se han utilizado transductores específicos de 100 kHz. Para la realización del ensayo se ha seguido el método sugerido por la ISRM (1981).

Este ensayo, establece una comparación entre las velocidades sísmicas y el ratio  $V_p/V_s$ , además, a partir de los resultados y considerando una densidad de las muestras de  $2,61 \text{ g/cm}^3$ , se ha determinado el módulo de Young, el coeficiente de Poisson, la compresibilidad y el módulo de cizalla.

#### *Resistencia a la compresión uniaxial (RCS)*

La resistencia de las cuarzoarenitas de la Formación Barrios, se ha determinado aplicando una carga perpendicularmente a la superficie de la muestra, hasta su rotura, siguiendo la norma UNE-EN 1926:2006. Para ello, fue necesario recurrir al empleo de los siguientes equipos:

- Rectificadora.
- Prensa de ensayo modelo MTS 815 “Rock Mechanics Test System”
- Horno ventilado.
- Balanza de precisión.
- Dispositivo de medida de deformación (Bandas extensométricas).



FIGURA 3-11. Prensa y consola de control utilizada en el ensayo resistencia a la compresión simple.

De acuerdo a la norma UNE anteriormente mencionada, es necesario ensayar un mínimo de 10 probetas (en este caso cilíndricas), con una altura mínima de 7 cm, para cumplir la relación de la esbeltez (2:1) y del tamaño de grano (10:1). Las probetas han de contar con dos caras planas opuestas con una tolerancia inferior de 0,1 mm. En este caso, se han ensayado 10 probetas cuyas características se encuentran resumidas en la Tabla II-1 del Anexo II.

El ensayo se lleva a cabo colocando cada probeta sobre la placa buscando un apoyo uniforme. La carga se aplica de manera continua con una velocidad de compresión de 1 MPa/s, siendo la carga máxima 10 kN. La resistencia a la compresión simple se determina mediante la siguiente relación:

$$\sigma_c = \frac{P}{A}$$

$\sigma_c$  = Resistencia a la compresión simple o uniaxial  
P = Carga de rotura (carga máxima admisible)  
A = Área de la superficie de aplicación de la carga

#### *Ensayo tracción indirecta o ensayo brasileño*

La resistencia a la tracción de las muestras, se ha determinado mediante el procedimiento denominado de tracción indirecta o “brasileño”, aplicando una carga a compresión uniaxial, hasta conseguir la rotura de las probetas de forma discoidal. De acuerdo a la norma UNE 22950-2:1990, se han efectuado 5 ensayos sobre 35 probetas con un diámetro mínimo de 50 mm y una esbeltez (L/D) del orden de 0,5 (Tabla II-2 del Anexo II).

El equipo empleado (Figura 3-12), cuenta con dos mandíbulas de acero diseñadas de forma que la rotura se produzca en el contacto de la probeta con forma de disco, en zonas diametralmente opuestas, en un arco de contacto de aproximadamente 10°.

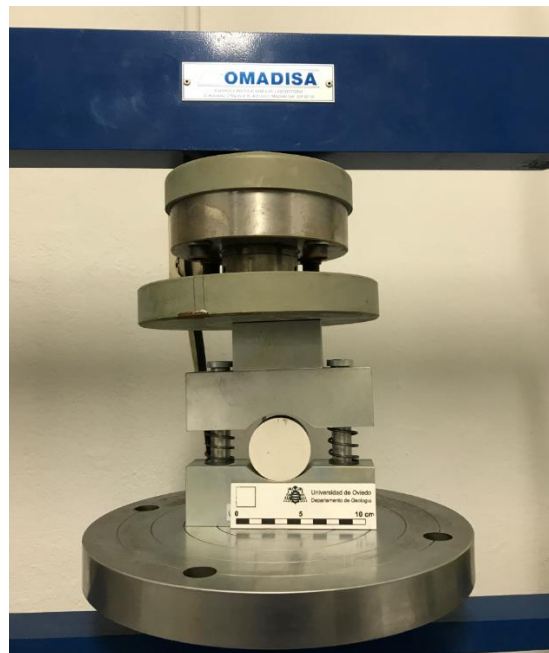


FIGURA 3-12. Equipo utilizado en el ensayo brasileño.

La carga sobre las probetas se ha aplicado de forma continua, de manera que la rotura de las rocas ha tenido lugar en un tiempo de 15 a 60 segundos desde el comienzo de la aplicación de la carga. La velocidad aplicada ha sido del orden de 200 N/s.

La resistencia a la tracción de las probetas  $\sigma_t$ , se ha determinado de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\sigma_t = \frac{2P}{De}$$

$\sigma_t$  = resistencia a la tracción de la probeta (MPa)

P = carga en la rotura (N)

D = diámetro de la probeta ensayada (mm)

e = espesor de la probeta ensayada (mm)

Una vez ensayado las muestras, se ha analizado el tipo de rotura producido (Tavalli y Vervoort, 2010). Existen tres tipos de roturas posibles en el ensayo brasileño: fracturas de activación, cuando se generan paralelas a la foliación, fracturas centrales (paralelas a la dirección de carga, situadas en la parte central de la probeta) y fracturas no centrales (fracturas fuera de la parte central).

#### *Ensayo de carga puntual*

El ensayo de punzonamiento mediante comprensión por carga puntual (Broch y Franklin, 1972), tiene como principal objetivo determinar de manera indirecta y estimativa, la resistencia a la tracción y a la comprensión uniaxial de las muestras, someténdolas a un proceso de carga progresiva. Este sistema permite efectuar múltiples ensayos incluso con fragmentos de rocas irregulares.

En este caso, se ha optado por los ensayos diametrales, axiales y en bloques irregulares, métodos fiables para valores de resistencia comprensión uniaxial comprendidos entre 30 y 100 MPa.

El equipo utilizado (Figura 3-13), está compuesto por un sistema de carga (bastidor, bomba hidráulica, cilindro hidráulico y punzones), un sistema de medida de la carga P para romper la muestra de roca y un sistema de medida de la distancia entre los extremos de los punzones.



FIGURA 3-13. Equipo empleado para el ensayo de carga puntual.

Las muestras empleadas (Tabla II-3 del Anexo II), corresponden a excedentes de probetas o partes de no válidas para otros ensayos. En este caso, se han ensayado probetas cilíndricas, aplicando la carga transversalmente (diametral) y longitudinalmente (axial), proporcionando resultados más precisos y, además, bloques de geometría regular.

Para poder llevar a cabo el ensayo de carga puntual, ha sido necesario la preparación de las muestras, siguiendo la norma UNE 22950-5:1996. Destacar que para cada tipo de ensayo, hay que realizar al menos 10 roturas.

En el ensayo diametral, se han utilizado probetas cuya longitud es superior a 0,5 veces el diámetro ( $L > 0,5 D$ ), en el axial, la longitud tiene que seguir una relación longitud/diámetro comprendida entre 0,3 y 1 ( $0,3W < D < W$ ). Por último, los bloques o fragmentos regulares deben tener un tamaño mínimo de  $50 \text{ mm} \pm 35 \text{ mm}$ , y seguir una relación  $D/W$  entre 0,3 y 1, siendo preferible aproximarse a 1. En la Figura 3-14, aparece resumidas las características de las probetas.

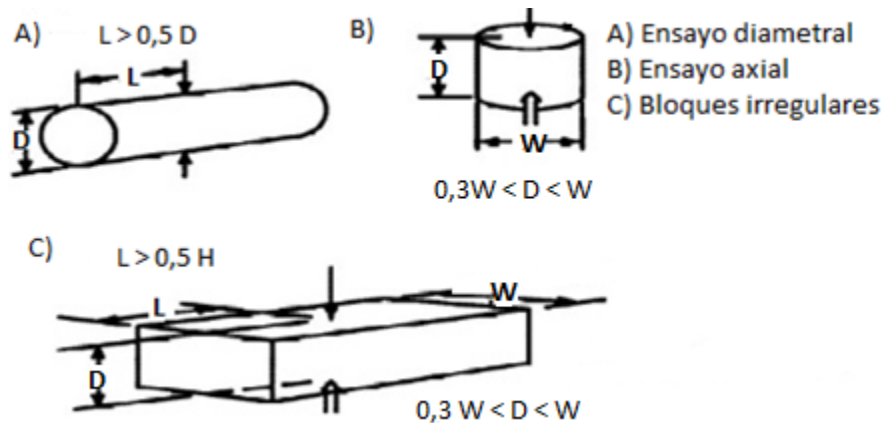


FIGURA 3-14. Dimensiones ensayo carga puntual según la UNE 22950-5:1996.

Con los resultados obtenidos, se calcula el índice de resistencia a la carga puntual no corregido ( $I_s$ ), el cual establece la relación entre la carga de rotura aplicada ( $P$ , en KN) y el diámetro equivalente ( $De$ , en mm):

$$I_s = \frac{P}{(De)^2}$$

$I_s$  = índice resistencia a la carga puntual no corregido (MPa)

$P$  = carga en la rotura (KN)

$De = D^2$  en ensayos diametrales

$De = 4 \cdot \text{área} / \pi$  en ensayos axiales y fragmentos irregulares

Este parámetro varía en función de la forma y dimensiones de las muestras, por lo que es necesario determinar el índice de resistencia a la carga puntual  $I_s(50)$ , que es el valor para probetas cilíndricas de 50 mm de diámetro en un ensayo diametral ( $De = D = 50$ ). Si las probetas tienen otras dimensiones, como es el caso, es necesario aplicar el factor de corrección de tamaño ( $F$ ) a los valores determinados ( $I_s$ ).

$$I_s(50) = P/(50)^2 = F \cdot I_s \quad (\text{MPa})$$

$$F = (De/50)^{0,45}$$

En el caso en el que la roca sea anisótropa, es necesario calcular el Índice de resistencia anisótropo  $I_s(50)$ , el cual establece la relación entre los valores medidos transversalmente y longitudinalmente a la dirección de la anisotropía.

Entre la resistencia a la compresión uniaxial y el ensayo de carga puntual, se ha podido establecer una relación o correlación aproximada (Bieniawski, 1975).

Además, los resultados de la carga puntual también se pueden correlacionar con el ensayo de tracción indirecta o brasileño, según la norma ISRM de 1985:

$$\sigma = I_s(50) / 0,8$$

### 3.3. Análisis e interpretación de los datos

En este apartado, se ha realizado una comparación entre los resultados de laboratorio obtenidos en el presente trabajo con los recabados en los 12 proyectos de obras públicas llevados a cabo en distintos puntos de la Península Ibérica (Anexo III).

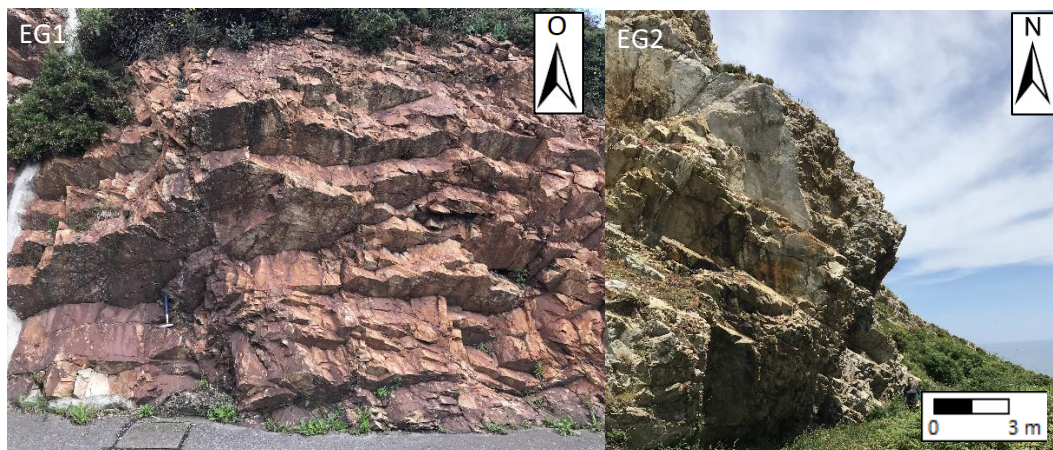
A partir de este análisis, se han podido conocer las diferencias y similitudes de las características geológicas-geotécnicas de las muestras del presente trabajo (Zona Cantábrica), con afloramientos de la Formación Barrios en otras Zonas del Macizo Ibérico.

## 4. RESULTADOS

En este apartado, se ha llevado a cabo un análisis detallado de los resultados obtenidos en los ensayos de campo (estaciones geomecánicas) y laboratorio, a partir de los cuales se ha obtenido la caracterización geotécnica de las cuarzoarenitas pertenecientes a la Formación Barrios en la Zona Cantábrica.

### 4.1. Estaciones geomecánicas: caracterización del macizo rocoso

A continuación, se detallan los resultados obtenidos en las ocho estaciones geomecánicas (Tabla de la Figura 3-2), seleccionadas en función de su ubicación, para estudiar distintas áreas y grados de alteración de las cuarzoarenitas. En esta primera parte, se han obtenido las características geotécnicas del macizo rocoso “in situ”, teniendo en cuenta el grado de alteración que presentan los materiales. En las Figuras 4-1 y 4-2, se muestran los afloramientos estudiados.





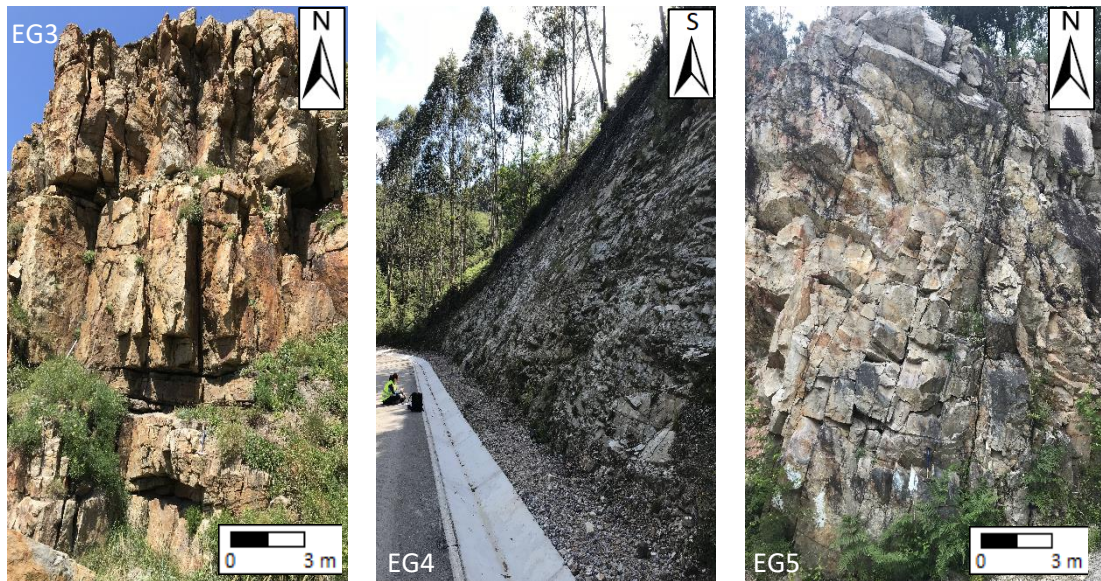


FIGURA 4-1. Estaciones geomecánicas: EG1, EG2, EG3, EG4 y EG5.

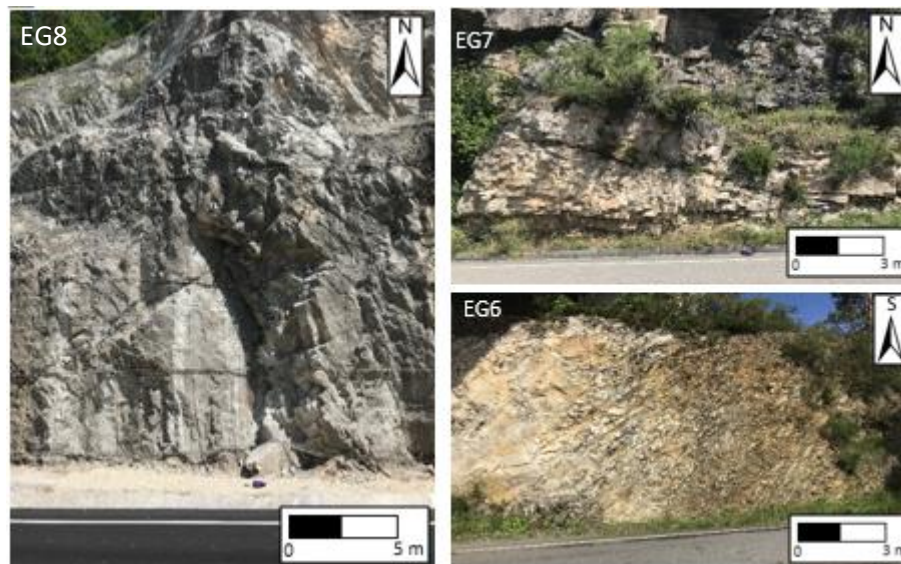


FIGURA 4-2. Estaciones geomecánicas EG6, EG7 y EG8.

Atendiendo a la clasificación de la meteorización según la ISRM, el macizo rocoso de los diversos afloramientos investigados, varía entre los grados II y III (ligeramente y moderadamente alterado), encontrándose decoloraciones que pueden interpretarse como alteración.

Además, para conocer la resistencia de la roca de los afloramientos (Tabla 4-1), se ha determinado mediante el martillo Schmidt (esclerómetro), la correlación de Miller (Figura 3-3) y el golpeo del martillo de geólogo.

Tipo de ensayo	EG-4	EG-1	EG-2	EG-3	EG-6	EG-7	EG-8	EG-5	
Martillo geológico	1 golpe	Muchos golpes						Esquirlas	
Martillo Schmidt	Rebote (R)	46	52	65	64	56	57	61	68
	$\sigma_{ci}$ (MPa)	95	140	240	225	160	180	220	>250
	ISRM (1978)	Dura	Muy dura						Extremadamente dura

TABLA 4-1. Resistencia estimada mediante el martillo Schmidt y geológico.

Los materiales se han clasificado en tres categorías: dura, muy dura y extremadamente dura, siendo las estaciones llevadas a cabo en el Cogollo (EG-4) y Peña flor (EG-5), las que presentan una menor y mayor resistencia a la compresión, respectivamente (95 MPa y > 250 MPa).

*Análisis de las discontinuidades: disposición*

A continuación, se han analizado conjuntamente los resultados de las familias de discontinuidades, obtenidas en los ocho afloramientos. En total, se han estudiado y tomado 72 medidas de dirección y buzamiento de discontinuidades y planos de estratificación. En la Figura 4-3, se puede observar la proyección de los polos y los planos medios para cada una de las familias, cuyo valor aparece en la leyenda.

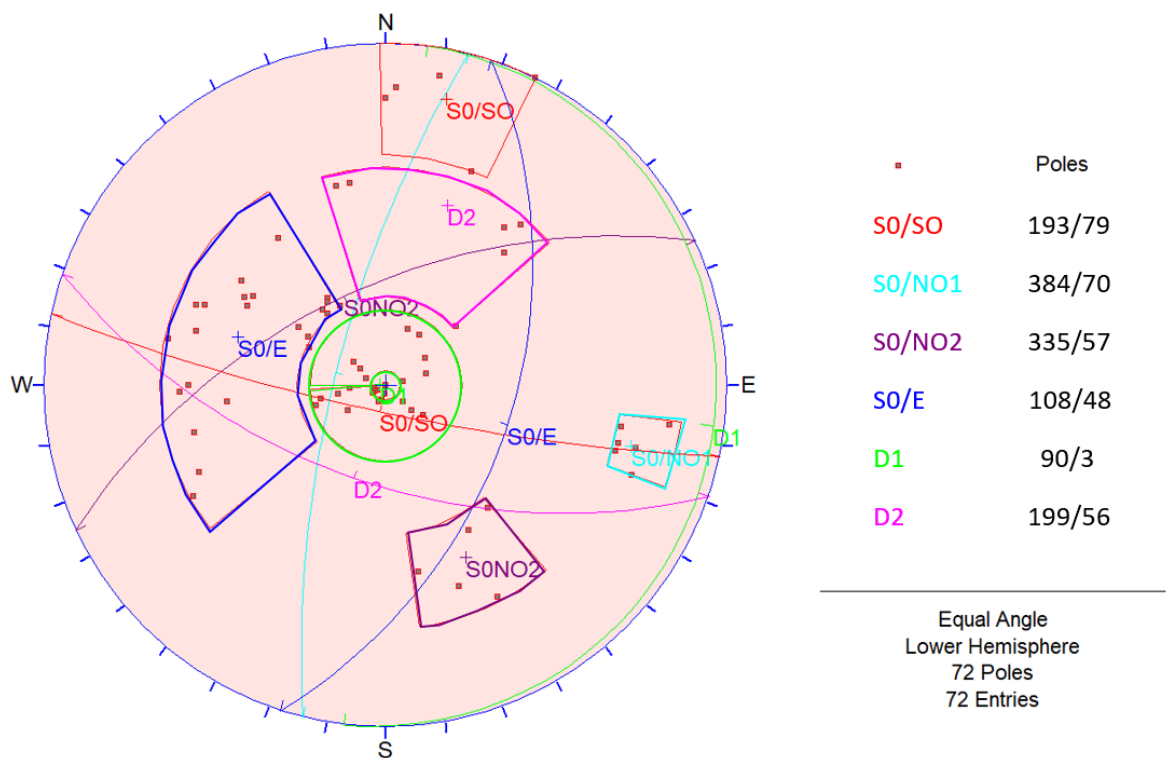


FIGURA 4-3. Proyección de los polos y planos de estratificación y discontinuidades.

En el cuadrante oeste de la plantilla (Figura 4-3), se observa una concentración elevada de medidas, que corresponden con superficies de estratificación. Los polos se encuentran agrupados en una zona, amplia, cuyos planos tiene una dirección y buzamiento medio de 108/48. Además, hay otros planos de estratificación que presentan una dirección NO y SO (S0/NO1 y S0/NO2), en ambos casos con un buzamiento alto ( $> 55^\circ$ ).

En cuanto a las discontinuidades, en el centro de la falsilla se observa una elevada concentración de medidas que corresponden con la familia principal (D1), la mayoría de los planos de discontinuidad presentan una dirección E y un buzamiento subhorizontal, paralelos a la estratificación (plano medio: 90/3). También, puede distinguirse otra familia de discontinuidad (D2), con una concentración de medidas menor y un plano medio de dirección y buzamiento 199/56.

En la Figura 4-4, se muestra el porcentaje de concentración de medidas.

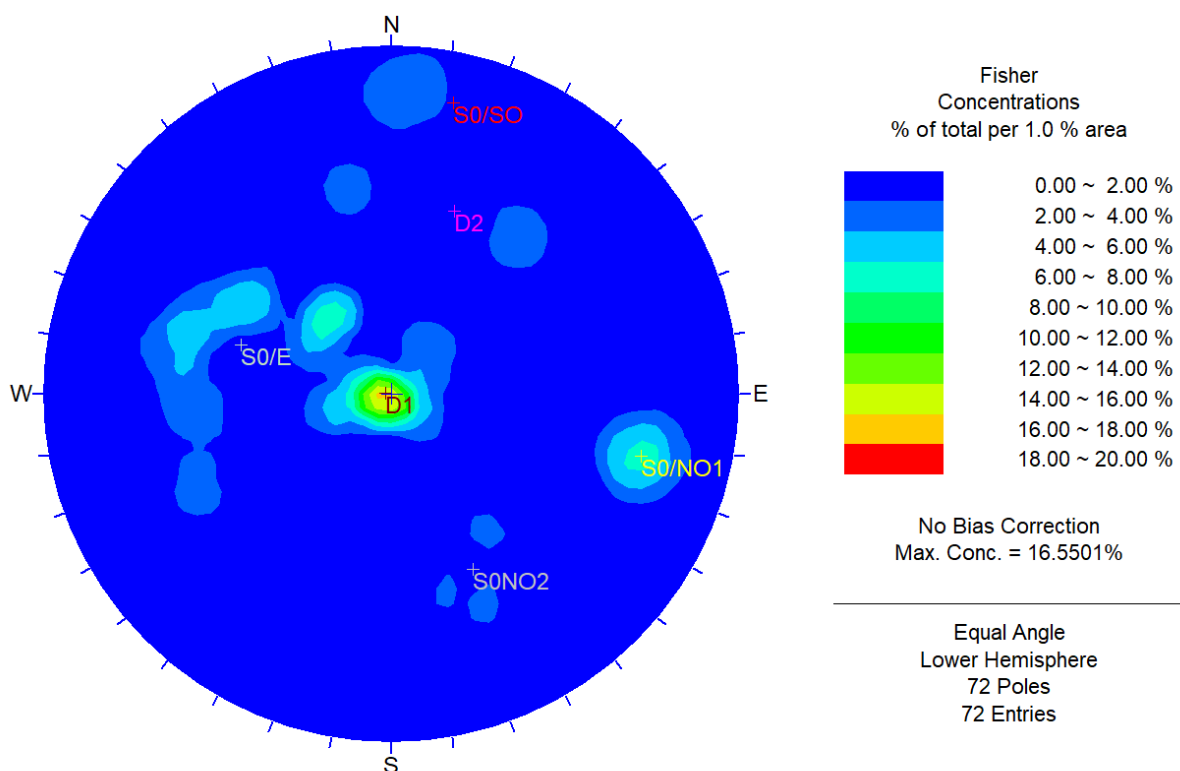


FIGURA 4-4. Representación del % de concentración de medidas en un 1 % de área.

Analizando los datos de la Figura 4-4, se puede observar, como se ha mencionado anteriormente, que la zona de mayor concentración de medidas, corresponde con la familia principal de discontinuidad D1, con una concentración que llega al 16,55 %. Las otras zonas destacadas, corresponde con los planos de estratificación S0/E y S0/NO1, cuya concentración se sitúa en torno al 6-8 %.

### Espaciado de las discontinuidades

En la Figura 4-5, se representa el espaciado de las discontinuidades para cada una de las ocho estaciones geomecánicas estudiadas. Analizando el gráfico, puede observarse como los resultados son muy variados y dispares.

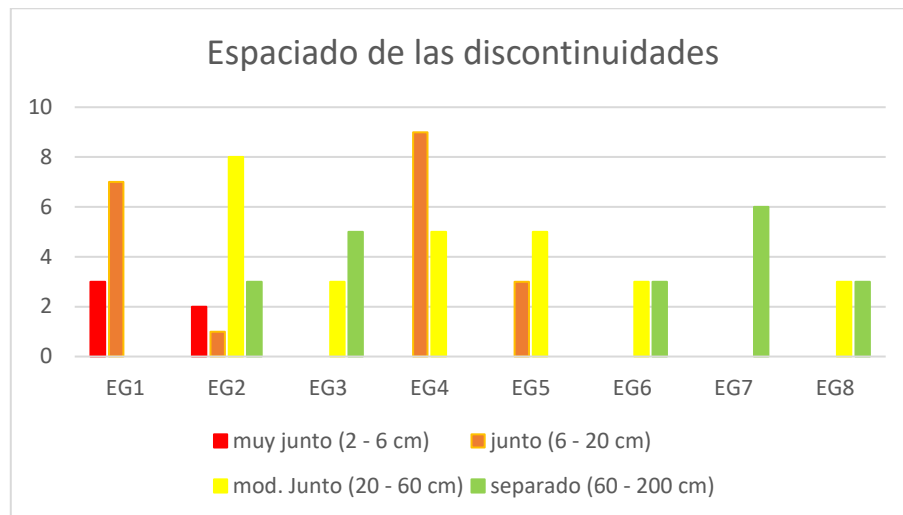


FIGURA 4-5. Espaciado de las discontinuidades.

Las estaciones EG3, EG6, EG7 y EG8 son las que presentan un mayor espaciado, variando entre moderadamente junto (20–60 cm) y separado (60–200 cm). En cambio, la EG2 presenta una variabilidad más alta, desde muy junto (2–6 cm) a separado (60–200 cm). Por último, las estaciones EG5, EG4 y EG1, son las que presentan el menor espaciado desde muy junto a moderadamente junto.

### Continuidad

Analizando la continuidad de las juntas (Figura 4-6), puede observarse de nuevo una alta heterogeneidad en prácticamente todas las estaciones, presentando desde continuidades bajas (entre 1 y 3 m) a muy altas (> 20 m).

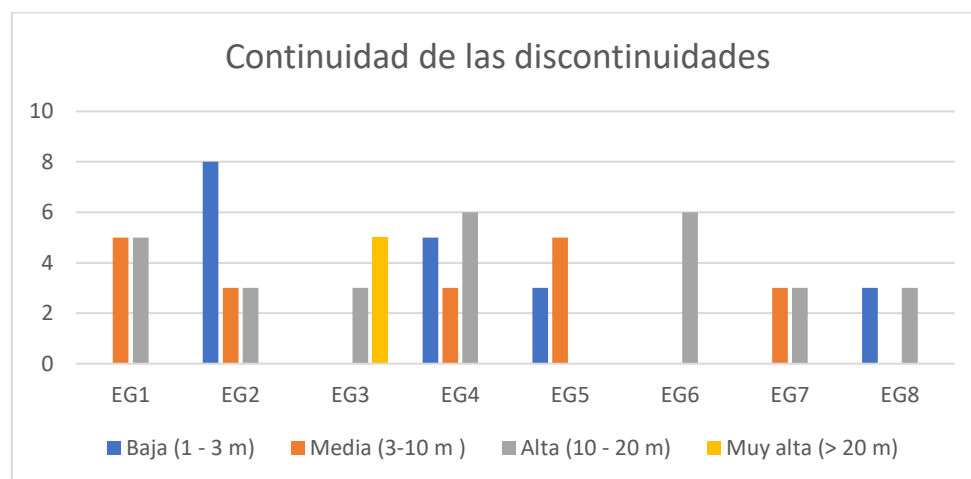
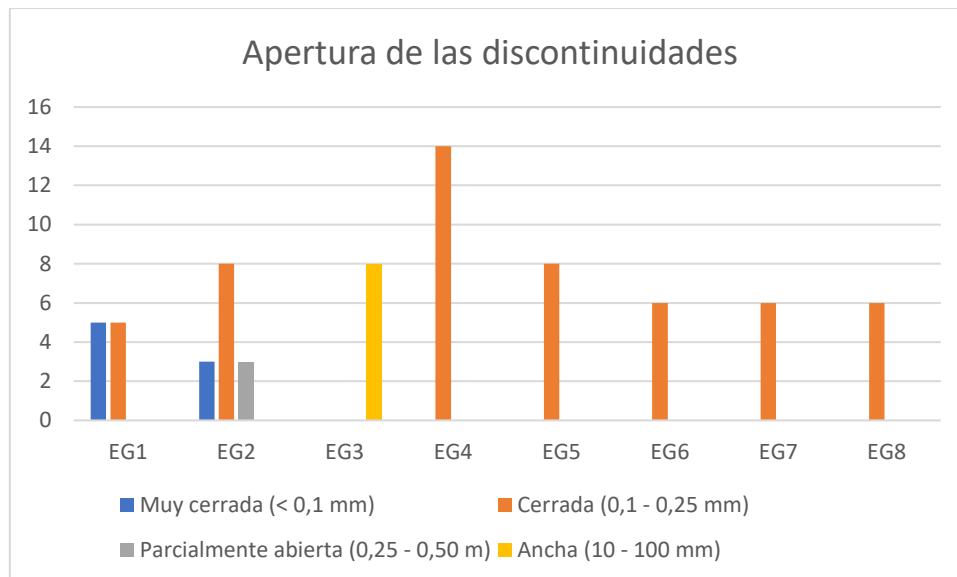


FIGURA 4-6. Continuidad de las discontinuidades.

A partir de la Figura 4-6, se puede afirmar que las estaciones EG6 y EG3 presentan una continuidad alta o muy alta en todas las juntas (10 – 20 m o > 20 m). Además, en las EG1 y EG7 puede considerarse que es elevada, dado que la longitud varía entre los 3 y los 30 m. En EG2 y EG4, la continuidad es muy heterogénea, predominando las bajas y altas, 8 y 6 discontinuidades, respectivamente. Por último, la EG5 es la de menor longitud (< 5 m).

#### *Apertura de las discontinuidades*

En cuanto a la apertura (Figura 4-7), se aprecian valores muy homogéneos en prácticamente todas las estaciones, predominando claramente las cerradas (entre 0,1 y 0,25 mm). En las EG4, EG5, EG6, EG7 y EG8, solo muestran ese tamaño de apertura, además la EG1 y EG2 presentan una apertura muy cerrada (< 1 mm) y parcialmente abierta (0,25 – 0,50 mm), respectivamente. Únicamente la EG3, no muestra dicho tamaño, siendo ancha (ente 10 y 100 mm).



*FIGURA 4-7. Apertura de las discontinuidades*

#### *Rugosidad*

Finalmente, la rugosidad también es muy homogénea (Figura 4-8), se aprecia un predominio de las juntas planas rugosas (con un coeficiente JRC entre 2 y 4) y de las onduladas rugosas (JRC entre 6 y 8), dado que se encuentran en todas las estaciones salvo en la EG1, que presenta unas juntas planas suaves y onduladas planas (JRC entre 0-2 y 4-6, respectivamente).

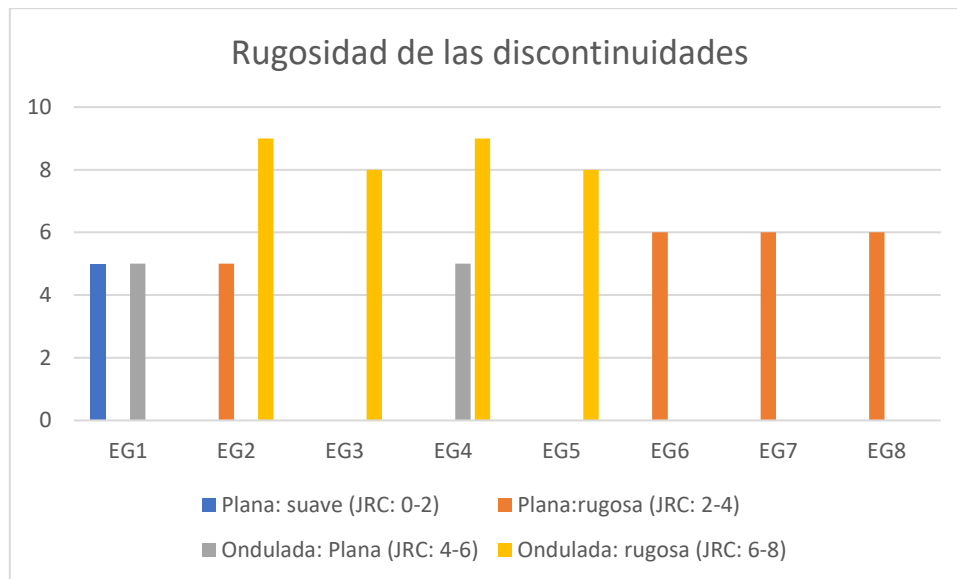


FIGURA 4-8. Rugosidad de las discontinuidades.

#### Densidad de fracturación: $J_v$ y $RQD$

En esta parte del estudio del macizo rocoso, se ha analizado la cantidad de discontinuidades encontradas. Observando estos parámetros, se pretende conocer cómo se encuentra de fracturado el macizo rocoso, dato fundamental para saber su comportamiento geotécnico. En primer lugar, se ha analizado el parámetro  $J_v$ , discontinuidades por unidad de volumen (Figura 4-9).

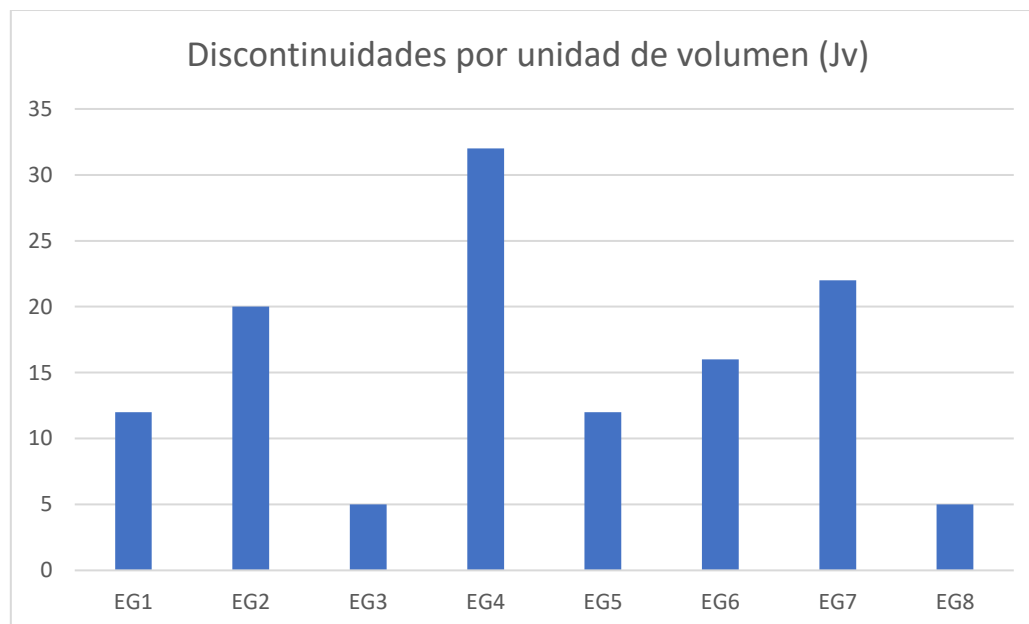


FIGURA 4-9. Discontinuidades por unidad de volumen ( $J_v$ ).

La dispersión de los resultados es elevada, variando el  $J_v$  entre 5 y 32. Todas las estaciones salvo las EG3, EG4 y EG8, se han clasificado como bloques pequeños, dado que el  $J_v$  se encuentra entre 10 y 30 discontinuidades/ $m^3$  (Tabla 4-2). La EG4, está formada por bloques muy pequeños ( $>30$  disc./ $m^3$ ) y, las EG3 y EG8 por bloques medianos (3 – 10 disc./ $m^3$ ).

Descripción	$J_v$ (discontinuidades/m <sup>3</sup> )
Bloques muy grandes	< 1
Bloques grandes	1 – 3
Bloques medianos	3 – 10
Bloques pequeños	10 – 20
Bloques muy pequeños	> 30
Macizo brechificado	> 60

TABLA 4-2. Descripción del macizo rocoso en función del parámetro  $J_v$ .

En cuanto al índice de calidad del macizo rocoso o RQD (%), determinado a partir de la densidad de discontinuidades por unidad de volumen, presenta una alta heterogeneidad. Los valores varían desde 30 a 97,5 (Figura 4-10).

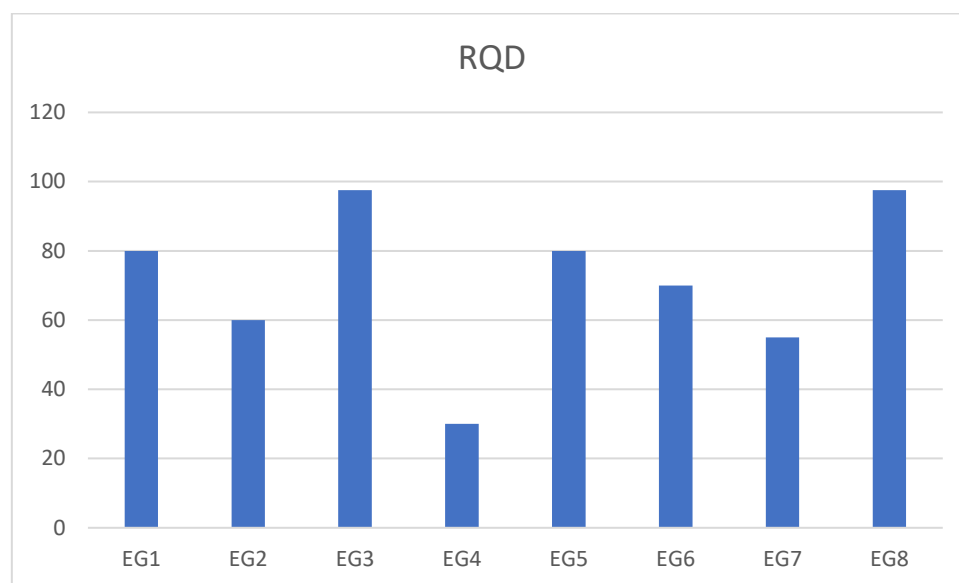


FIGURA 4-10. Índice de calidad del macizo rocoso (RQD).

En función del parámetro RQD, se ha podido determinar la calidad del macizo rocoso en cada estación geomecánica (Tabla 4-3). La EG4, presenta una calidad mala, con un RQD que se encuentra entre el 25 y 50 % siendo con diferencia el de peor %. Las EG2, EG6 y EG7, se considera que tienen un índice de calidad aceptable (RQD entre 50 y 75 %). Por último, los macizos rocosos con un mejor índice son los pertenecientes a las estaciones EG5 y EG8, con una calidad buena (RQD entre 75 y 90 %) y las EG1 y EG3, con una calidad muy buena (> 97,5 %).

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

TABLA 4-3. Calidad del macizo rocoso en función del RQD.

### Clasificación de los macizos rocosos: RMR y $Q$ de Barton.

La clasificación de los macizos rocosos, se ha llevado a cabo en función del parámetro RMR de Bieniawski y la  $Q$  de Burton (Tabla 4-4):

Tipo de ensayo		EG-4	EG-2	EG-7	EG-1	EG-3	EG-5	EG-6	EG-8
RMR	Valor	56	68	75	72	76	79	65	86
	Clase	III	II						I
	Descripción	Medio	Bueno						Muy bueno
Q	Valor	0,66	2,66	8,25	16	29	24	10,5	14,6
	Clasificación	Roca muy mala	Roca mala	Roca media	Roca buena				

TABLA 4-4. Clasificación del macizo rocoso en función del RMR y  $Q$  de Burton.

La estación llevada a cabo en "El Cogollo" (EG4), se ha calificado como un macizo medio según el RMR y roca muy mala según la  $Q$  de Burton, siendo el afloramiento de peor calidad. Esto concuerda con los resultados del martillo Schmidt (Tabla 4-1) y el análisis de las discontinuidades.

La mayoría de las estaciones, se han clasificado como rocas buenas según el RMR y la  $Q$  de Burton (EG1, EG3, EG5 y EG6).

Por último, la estación del embalse de Tanes (EG8), presenta el macizo rocoso de mayor calidad, clasificándose como muy bueno según el RMR y bueno según la  $Q$  de Burton. Estos resultados concuerdan de nuevo con los del martillo Schmidt y las características de las discontinuidades.

## 4.2. Laboratorio

Los ensayos de laboratorio se han llevado a cabo con el fin de obtener una caracterización geotécnica de la Formación Barrios y establecer una comparación con los parámetros existentes. Para realizar los ensayos, se han utilizado 6 bloques, la mitad pertenecientes al entorno de uno de los afloramientos estudiados (EG4) y el resto, recogidos en el parque natural del Ponga, área diferente a la estudiada en las estaciones geomecánicas. No se ha seguido ningún criterio más en la elección de los puntos de recogida de muestras.

### Estudios petrográficos

Macroscópicamente es una roca bastante homogénea, coherente, mayoritariamente de tonos blanquecinos, aunque las muestras que presentan un cierto grado de alteración, pueden presentar unos tonos beige-amarillentos; dichos tonos aparecen con una cierta orientación que coincide con la estratificación.



A veces pueden observarse discontinuidades, bastante penetrativas y de extensión irregular. La superficie de fractura es rugosa, típica de las rocas sedimentarias detríticas de grano medio. A la lupa pueden observarse sobre todo en las que presentan un cierto grado de alteración y una cierta porosidad, que mayoritariamente se encuentra entre los granos.

Siguiendo la Norma correspondiente, se han estudiado al microscopio petrográfico cuatro láminas que presentan básicamente unas características muy similares, como puede verse a continuación en las fichas correspondientes.

En todos los casos, la roca se ha clasificado como una cuarzoarenita (Pettijohn, Potter y Siever, 1972), debido a su textura y alto contenido en cuarzo (en torno al 95%).

No se observa en ningún caso una orientación preferente, por lo que no se distingue claramente la dirección de la estratificación. La diferencia entre las láminas reside en el tamaño de grano, variando desde grano muy fino a grueso.

ESTUDIO PETROGRÁFICO		Muestra: B3-P4-1	
<b>Composición mineralógica</b>	Cuarzo	95 %	
	Cemento de cuarzo	<5 %	
	Feldespatos	< 1%	
<b>Descripción mineralógica:</b>			
<p>La muestra estudiada, está formada prácticamente en su totalidad por cuarzo, el cual le confiere a la roca una textura granoblástica. Además, junto al mineral principal, aparecen de manera esporádica feldespatos y cemento de cuarzo de sobrecrecimiento.</p> <p>El tamaño de los granos de cuarzo varía entre 0,062 mm y 1 mm, encontrándose la mayor cantidad de granos entorno a los 0,25 mm (grano medio), estando la muestra bien calibrada (valores de 0,35 – 0,50 según Folk y Ward). En cuanto a la forma, son subangulosos con una esfericidad baja.</p> <p>A partir de estos parámetros, podemos determinar la madurez textural de la roca. Es una arenisca madura, dado que su porcentaje de matriz es inferior al 5 % y su calibrado menor a 0,5, además de presentar una redondez inferior a 3.</p> <p>En función de las características petrográficas anteriormente descritas, se ha podido clasificar la muestra como una cuarzoarenita, según la clasificación de <a href="#">Pettijohn, Potter y Siever (1972)</a>.</p>			
			
<b>Dirección estratificación:</b> Perpendicular		<b>Ancho de la imagen:</b> 1,00 cm	

ESTUDIO PETROGRÁFICO		Muestra: B3-P4-2
<b>Composición mineralógica</b>	Cuarzo	95 %
	Cemento de cuarzo	< 5 %
	Feldespatos	< 1%
<p><b>Descripción mineralógica:</b></p> <p>La muestra estudiada, está formada prácticamente en su totalidad por cuarzo, el cual le confiere a la roca una textura granoblástica. Además, junto al mineral principal, aparecen de manera simbólica feldespatos y cemento de cuarzo de sobrecrecimiento.</p> <p>El tamaño de los granos de cuarzo varía entre 0,062 mm y 1 mm, encontrándose la mayor cantidad de granos entorno a los 0,25 – 0,50 mm (grano medio-grueso), estando la muestra moderadamente calibrada (valores de 0,50 – 0,70 según Folk y Ward). Los granos son subangulosos y con una esfericidad baja.</p> <p>A partir de estos parámetros, podemos determinar la madurez textural de la roca. Es una arenisca submadura, dado que su porcentaje de matriz es inferior al 5 % y su calibrado mayor a 0,5.</p> <p>En función de las características petrográficas anteriormente descritas, se ha podido clasificar la muestra como una cuarzoarenita, según la clasificación de <a href="#">Pettijohn, Potter y Siever (1972)</a>.</p>		
		
<b>Dirección estratificación:</b>	Perpendicular	<b>Ancho de la imagen:</b> 1,00 cm

ESTUDIO PETROGRÁFICO		Muestra: EB2– P24	
<b>Composición mineralógica</b>	Cuarzo	95 %	
	Cemento de cuarzo	< 5 %	
	Feldespatos	< 1%	
<b>Descripción mineralógica:</b>			
<p>La muestra estudiada, está formada prácticamente en su totalidad por cuarzo, el cual le confiere a la roca una textura granoblástica. Además, junto al mineral principal, aparecen de manera simbólica feldespatos y cemento de cuarzo de sobrecrecimiento.</p> <p>El tamaño de los granos de cuarzo varía entre 0,062 mm y 0,25 mm, predominando los tamaños entre 0,062 y 0,125 mm (grano muy fino – fino). La muestra está muy bien calibrada (&lt; 0,35 según Folk y Ward). Además, los granos son subredondeados y tienen una alta esfericidad.</p> <p>A partir de estos parámetros, podemos determinar la madurez textural de la roca. Es una arenisca supermadura, dado que su porcentaje de matriz es inferior al 5 %, su calibrado es inferior a 0,5 y su redondez es superior a 3.</p> <p>En función de las características petrográficas anteriormente descritas, se ha podido clasificar la muestra como una cuarzoarenita, según la clasificación de <a href="#">Pettijohn, Potter y Siever (1972)</a>.</p>			
			
<b>Dirección estratificación:</b> Paralela		<b>Ancho de la imagen:</b> 1,00 cm	

ESTUDIO PETROGRÁFICO		Muestra: EB2 – P9	
<b>Composición mineralógica</b>	Cuarzo	95 %	
	Cemento de cuarzo	< 5 %	
	Feldespatos	< 1%	
<b>Descripción mineralógica:</b>			
<p>La muestra estudiada, está formada prácticamente en su totalidad por cuarzo, el cual le confiere a la roca una textura granoblástica. Además, junto al mineral principal, aparecen de manera simbólica feldespatos y cemento de cuarzo de sobrecrecimiento.</p> <p>El tamaño de los granos de cuarzo varía entre 0,062 mm y 0,25 mm, predominando los tamaños entre 0,062 y 0,125 mm (grano muy fino – fino). La muestra está muy bien calibrada (&lt; 0,35 según Folk y Ward). Además, los granos son subangulosos y tienen una alta esfericidad</p> <p>A partir de estos parámetros, podemos determinar la madurez textural de la roca. Es una arenisca supermadura, dado que su porcentaje de matriz es inferior al 5 %, su calibrado es inferior a 0,5 y su redondez es inferior a 3.</p> <p>En función de las características petrográficas anteriormente descritas, se ha podido clasificar la muestra como una cuarzoarenita, según la clasificación de <a href="#">Pettijohn, Potter y Siever (1972)</a>.</p>			
			
<b>Dirección estratificación:</b> Paralela		<b>Ancho de la imagen:</b> 1,00 cm	

### Difracción y fluorescencia de rayos X

En el ensayo de DRX y FRX, se han analizado tres muestras de distintos bloques y grados de alteración, para determinar la composición química y mineralógica de todos los tipos de ejemplares estudiados. Este ensayo, ha sido encargado al Servicio Científico –Técnico de la Universidad de Oviedo.

En primer lugar, se ha estudiado la composición mineralógica, obtenida mediante la difracción de rayos X (en adelante DRX). Como ejemplar del bloque 1, se ha seleccionado la muestra B1 – P2, compuesta en su mayoría por cuarzo (mineral principal) y, goetita y caolinita (minerales accesorios). En la Tabla 4-5 y Figura 4-11, se muestran los resultados.

Mineral	Factor escala (gráfica)	Formula Química
Cuarzo	0,799	SiO <sub>2</sub>
Goetita	0,010	Fe <sup>3+</sup> O (OH)
Caolinita	0,006	Al <sub>4</sub> (OH) <sup>8</sup> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> )

TABLA 4-5. Composición mineralógica de la muestra B1-P2.

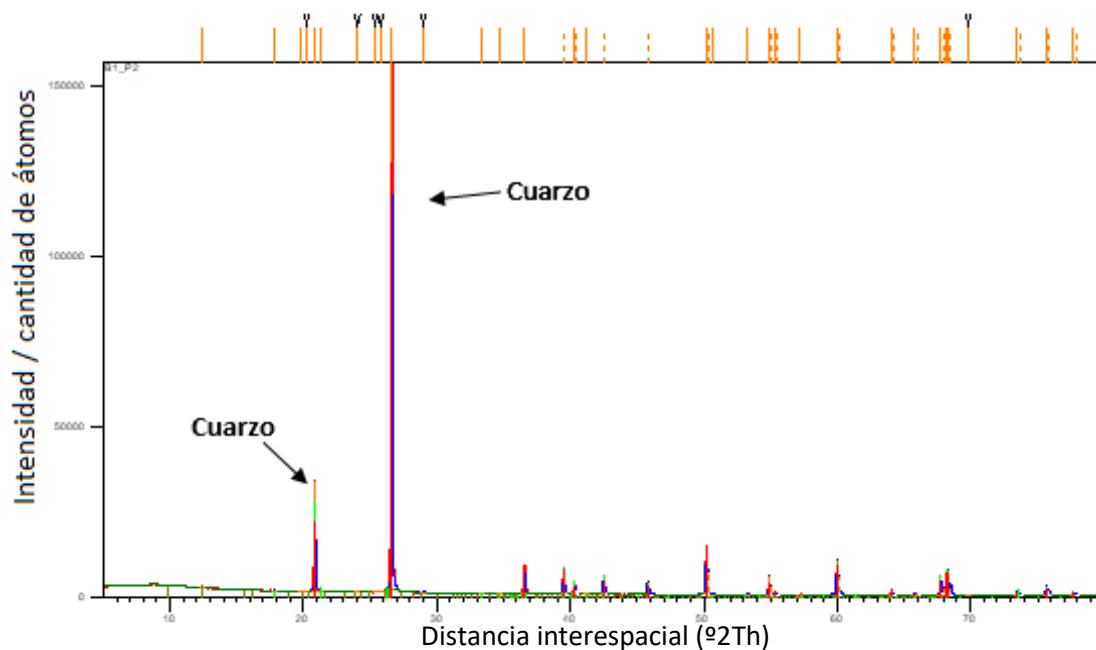


FIGURA 4-11. Análisis mineralógico de la muestra B1-P2.

En la Figura 4-11, se observan las intensidades presentadas por cada mineral (cantidad de átomos) al aplicarle un haz de rayos de una longitud de onda de 3,35, en función de la distancia interespacial (Å), con valores comprendidos entre 5 y 80. Los picos de mayor intensidad, pertenece al cuarzo con una presencia de 155.472, 90 y 39.965 átomos. La goetita y la caolinita, presentan una intensidad inferior a 6000.

En cuanto a las muestras del bloque 2 (B-P16 y B2-P19), a diferencia del caso anterior, puede observarse como únicamente están compuestas por cuarzo (Tabla 4-6 y Figura 4-12).

Mineral	Factor escala (gráfica)	Formula Química
Cuarzo	0,875	SiO <sub>2</sub>

TABLA 4-6. Composición mineralógica de la muestra B2-P16 y B2-P19.

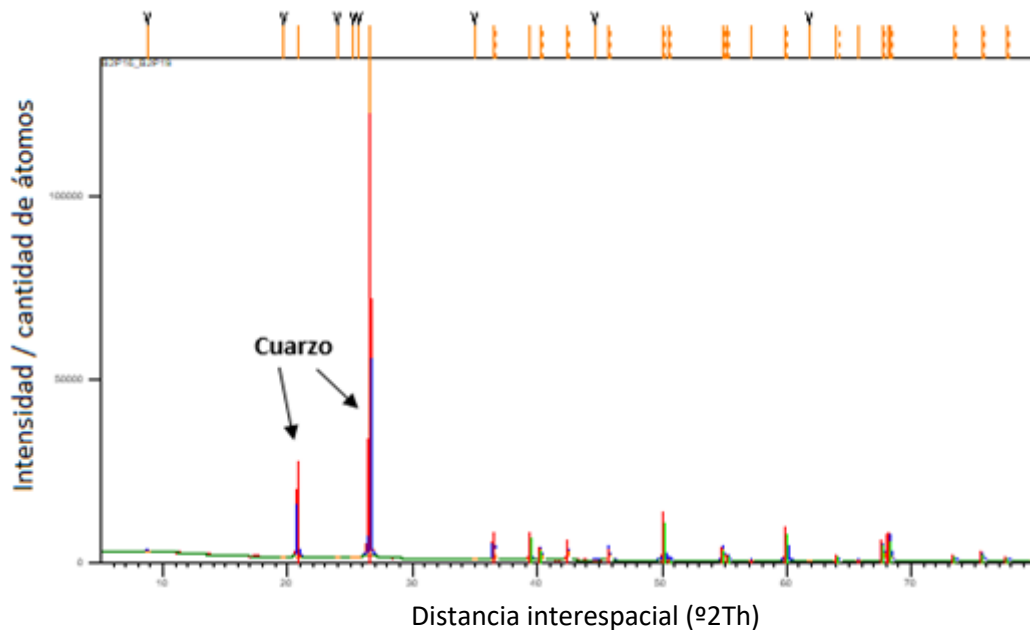


FIGURA 4-12. Análisis mineralógico de la muestra B2-P16 y B2-P19.

En la Figura 4-12, hay algunas diferencias respecto al caso anterior, se observan más cantidad de picos, todos pertenecientes al cuarzo, pero con una intensidad más baja. Los dos principales, presentan 136.000 y 20.000 átomos, descendiendo ligeramente en ambos respecto a las muestras del bloque 1.

Por último, se han analizado los resultados de DRX obtenidos en las muestras B6-P3 y B6-P8 del bloque 6. En este caso, al igual que las del bloque 2, únicamente presenta cuarzo, pero la intensidad de los picos es inferior (Tabla 4-7 y Figura 4-13).

Mineral	Factor escala (gráfica)	Formula Química
Cuarzo	0,886	SiO <sub>2</sub>

TABLA 4-7. Composición mineralógica de la muestra B6-P3 y B6-P8.

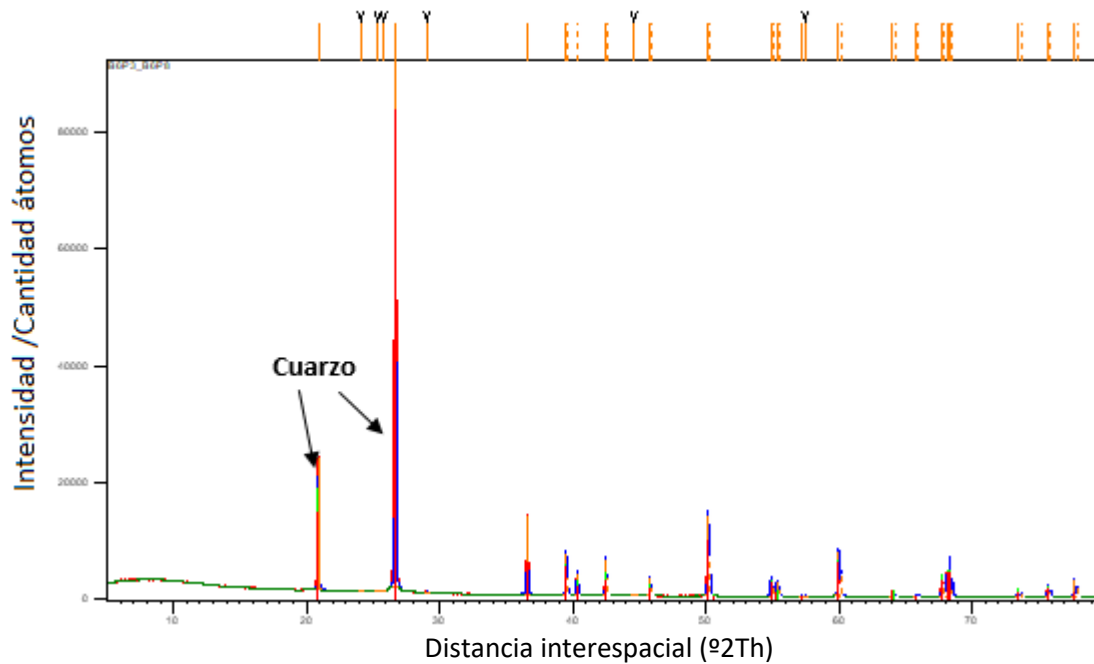


FIGURA 4-13. Análisis mineralógico de la muestra B6-P3 y B6-P8.

En la Figura 4-13, hay algunas diferencias respecto al caso anterior, se observa que los dos principales picos, presentan una intensidad menor 91.000 y 28.000, en cambio, los picos de menor intensidad presentan valores ligeramente mayores a las otras muestras estudiadas.

En conclusión, los resultados de DRX coinciden con las descripciones de las láminas delgadas donde el mineral principal es cuarzo, de hecho en algunos ejemplos únicamente aparece dicho mineral. Además, aparecen como accesorios la goetita y caolinita. La principal diferencia, es la cantidad de átomos de cuarzo presentes en cada haz emergente de las muestras. El bloque 1, presenta la intensidad más alta (155.000 átomos) y las muestras del bloque 6 las más bajas (91.000 átomos).

Una vez determinado la composición mineralógica, a partir del ensayo de fluorescencia de rayos X (en adelante FRX), se ha determinado la composición química de las muestras (Tabla 4-8).

Muestra	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	L.O.I.	To.
B1-P2	96,86	1,02	0,86	0,00	0,06	0,11	0,11	0,21	0,10	0,05	0,60	99,97
B2-P16 B2-P19	96,74	1,33	0,06	0,00	0,05	0,02	0,07	0,28	0,27	0,03	0,33	99,18
B6-P3 B6-P8	97,55	0,97	0,04	0,00	0,15	0,01	0,07	0,11	0,28	0,02	0,50	99,70

TABLA 4-8. Composición química de las muestras (FRX).



En la Tabla 4-8, se puede observar que prácticamente la totalidad de las muestras están compuestas por  $\text{SiO}_2$ , (96 – 97%), es decir, están formadas por cuarzo. Estos resultados concuerdan con lo mencionado en las descripciones petrográficas y en el ensayo de DRX, en los que el mineral predominante es el cuarzo. Además, hay una presencia mínima, en torno al 1% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , correspondientes a la caolinita y goetita, minerales accesorios que aparecen en la muestra B1-P2.

#### *Propiedades físicas elementales*

En la Tabla 4-9, se muestra el contenido en humedad de las 24 muestras utilizadas en la determinación de las propiedades físicas elementales (todas tienen 35 mm de diámetro y su dirección es paralela respecto a la estratificación). El contenido en humedad (W) es muy bajo (inferior al 0,3 %), no se aprecia una variación de la humedad entre los distintos bloques, obteniéndose valores similares, entorno al 0,05 %. Mencionar que entre la medida del peso húmedo (Mw) y peso seco (Ms), hubo un día de diferencia (siguiendo la norma), respectivamente.

Nº	Muestra	Mw (g)	Ms (g)	W (%)	Nº	Muestra	Mw (g)	Ms (g)	W (%)
1	B1-P1	134,490	134,432	0,043	13	B4-P3	171,933	171,367	0,330
2	B1-P4	171,445	171,382	0,037	14	B4-P6	193,267	193,19	0,040
3	B1-P5	170,335	170,263	0,042	15	B5-P3	197,382	197,231	0,077
4	B1-P7	184,923	184,841	0,044	16	B5-P4	176,961	176,839	0,069
5	B1-P8	189,070	188,996	0,039	17	B5-P6	160,070	159,942	0,080
6	B1-P10	163,653	163,593	0,037	18	B5-P9	166,211	166,075	0,082
7	B2-P5	203,109	202,998	0,055	19	B6-P1	193,564	193,388	0,091
8	B2-P7	194,628	194,528	0,051	20	B6-P2	174,708	174,477	0,132
9	B2-P10	198,031	197,938	0,047	21	B6-P4	170,827	170,596	0,135
10	B2-P11	199,206	199,101	0,053	22	B6-P5	191,533	191,352	0,095
11	B2-P13	203,859	203,755	0,051	23	B6-P6	189,222	189,082	0,074
12	B2-P14	198,316	198,209	0,054	24	B6-P9	188,504	188,368	0,072

TABLA 4-9. Determinación del contenido en humedad (W) de las muestras estudiadas.

Una vez hallado el contenido en humedad, se ha determinado el índice de vacíos (Iv), la densidad aparente ( $\rho_b$ ), porosidad abierta ( $\rho_o$ ), el volumen de poros abiertos (Vo) y aparente (Vb) en los bloques 1, 2, 4, 5 y 6. Los resultados, se resumen en la Tabla 4-10.

Muestra	md1 (g)	md2 (g)	md3 (g)	Limite (g)	Dif. Pesada (g)	Ms (g)	Mh (g)	Iv (%)	$\rho_b$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_o$ (%)	Vo (mm <sup>3</sup> )	Vb (mm <sup>3</sup> )
B1-P1	134,49	134,43	134,43	0,134	0,006	137,62	86,28	2,37	2618	6,2	3,19	51,34
B1-P4	171,45	171,38	171,37	0,171	0,010	174,12	110,13	1,60	2678	4,3	2,75	63,99
B1-P5	170,34	170,26	170,26	0,170	0,003	172,97	109,63	1,59	2688	4,3	2,71	63,34
B1-P7	184,92	184,84	184,83	0,185	0,009	188,06	118,82	1,74	2669	4,7	3,22	69,24
B1-P8	189,07	188,99	188,99	0,189	0,008	191,66	121,82	1,41	2706	3,8	2,67	69,84
B1-P10	163,65	163,59	163,59	0,164	0,004	166,31	105,71	1,66	2700	4,5	2,72	60,59
<b>Media B1</b>	<b>168,99</b>	<b>168,92</b>	<b>168,91</b>	<b>0,169</b>	<b>0,007</b>	<b>171,79</b>	<b>108,73</b>	<b>1,73</b>	<b>2677</b>	<b>4,6</b>	<b>2,87</b>	<b>63,05</b>
B2-P5	203,11	202,99	202,99	0,203	0,007	204,96	126,48	0,97	2586	2,5	1,97	78,48
B2-P7	194,63	194,53	194,52	0,195	0,008	195,91	121,18	0,71	2603	1,9	1,39	74,73
B2-P10	198,03	197,94	197,93	0,198	0,013	199,38	123,30	0,73	2602	1,9	1,45	76,08
B2-P11	199,21	199,10	199,09	0,199	0,009	200,78	123,99	0,85	2593	2,2	1,68	76,78
B2-P13	203,86	203,76	203,75	0,204	0,010	205,51	127,07	0,87	2597	2,3	1,77	78,45
B2-P14	198,32	198,21	198,20	0,198	0,007	199,74	123,49	0,78	2599	2,0	1,55	76,26
<b>Media B2</b>	<b>199,53</b>	<b>199,42</b>	<b>199,41</b>	<b>0,199</b>	<b>0,009</b>	<b>201,05</b>	<b>124,25</b>	<b>0,82</b>	<b>2597</b>	<b>2,1</b>	<b>1,63</b>	<b>76,80</b>
B4-P3	171,93	171,37	171,36	0,171	0,005	171,93	106,64	0,33	2625	0,9	0,57	65,29
B4-P6	193,27	193,20	193,18	0,193	0,006	193,80	120,31	0,32	2629	0,8	0,62	73,49
B5-P3	197,38	197,23	197,22	0,197	0,011	198,22	122,95	0,51	2620	1,3	1,00	75,27
B5-P4	176,96	176,84	176,83	0,177	0,013	177,71	110,23	0,50	2620	1,3	0,88	67,48
B5-P6	160,07	159,94	159,93	0,160	0,011	160,84	99,74	0,57	2617	1,5	0,91	61,11
B5-P9	166,21	166,08	166,07	0,166	0,007	167,10	103,58	0,62	2614	1,6	1,03	63,53
<b>Media B4 y B5</b>	<b>180,76</b>	<b>180,58</b>	<b>180,57</b>	<b>0,181</b>	<b>0,009</b>	<b>181,52</b>	<b>112,53</b>	<b>0,52</b>	<b>2617</b>	<b>1,4</b>	<b>0,95</b>	<b>68,99</b>
B6-P1	193,56	193,39	193,38	0,193	0,006	195,10	120,22	0,89	2582	2,3	1,72	74,89
B6-P2	174,71	174,48	174,47	0,174	0,006	175,88	108,54	0,81	2591	2,1	1,41	67,34
B6-P4	170,83	170,60	170,59	0,171	0,009	171,99	106,08	0,82	1398	2,1	1,40	65,91
B6-P5	191,53	191,35	191,35	0,191	0,004	193,00	119,05	0,86	1650	2,2	1,65	73,95
B6-P6	189,22	189,08	189,07	0,189	0,008	190,74	117,58	0,88	1669	2,3	1,67	73,16
B6-P9	188,50	188,37	188,36	0,188	0,007	189,92	117,10	0,83	1561	2,1	1,56	72,82
<b>Media B6</b>	<b>184,73</b>	<b>184,54</b>	<b>184,54</b>	<b>0,185</b>	<b>0,007</b>	<b>186,11</b>	<b>114,76</b>	<b>0,85</b>	<b>2587</b>	<b>2,2</b>	<b>1,57</b>	<b>71,34</b>

TABLA 4-10. Resultados de los ensayos de las propiedades físicas.

En primer lugar, tras secar las muestras y poder empezar el ensayo, se han realizado varias pesadas (md1, md2 y md3) para comprobar que la diferencia entre las medidas (transcurridas 24 h), no superan el 0,1 % de la masa de la muestra en cada caso. En la Tabla 4-10, se representa dicho límite y la diferencia entre las pesadas md2 y md3, cumpliéndose ampliamente la norma en todos los casos.

Analizando los bloques, se observa como las muestras del bloque 1 presentan un índice de vacíos (Iv) entre 1,41 y 2,37 %, una porosidad abierta ( $\rho_o$ ) entre 3,8 y 6,2 % y un volumen de poros abiertos (Vo) que varía de 2,67 a 3,19 mm<sup>3</sup>, siendo los valores más altos comparándolos con el resto de los ejemplares.

Además, presentan las densidades aparentes más altas: 2700 kg/cm<sup>3</sup> y 2706 kg/m<sup>3</sup>, concordando con los valores del volumen aparente (Vb).

Las muestras de los bloques 2, 4, 5 y 6, tienen unas características similares, razón por la que se han analizado conjuntamente. Los parámetros correspondientes a la porosidad y vacíos, disminuyen considerablemente respecto al caso anterior:  $I_v = 0,32 - 0,97 \%$ ,  $\rho_o = 0,8 - 2,5 \%$  y  $V_o = 0,57 - 1,97 \text{ mm}^3$ . Los valores de la densidad aparente son similares a los del bloque 1, salvo en los ejemplares del bloque 6.

Por último, se ha determinado en 10 muestras la densidad real de los granos minerales ( $\rho_r$ ), resumidas en la Tabla 4-11:

Muestra	Picnómetro + tapón (g)	me (g)	Picnómetro + me (g)	m1 (g)	m2 (g)	$\rho_r$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Medias $\rho_r$ (Kg/m <sup>3</sup> )
B1-P3	35,421	10,103	45,524	91,737	85,560	2573	2551
B1-P9	34,437	11,028	45,465	91,311	84,528	2598	
B1-P12	34,496	10,310	44,806	90,598	84,442	2482	
B4-P5	31,637	12,083	43,72	89,765	82,599	2457	2543
B4-P7	31,013	10,444	41,457	89,490	83,073	2594	
B5-P2	31,526	15,739	47,265	92,818	83,347	2511	
B5-P10	36,717	11,588	48,305	93,214	86,062	2612	
B6-P7	31,962	10,86	42,823	90,187	84,042	2303	2300
B6-P12	31,170	10,265	41,435	88,203	82,510	2245	
EB6-P2	29,404	11,689	41,088	86,508	79,787	2353	

TABLA 4-11. Determinación de la densidad de los granos minerales.

Como se puede observar en la Tabla 4-11, la densidad de los granos minerales ( $\rho_r$ ) varía entre 2200 y 2600 kg/cm<sup>3</sup>, presentando las muestras de los bloques 1, 4 y 5 los valores más altos, en torno a los 2600 kg/m<sup>3</sup> en la mayoría de los casos. En cambio, los ejemplares del bloque 6, presentan una densidad considerablemente más baja, alrededor de 2300 kg/cm<sup>3</sup>.

#### *Velocidad de propagación de las ondas sísmicas*

Las medidas de la velocidad sísmica de las ondas P y S, han permitido establecer una relación con la alteración que presenta la roca, en función del ratio VP/VS. Todos los datos aparecen resumidos en la siguiente tabla:

Nº	Bloque	Testigo	VELOCIDAD P 54 kHz (m/s)	VELOCIDAD P 500 kHz (m/s)	VELOCIDAD S 100 KhZ (m/s)	VP/VS
1	1	B1 - P1	3083,0	2978,7	1414,2	2,1
2		B1 - P2	3408,0	3259,0	1629,5	2,0
3		B1 - P4	3160,4	3300,9	1755,8	1,9
4		B1 - P5	3017,7	3394,9	1713,3	2,0
5		B1 - P6	3524,3	3462,8	1731,4	2,0
6		B1 - P7	4116,5	3597,3	2158,4	1,7
7		B1 - P8	4084,2	4235,4	2175,3	1,9
8		B1 - P10	3376,8	3283,4	1785,7	1,8
9	2	B2 - P4	3799,5	3664,5	2110,8	1,7
10		B2 - P5	3690,1	3537,6	2103,4	1,7
11		B2 - P6	4070,7	3942,3	2411,0	1,6
12		B2 - P7	3990,0	3879,7	2454,5	1,6
13		B2 - P8	4070,1	3863,5	2285,6	1,7
14		B2 - P10	3907,8	3786,2	2218,5	1,7
15		B2 - P11	3687,7	3522,8	2182,9	1,6
16		B2 - P12	3930,4	3746,7	2208,8	1,7
17		B2 - P13	3806,5	3678,6	2233,4	1,6
18		B2 - P14	3992,9	3761,2	2188,3	1,7
19		B2 - P16	3833,5	3651,0	2184,3	1,7
20	B2 - P18	3997,6	3833,3	2238,7	1,7	
21	B2 - P19	3870,2	3701,9	2240,6	1,7	
22	4	B4 - P3	4390,2	4161,8	2360,7	1,8
23		B4 - P6	4300,5	4125,0	2392,0	1,7
24	5	B5 - P3	4383,8	4096,0	2591,1	1,6
25		B5 - P4	4220,1	4196,0	2480,7	1,7
26		B5 - P6	4282,5	3879,4	2258,6	1,7
27		B5 - P9	4150,3	3872,1	2295,0	1,7
28	6	B6 - P1	3211,0	3301,6	1926,6	1,7
29		B6 - P2	3126,1	3030,3	1847,9	1,6
30		B6 - P3	3133,3	3071,7	1781,3	1,7
31		B6 - P4	2848,2	2528,4	1691,5	1,5
32		B6 - P5	3443,5	3314,9	1906,7	1,7
33		B6 - P6	3232,2	3093,4	1808,0	1,7
34		B6 - P8	3138,2	3052,3	1728,8	1,8
35		B6 - P9	3194,4	3094,5	1796,4	1,7
36		B6 - P10	3202,8	3228,3	1943,2	1,7
37		B6 - P11	3030,8	2956,0	1764,9	1,7

TABLA 4-12. Velocidad de las ondas P y S y ratio  $V_p/V_s$ .

Analizando el ratio VP/VS de las muestras de los distintos bloques (Tabla 4-12), puede observarse como los ejemplares del bloque 1 presentan valores entre 1,9 y 2,1, superiores al del resto, en la mayoría de los casos es de 1,7. Estos resultados permiten afirmar que las probetas del bloque 1, presentan un grado de alteración mayor.

En función de las velocidades de las ondas P y S, se ha podido establecer según los gráficos de la Figura 4-14, a que material geológico pertenecen las muestras. Para poder llevar a cabo esta estimación, se han resumido en la Tabla 4-13, las características de las velocidades de las ondas P y S de la Tabla 4-12.

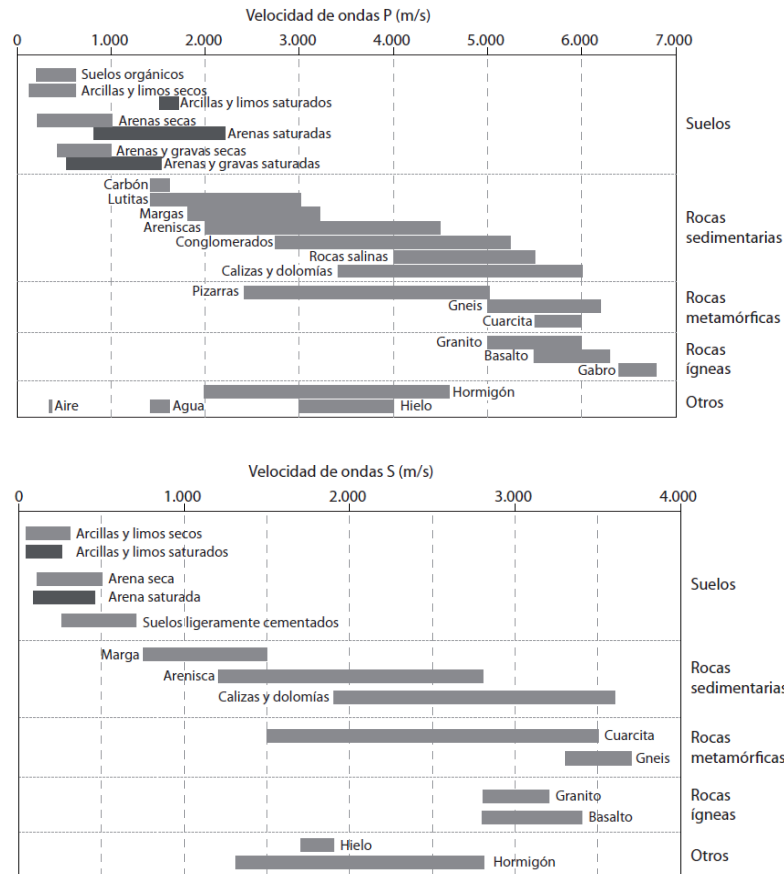


FIGURA 4-14. Rangos de velocidad de ondas P y S típicas en materiales geológicos. Figuras elaboradas Olona (2014). Basadas en Bodare (1997, Hall (2000), Mc-Dowell et al. (2002) y Santamarina et al. (2001).

Velocidad de las ondas P - 54 kHz (m/s)					
BLOQUE	1	2	4	5	6
PROMEDIO	<b>3473,4</b>	<b>3894,5</b>	<b>4345,4</b>	<b>4258,0</b>	<b>3175,8</b>
MAX	4133,0	4070,7	4390,2	4383,8	3443,5
MIN	3017,7	3687,7	4300,5	4145,5	3030,8
DESV.EST	428,0	127,5	63,4	100,8	115,8
Velocidad de las ondas P- 500 kHz (m/s)					
BLOQUE	1	2	4	5	6
PROMEDIO	<b>3439,1</b>	<b>3736,1</b>	<b>4143,4</b>	<b>4010,9</b>	<b>3067,1</b>
MAX	4235,4	3942,3	4161,8	4196,0	3314,9
MIN	2978,7	3942,3	4161,8	4196,0	3314,9
DESV.EST	368,3	127,1	26,1	161,3	223,1
Velocidad de las ondas S -100 kHz (m/s)					
BLOQUE	1	2	4	5	6
PROMEDIO	<b>1795,4</b>	<b>2235,5</b>	<b>2376,3</b>	<b>2406,3</b>	<b>1819,5</b>
MAX	2175,3	2454,5	2392,0	2591,1	1943,2
MIN	1414,2	2103,4	2360,7	2258,6	1691,5
DESV.EST	256,7	101,2	22,2	156,9	84,9

TABLA 4-13. Promedios y características de las velocidades de las ondas P (54 y 500 kHz) y S (100 kHz).

Analizando las velocidades de las ondas S de las Tablas 4-12 y 4-13, en todos los casos salvo en la muestra B1-P1, se encuentran en el rango perteneciente a las cuarzoarenitas según la Figura 4-14 (1500 – 3500 m/s). En cambio, las velocidades de las ondas P, son menores de las esperadas en una cuarcita metamórfica (5500 – 6000 m/s). Mencionar, que las variaciones entre las velocidades de las ondas P obtenidas con distintos traductores (54 y 500 kHz) son bajas, siendo la mayor diferencia de 300 m/s.

Además, a partir del ensayo de propagación de ondas, se ha podido determinar las constantes elásticas de los materiales (Poisson, Young, Cizalla y Comprensibilidad), resumidas en la siguiente Tabla 4-14:

Nº	Bloque	Testigo	Poisson	Young (GPa)	Cizalla (GPa)	Comprensibilidad (GPa)
1	1	B1 - P1	0,354	14,14	5,22	16,20
2		B1 - P2	0,333	18,51	6,93	18,48
3		B1 - P4	0,303	20,96	8,05	17,71
4		B1 - P5	0,329	20,36	7,67	19,87
5		B1 - P6	0,333	20,86	7,82	20,86
6		B1 - P7	0,219	29,64	12,16	17,56
7		B1 - P8	0,321	32,63	12,35	30,35
8		B1 - P10	0,290	21,47	8,32	17,04
9	2	B2 - P4	0,252	29,11	11,63	19,54
10		B2 - P5	0,227	28,33	11,55	17,26
11		B2 - P6	0,201	36,45	15,17	20,34
12		B2 - P7	0,166	36,68	15,72	18,32
13		B2 - P8	0,231	33,56	13,63	20,78
14		B2 - P10	0,239	31,82	12,84	20,29
15		B2 - P11	0,188	29,56	12,43	15,81
16		B2 - P12	0,234	31,42	12,73	19,66
17		B2 - P13	0,208	31,45	13,02	17,96
18		B2 - P14	0,244	31,10	12,50	20,26
19		B2 - P16	0,221	30,42	12,45	18,17
20		B2 - P18	0,241	32,47	13,08	20,91
21		B2 - P19	0,211	31,74	13,10	18,30
22	4	B4 - P3	0,263	36,74	14,55	25,82
23		B4 - P6	0,247	37,24	14,93	24,50
24	5	B5 - P3	0,166	40,88	17,52	20,42
25		B5 - P4	0,231	39,56	16,06	24,54
26		B5 - P6	0,244	33,12	13,31	21,53
27		B5 - P9	0,229	33,80	13,75	20,80
28	6	B6 - P1	0,242	24,06	9,69	15,53
29		B6 - P2	0,204	21,46	8,91	12,08
30		B6 - P3	0,247	20,65	8,28	13,58
31		B6 - P4	0,095	16,35	7,47	6,73
32		B6 - P5	0,253	23,77	9,49	16,03
33		B6 - P6	0,241	21,12	8,53	13,60
34		B6 - P8	0,264	19,72	7,80	13,92
35		B6 - P9	0,246	20,99	8,42	13,76
36		B6 - P10	0,216	23,97	9,86	14,06
37		B6 - P11	0,223	19,89	8,13	11,97

TABLA 4-14. Constantes elásticas de los materiales.

En función de las constantes elásticas de la Tabla 4-14, se ha podido establecer una relación con la alteración de los materiales. En función de estos parámetros, cuyos valores medios aparecen resumidos en la Tabla 4-15, se puede afirmar que los bloques 1 y 6, presentan un grado de alteración II – III (ISRM) y los bloques 2, 4 y 5 un grado de alteración I – II (ISRM).

Bloque	Poisson	Young (GPa)	Cizalla (GPa)	Comprensibilidad (GPa)
1 (G.A. II – III)	0,30	20,7	8,5	19,7
6 (G.A. II – III)	0,22	21,2	8,6	13,1
2 (G.A. I – II)	0,22	31,8	13,0	19,0
4 (G.A. I – II)	0,26	36,9	14,7	25,1
5 (G.A. I – II)	0,22	36,8	15,1	21,8

TABLA 4-15. Resumen de las constantes elásticas.

En la Tabla 4-15, asimismo se puede observar como las muestras de los bloques 1 y 6 presentan los valores más bajos para los módulos de deformación (Young, cizalla y comprensibilidad), con una diferencia considerable.

#### *Resistencia a la compresión simple*

Para determinar la resistencia a la compresión simple han sido empleadas las 10 probetas que aparecen representadas en la Tabla 4-16, en las que se han colocado bandas extensiométricas para determinar la deformación de las muestras al aplicarles el esfuerzo y así obtener la deformación generada en los ejemplares.

Descripción de las muestras		Ensayo compresión simple		
Testigo	Longitud (mm)	Carga (KN)	Resistencia (MPa)	
B1 - P4	74,27	76	79	88,5
B1 - P7	79,86	94	98	
B2 - P5	85,61	102	106	159,5
B2 - P7	84,19	192	213	
B4 - P6	80,85	111	115	115,0
B5 - P3	81,10	121	130	143,5
B5 - P4	73,43	151	157	
B6 - P2	79,09	75	78	162,0
B6 - P4	72,06	202	210	
B6 - P5	79,89	190	198	

TABLA 4-16. Resultados del ensayo de compresión simple y los módulos de deformación de terminados en los dos ensayos.

Analizando los resultados de la Tabla 4-16, las muestras han podido separarse en dos grupos en función de la resistencia a la compresión, las muestras del bloque 1 que presentan valores inferiores a 100 MPa y, el resto de ejemplares que en la mayoría de los casos muestran resistencias entre 106 y 213 MPa. Además, en la Figura 4-15 se representa la deformación producida (mm) frente al esfuerzo (MPa).

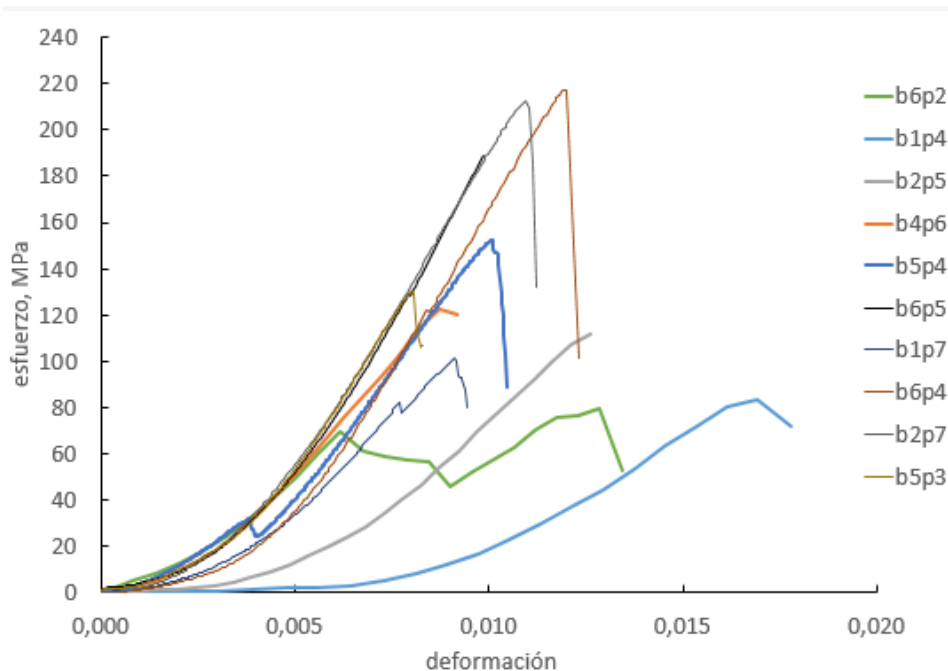


FIGURA 4-15. Esfuerzo/Deformación en las muestras de RCS.

En la Figura 4-15, se observa como en la mayoría de las muestras se produce una deformación entre 0,008 y 0,012 mm, variando principalmente los valores de esfuerzo que aguantan las probetas, entre 120 y 220 MPa. En cambio, hay tres casos en los que la deformación aumenta rápidamente con esfuerzos bajos (B1-P4, B2-P6 y B2-P5).

#### Ensayo tracción indirecta o ensayo brasileño

En la Tabla 4-17, se muestran la resistencia a la tracción de las 35 muestras ensayadas, determinada a partir de la carga que soporta en la rotura, el espesor y diámetro de cada probeta. Mencionar que se muestra la carga en toneladas (t) y newtons (N); la velocidad en la que se aplicó la carga fue 10 de kg/s.

Nº	Probeta	Carga en la rotura (t)	Carga en la rotura (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	
1	B1-P11	1,3883	13615,06	20,55	20,55
2	B2-P1-I	1,4514	14233,88	21,49	25,00
3	B2-P1-II	1,556	15259,69	23,03	
4	B2-P1-III	1,6457	16139,38	24,36	
5	B2-P2-I	1,5186	14892,91	22,48	
6	B2-P2-II	1,3269	13012,91	19,64	
7	B2-P2-III	2,1503	21087,99	31,83	
8	B2-P3-I	1,4267	13991,65	21,12	



Nº	Probeta	Carga en la rotura (t)	Carga en la rotura (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	
9	B2-P3-II	1,5225	14931,16	22,54	25,00
10	B2-P3-III	2,7268	26741,73	40,36	
11	B2-P9-I	1,4388	14110,31	21,30	
12	B2-P9-II	1,4903	14615,37	22,06	
13	B2-P9-III	2,2859	22417,82	33,84	
14	B2-P21-I	2,1205	20795,74	31,39	
15	B2-P22-I	2,2093	21666,61	32,70	
16	B2-P22-II	1,2822	12574,54	18,98	
17	B2-P23-I	1,7599	17259,34	26,05	
18	B2-P24-I	1,3457	13197,28	19,92	
19	B2-P24-II	1,1734	11507,53	17,37	
20	B2-P24-III	1,6562	16242,35	24,52	
21	B3-P1-I	1,3051	12799,12	19,32	22,29
22	B3-P1-II	1,3938	13669,00	20,63	
23	B3-P2-I	1,5292	14996,86	22,64	
24	B3-P2-II	1,8015	17667,31	26,67	
25	B3-P3-I	1,1641	11416,33	17,23	
26	B3-P3-II	1,4484	14204,46	21,44	
27	B3-P5-I	1,6127	15815,75	23,87	
28	B3-P6-I	1,7933	17586,89	26,55	
29	B4-P1-I	3,1320	30715,52	46,36	42,78
30	B4-P1-II	3,0656	30064,34	45,38	
31	B4-P2-II	2,8391	27843,05	42,03	
32	B4-P2-III	2,5215	24728,35	37,33	
33	B5-P11-I	2,1154	20745,73	31,31	28,52
34	B5-P11-II	1,7374	17038,68	25,72	
35	B6-P12	1,5158	14865,45	22,44	22,44

TABLA 4-17. Resistencia a la tracción indirecta “brasileño” de las muestras.

A partir de los resultados de la Tabla 4-17, se ha obtenido la media de la resistencia a la tracción para cada uno de los bloques, situándose entre los 20 y 28 MPa en todos los casos, salvo en el bloque 4, cuya resistencia a la tracción aumenta hasta los 42 MPa.

A continuación, se ha analizado los distintos tipos de rotura que se producen en las probetas al realizar el ensayo brasileño o de tracción indirecta (Tavalli y Vervoort, 2010). Se han estudiado en función del bloque al que pertenecen (Figuras 4-16, 4-17 y 4-18).



FIGURA 4-16. Tipo de rotura del ensayo brasileño. Muestra del bloque 1 (izquierda); muestras bloque 2 (derecha).

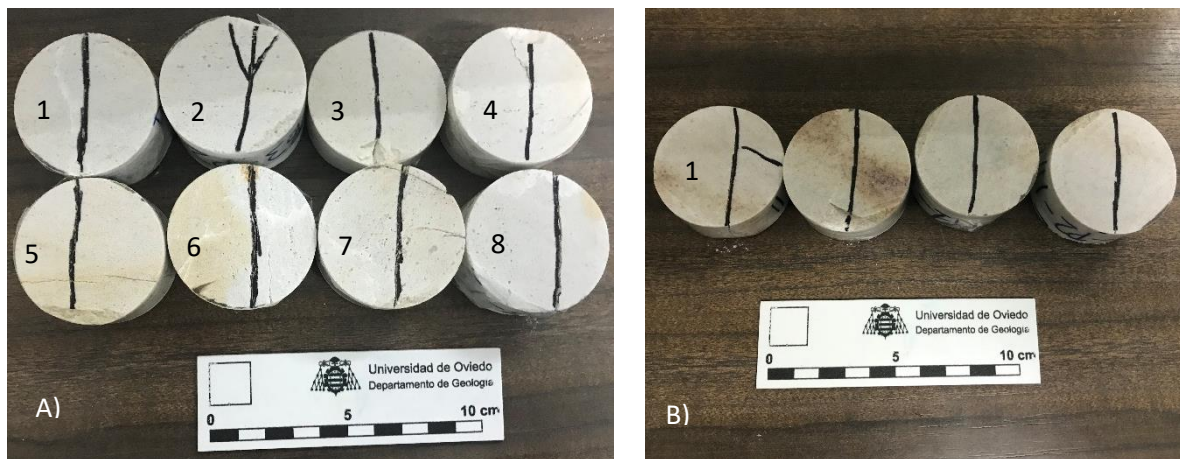


FIGURA 4-17. Tipo de rotura del ensayo brasileño. A: muestras bloque 3; B) muestras bloque 4.

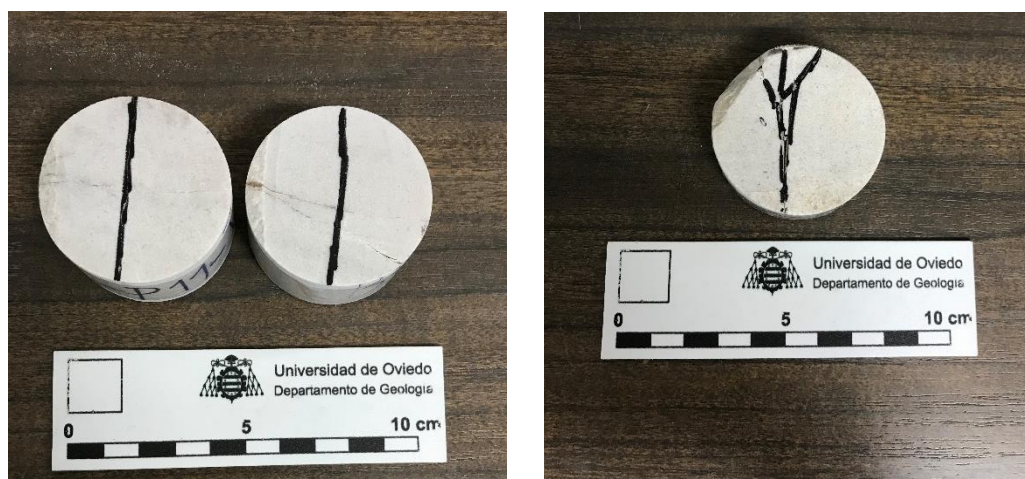


FIGURA 4-18. Tipo de rotura del ensayo brasileño. Muestras bloque 5 (izquierda); muestras bloque 6 (derecha).

En primer lugar, las muestras de los bloques 1 y 2 (Figura 4-16) presentan únicamente fracturación central, salvo en 3 muestras del bloque 2, que además presentan una activación lateral. Las muestras del bloque 3 (Figura 4-17A), presenta una variabilidad de roturas, predominando la fracturación central (muestras: 1, 3, 4 y 7) y diametral (muestras: 5, 6 y 8), además hay una rotura diametral múltiple en la muestra 2. En el bloque 4 (Figura 4-17B), la fracturación es central y, además, en la muestra 1 tiene una rotura lateral. En el bloque 5 (Figura 4-18), únicamente aparece la fracturación central y, por último, la probeta del bloque 6 presenta una rotura diametral múltiple.

### *Ensayo de carga puntual*

En el ensayo de carga puntual se han utilizado 32 muestras, para llevar a cabo los siguientes tipos de ensayos: axial, diametral y bloques irregulares. En la Tabla 4-19, se muestran los resultados finales de  $I_s$  (50) de cada uno y la correlación con la resistencia a la comprensión (Bieniawski, 1975) y tracción indirecta (ISRM, 1985).

Nº	Muestra	Ensayo	$I_s$ 50 (MPa)	RCS (Mpa)	Tracción indirecta (Mpa)	
1	B2-P6	Axial	0,12	0,17	28,56	0,15
2	B2-P7		0,21		38,08	0,26
3	B2-P10		0,10		28,56	0,12
4	B2-P11		0,11		26,18	0,14
5	B2-P12		0,19		42,84	0,23
6	B4-P9-II		0,23		35,7	0,29
7	EB4-P6		0,16		33,32	0,19
8	B5-P5-II		0,28		35,7	0,35
9	EB6-P1		0,11		45,22	0,14
10	EB6-P3		0,16		30,94	0,20
11	EB6-P5		0,16		28,56	0,20
12	EB6-P9		0,12		33,32	0,15
13	B2-P4	Diametral	0,24	0,36	64,26	0,30
14	B2-P15-I		0,15		54,74	0,18
15	B2-P15-II		0,17		59,5	0,22
16	B4-P4		0,44		66,64	0,55
17	B4-P8		0,47		66,64	0,59
18	B4-P9		0,57		64,26	0,72
19	B5-P5		0,23		59,5	0,29
20	B5-P7-I		0,57		41,65	0,71
21	B5-P7-II		0,50		49,98	0,62
22	B5-P8		0,25		71,4	0,31
23	EB1-P11-I	Bloques	0,32	0,32	121,38	0,40
24	EB1-P11-II		0,29		121,38	0,36
25	EB2-P1		0,34		138,04	0,42
26	EB2-P2		0,33		130,90	0,41
27	EB2-P3		0,22		126,14	0,27
28	EB3-P5-I		0,27		130,90	0,33

Nº	Muestra	Ensayo	IS 50 (Mpa)	RCS (Mpa)	Tracción indirecta (Mpa)
29	EB3-P5-II	Bloques	0,27	0,32	130,90
30	EB4-P1		0,41		123,76
31	EB4-P2-I		0,38		128,52
32	EB4-P2-II		0,38		130,90

TABLA 4-19. Resultados de la carga puntual y correlacione con la RCS y la resistencia a la tracción.

Los valores de la resistencia a la carga puntual en el ensayo diametral, son ligeramente superiores al axial y bloques. El principal motivo de los resultados tan dispares y que la RCS en los ensayos axial y diametral sean más bajos, es por las dimensiones de las probetas (Tabla II-3 del Anexo II). Además, podemos observar, que los resultados del ensayo axial son los resultados más bajos, con una media de 0,17 MPa, al igual que las muestras del bloque 2 del ensayo diametral. En la Figura 4-19, puede observarse la rotura producida en las muestras del ensayo axial.



FIGURA 4-19. Tipos de rotura en el ensayo axial.

En la Figura 4-19, puede observarse como en las probetas 2, 3 y 7, se produce una fractura triple a partir del punto donde se aplicó la carga, y en el resto de las muestras se rompen en dos partes dando lugar a una fractura vertical.

En el caso del ensayo diametral (Figura 4-20), se producen dos tipos de roturas: fracturas triples (Figura 4-20C) y verticales (Figura 4-20A y 4-20B) según la dirección respecto a la estratificación (paralela y perpendicular).



FIGURA 4-20. Tipos de rotura en el ensayo diametral. A: punto triple; B y C: verticales.

Por último, en la Figura 4-21, se representa la rotura de los bloques regulares, en la imagen de la parte superior, se observa que los bloques se han roto dando lugar al punto triple. En cambio, en la imagen inferior, la rotura se ha producido dando lugar a una única fractura oblicua.



FIGURA 4-21. Tipos de rotura en el ensayo llevado a cabo en bloques.

### 4.3. Análisis e interpretación de los datos

A continuación, se establece la comparación entre los resultados de campo y laboratorio obtenidos en el presente trabajo, con los recogidos en el Anexo III (datos de Obras Públicas).

#### *Análisis e interpretación de los resultados obtenidos en campo*

En primer lugar, se ha analizado el RQD y RMR (Tablas 4-4 y 4-3) de los macizos rocosos de las estaciones geomecánicas llevadas a cabo, obteniéndose valores entre 56 y 86, que permiten clasificarlos como medios, buenos y muy buenos (Bieniawski 1989). En cambio, en las obras de la autovía A-8 (Oueuras – Otur), en los túneles de Miravetes - Cáceres y de Fabar – Fabares – Llovio (autovía A-8 oriental del Cantábrico), los valores son ligeramente inferiores (34 – 50), clasificando los macizos como malos y muy malos; el resto, se consideran como medios y buenos (50 – 70).

Lo mismo ocurre con el RQD, los afloramientos estudiados, son de mayor calidad geotécnica, predominando los macizos rocosos de calidad buena y muy buena ( $RQD > 75\%$ ), en cambio, en las obras recogidas en el Anexo II, destacan los de calidad muy mala ( $RQD < 25\%$ ).

Para concluir, se han analizado y comparado los datos de resistencia del macizo rocoso, obtenidos mediante el martillo Schmidt. En la Tabla 4-1, se observan los valores del rebote (R), que varían de 46 a 68, mostrando una resistencia a la compresión entre 95 y 250 MPa, con una media de 190 MPa. En el límite municipal de Santo Adriano y en la Obra lineal de Navia – Santiago, los valores de rebote (R) se encuentran en torno a 56, con una resistencia de 140 MPa.

En conclusión, la calidad de macizo rocoso es mayor en los afloramientos estudiados, que los pertenecientes a las Obras Públicas del Anexo III, dicha afirmación puede observarse analizando los valores medios de los parámetros determinados en campo en ambos casos (Tablas 4-20 y 4-21).

Parámetros /Ensayos		Resultados	Media
RQD		30 – 97,5 %	72 % (predominio)
RMR		56 – 86	72
Martillo Schmidt	Rebote (R)	46 – 68	58
	$\sigma_{ci}$	95 – 250 MPa	190 MPa

TABLA 4-20. Resumen de los resultados de campo del presente trabajo.

Parámetros /Ensayos		Resultados	Media
RQD		12 – 80 %	< 25 % (predominio)
RMR		34 - 72	54
Martillo Schmidt	Rebote (R)	47 – 64	56
	$\sigma_{ci}$	95 – 225 Mpa	140 MPa

TABLA 4-21. Resumen de los resultados de campo de las obras públicas (Anexo III).

### *Análisis e interpretación de los resultados de laboratorio*

En cuanto a los ensayos de laboratorio, se han analizado las densidades reales ( $\rho_r$ ) y aparentes ( $\rho_a$ ), que varían entre 2200 y 2600 kg/m<sup>3</sup> (Tabla 4-10) y entre 1400 – 2600 kg/m<sup>3</sup> (Tabla 4-9), respectivamente. En el Anexo III, las densidades reales y aparentes muestran valores superiores, entre 2200 y 3000 kg/m<sup>3</sup>, predominando valores más altos en ambos casos.

En cuanto a los ensayos de mecánica de rocas, se ha analizado la resistencia a la compresión simple (RCS), a la carga puntual y a la tracción indirecta. En el primer ensayo, se han obtenido valores entre 78 y 213 MPa, en cambio, en el Anexo III, los valores son muy dispares variando desde 2 a 441 MPa, pero con un promedio de 105 MPa, parecido al primer caso.

Los resultados de la resistencia a la tracción indirecta son muy similares, situándose las medias de los bloques en torno a los 17 y 46 MPa y, entre 5 y 80 MPa en los proyectos públicos. La gran diferencia se encuentra en el ensayo de resistencia a la carga puntual, donde los valores obtenidos en las Obras Públicas son muy superiores. La causa puede deberse al tamaño de las muestras ensayadas.

El Módulo de Young, es el último parámetro con el que se ha podido establecer una comparación, variando las medias de cada bloque entre 20 y 36 GPa, en el presente informe y entre 9 y 76 GPa en el resto de los trabajos, siendo ligeramente superior en el segundo caso.

En resumen, puede decirse que las muestras ensayadas en el presente trabajo presentan una densidad y resistencia a los ensayos mecánicos inferior a las estudiadas en las Obras Públicas, llevadas a cabo en el resto de los afloramientos de la Zona Cantábrica y Península Ibérica. La causa puede deberse a que las muestras de las obras, hayan sido tomadas de los sondeos, por lo que el tamaño de los ejemplares es mayor obteniéndose unas resistencias más altas. En las Tablas 4-22 y 4-23, pueden observarse los valores medios de todos resultados de los ensayos de laboratorio.

Parámetros /Ensayos	Resultados	Media
Densidad real ( $\rho_r$ )	2200 – 2600 kg/m <sup>3</sup>	2472 kg/m <sup>3</sup>
Densidad aparente ( $\rho_a$ )	1400 – 2600 kg/m <sup>3</sup>	2383 kg/m <sup>3</sup>
Resistencia a la compresión (RCS)	78 - 213 MPa	138 MPa
Resistencia carga puntual	26 – 138 MPa	71 MPa
Resistencia tracción Indirecta	17 – 46 MPa	24 MPa
Módulo de Young	14 – 40 GPa	27 GPa

TABLA 4-22. Resumen de los resultados de laboratorio del presente informe.

Parámetros /Ensayos	Resultados	Media
Densidad real ( $\rho_r$ )	2200 – 2720 kg/m <sup>3</sup>	2591 kg/m <sup>3</sup>
Densidad aparente ( $\gamma$ )	2600 – 3000 kg/m <sup>3</sup>	2686 kg/m <sup>3</sup>
Resistencia a la compresión (RCS)	2 - 441 MPa	105 MPa
Resistencia carga puntual	41 – 360 MPa	244 MPa
Resistencia tracción Indirecta	4 – 80 MPa	20 MPa
Módulo de Young	9 – 76 GPa	36 GPa

TABLA 4-23. Resumen de los resultados de laboratorio de las obras públicas (Anexo III).



## 5. CONCLUSIONES

El presente trabajo, supone un estudio en profundidad de las características geológica-geotécnicas de las cuarzoarenitas presentes en la Formación Barrios en la Zona Cantábrica, debido a que ha sido estudiada por diversos autores, pero nunca desde un punto de vista geotécnico. A continuación, se exponen las conclusiones extraídas durante el desarrollo del trabajo:

- Las cuarzoarenitas de la Formación Barrios en la Zona Cantábrica, son rocas siliclásticas de edad Cámbrica – Ordovícica, que aparecen a lo largo de prácticamente todas las Unidades de la Zona Cantábrica. Presentan una tonalidad blanquecina y un espesor de 80 a 1020 m, disminuyendo progresivamente hacia el este. Mencionar que esta Formación, también aflora en varias Zonas del Macizo Ibérico.
- A lo largo de los años, las cuarzoarenitas han tenido un uso como roca industrial en Asturias durante varios años, siendo explotadas en numerosos puntos como árido para hormigón, balasto, bloques de escollera o como estéril de carbón. El caolín y cuarzo, han sido los materiales fundamentalmente trabajados.
- En primer lugar, se llevó a cabo un estudio bibliográfico, basado fundamentalmente en la búsqueda de los informes geotécnicos pertenecientes a las obras públicas repartidas por el Macizo Ibérico, para recopilar los parámetros geotécnicos y, así establecer una comparación con los resultados obtenidos en los ensayos del presente informe.
- El trabajo de campo, se ha basado en la caracterización de ocho macizos rocosos en distintos emplazamientos geográficos de la Zona Cantábrica. Atendiendo a la clasificación de la ISRM, los diversos afloramientos varían entre el grado de alteración II y III.
- Los materiales se han clasificado de duros a extremadamente duros, variando su resistencia determinada mediante el martillo Schmidt “in situ” entre 95 y 250 MPa.
- Analizando la disposición de las discontinuidades presentes en los macizos rocosos, se han distinguido dos familias de discontinuidades, la principal D1, subhorizontal con dirección E y la familia D2 con dirección SO y buzamiento en torno a 56. En cuanto a la estratificación, presenta varias direcciones (E, SO y NO), en todos los casos con buzamiento alto.
- Las características de las discontinuidades (continuidad, apertura, rugosidad, densidad de fracturación) son muy heterogéneas obteniéndose resultados muy dispares. La mayoría de los afloramientos (EG1, EG3, EG5, EG6 y EG8), se han clasificado según el RMR, como bueno - muy bueno (65 – 86) y en función de la Q de Barton como roca buena (10,5 – 29). En cuanto al índice de calidad (RQD), son macizos rocosos buenos o muy buenos (75 – 97,5 %).

- Para llevar a cabo los ensayos de laboratorio, se han utilizado las muestras pertenecientes a los bloques 1, 2 y 3, recogidos en “El Cogollo” (Las Regueras), y 4, 5, y 6, obtenidos en el Parque Natural de Ponga. Presentan superficialmente distintos grados de alteración. A partir de estos bloques se han extraído y preparado numerosas probetas utilizadas en los distintos ensayos (Anexos I y II).
- En primer lugar, se ha llevado a cabo el estudio petrográfico en 4 láminas delgadas, confirmando que se tratan de rocas siliciclásticas con un porcentaje mayor del 95 % en cuarzo, denominada cuarzoarenita según [Pettijohn, Potter y Siever \(1972\)](#). Con los ensayos de difracción y fluorescencia de rayos X, se ha confirmado que el único mineral principal presente es el cuarzo, apareciendo en ocasiones con caolinita y goetita como accesorios.
- Una vez clasificada la roca, se ha determinado sus propiedades físicas elementales, obteniéndose un contenido en humedad muy bajo (< 0,3 %). En función del resto de propiedades, las muestras del bloque 1, presentan un (Iv) entre 1,41 y 2,37 %, una porosidad abierta entre 3,8 y 6,2 % y un volumen de poros entre 2,67 y 3,19 mm<sup>3</sup>. En el resto de los bloques los valores son inferiores, salvo en la densidad aparente que son similares, excepto en el bloque 6 (muy bajos). Esto nos indica que las muestras del bloque 1 y 6, presentan un mayor grado de alteración.
- En cuanto a la densidad de los granos minerales, los bloques 1, 4 y 5, presentan valores entorno a los 2550 kg/m<sup>3</sup>, mientras que en los ejemplares del bloque 6 es ligeramente menor (2300 kg/m<sup>3</sup>), concordando con los resultados anteriores.
- A partir de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas, se ha determinado el ratio VP/VS, el bloque 1 presenta valores entre 1,9 y 2,1 y el resto de muestras resultados en torno a 1,7, indicando que tiene un grado de alteración mayor.
- Las velocidades de las ondas S, determinadas mediante el transductor de 100 kHz, varían entre 1500 y 3500 m/s, siendo valores normales para unas cuarcitas (Figura 4-14). En cambio, analizando las medidas de las ondas P, para ambos transductores, las velocidades son de 3000 - 4000 m/s, esto indica que no son cuarcitas puramente metamórficas, concordando con la clasificación de cuarzoarenitas.
- Además, a partir de este ensayo se ha podido determinar las constantes elásticas de los materiales, (Tabla 4-14). Ha permitido conocer el grado de alteración de las muestras, de nuevo, los bloques 1 y 6 presentan un grado de alteración mayor (II – III) que el resto (I – II).
- En cuanto a los ensayos de mecánica de rocas, la resistencia a la compresión simple varía de 78 a 213 MPa, siendo los ejemplares del bloque 1 los que presentan los valores más bajos.

- Los resultados del ensayo brasileño han sido muy homogéneos variando de 20 a 28 MPa, salvo en el bloque 4, donde la resistencia a la tracción ha sido mayor (42 MPa). Ha predominado la fractura central y diametral (Tavalli y Vervoort, 2010).
- El último ensayo de mecánica de rocas determinado, ha sido la resistencia a la carga puntual, en el cual se han obtenido valores muy bajos, entre 0,10 y 0,57 MPa ( $I_s50$ ). Correlacionándolo, se obtendrían unos valores de RCS de 130 MPa. Estos resultados tan bajos podrían deberse al pequeño tamaño de las muestras.
- Por último, se ha establecido una comparación de los resultados obtenidos en el presente trabajo con los del Anexo III. Datos de Obras públicas. En general, los resultados de las propiedades físicas y clasificación de macizos rocosos de las cuarzoarenitas estudiadas, presentan mejores características geotécnicas. En cambio, en cuanto a los ensayos de mecánica de rocas, tienen una menor resistencia que los recopilados bibliográficamente.
- Se puede concluir que las cuarzoarenitas presentes en la Formación Barrios en la Zona Cantábrica muestran unas propiedades geotécnicas buenas, los macizos rocosos estudiados han sido clasificados como buenos o muy buenos, en función de sus parámetros y características geotécnicas. Además, analizando los resultados de los ensayos de laboratorio, se ha llegado a la misma conclusión, las muestras presentan un grado de alteración bajo y una resistencia a las cargas y esfuerzos alta.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Adaro, L y Junquera, G (1916). Criaderos de hierro de España. Tomo II, Hierros de Asturias. *Memoria Instituto Geológico de España*, 676 pp.

Aramburu, C. (1989). *El Cámbrico-Ordovícico de la Zona Cantábrica (NO de España)*. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo.

Aramburu, C., Arbizu, M., Bernárdez, E., Gonzalo, R., Gutiérrez-Marco, J.C. y Liñán, E. (2006). Paleontología y Estratigrafía del Paleozoico Inferior en Los Barrios de Luna. *XXII Jornadas de la Sociedad Española de Paleontología. Guía de campo de la Excursión B. Universidad de León*, 75 pp.

Aramburu, C. & García-Ramos, J.C. 1988. Presencia de la discontinuidad sárdica en la Zona Cantábrica. *Geogaceta*, 5, 11-13.

Aramburu, C. y García-Ramos, J.C. (1993). La sedimentación Cámbrico-Ordovícica en la Zona Cantábrica (NO de España). *Trabajos de Geología*, 19: 45-73.

ASTM D 5873-05. Standar test method for determination of rock hardness by rebound hammer method.

Baldwin, C.T. (1977). The stratigraphy and facies associations of trace fossils in some Cambrian and Ordovician rocks of north western Spain. *En: T.P. Crimes y J.C. Harper (eds.). Trace Fossils 2. Geological Journal Special Issue, Liverpool*, 9: 9-40.

Barrios, C (1882). Recherches sur les terrains anciens des Asturies et de la Galice. *Mem. Soc. Geol. Nord*. 2(1), 630 pp.

Barton, N., Lien, R., Luende, J. (1974): Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech* 6(4): 189-236.

Bieniawski, Z.T. (1975): The Point Load Test in Geotechnical Practice. *Eng. Geol.*, Sept 1975 pp. 1-11.

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

Bosch, W.J. van den (1969). Geology of the Luna-Sil Region, Cantabrian Mountains (NW Spain). *Leidse Geologische Mededelingen*, 44, 137-225.

Broch, E. and Franklin, J.A. (1972): Point load strength test, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 9(6), 669-97.

Comte, P. (1934). Sur couches intermédiaires entre le Silurien et le Devonien dans les Asturies. *C.R. Acad. De Sci. Paris. tomo 198*, 1.164-1.166.

Comte, P. 1937a. La série cambrienne et silurienne du León (Espagne). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 204, 604-606.

Comte, P., 1937b. Les grès rouges de San Pedro (León, Espagne). *Annales de la Société Géologique du Nord*, 62 (13), 60-68.

Comte, P. 1938. La succession lithologique des formations cambriennes du León (Espagne). *LXXI Congrès de la Société des Savants, Nice 1938, Section Sciences*, 181-183.

Comte, P. 1959: Recherches sur les terrains anciens de la Cordillère Cantabrique. *Memorias del Instituto Geológico y Minero de España*, 60, 1-440.

Farias, P. et al., (1987): Aportaciones al conocimiento de la litoestratigrafía y estructura de Galicia Central. *Mem. Museo e Lab. Miner. Geol., Fac. Ciências, Univ. Porto*, 1: 411-431.

García-Ramos, J.C., Aramburu, C y Brime, C. (1984): Kaolin tonstein of volcanic ash origin in the lower ordovician of the Cantabrian Mountains (NW Spain). *Trab. Geol., Univ. Oviedo*, 14: 27-33, Oviedo.

Gietelink, G. (1973): Sedimentology of a linear prograding coastline followed by three high-destructive delta complexes (Cambro-Ordovician, Cantabrian Mountains, NW Spain). *Leidse Geologische Mededelingen*, 49: 125-144.

Gutiérrez-Alonso, G; Fernández-Suárez, G.J. y Murphy, J. B. (2011): trasplante del manto en el corazón de Pangea. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 19, 119-121.

Hernandez Sampelayo, P (1928): Discusión de algunos puntos de la Hoja Geológica de Llanes (Asturias). *Not. Com. Inst. Geol. Min. Esp.*, 1, 5 – 23.

Hernandez Sampelayo, P (1936): Sobre las cruzianas de las Sierras Planas (Asturias). *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat.*, 36, 14 – 16.

Hernández Sampelayo, P. (1942): Explicación del nuevo Mapa Geológico de España. El Sistema Siluriano. *Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, Memorias*, 2 (1 y 2), 848 pp.

IGME (2012): Mapa de rocas y minerales Industriales de Asturias. *Instituto Geológico y Minero de España. Septiembre 2012*.

ISRM (1978): Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. *International Society for Rocks Mechanics Commission on standardization of laboratory and field tests. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanical Abstracts* 15, 319-368.

ISRM (1981): Suggested Methods for Determining Sound. Rock Characterization Testing and Monitoring (ISRM Suggested Methods. Editor: ET Brown. Pergamon Press. pp. 107-110.

ISRM (1985): International Society of Rock Mechanics Commission on Testing Methods, Suggested Method for Determining Point Load Strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.* 22, 51-60.

Julivert, M. (1967a): La ventana tectónica del río Color y la prolongación del septentrional del manto del Ponga (Cordillera Cantábrica, España). *Trabajos de Geol. Univ. de Oviedo*, 1, 1-26.

Julivert, M (1971a): Décollement tectonics in the Hercynian Cordillera of NW Spain. *Amer. Jour. Sci.*, 270: 1-29.

Loetze, F. (1958): Zur Stratigraphie des spanischen Kambriums Geologie, año 7, n.º. 3-6, pp. 727-750, Berlin (Traducido por J. Gomez de Llarena: Sobre la Estratigrafía del Cámbrico Español. *Not. Com. Inst. Geol. Min. España*, n.º 61, pp. 131-164, Madrid 1961.

Marcos, A. (1967): Estudio geológico del reborde NW de los Picos de Europa (Región de Onís – Cabrales, Cordillera Cantábrica). *Trabajos de Geología. Univ. de Oviedo*, 1, 39-46.

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

Oele, E. (1964): Sedimentological aspects of four Lower Paleozoic Formations in the northern part of the Province of León (Spain). *Leidse Geologische Mededelingen*, 30: 1-100.

Olona, J. (2014): Integración de metodologías geofísicas para la caracterización geológico – geotécnica del terreno. *Programa de doctorado: exploración, análisis y modelización de cuencas y sistemas orogénicos. Tesis doctoral, Universidad de Oviedo*.

Pello, J. (1967): Estudio geológico de la prolongación del borde oriental de la cuenca minera central de Asturias (NW de España). *Trabajos de Geol., Univ. de Oviedo*, 1, 27-38.

Pettijohn, F.J.; Potter, P.E. y Siever, R. (1972): Sand and Sandstones, 1-618. Springer, Berlín.

Quiroga, F (1887): Noticias petrográficas sobre la provincia de Santander. *Anr. Soc. Esp. Hist. Nat.* 14, 209 -222.

Rouault, M. (1851): Note préliminaire sur une nouvelle formation (étage du Grès armoricain) découverte dans le terrain silurien inférieur de la Bretagne. *Bulletin de la Société Géologique de France, 2ème série*, 7, 724-744.

Russel, S.A (1927). Stone preservation committee report (Appendix I). *H.M. Stationary Office, London*.

Service Géologique National (1996): *Carte géologique de la France au millionième, Éditions BRGM (6<sup>th</sup> ed.)*, Paris.

Schulz, G. (1858): Descripción geológica de la provincia de Oviedo. Madrid.

Tavallali, A. y Vervoort, A., (2010): Effect of layer orientation on the failure of layered sandstone under Brazilian test conditions. *Int J Rock Mech Min Sci*, 47, 313–322.

Toyos, J.M. y Aramburu, C. (2014): El ordovícico en el área de los Barrios de Luna, Cordillera Cantábrica (NW de España). *Trabajos de geología, Universidad de Oviedo*, 34, 61-94.

UNE 22950-2 (1990): Propiedades mecánicas de las rocas. Ensayos para determinación de la resistencia. Parte 2: resistencia a tracción indirecta. AENOR 13 pp.

UNE 22950-5 (1996): Propiedades mecánicas de las rocas. Ensayos para determinación de la resistencia. Parte 5: resistencia a la carga puntual. AENOR 13 pp.

UNE-EN 932-3 (1997): Ensayo para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 3: procedimiento y terminología para la descripción petrográfica simplificada. AENOR. 13 pp.

UNE-EN 12407 (2001): Métodos de ensayo para piedra natural. Estudio petrográfico. AENOR.

UNE-EN 1936 (2006): Métodos de ensayo para piedra natural: Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total. AENOR. 13 pp.

UNE-EN 1936 (2006): Métodos de ensayo para piedra natural: Determinación de la resistencia a la compresión uniaxial AENOR. 21 pp.

UNE-EN 13925 (2006): Ensayos no destructivos. Difracción de rayos X aplicado a policristalinos y amorfos. Parte 1: Principios generales. AENOR 25 pp.

Vaquero Nazabal, C.; Fernández Álvarez, J.M.; Collantes Estrada, L.; Claverías Muñoz, P. y Muñoz de la Nava Sánchez, P. (1987): Investigación de Caolines en el Principado de Asturias. Primera Fase. (Áreas seleccionadas: Gorfoli; Barzana; Sierra de la Curiscada; Arroyo Farandon). 2 Vol. ITGE, Madrid.

Vera, J. A. Ed. (2004): Geología de España. Soc. Geol. de España. Instituto Geológico y Minero de España, 884 pp.



# ANEXOS







# **ANEXO I. CARACTERISTICAS DE LAS PROBETAS: PROPIEDADES FÍSICAS ELEMENTALES Y VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS**



Bloque	Diámetro	Muestra	Altura (cm)	Bloque	Diámetro	Muestra	Altura (cm)
1	35 mm (=)	B1-P1	6,3	4 y 5	35 mm (=)	B4-P3	7,1
		B1-P4	7,4			B4-P6	8,1
		B1-P5	7,5			B5-P3	8,3
		B1-P7	8,0			B5-P4	7,2
		B1-P8	8,1			B5-P6	6,5
		B1-P10	7,1			B5-P9	6,5
2	35 mm (=)	B2-P5	8,6	6	35 mm (=)	B6-P1	8,2
		B2-P7	8,4			B6-P2	7,4
		B2-P10	8,5			B6-P4	7,2
		B2-P11	8,7			B6-P5	8
		B2-P13	8,7			B6-P6	7,9
		B2-P14	8,5			B6-P9	7,9

TABLA I-1. Probetas utilizadas en los ensayos de determinación de las propiedades físicas.

Bloque	Diámetro	Muestra	Bloque	Diámetro	Muestra
1	35 mm	B1-P9	5	35 mm	B5-P2
	50 mm	B1-P12		35 mm	B5-P10
	35 mm	B1-P3	6	35 mm	B6-P7
35 mm	B4-P5	35 mm		B6-P12	
35 mm	B4-P7	35 mm		EB6-P2	

TABLA I-2. Probetas utilizadas en el ensayo de la densidad de los granos minerales.

Numero	Bloque	Testigo	Altura (mm)	Numero	Bloque	Testigo	Altura (mm)
1	1	B1 - P1	61,66	20	2	B2 - P18	83,95
2		B1 - P2	59,64	21		B2 - P19	76,63
3		B1 - P4	74,27	22	4	B4 - P3	72,00
4		B1 - P5	73,33	23		B4 - P6	80,85
5		B1 - P6	59,56	24	5	B5 - P3	81,10
6		B1 - P7	79,86	25		B5 - P4	73,43
7		B1 - P8	80,05	26		B5 - P6	65,95
8		B1 - P10	71,25	27	B5 - P9	69,31	
9	2	B2 - P4	72,19	28	6	B6 - P1	81,88
10		B2 - P5	85,61	29		B6 - P2	79,09
11		B2 - P6	87,52	30		B6 - P3	78,02
12		B2 - P7	84,19	31		B6 - P4	72,06
13		B2 - P8	76,11	32		B6 - P5	79,89
14		B2 - P10	85,19	33		B6 - P6	79,19
15		B2 - P11	86,66	34		B6 - P8	78,14
16		B2 - P12	80,18	35		B6 - P9	79,22
17		B2 - P13	87,55	36		B6 - P10	81,03
18		B2 - P14	84,25	37		B6 - P11	71,83
19		B2 - P16	76,67				

Tabla I-3. Muestras empleadas en el ensayo de velocidad de propagación de ondas.



# **ANEXO II. CARACTERISTICAS DE LAS PROBETAS: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE, ENSAYO BRASILEÑO Y CARGA PUNTUAL**



Nº	Bloque	Diámetro	Muestra	Altura (cm)
1	1	35 (=)	B1 - P4	74,27
2			B1 - P7	79,86
3	2		B2 - P5	85,61
4			B2 - P7	84,19
5	4		B4 - P6	80,85
6	5		B5 - P3	81,10
7			B5 - P4	73,43
8	6		B6 - P2	79,09
9			B6 - P4	72,06
10			B6 - P5	79,89

TABLA II-1. Características de las probetas utilizadas en el ensayo RCS.

Bloque	Diámetro	Muestra	Bloque	Diámetro	Muestra
1	50 mm (=)	B1-P11	2	50 mm (T)	B2-P24-II
2	50 mm (=)	B2-P1-I			3
		B2-P1-II	B3-P1-I		
		B2-P1-III	B3-P1-II		
		B2-P2-I	B3-P2-I		
		B2-P2-II	B3-P2-II		
		B2-P2-III	B3-P3-I		
		B2-P3-I	B3-P3-II		
		B2-P3-II	B3-P5-I		
		B2-P3-III	B3-P6-I		
		50 mm (T)	B2-P9-I	4	
	B2-P9-II		B4-P1-II		
	B2-P9-III		B4-P2-II		
	B2-P20-I		B4-P2-III		
	50 mm (=)	B2-P21-I	5	50 mm (=)	B5-P11-I
B2-P22-I		B5-P11-II			
B2-P22-II		6	50 mm (=)	B6-P12	
B2-P23-I					

TABLA II-2. Probetas utilizadas en el ensayo "brasileño".

Nº	Ensayo	Muestra	Dimensiones (cm)	Nº	Ensayo	Muestra	Dimensiones (cm)	
1	Ensayo Axial	B2 - P6	D = 1,2	17	Ensayo diametral	B4 - P8	D = 2,8	
2		B2 - P7	D = 1,6	18		B4 - P9	D = 2,7	
3		B2 - P10	D = 1,2	19		B5 - P5	D = 2,5	
4		B2 - P11	D = 1,1	20		B5 - P7 - I	D = 1,75	
5		B2 - P 12	D = 1,8	21		B5 - P7 - II	D = 2,1	
6		B4 - P9 - II	D = 1,5	22		B5 - P8	D = 3	
7		EB4 - P6	D = 1,4	23	Bloque irregular	EB1 - P11 - I	L = 5,1 / W = 1,7 / D = 1,4	
8		B5 - P5 - II	D = 1,5	24		EB1 - P11 - II	L = 5,1 / W = 1,7 / D = 1,5	
9		EB6 - P1	D = 1,9	25		EB2 - P1	L = 5,8 / W = 2,7 / D = 1,7	
10		EB6 - P3	D = 1,3	26		EB2 - P2	L = 5,5 / W = 2,5 / D = 1,4	
11		EB6 - P5	D = 1,2	27		EB2 - P3	L = 5,3 / W = 3 / D = 1,8	
12		EB6 - P9	D = 1,4	28		EB3 - P5 - I	L = 5,5 / W = 2,3 / D = 1,5	
13		B2 - P4	D = 2,7	29		EB3 - P5 - II	L = 5,5 / W = 3,3 / D = 1,6	
14		Ensayo diametral	B2 - P15 - I	D = 2,3		30	EB4 - P1	L = 5,2 / W = 2,4 / D = 2
15			B2 - P15 - II	D = 2,5		31	EB4 - P2 - I	L = 5,4 / W = 1,5 / D = 1,2
16			B4 - P4	D = 2,8		32	EB4 - P2 - II	L = 5,5 / W = 1,6 / D = 1,2

TABLA II-3. Muestras y dimensiones de las probetas utilizadas en el ensayo de carga puntual.



# ANEXO III. DATOS DE OBRAS PÚBLICAS



Proyecto-obra	RCS (MPa)	RMR	RQD (%)	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Carga puntual (MPa)	Resistencia tracción indirecta (MPa)	martillo Smith (MPa)				Módulo de Young (GPa)		
Túneles de Ave de Pajares	90	-	-	2,8 2,7	-	-	7,3 11	-				-		
Obra Navia - Santiago (p.k. 104+95)	6,36	63	-	-	2,27	41,58	-	-	-	47,3	-	-		
	10,43				2,6									
	2,29				2,64									
	82,49				2,59									
Autovía A-8 (Queuras - Otur, Asturias)	39,12	48	12,50%	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	5,58													
	6													
	0,98													
	14,02													
	3,9													
	2,92													
3,41														
Túneles Fabar-Fabares-Llovio (Autovía oriente A-8 del Cantábrico)	197	50	-	-	2,62	-	-	-	-	-	-	56,892		
	9,9				2,68							73,44		
	97				2,57							31,8	9,98	
					2,61							31,992		
Materiales rocosos del río Benesga, León	187,76	63 - 70	-	2,67	2,52	-	-	-	-	-	-	-		
	153,765												189,12	
	156,94												310,08	
	158,55												360,72	
	171,22												294	
	156,14												171,20	
	163,5												256,86	
	134,2												315,73	
	121,95												262,49	
	139,5												-	
	141,15												17,74	
	98,82												-	
	208,5												-	
Estudio Geológico - Geotécnico del termino municipal de Santo Adriano (2004)	294,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48 52 58 60		
	441,29											50 52 60 63		
Revisión del Estudio Geológico - Geotécnico del túnel de Puerto Viejo, Cáceres	17	-	-	2,63	2,54	-	-	-	-	-	-	-	46	
	35												80	10
	60												50	46
	6 - 7,5 8 a 13												2,72	50
Linea de Ave de Pajares lote 1	77,8	55 - 65	80%	2,6	2,53	2,58	2,54	-	-	-	-	-	61,899	
	94,34				2,66	2,58	2,65						11,5	40
	87,8				2,49	2,61	2,63						5,31	62,913
	137,07				2,55	2,59	2,56						7,52	43,183
	127,74				2,71	2,57	2,6						10,83	29
	38,88				2,62	2,68							3,95	19,373
	73,79				2,5	2,50							6,12	66,2
	44,78				2,57	2,68							7,34	13,2
	64,78				2,56	2,66							7,26	15,8
	84				2,61	2,70							7,4	18,7
Ferrocarriil La robla Ujo - Pola Lena (renfe)	144	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	302													
	210													
	199													
Túnel Miravetes - Cáceres	-	40 - 59	13 - 17 %	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	-	45 - 62	13 - 17 %											
	-	34 - 51	2 - 4 %											
Fm. Altorrey (Guadalajara)	-	54 - 72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Materiales del Subsuelo de Gijón	82,7	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-		
				2.659										
				2.629										
				2.639										
				2,64										
				2,65										
2.619														

Tabla III-1. Recopilación de los parámetros geotécnicos de las obras públicas.