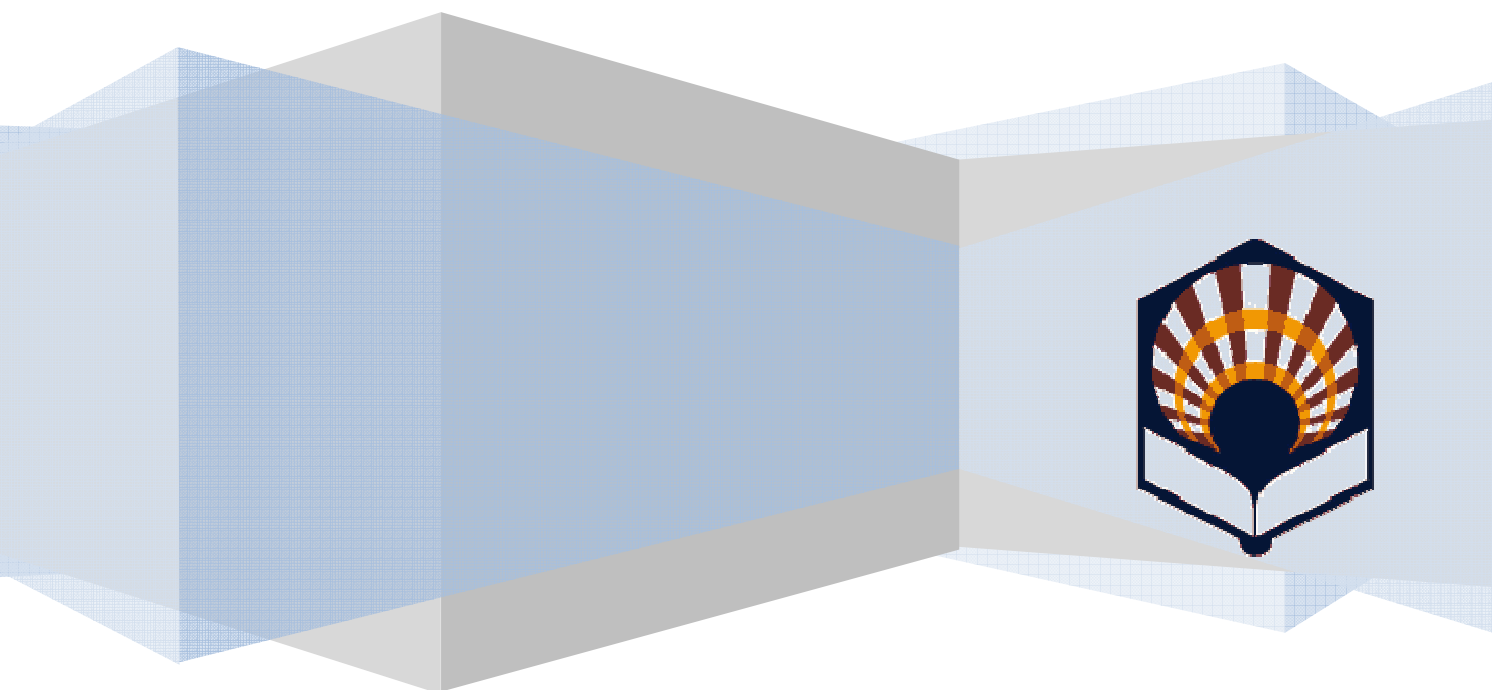


UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
TESIS DOCTORAL

Aplicaciones industriales de los terrenos arcillosos de la provincia de Córdoba

Antonio Daza Sánchez. Universidad de Córdoba 2010-2011



TITULO: *Aplicaciones industriales de los terrenos arcillosos de la provincia de Córdoba*

AUTOR: *Antonio Daza Sánchez*

© Edita: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. 2011
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396
14071 Córdoba

www.uco.es/publicaciones
publicaciones@uco.es

ISBN-13: 978-84-694-4754-3

TÍTULO DE TESIS DOCTORAL:

**APLICACIONES INDUSTRIALES DE LOS TERRENOS
ARCILLOSOS DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA**

Doctorando: ANTONIO DAZA SÁNCHEZ (Área de Ingeniería del Terreno)



VºBºDirector: Dr. JESÚS AYUSO MUÑOZ (Área Ingeniería de la Construcción)



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA RURAL. UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA.

Programa Doctorado: **Ingeniería de Plantas Agroindustriales.**

Línea de Investigación: **Aplicaciones de nuevas tecnologías y métodos en ingeniería de la construcción y el medio ambiente.**



ESCUELA POLITECNICA DE BELMEZ
UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



TÍTULO DE LA TESIS: APLICACIONES INDUSTRIALES DE LOS TERRENOS ARCILLOSOS DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA.

DOCTORANDO: ANTONIO DAZA SÁNCHEZ

INFORME RAZONADO DEL DIRECTOR DE LA TESIS

(se hará mención a la evolución y desarrollo de la tesis, así como a trabajos y publicaciones derivados de la misma).

El doctorando, profesor de la Universidad de Córdoba, ha realizado el estudio en cuatro años. El objetivo principal de la presente tesis doctoral es evaluar las posibilidades de uso en la industria cerámica de las margas del mioceno y de las lutitas paleozoicas de la provincia de Córdoba: Para la consecución de este objetivo, el doctorando ha realizado una correcta planificación del trabajo de investigación y aplicado las metodologías y técnicas de ensayo adecuadas.

Una prueba del interés de esta tesis es la obtención por el doctorando de una ayuda de la Convocatoria de Subvenciones para actividades relacionadas con las obras públicas, del Ministerio de Fomento para el proyecto *“Investigación para la caracterización y aplicaciones de las lutitas arcillosas en materiales de construcción y obra civil”*.

Por último, el doctorando ha cumplido los objetivos propuestos en la tesis, y una muestra de la calidad de la misma es la publicación de un artículo en una revista indexada en el JCR cuya referencia es: Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio (Vol. 49 nº 3 pp: 215-220) titulado: *“Prospección de arcillas cerámicas en la Campiña de Córdoba (España)”*.

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral.

Córdoba, 4 de Mayo de 2011

Firma del director:

Fdo.: Dr. Jesús Ayuso Muñoz

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la disposición objetiva, su ejemplo y las reflexiones del director de esta tesis, Dr. Jesús Ayuso.

Al director del Máster de Proyectos y Gestión de Plantas Agroindustriales, Dr. Francisco Montes, y demás profesores por sus ánimos y facilidades.

Al Instituto de Tecnología Cerámica de la Universidad Jaime I por su colaboración.

Al contrato OTRI con la empresa Procerán y al Ministerio de Fomento por la subvención del proyecto de investigación.

Mi gratitud a los compañeros de áreas afines del Departamento de Mecánica de la Universidad de Córdoba, a los profesores de áreas que planifican con filosofía de la Escuela Politécnica de Belmez, a D. Manuel López y a D. Enrique Cano, al apoyo de D. Juan Mateo y alumnos del Seminario "Antonio Carbonell", y a la ayuda del área de Prospección de la Escuela de Minas de Madrid.

Al Departamento de Mineralogía de la Universidad de Granada por los análisis de minerales, con el apoyo del Dr. Jesús Gutierrez-Ravé y de D. Pedro Llanes.

A mi familia: Dulce, Antonio, Silvia y Dulce, mis padres, suegros, hermanos y cuñados, por sentir de cerca y siempre con buen estado de ánimo, en mi continuo renacer como investigador para leer el libro abierto de la naturaleza.



TÍTULO DE LA TESIS: APLICACIONES INDUSTRIALES DE LOS TERRENOS ARCILLOSOS DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA.

DOCTORANDO: ANTONIO DAZA SÁNCHEZ (Área de Ingeniería del Terreno)

RESUMEN DE LA TESIS

Esta Tesis ha investigado las lutitas de Sierra Morena y las arcillas margosas con poca calcita de la Campiña de Córdoba, para suministrar materias primas a la fabricación de bloques y productos cerámicos. En la caracterización del subsuelo de la Campiña se han planificado cuatro zonas de trabajo de 4 km² cada una, donde se han aplicado métodos geofísicos basados en perfiles de Tomografía Eléctrica y Sondeos Eléctricos Verticales (SEV). En estaciones de muestreo de cada zona se han realizado análisis mineralógicos de difracción de rayos-X (DRX), análisis químico por energías dispersivas de rayos-X (EDAX), ensayos de plasticidad, corte directo, compactación, hinchamiento y capacidad portante, molienda, secado y cocción. Se ha conseguido descubrir las áreas de interés para la explotación de materias primas, y con los resultados de esta prospección pueden estudiarse nuevos yacimientos de arcilla cerámica.

La difracción de rayos X confirma que las margas del mioceno poseen características mineralógicas similares, con presencia de yeso y pocas variaciones intrínsecas entre las margas azules y las margas blancas albarizas (ésta con más calcita y menos esmectita). Las muestras estudiadas no contraen excesivamente en cocción (<12%) por lo que son susceptibles de aplicación cerámica y presentan altas pérdidas de peso.

Las lutitas de Sierra Morena están exentas de carbonato cálcico, no contraen mucho ni en el secado ni en la cocción y son susceptibles de aplicarse en cerámica. La lutita westfaliense no es fundente, la lutita devónica es de color marfil tras la cocción y su comportamiento es refractario, debido a la pirofilita. La lutita namuriense presenta buen comportamiento en el prensado y la cocción desarrolla fundencia, obteniendo composiciones de bajos valores de absorción de agua, y es útil como arcilla cerámica.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	10
1.1. INTRODUCCIÓN	11
1.2. ESTADO ACTUAL Y PLANIFICACIÓN.....	12
1.3. OBJETIVO.....	16
1.4. ARCILLAS.....	16
1.4.1. CAOLINITA.....	19
1.4.2. MONTMORILLONITA.....	20
1.4.3. ILLITA.....	21
1.4.4. VERMICULITA.....	21
1.4.5. CLORITA.....	21
1.5. BOSQUEJO DE LOS SUELOS DE CÓRDOBA.....	22
1.5.1. LOS SUELOS DE SIERRA MORENA.....	22
1.5.2. LOS SUELOS DE LA CAMPIÑA.....	24
1.6. REFERENCIAS.....	25
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.....	27
2.1. ARCILLAS CERÁMICAS.....	29
2.2. PANORAMA DE LOS MINERALES DE ARCILLA.....	30
2.2.1. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN CON ARCILLA COCIDA.....	33
2.2.2. PAVIMENTOS CERÁMICOS.....	34
2.3. PLANTEAMIENTO DEL PRODUCTO CERÁMICO.....	35
2.3.1. CONFORMADO DE LAS CERÁMICAS.....	36
2.3.2. ACCIÓN DEL CALOR SOBRE LAS ARCILLAS.....	37
2.3.3. COMPORTAMIENTO DE LAS ARCILLAS EN FÁBRICA.....	38
2.4. REFERENCIAS.....	42
CAPÍTULO 3. GEOLOGÍA DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA.....	45
3.1. ESTRUCTURA GEOLÓGICA DE LA SIERRA MORENA.....	46
3.1.1. INTRODUCCIÓN A LA ZONA DE OSSA-MORENA.....	46
3.1.2. TECTÓNICA DEL NOROESTE DE CÓRDOBA.....	48
3.1.3. SISTEMA DE FALLAS TRANSVERSALES.....	50
3.1.4. FALLA DEL GUADALQUIVIR.....	51
3.1.5. CUENCA DEL GUADIATO.....	52
3.2. ESTRUCTURA GEOLÓGICA DE LA CAMPIÑA.....	56
3.2.1. INTRODUCCIÓN A LA GEOLOGÍA DE LA CAMPIÑA.....	56
3.2.2. TECTÓNICA E HISTORIA DEL SUR DE CÓRDOBA.....	57
3.2.3. LAS MARGAS ARCILLOSAS DE LA CAMPIÑA.....	59
3.2.3.1. <i>Margas blancas del Mioceno.....</i>	<i>60</i>
3.2.3.2. <i>Margas azules del Mioceno Superior.....</i>	<i>61</i>
3.2.3.3. <i>Sinéresis.....</i>	<i>62</i>
3.3. REFERENCIAS.....	63

CAPÍTULO 4. MATERIALES Y METODOS.....	66
4.1. MATERIALES.....	67
4.2. METODOS DE ENSAYO Y CARACTERIZACIÓN.....	72
4.2.1. ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN CON EDÓMETRO.....	72
4.2.2. CARACTERIZACIÓN EN LUTITAS DE SIERRA MORENA	77
4.2.2.1. <i>Análisis químico y mineralógico</i>	78
4.2.2.2. <i>Ensayos en productos acabados con las lutitas</i>	84
4.2.2.3. <i>Absorción, peso específico y porosidad</i>	85
4.2.2.4. <i>Ensayos de plasticidad, compactación y penetración</i>	86
4.2.3. CARACTERIZACIÓN EN MARGAS DE LA CAMPIÑA.....	92
4.2.3.1. <i>Introducción</i>	92
4.2.3.2. <i>Prospección geofísica</i>	94
4.2.3.3. <i>Plan de trabajo</i>	99
4.2.3.4. <i>Caracterización geotécnica de las margas</i>	100
4.2.3.5. <i>Análisis químico mediante microscopía electrónica</i>	102
4.2.3.6. <i>Análisis mineralógico con difracción de Rayos X</i>	102
4.3. MÉTODOS DE COCCIÓN.....	105
4.3.1. ENSAYOS PARA PROCESOS DE COCCIÓN EN LUTITAS	105
4.3.1.1. <i>Desarrollo experimental</i>	105
4.3.1.2. <i>Ensayos para procesos lentos de cocción</i>	108
4.3.1.3. <i>Ensayos para procesos rápidos de cocción</i>	109
4.3.2. PLANTEAMIENTO DE LA COCCIÓN EN LAS MARGAS.....	109
4.4. REFERENCIAS.....	111
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y APLICACIÓN CERÁMICA.	115
5.1. RESULTADOS EN LAS LUTITAS DE SIERRA MORENA.	116
5.1.1. VIABILIDAD PARA MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.....	120
5.1.1.1. <i>Lutita Namuriense nº 4</i>	121
5.1.1.2. <i>Lutita Namuriense nº 5</i>	121
5.1.2. VIABILIDAD PARA FABRICAR BALDOSAS CERÁMICAS.....	122
5.1.2.1. <i>Lutita Westfaliense nº 1</i>	123
5.1.2.2. <i>Lutita Devónica nº 2</i>	123
5.1.1.2. <i>Lutita Namuriense nº 5</i>	123
5.1.3. APLICACIÓN CERÁMICA DE LAS LUTITAS INVESTIGADAS.....	124
5.1.4. VALORACIÓN DE RESERVAS	125
5.2. RESULTADOS PARA ARCILLA CERÁMICA EN LA CAMPIÑA.	128
5.2.1. RESULTADOS DE LA PROSPECCIÓN EN LA CAMPIÑA.....	132
5.2.2. DISCUSIÓN PARA ARCILLAS CERÁMICAS DE LA CAMPIÑA	137
5.3. REFERENCIAS.....	139
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	142

CAPITULO 7. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	146
7.1. APLICACIÓN INMEDIATA Y FUTURO DE LA PIROFILITA.....	147
7.2. MATERIALES EVOLUCIONADOS EN LA CAMPIÑA.....	149
7.2.1. GLAUCONITA.....	149
7.2.2. YESO.....	150
7.2.3. GISMONDINA.....	152
7.3. LAS MARGAS AZULES COMO ARCILLAS TERAPÉUTICAS.....	154
7.4. NUEVAS LINEAS EN INGENIERÍA DEL TERRENO.....	156
7.5. VALORACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES Y SU ESPACIADO.....	159
7.5.1. METODOLOGÍA PARA CLASIFICAR LUTITAS.....	160
7.5.2. ROCK MASS RATING: RESULTADO DEL DISCONTINUO.....	162
7.5.3. CONSIDERACIONES.....	165
7.6. MODELO DE LA TECTÓNICA DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA.....	166
7.6.1. MODELO DE DEFORMACIÓN TECTÓNICA.....	168
7.6.2. DISCUSIÓN.....	179
7.7. REFERENCIAS.....	180
CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA.....	183
<u>ANEXOS</u>.....	192
-APÉNDICE 1: NORMATIVA DE CONTROL DE CALIDAD.....	193
-APÉNDICE 2: GESTIÓN DE LA INVERSIÓN INDUSTRIAL.....	195
-APÉNDICE 3: MUESTRAS DE LUTITAS.....	203

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	10
TABLA I 1. PLASTICIDAD DEL MINERAL DE ARCILLA.....	18
CAPÍTULO 3. GEOLOGÍA DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA.....	45
TABLA III 1. ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS MARGAS REALIZADO POR EL IGME.....	62
CAPÍTULO 4. MATERIALES Y METODOS.....	66
TABLA IV 1. LUTITA 1.....	80
TABLA IV 2. LUTITA 5.....	80
TABLA IV 3. LUTITA 2.....	81
TABLA IV 4. LUTITA 6.....	81
TABLA IV 5. LUTITA 4.....	81
TABLA IV 6. LUTITA 7.....	81
TABLA IV 7. LUTITA 8.....	82
TABLA IV 8. LUTITA 9.....	82
TABLA IV 9. LUTITA 10.....	82
TABLA IV 10. ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE LAS LUTITAS.....	83
TABLA IV 11. PLASTICIDAD POR EL MÉTODO DE INDENTACIÓN.....	88
TABLA IV 12. CAPACIDAD DE CARGA PARA DIFERENTES SATURACIONES.....	91
TABLA IV 13. CRITERIO "A PRIORI" DE RESISTIVIDAD APARENTE DE LITOLÓGÍAS.....	95
TABLA IV 14. ESPESOR DE CAPAS DE SUBSUELO Y RESISTIVIDAD: SEV 1, 2 Y 3.....	97
TABLA IV 15. DENSIDAD APARENTE, EN SECO Y A 850°C, DE MUESTRAS.....	101
TABLA IV 16. LÍMITES DE ATTERBERG DE MUESTRAS.....	101
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y APLICACIÓN CERÁMICA.....	115
TABLA V 1. PROPIEDADES DE LA ARCILLA COCIDA A VARIAS TEMPERATURAS.....	116
TABLA V 2. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LAS LUTITAS.....	119
TABLA V 3. CLASIFICACIÓN DE LAS LUTITAS SEGÚN SU MATERIA ORGÁNICA.....	120
TABLA V 4. CARACTERÍSTICAS DE LAS LUTITAS Nº 3, 4 Y 5.....	121
TABLA V 5. CARACTERÍSTICAS DE LAS LUTITAS Nº 1, 2 Y 5.....	122
TABLA V 6. CAMPOS DE APLICACIÓN DE LAS LUTITAS.....	124
TABLA V 7. ANÁLISIS DRX DE COMPONENTES CRISTALINOS Y AMORFOS.....	135
TABLA V 8. ABSORCIÓN DE AGUA, CONTRACCIÓN LINEAL, PÉRDIDAS POR CALCINACIÓN, ELEMENTO CALCIO, PLASTICIDAD Y CONTRACCIÓN DE SECADO.....	136
TABLA V 9. RELACIÓN DE RESISTIVIDADES Y NÓDULOS DE MUESTRAS.....	138
CAPITULO 7. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	146
TABLA VII 1. ANÁLISIS QUÍMICO DE 2 MUESTRAS CON EL 50% DE PIROFILITA.....	147
TABLA VII 2. NUEVA VALORACIÓN PARA LUTITAS.....	161
TABLA VII 3. CLASIFICACIÓN DE BIENIAWSKI.....	164
TABLA VII 4. CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES.....	165

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	10
FIGURA I 1. DIAGRAMA DEL PROCESO EN FÁBRICA.....	15
FIGURA I 2. ESTRUCTURA DE LA CAOLINITA.....	20
FIGURA I 3. MAPA DE SUELOS DEL GUADIATO.....	23
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.....	27
FIGURA II 1. ARCILLAS INDUSTRIALES.....	32
FIGURA II 2. ARCILLAS REFRACTARIAS.....	37
FIGURA II 3. ALIMENTACIÓN DE PAQUETES.....	42
CAPÍTULO 3. GEOLOGÍA DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA.....	45
FIGURA III 1. ZONAS GEOLÓGICAS.....	53
FIGURA III 2. ESQUEMA TECTÓNICO DE SIERRA MORENA CENTRAL.....	54
FIGURA III 3. CORTE GEOLÓGICO DE S. ALBARRANA Y OBEJO-VALSEQUILLO.....	54
FIGURA III 4. BLOQUE DE LOS MOVIMIENTOS EN LA CUENCA DEL GUADIATO.....	55
FIGURA III 5. MODELO FLEXURAL PARA EL MACIZO HESPÉRICO.....	55
FIGURA III 6. BLOQUE DIAGRAMA DE LA CUENCA DEL GUADALQUIVIR.....	56
CAPÍTULO 4. MATERIALES Y METODOS.....	66
FIGURA IV 1. SITUACIÓN DE ESTACIONES Y CANTERA DE MARGAS.....	69
FIGURA IV 2. BANCADA EDMÉTRICA.....	73
FIGURA IV 3. PROBETAS SOMETIDAS AL ENSAYO EDMÉTRICO.....	73
FIGURA IV 4. LOCALIZACIÓN DE MUESTRAS LUTÍICAS.....	79
FIGURA IV 5. ENSAYOS QUÍMICOS DE ENERGÍA DISIPATIVA DE RAYOS X (EDAX).....	82
FIGURA IV 6. PLASTICIDAD Y CARGA ADMISIBLE.....	89
FIGURA IV 7. APISONADO Y CORTE DIRECTO.....	91
FIGURA IV 8. SITUACIÓN DE LA CANTERA, PLANTA Y LAGUNA DE ZOÑAR.....	93
FIGURA IV 9. TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA EN LA ZONA SUROESTE DE AGUILAR.....	96
FIGURA IV 10. CANTERA DE MARGAS AZULES DE PROCERAN EN AGUILAR.....	98
FIGURA IV 11. DIAGRAMAS TRIANGULARES DE MUESTRAS EN DRX.....	104
CAPITULO 7. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	143
FIGURA VII 1. MORTERO DE PIROFILITA Y CAL.....	148
FIGURA VII 2. LAGUNA ZOÑAR EN AGUILAR DE LA FRONTERA.....	151
FIGURA VII 3. ZONA DE GISMONDINA AL NORTE DE LA CANTERA PROCERAN.....	154
FIGURA VII 4. TALUD EN MARGAS AZULES (AGUILAR-LUCENA).....	156
FIGURA VII 5. DIAGRAFÍAS DE RESITIVIDADES EN SONDEO Y ENTUBACIÓN.....	163
FIGURA VII 6. CORTES DE DEWEY.....	167
FIGURA VII 7. TRAYECTORIA DE MOVIMIENTO DE CONTINENTES DE CONDIE.....	169
FIGURA VII 8. CICLO CADOMIENSE/CALEDONIANO.....	171
FIGURA VII 9. VARISCO.....	173
FIGURA VII 10. TARDIHERCÍNICO.....	175
FIGURA VII 11. CICLO ALPINO.....	177

CAPÍTULO 1
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el Programa de Doctorado de la Universidad de Córdoba “Ingeniería de Plantas Agroindustriales”, se dispone de la Línea de Investigación de “Aplicaciones de nuevas tecnologías y métodos en ingeniería de la construcción y el medio ambiente”, y en ese ámbito se realiza la presente Tesis Doctoral: “**Aplicaciones industriales de los terrenos arcillosos de la provincia de Córdoba**”.

Esta Tesis Doctoral que corresponde al área de conocimientos de “Ingeniería del Terreno” trata de la catalogación geotecnológica, investigación, viabilidad y aplicaciones de las lutitas de Sierra Morena y de las margas de la Campiña. Proporciona el conocimiento para las arcillas cerámicas mediante análisis físico-químicos, de composición mineralógica, ensayos geotecnológicos y cuantificativos de cocción, al tiempo que contribuye a la valoración y la utilización de estos recursos geológicos, con el apoyo de la prospección geofísica y la geotécnica (1).

Actualmente en Sierra Morena las principales reservas de arcillas son las zonas meteorizadas de lutitas (2) namurienses, westfalienses y devónicas, las investigamos de forma sistemática en diez estaciones de desmuestres, seleccionadas con el estudio geológico (3) (4). Para la evaluación de las margas del mioceno de la Campiña cordobesa (5) se planifican 3 zonas de 4 km² y el entorno de la cantera en explotación (Proceran), en cada una se aplican métodos geofísicos como perfiles de tomografía eléctrica y sondeos eléctricos verticales, análisis mineralógicos y químicos, y ensayos geotécnicos y de cocción.

Se ha realizado en profundidad el estudio geológico de la provincia de Córdoba, desde el estado actual de conocimientos y con argumentos y modelos descubiertos, por su importancia en la estructura del trabajo de investigación que contempla la caracterización y ensayos tecnológicos en estaciones de muestreo, en las zonas de máximo interés, donde se aplican por primera vez algunos métodos geofísicos de campo artificial que dan información del subsuelo, yacimientos profundos y cubicación de materias primas. Con el fin de evaluar futuras explotaciones para plantas industriales y otras líneas de investigación.

1.2. ESTADO ACTUAL Y PLANIFICACIÓN

Existen desde la antigüedad numerosos indicios de actividad extractiva y de transformación de las lutitas arcillosas de Sierra Morena, hemos encontrado bastantes hornos inactivos para su uso como material de construcción y alfarería. Actualmente podría constituir una importante actividad industrial y desarrollar una notable labor social, funciones acrecentadas por ser actualmente la Cuenca Carbonífera del Guadiato una zona económicamente débil como consecuencia de la disminución de la minería del carbón. En la actualidad existen dos minas a cielo abierto de carbón en el valle del Guadiato que producen menos de un millón de toneladas y conlleva diez veces más cantidad de estéril lutítico que puede ser aprovechable. Las escombreras de la minería del carbón de la Cuenca del Guadiato son interesantes para recuperar la lutita westfaliense, el volumen disponible en las escombreras mineras se estima en más de 100 Mt, no obstante no se han considerado estas escombreras, solamente se investigan nuevas zonas in situ vírgenes que podrían ser concesiones de explotación de arcilla. La lutita devónica presenta la pirofilita como mineral principal, y en la lutita namuriense se establecen cuadrículas mineras seleccionadas en esta Tesis Doctoral para su posible laboreo.

Esta Tesis Doctoral pretende avanzar en el conocimiento de los terrenos arcillosos de la provincia de Córdoba para aplicaciones innovadoras, mediante análisis físico-químicos, de composición mineralógica y ensayos geotecnológicos, al tiempo que contribuye a la valoración y utilización de estos recursos geológicos.

Las margas del mioceno y las lutitas carboníferas son arcillas de cocción roja, y las lutitas devónicas con pirofilita presentan cocción blanca. Estos terrenos arcillosos de la provincia de Córdoba son el planteamiento del trabajo de esta Tesis Doctoral que ha permitido conocer las aplicaciones cerámicas. La metodología de la investigación de las arcillas de cocción roja ha sido para la aplicación en la cerámica estructural o industrial, y para las arcillas de cocción blancas (véase la figura I 1) podrían aplicarse en lozas, porcelanas, cerámica industrial y cemento. Otra aplicación de esta Tesis será el conocimiento de la ingeniería del terreno, además se podrían aplicar las arcillas en la industria ambiental, de absorbentes y usos terapéuticos.

Las arcillas de cocción roja se clasifican en fundentes (como la lutita namuriense) y refractarias (como la lutita westfaliense); las fundentes de bajo contenido en carbonato se suelen utilizar en pavimentos gres de monococción (como la lutita namuriense) y también tienen uso en

revestimientos porosos de monococción al añadir calcita. Las refractarias se usan para altas temperaturas, en la fabricación de pavimentos de gres y revestimientos.

Se ha realizado una identificación de los minerales (difracción de rayos X) constituyentes de estas lutitas, así como ensayos geotecnológicos, como comportamiento a los tratamientos térmicos, módulos de rotura, de plasticidad y análisis de elementos químicos EDAX. Todo ello en la zona algo meteorizada de alteración superficial de unos 30m de profundidad.

En esta investigación se realiza el estudio geológico y estructural de la provincia de Córdoba, y se aplican métodos geofísicos con una prospección geoelectrica en las margas del mioceno mediante Tomografía Eléctrica y Sondeos Eléctricos Verticales (15)(16). Se aportan relaciones con los datos geofísicos-geotécnicos y los de caracterización de las distintas capas del subsuelo donde se realizan ensayos diversos. La metodología de estaciones de muestreo en diversos sectores o zonas del terreno representativas se ha desarrollado para poder realizar los ensayos y análisis necesarios que permiten conocer su aplicación industrial. Caracterizando las lutitas del norte de Córdoba y las arcillas margosas del sur de Córdoba para comparar con los parámetros geofísicos de resistividad (17). Ambos métodos, los geofísicos y los de caracterización con ensayos y análisis, han permitido conocer en profundidad las arcillas cordobesas, lo que permite interpretar la continuidad de la arcilla, u otras litologías y la distribución de las concreciones presentes. Las muestras se recogen con tomamuestras cilíndricos una vez eliminada la capa edáfica superficial, de 0,5 a 1m de profundidad. El “todo-uno” de unos 10kg de muestra se somete a preparación mineralúrgica en laboratorio, primero en machacadora de mandíbulas obteniendo un calibre máximo de 1cm (aplastamiento a compresión entre dos mandíbulas), posteriormente por molturación en seco en un molino de bolas de acero (que actúa por compresión, percusión y fricción) y dosificación para los grupos de ensayos o análisis.

La testificación geofísica en un importante número de sondeos en la Cuenca de Peñarroya-Belmez realizados anteriormente (18) ha permitido precisar la metodología de relacionar los datos geofísicos con parámetros geomecánicos como la fracturación, resistencia o la presencia de concreciones, en definitiva son anomalías del terreno registradas en las resistividades eléctricas.

Las arcillas margosas azules de la depresión del Guadalquivir podrían considerarse lutitas del Mioceno superior, continuas en la horizontal y que en zonas de mal drenaje desarrollan vertisuelos; existen abundantes

afloramientos de estas margas azules en la campiña de Córdoba. Poseen una alta proporción en carbonato cálcico, sobre todo las margas blancas del mioceno inferior, ello es perjudicial al necesitar una temperatura de cocción máxima de 850º, también condiciona la investigación para localizar margas con baja proporción de CO_3Ca y que no se produzca agrietamiento en las piezas cerámicas. La metodología también será la utilización de ensayos geotécnicos y de cocción, realizados según las normas técnicas.

Se inicia esta Tesis con la revisión bibliográfica y de los antecedentes de las arcillas, el estudio geológico permite una sectorización de los terrenos y la ubicación de estaciones experimentales en Sierra Morena y la Campiña. Estas han servido para recoger las muestras de lutitas y margas, y realizar los ensayos, como la microscopía electrónica o de barrido, el análisis de energía disipativa por rayos X (EDAX), los mineralógicos y los ensayos de cocción de materiales arcillosos con vistas a evaluar su uso en la fabricación de productos cerámicos tradicionales.

Las arcillas para fabricación de materiales de construcción deben proporcionar al producto sus propiedades características (porosidad, resistencia mecánica, etc.) y deben comportarse adecuadamente durante las diferentes etapas de que consta el proceso (6)(13): Trituración, molienda vía seca de las materias primas, amasado y secado, y cocción a temperaturas del orden de 800ºC (margas) y 900-950ºC (lutitas) y con un ciclo de varias horas o cocción con ciclo rápido (60 minutos) a 1.100-1.150ºC.

En el plan de trabajo de la Campiña tenemos que diferenciar en el Mioceno las margas blancas y las margas azules. Encima de las margas blancas se disponen los materiales que rellenan la depresión del Guadalquivir, que son las margas azules con intercalaciones de limo arenoso y arenas silíceas, también nódulos de carbonato cálcico diagenético. Se ha realizado una prospección geofísica con Tomografía Eléctrica y Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), que han seguido dos criterios, uno de caracterización geotécnica (19)(20) con toma de muestras en campo y otro geofísico con SEV en un programa de prospección que ha detectado las arcillas en profundidad, lo que permite conocer la distribución de los nódulos de CO_3Ca y la continuidad.

La estructura del trabajo de investigación contempla estaciones en los terrenos arcillosos de Sierra Morena y de la Campiña, con los métodos geofísicos, de análisis mineralógico y químico, ensayos geotécnicos (19)(21), análisis de cocción y de geotecnología (20)(6).

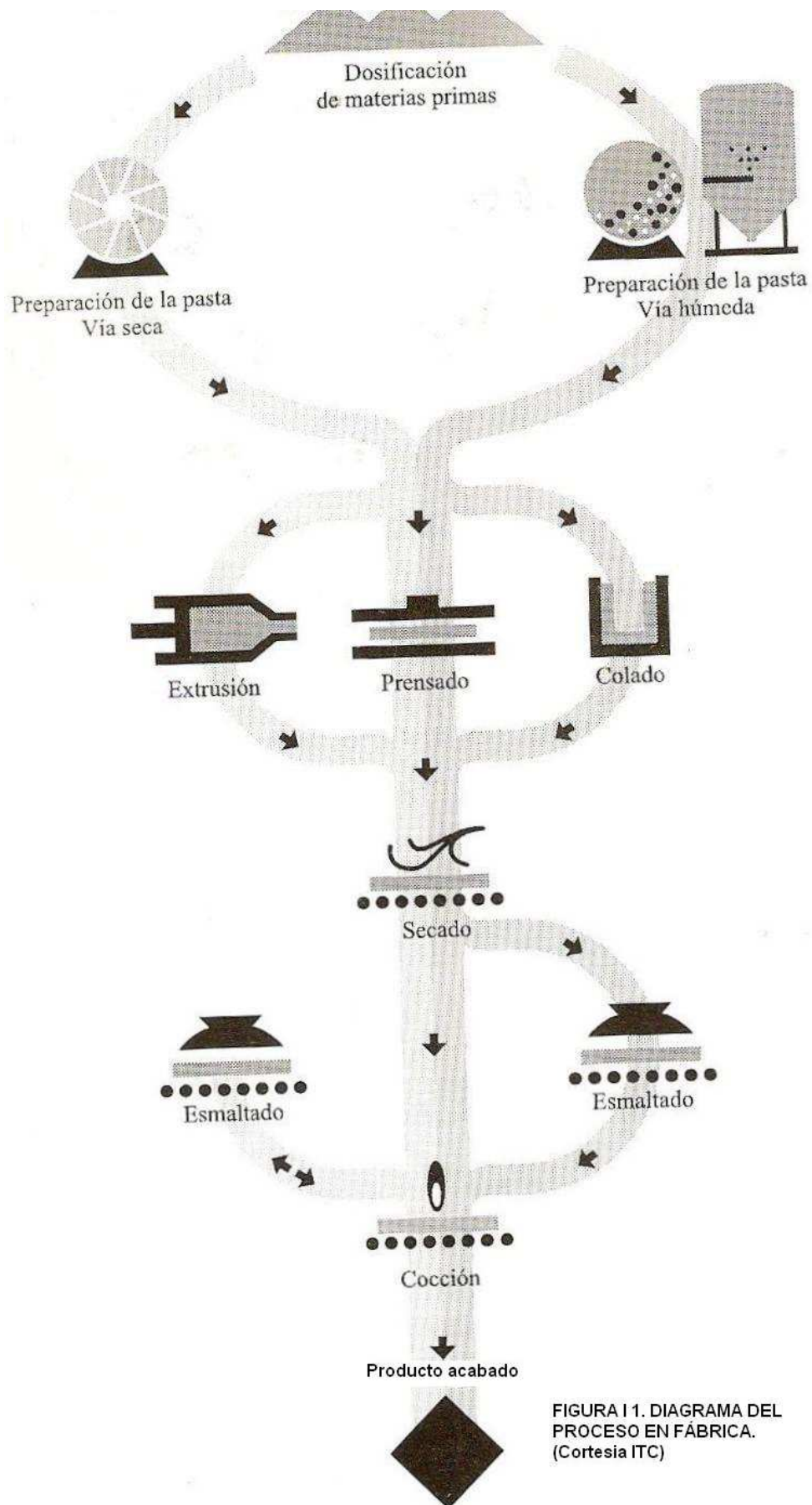


FIGURA I 1. DIAGRAMA DEL PROCESO EN FÁBRICA. (Cortesía ITC)

1.3. OBJETIVOS

El objetivo principal de la presente tesis doctoral es evaluar las posibilidades de uso en la industria cerámica de las margas del mioceno y de las lutitas paleozoicas de la provincia de Córdoba (6) (7).

Este objetivo se puede desglosar en los siguientes objetivos parciales:

1.- Sectorización y selección de aquellas zonas de mayor interés y continuidad de estos terrenos arcillosos en la provincia de Córdoba, mediante la realización de un estudio geológico-estructural (8).

2.- Caracterización de estas lutitas y margas mediante la aplicación de métodos geofísicos de campo artificial como sondeos eléctricos verticales y tomografía eléctrica que dan información del subsuelo para cartografía geológica bajo recubrimiento, localización de arcillas en profundidad y sus concreciones, y los yacimientos de estas materias primas (9), con el objetivo de investigar la geotecnología de estas arcillas cerámicas y compararla con la resistividad geofísica con el propósito de evaluar su aplicación industrial. En las margas de la Campiña se valora la baja proporción de carbonatos.

3.- Analítica para cuantificar los distintos minerales presentes en las lutitas y margas, y realizar también ensayos de cocción, valorando otras posibles aplicaciones innovadoras.

4.- Estudiar el comportamiento de la deformación de los terrenos arcillosos mediante los ensayos geotécnicos de sus propiedades (10) y marcar futuras líneas de investigación en ingeniería del terreno.

1.4. ARCILLAS

Una definición del concepto “arcilla” (22) según la nomenclatura del comité de la Clay Minerals Society -CMS- es la siguiente: “Materia prima natural con una constitución de partida compuesta por minerales de tamaño fino, que se comporta plásticamente con el agua y que endurece al ser secada o calentada”. Las arcillas son silicatos de aluminio hidratados, filosilicatos de tamaño de grano fino (por debajo de las 5 micras) y estructura laminada de tetraedros de sílice y octaedros de alúmina, lo que les confiere un elevado valor de superficie específica que facilita su interacción con multitud de sustancias, en especial la expansión con el agua. De ello se

derivan sus propiedades plásticas, su capacidad de cambio catiónico y su endurecimiento cuando son secadas o sometidas a tratamientos térmicos. La mayor parte de las arcillas son de origen sedimentario, además es el primer resultado de la alteración superficial de otras rocas, como la hidrolización de los feldspatos.

Cuando las cargas superficiales electronegativas de la arcilla coloidal (que atrae cationes de cambio) entran en contacto con el agua, los cationes H^+ y otros son fuertemente atraídos por las partículas y ocupan posiciones entre las láminas o unidades cristalográficas y las separa, el resultado son varias capas de moléculas de agua adsorbidas y cationes sustituidos (isomorfismo) en la arcilla por otros de menor valencia. Al disminuir con la distancia las fuerzas eléctricas de superficie, los cationes comienzan a disponerse difusamente fuera del espacio intralaminar y allí al disponerse de más agua con menos iones, se produce un flujo debido a la presión osmótica que produce un hinchamiento suplementario [Ayala Carcedo et al. (10)]. La electronegatividad además de ser debida al isomorfismo, también se produce por la capacidad adsorbente al separar ligeramente el hidrógeno de los radicales $-OH$ de la superficie de los octaedros que queda con la carga negativa del oxígeno.

Los minerales de la arcilla están estructuralmente constituidos por la alternancia de una hoja tetraédrica de SiO_4 y la otra octaédrica o bien de gibbsita (hidróxido de aluminio) o de brucita (hidróxido de magnesio), el aluminio puede estar parcialmente sustituido por magnesio o hierro. Además, cuando el catión octaédrico es de tipo Al^{3+} o Fe^{3+} el balance de carga dentro del retículo del mineral arcilloso requiere que sólo dos de cada tres posiciones octaédricas estén llenas y la hoja se denomina dioctaédrica. Por el contrario cuando el catión predominante es de tipo Mg^{2+} o Fe^{2+} todas las posiciones presentan un balance de cargas completo y la hoja se denomina trioctaédrica (23).

En realidad las llamadas “arcillas” no suelen tener predominio cuantitativo de minerales arcillosos y una parte corresponde a minerales de fracción limosa con precipitados químicos; parece apropiado, sin embargo, utilizar el nombre de lutita para el sedimento litificado [Ayala Calcedo (10)].

Los minerales de la arcilla están constituidos por un apilamiento tridimensional de capas elementales de idénticas características, a su vez cada capa está constituida por una yuxtaposición regular de hojas de tetraedros y octaedros. En los tetraedros las bases se sitúan sobre un mismo plano, y los cuatro vértices de cada tetraedro están ocupados por átomos de oxígeno, coordinados desde el centro por un átomo de silicio. Las

hojas de octaedros tienen sus seis vértices ocupados por iones de oxígeno y en el centro hay iones aluminio o magnesio. Así una hoja tetraédrica y una octaédrica conforman filosilicatos de tipo 1:1 (capa TO), los de tipo 2:1 (capa TOT), poseen una hoja octaédrica insertada a modo de sándwich entre dos hojas tetraédricas. Los de tipo 2:1:1 como la clorita poseen una hoja tetraédrica adicional intercalada entre dos capas TOT. Otro grupo es el 2:1 con las capas invertidas y textura fibrosa, como la sepiolita y la palygorskita.

Las arcillas están englobadas dentro del grupo de yacimientos minerales no metálicos. Todas las arcillas son plásticas por encima del 20% de humedad, los ensayos de consistencia o límites de Atterberg son de amplia aceptación y muy interesantes para su caracterización (véase la tabla I 1), ya que la plasticidad da las posibilidades del moldeo y del secado. Así:

- *LÍMITE LÍQUIDO (LL)*: Es la humedad con la que la arcilla pasa del estado líquido al plástico, un mayor contenido en agua no da consistencia para moldearse.
- *LÍMITE PLÁSTICO (LP)*: Es el contenido de agua en el momento en que no se moldean cilindros menores de 3 mm, es decir, es la mínima humedad en estado plástico, antes de pasar a semisólido. El *índice de plasticidad (IP)* es la diferencia de humedades entre los límites líquido y plástico.
- *LÍMITE DE RETRACCIÓN (LS)*: Es aquel en el que una mayor pérdida de agua no provoca una disminución alguna en el volumen de arcilla, es el paso de semisólido a sólido, la humedad mínima que se requiere para llenar los huecos de una muestra que ha sido desecada. Al desecarse la arcilla va reduciendo su volumen, hasta este límite.

Tabla I 1 PLASTICIDAD DEL MINERAL DE ARCILLA	Na ⁺		K ⁺		Ca ⁺⁺		Mg ⁺⁺	
	LL	IP	LL	IP	LL	IP	LL	IP
Caolinita	25	3	30	6	25	9	35	12
Illita	50	20	70	25	80	45	75	40
Montmorillonita	300	210	145	85	145	85	145	85

La capacidad de cambio de cationes de las arcillas (miliequivalentes/100 gr) es su aptitud para adsorber cationes y cambiar la plasticidad, pirofilita 1-5, caolinita 5-15, illita 10-40 y montmorillonita 50-150 meq, la zeolita tiene 700 meq. Al aumentar el pH se acrecienta la capacidad de cambio de cationes y disminuye la de aniones, la arcilla presenta una carga negativa que es neutralizada por los cationes de cambio atraídos.

La sensibilidad o susceptibilidad es la diferencia de resistencia entre el estado inalterado y remoldeado. La resistencia de la arcilla puede ser muy blanda (0'25 Kg/cm²), media (0'5-1), dura (2-4) y rígida (> 4 Kg/cm²).

Este proyecto investiga las lutitas arcillosas de forma sistemática en diez estaciones de muestreo, las muestras ensayadas se han tomado en los afloramientos lutíticos, y mezclando varias en cada estación obtenemos medias de las arcillas y así la homogeneidad de cada yacimiento. Posteriormente se han realizado los análisis químicos por microscopía electrónica (EDAX), los mineralógicos por difracción de rayos X en la fracción menor de 40 micras, los geotecnológicos en la fracción menor de 250 micras y los ensayos para muestras procesables mediante cocción.

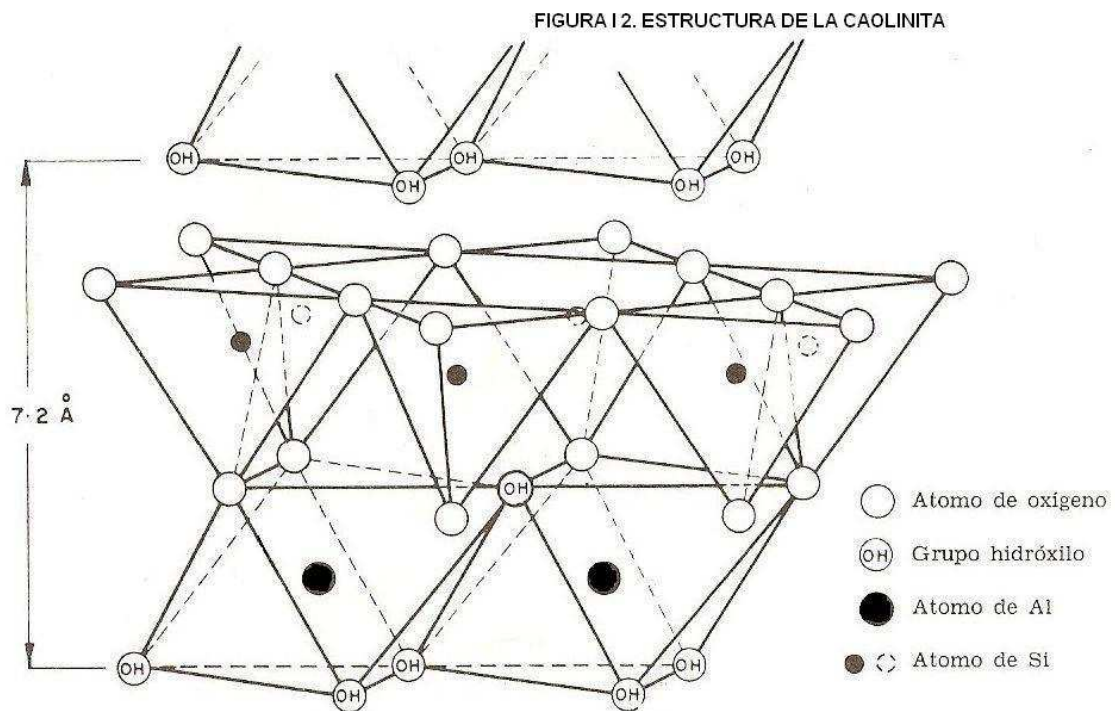
Los tipos principales de minerales de la arcilla (10)(12)(21) de la provincia de Córdoba son:

1.4.1. CAOLINITA (grupo del caolín, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

Formada por capas (TO) que alternan una hoja de tetraedros de sílice y hoja de octaedros de alúmina (estructura dioctaédrica tipo 1:1), muy unidas por átomos de oxígeno que son compartidos por átomos de Si de la hoja de tetraedros y de Al^{3+} de la hoja de octaedros. Constituyendo la unidad cristalina y ésta se une con otras por enlaces de hidrógeno entre los hidroxilos y los oxígenos. La partícula arcillosa no permite la expansión entre las unidades cristalinas cuando se humedece, así que ni el agua ni los cationes pueden penetrar internamente y la única superficie activa es la externa, por lo que posee baja adsorción (véase la figura I 2).

La caolinización es una alteración por hidrólisis del macizo rocoso rico en Al_2O_3 y SiO_2 , por encima del nivel freático, así el granito es progresivamente lixiviado; la acidez del líquido favorece la eliminación (lixiviación) de Fe, Al, Mg, Ca y Na, dejando la concentración de caolinita, moscovita y cuarzo (el feldespato y la plagioclasa pasan a caolinita y la biotita con la hornblenda pasa a clorita). La caolinita tiene un alto valor

añadido dada su blancura, se forma por meteorización intensa de rocas ácidas sobre todo en mares regresivos, también por lavado y eliminación de potasio y de sílice; indica ausencia de calcio, elevado drenaje, temperatura baja y zonas húmedas.



1.4.2. MONTMORILLONITA (*grupo de la esmectita*)

Las unidades cristalinas están formadas por capas (TOT) con dos hojas tetraédricas de sílice y una hoja octaédrica de alúmina en el centro (estructura tipo 2:1), la unión electrostática es débil, entre las unidades cristalográficas se unen los tetraedros con puente O-O que permite adsorción de agua y cationes. Posee la típica expansividad, así si el catión de cambio es Na o Li se presenta el máximo potencial expansivo, que se realiza en las superficies internas, y son mayores que las externas. La sustituciones isomorfas son de Al por Si en las capas tetraédricas y de Mg por Al en las capas octaédricas.

Rica en magnesio, se forma generalmente por alteración de rocas básicas volcánicas, en zonas de drenaje difícil y gran evaporación, en condiciones reductoras y medios lagunares someros (playas marinas). Estas esmectitas son "*arcillas expansivas*" denominadas también bentonitas y poseen capacidad de adsorción/desorción de agua con cambios de volumen, manifiestan su presencia por la pesadez del suelo mojado que se adhiere y

deforma fácilmente, muy alta plasticidad, y en la estación seca aparecen grietas con profundidades activas de 2 a 3 m. Son arcillas especiales.

1.4.3. ILLITA (grupo de la mica)

La illita posee capas (TOT) de estructura dioctaédrica tipo 2:1, se dan en ella sustituciones de Si por Al^{3+} y esto origina un déficit de carga que se compensa con la introducción de iones de K, alojado en posición interlaminar (unión adicional).

Mineral que procede de rocas ígneas ácidas y suele tener un origen diagenético y de zonas frías con lluvia escasa y drenaje difícil. Son micas de segunda formación (micas hídricas-hidratadas o sericita) y puede proceder de un proceso diagenético de illitización de la montmorillonita al fijar el potasio entre sus láminas.

1.4.4. VERMICULITA

De estructura semejante a la illita, tipo 2:1, de capas (TOT) que contiene magnesio en vez de potasio entre las hojas de tetraedros de sílice de dos unidades cristalinas. Además la hoja octaédrica si presenta un balance de cargas completo se denomina trioctaédrica, también se dan vermiculitas dioctaédricas.

Es una “*arcilla hinchable*” por su fácil expansión que facilita la entrada de agua y cationes sustituyendo Mg^{++} (es mucho menos plástica que la montmorillonita). La sustitución isomorfa es de Al por Si. Los minerales arcillosos que más modificaciones volumétricas experimentan son la vermiculita y la montmorillonita, se pueden combinar en capas alternativas, dando origen a interestratificados.

1.4.5. CLORITA

La alteración de la biotita y la hornblenda de los macizos rocosos dan la clorita. Que posee una estructura tipo 2:1:1, pero las unidades cristalinas se mantienen juntas más por los hidróxidos de magnesio y aluminio que por el potasio. Contiene dos hojas tetraédricas y una octaédrica (a modo de sánwich), más otra hoja octaédrica (de hidróxidos) intercalada entre dos capas TOT y la hoja de hidróxidos (octaédrica) enlazan la unidad cristalina y no permiten su expansión con la presencia de agua. Las sustituciones isomorfas son de Al por Si y Mg.

1.5. BOSQUEJO DE LOS SUELOS DE SIERRA MORENA Y LA CAMPIÑA

1.5.1. LOS SUELOS DE SIERRA MORENA

Los suelos más representativos en la lutita westfaliense de la margen izquierda del río Guadiato son los Cambisoles y Fluvisoles “Tierras pardas sobre sedimentos diluviales” que presentan un carácter pedregoso de cuarcitas rojas devónicas subredondeadas y tierras arenosas con finos de baja plasticidad en grumos. Otros suelos son los Luvisoles “Suelos rojos mediterráneos” aparecen en la alteración de las lutitas devónicas, mezclados con los anteriores y ambos ácidos, también los Cambisoles (Leptosoles) “Tierras pardas meridionales-mediterraneas y Rankers (tipo A-C)” sobre las pizarras del Culm, filitas cámbricas, cuarcitas ordovícicas y lutitas namurienses. Litosuelos muy poco profundos sobre rocas ácidas en áreas escarpadas, al sur en la Sierra de los Santos, Cambisoles (Regosoles) de tierras pardas meridionales y rankers sobre rocas ígneas del eje magmático de Cerro Muriano-Villaviciosa-La Coronada. Suelos de Vega o Fluvisoles con horizontes desarrollados en las áreas aluviales de los arroyos del río Guadiato, que definen en conjunto el paisaje edáfico de la zona investigada, tal como se representa en el mapa de suelos de la Cuenca del Guadiato (cortesía del IGME) de la figura I 3.

En los aprovechamientos destaca la labor extensiva con arbolado o dehesas que están localizadas principalmente en las tierras llanas del noroeste de Córdoba. La intensidad de cultivo es pequeña, alrededor del 10% y cada vez se reduce más, lo que está provocando la progresiva transformación de estas tierras en áreas de pastizal con arbolado. Los principales cereales que se cultivan son el trigo, con un 50% del territorio ocupado, y la cebada y la avena, con un 25% de superficie cultivada respectivamente. El arbolado está formado por masas adehesadas de encina, con una densidad media de 30 pies por hectárea.

1.5.2. LOS SUELOS DE LA CAMPIÑA

Los relieves de la Campiña de Córdoba son muy suaves con pendiente muy baja y presentan comportamiento portante fragil, son suelos arcillosos que constituyen las tierras típicas del cultivo de secano, estos vertisuelos son de evolución rápida y con un perfil homogéneo relativamente profundo, con un metro, propios de climas cálidos con estación seca, y se desarrollan en medios confinados. Un ejemplo típico de vertisuelo son estas “tierras negras” o “tierras de bujeo” que se abren y cierran grietas anualmente como consecuencia de una desecación acusada y endurecedora, con aumento de cohesión, que pasa a encharcarse con frecuencia ya que el subsuelo de estos vertisuelos corresponden a arcillas margosas del Guadalquivir “margas azules”, ricas en sales cálcicas.

Antonio Carbonell en sus “Notas para el plano edafológico de la provincia de Córdoba” que expone en la Asociación española para el progreso de las Ciencias, sesión del 5 de mayo de 1927, decía lo siguiente: “La Campiña Andaluza propiamente dicha, se halla formada a su vez por conjuntos pétreos que varían desde arcillas a las calizas arcillosas y a las areniscas con glauconita. Desde la línea del Guadalquivir hasta unos 25 km al mediodía, la base del terreno de la Campiña la determinan las margas azuladas del terciario superior. Tierras recias que se abren mucho en las sequías, donde el análisis acusa con frecuencia la presencia de sales derivadas del origen de tales depósitos, que tuvieron lugar en el estuario terciario del Guadalquivir. En estos terrenos los cereales se desarrollan con lozanía insuperable, justificando su bien cimentada fama de feraces, en Aguilar se obtiene: 6'2% de K_2O , 1'4% N, 1% P_2O_5 , 6'2% CaO y 1% MgO ”.

El límite sur de la Campiña la hacemos llegar hasta la línea de Puente Genil-Moriles-Cabra-Baena, donde ya aparece la agreste barrera de las sierras de afilados perfiles de Cabra y de Rute; definida a espensas de potentes masas calizas, que reposan sobre una amplia zona yesífera en cuyo contacto emergen las fuentes más caudalosas de Andalucía.

La presencia de glauconita (illita-moscovita) en las tierras de la Campiña es básica para el enriquecimiento en potasa asimilable en estos feraces terrenos. Si la sustancia en él estaba, y si era constantemente asimilada por las plantaciones, si la Campiña desde tiempo inmemorial era labrada y rendía cosechas, se llegaba a la conclusión de que en su seno había una fuente de reposición de tal mineral. En esta materia verdosa interviene como componentes esenciales la potasa y el hierro; cada vez que esas piedras son golpeadas por la reja del arado los compuestos potásicos quedan expuestos a la acción meteórica destructora y supone una importante causa de la feracidad del suelo andaluz.

Antonio Carbonell también comentaba que es curioso que los vinos más apreciados se deriven de aquellos terrenos en donde se extienden las tierras diatomíferas (margas blancas del mioceno) como ocurre en los Moriles, lo que acaso se debe a una permanente nitrificación originada por un fenómeno catalítico a expensas de los capilares conjuntos de aquellas.

1.6. REFERENCIAS

- [1].- A. Daza Sánchez. Aportaciones de la Geofísica a la Geotecnia. Seminario sobre la utilización de las diagráfias en minería. Ed. T. Alonso, Pres. Fernando Pendas. Escuela Superior de Ingenieros de Minas de Oviedo. Fundación "Luis Fernández de Velasco". 1986.
- [2].- I.G.M.E. Mapa de Rocas Industriales. 1976. Hoja 69 (4-9) Pozoblanco 1:200.000 (Compañía General de Sondeos para el IGME).
- [3].- L. Mallada. Memoria de la Cuenca Carbonífera de Belmez. IGME, 1900.
- [4].- O. Apalategui, F. Roldan, P. Higuera et al. Mapa Geológico de España. Hojas 879 (Peñarroya) y 880 (Espiel). IGME 1:50.000. 1985. (Realizado por INGEMISA para el I.G.M.E.).
- [5].- F. J. Roldan et al. (Ingemisa). Mapa y memoria explicativa de la hoja 988 (Puente Genil) y 966 (Montilla). Mapa Geológico. 1:50.000 IGME, 1988.
- [6].- A. Daza Sánchez. Investigación para la caracterización y aplicaciones de las lutitas arcillosas de la Cuenca del Guadiato en materiales de construcción y obra civil. Subvencionada por el Ministerio de Fomento (BOE 20-5-2000). 85p.; Grupo RNM244 (UCO) 2001. Colabora el ITC (Informe C001230, Castellón, 18p.): J. García-Ten y otros.
- [7].- Catálogo de las arcillas portuguesas utilizadas en la industria cerámica. Ministerio Industria y Energía. Dirección G. Geología y Minas. 175p. 1985.
- [8].- F. Pérez Lorente. Geología de la Zona de Ossa-Morena al norte de Córdoba (Belmez-Villaviciosa-Pozoblanco). 1979. Tesis doctoral nº 281 Universidad de Granada.
- [9].- W. E. Petrascheck. Yacimientos y Criaderos. Omega. DL B-16260-1965.
- [10].- F.J. Ayala Calcedo y otros. Mapa de arcillas expansivas de España. 1:1.000.000. I.G.M.E. 1987. (Realiza CEDEX- I.G.M.E.).
- [11].- P. J. Sánchez Soto. "Efecto del tratamiento mecánico por molienda en las propiedades texturales de pirofilita". Bol. Soc. Esp. Ceram. Vol. 48, nº2, p 59-68. Marzo-Abril 2009.

- [12].- A. Barba, C. Feliu, J. García-Ten et al. Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas. Castellón: Instituto de Tecnología Cerámica- AICE, 1997. 292p.; ISBN 84-923176-0-4.
- [13].- A. Daza Sánchez. Prospección minera de arcillas en tres zonas de Aguilar de la Frontera-Puente Genil (Córdoba). Para la empresa Proceran. OTRI-UCO. Resolución Rectoral 8/6/2005. XLIX Congreso de la Soc. Esp. Cerámica y V. (SECV), 2009 Linares.
- [14].- J. Coroado, J. Marqués et al. "Propiedades cerámicas de las arcillas de la cantera de Asseiceira (Tomar, Portugal)". Mater. Construcc. Vol. 55. nº279. p 5-16. 2005.
- [15].- A. Binley y A. Kemna, DC Resistivity and Induced Polarization Methods. Hydrogeophysics. Vol. 50. Springer Netherlands. ISBN: 978-1-4020-3101-4. pp 129-156. 2005.
- [16].- E. Orellana. Prospección Geológica. Ed. Paraninfo. ISBN 84-283-1153-6. DL M-35184-1981.
- [17].- A. López Hidalgo, M. H. Loke, G. O. Fanton, E. C. Rubí. Técnicas prácticas para investigación de resistividad en 2D y 3D (Tomografía Eléctrica). 23/6/2009. <http://www.geoelectrical.com/Articulo.pdf>
- [18].- A. Daza Sánchez. Nueva clasificación geomecánica. Revista Consejo Superior Ing. T. Minas "Minería y Siderurgia". 2º trimestre 1991. Madrid.
- [19].- A. Daza Sánchez y J. Ayuso Muñoz. "Nueva norma de ensayo de consolidación del terreno con edómetro". Revista ENERGÍA Y MINAS. Edita: Consejo Superior de Ingenieros T. de Minas. Madrid. Vol. 7, año 2009. P. 28-32. ISSN 1699-7743.
- [20].- A. Daza Sánchez. Geotecnia del terreno y del macizo rocoso. Ed. Antonio Daza me1dasaa@uco.es Depósito Legal CO-1557-03. 434pgs en 28 epígrafes. 12 enero 2004. ISBN nº 84-688-4703-8
- [21].- J.A. Jiménez Salas et al. Geotecnia y Cimientos. Ed. Rueda. 1975.
- [22].- S. Guggenheim, and R.T. Martin. "Definition of Clay and Mineral: Join Report of the AIPEA Nomenclature and CMS Nomenclature Committees". Clays Clay Miner., 43, 255-256 (1995).
- [23].- L.A. Díaz Rodríguez y R. Torrecillas, (Instituto N. del Carbón). "Arcillas cerámicas: una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones". Bol. Soc. Esp. Cerámica y V. 41 (5) 459-470 (2002).
- [24].- E. Sanchez, J. García-Ten y M. Regueiro. "Materias para la industria cerámica española. Situación actual y perspectivas". Bol. Soc. Esp. Cerámica y Vidrio, 45(1) 1-12 (2006).

CAPÍTULO 2
ANTECEDENTES

2. ANTECEDENTES

Los productos de pavimento gresificado se caracterizan por una alta resistencia mecánica de las piezas cocidas y una baja porosidad, debe formarse una fase vítrea con el aporte de óxidos alcalinos, pero los productos de revestimiento o azulejos requieren una alta porosidad que se consigue con la introducción de carbonato cálcico.

La preparación de la pasta se inicia con una molienda de las materias primas por vía seca (11), después viene el conformado, que se puede realizar por procesos de prensado o extrusión y posteriormente el secado, figura I 1 (12). En monococción se usan pastas con compuestos que no se descomponen y con pocos carbonatos, además sin sulfatos ni carbón.

Una cerámica densa y resistente puede obtenerse durante el cocido sin fusión completa (800-1.400°C) el vidrio líquido fluye hacia los poros y cuando un fundente, como los feldespatos, se mezcla con arcilla, se forma un vidrio que tiene un punto de fusión bajo. A 1.000°C se experimenta cambios, variaciones estructurales sin nuevos enlaces, de estado sólido-líquido y líquido-gas, y de sinterización hacia un estado de máxima compacidad (12). Las suspensiones concentradas de arcilla en agua depende de la desfloculación para bajar la viscosidad, actualmente se usan carbonatos sódicos, fosfatos, silicatos y sosa cáustica.

Al desflocular las partículas no se aglomeran debido al elevado potencial de repulsión y se requiere poca cantidad de agua para que la masa fluya, el aumento de CO_3Ca dificulta la desfloculación, ya que las sales solubles, los cationes y sulfatos, actúan como floculantes.

Actualmente se usan desgrasantes, como el cuarzo, para disminuir la plasticidad y la contracción en el secado. El prensado es un método utilizado en la fabricación de piezas cerámicas, en el secado las partículas se acercan produciéndose la contracción máxima o humedad crítica, cuando el exterior ya no está húmedo (13).

En piezas moldeadas la contracción lineal presenta un rango entre el 3% y el 8%, y en las piezas conformadas por prensado la humedad se sitúa en la humedad crítica. Al terminar la contracción el resto del agua se elimina fácilmente con secado lento, sin riesgo de que se produzcan defectos (13). Los fundentes (feldespato o cuarzo) son formadores de fase líquida, mejoran la compacidad de las arcillas, disminuyen la pérdida por calcinación, reducen

la absorción de agua y la contracción. Los parámetros característicos del comportamiento de las arcillas españolas en cocción blanca a 1.100°C son: contracción lineal de 2 a 6% y absorción de agua de 8 a 11%; a 1.200°C: contracción de 5 a 9% y absorción de 1 a 6% (14).

En la dilatación térmica de los sólidos una alta porosidad confiere a las piezas cocidas un coeficiente de dilatación lineal (α) bajo, éste aumenta con la montmorillonita (12).

2.1. ARCILLAS CERÁMICAS

Las arcillas son las materias primas plásticas para la industria cerámica, pero se utilizan también materias primas no plásticas o desgrasantes en la industria cerámica, como el cuarzo, los feldespatos, el carbonato de calcio o el talco.

Las arcillas industriales se clasifican en arcillas rojas, arcillas de cocción blancas y las arcillas especiales son las bentonitas-esmectitas y la sepiolita (véase la figura II 1). Las arcillas rojas tienen aplicación en la cerámica estructural (ladrillos y tejas), baldosas cerámicas y alfarería. Las arcillas de cocción blancas se emplean en baldosas cerámicas y en lozas (arcilla, caolín y cuarzo), así el caolín con cuarzo se usa en la cerámica vidriada fabricada en Paterna, Manises y Talavera, recubiertas de esmalte transparente u opaco de estaño blanco; estas arcillas blancas también se usan en porcelanas (caolín, cuarzo y feldespato), mezclando el caolín con un 25% de feldespato y menos del 1% de Fe_2O_3 , son importantes las de Sévres y, en España, las de Alcora y La Cartuja. También los caolines se emplean para fibra de vidrio y en la industria del papel.

Siguiendo en la gama de productos utilizando la arcilla blanca, tenemos las baldosas de baja porosidad tales como el gres esmaltado o el gres porcelánico, a partir de arcillas illítico-caoliníticas muy plásticas con bajo contenido en óxido de hierro (arcillas blancas grasas llamadas comúnmente "ball clays") y feldespatos (24), las plagioclasas no se utilizan en la industria cerámica.

Por otra parte, las arcillas refractarias (resistentes a la temperatura) también se usan en baldosas cerámicas de gres impermeable. Finalmente las arcillas especiales como las bentonitas y sepiolitas se utilizan poco en industria cerámica pero tienen aplicación en la industria de absorbentes y medio ambiente.

Las baldosas cerámicas de arcillas rojas representan actualmente el 75% de la producción nacional (23) y se formulan a partir de arcillas rojas extraídas de yacimientos cercanos, ya que la incidencia del coste del transporte sobre el precio final de la arcilla es determinante, además estos yacimientos presentan una variabilidad intrínseca y para obtener una calidad constante es necesario proceder al mezclado y homogeneización de las diferentes capas de arcilla.

Para el gres se utilizan arcillas illítico-caoliníticas para disminuir fundencia y aumentar desfloculación, con escasa montmorillonita (<10-15%) y Fe_2O_3 <15%; el objetivo es también obtener pastas cerámicas capaces de adquirir impermeabilidad por cocción, sin necesidad de esmaltes o cubiertas vidriadas (pueden estar recubiertas por un barniz o vidriado con sales) y poseen alta resistencia al ataque por ácidos.

Al margen de las arcillas cerámicas de la Campiña, constituidas por las margas azules, en Sierra Morena consideramos unas lutitas arcillosas que destacan por sus expectativas y que son las Namurienses o lutitas abigarradas entre las calizas y el Culm (carbonífero inferior), explotadas desde la antigüedad para cerámica. Se encuentran en el entorno del río Guadiato; son de sedimentación marina somera de plataforma continental y está constituido por cuarcitas, carbonatos y lutita. Existió un enriquecimiento de caolinita y algo de montmorillonita, aunque domina la illita y debido a la diagénesis se produce un aumento de tamaño de grano. El contenido en alúmina (Al_2O_3) no llega a la cuarta parte y el de sílice (SiO_2) es el 50%.

2.2. PANORAMA DE LOS MINERALES DE ARCILLA

No se publican estadísticas de la producción mundial de arcillas, sólo de caolines y en algunos países occidentales dan detalle de la extracción de arcillas. En España la principal aplicación de la arcilla es la elaboración de productos cerámicos, por lo que suelen ser objeto de explotación industrial en gran escala. Los datos de la industria cerámica en España, que duplican la producción de EEUU, muestran un espectacular crecimiento que tuvo lugar desde la segunda mitad de los 90, en particular en productos relacionados con la construcción, como baldosas cerámicas o ladrillos y tejas, impulsados por una frenética actividad en el sector industrial. Sin embargo con el comienzo del siglo XXI, el modelo cerámico español muestra claros síntomas de agotamiento (24) como consecuencia del gran aumento de la producción en China, Brasil, Iran, Turquía y Vietnam. En el caso de

Brasil ya esta superando a España como segundo productor mundial de baldosas cerámicas.

El valor de la producción superó hace cinco años la cifra de 12.000 M euros, más del 1% del PIB, dando empleo a alrededor de 100.000 personas en unas 2.600 empresas, la construcción de viviendas ha sido el motor de la demanda con 700.000 viviendas construidas anualmente (24). Esta era la situación actual hasta la crisis de la construcción y de la economía española del último bienio.

La producción nacional de arcilla roja asciende desde hace diez años a 30 Mt, con un valor total de 100 MEuros, 32 Mt en el año 2007 (www.igme.es/internet/PanoramaMinero/pm_junio07/ARCILLAS07.pdf). De ellas la producción de *arcillas rojas para tejas y ladrillos* asciende a 22 Mt (74% del total de arcilla roja en 2007, según la Estadística Minera, www.igme.es) con un valor de 70 MEuros, cifra que se multiplica por seis acabado el tratamiento del producto cocido, las explotaciones se encuentran situadas prácticamente en todo el país en la proximidad de las fábricas, dado que el valor de la materia prima no permite un transporte largo, las principales provincias son: Toledo (15%), Barcelona (10%), Valencia (8%), Alicante (7%) y Jaén (4%).

En cuanto a las *arcillas rojas para revestimientos y pavimentos cerámicos*, la producción española es de 8 Mt al año (24% del total, incluyendo el pequeño uso en cementos). El principal productor es *Arcitras*, con 3 Mt/año, en San Juan de Moro (Castellón) y Galve (Teruel), con 70 Mt de reservas. Unas veinte compañías completan el resto de la producción y poseen plantas que tratan producciones de 300.000 t al año como máximo.

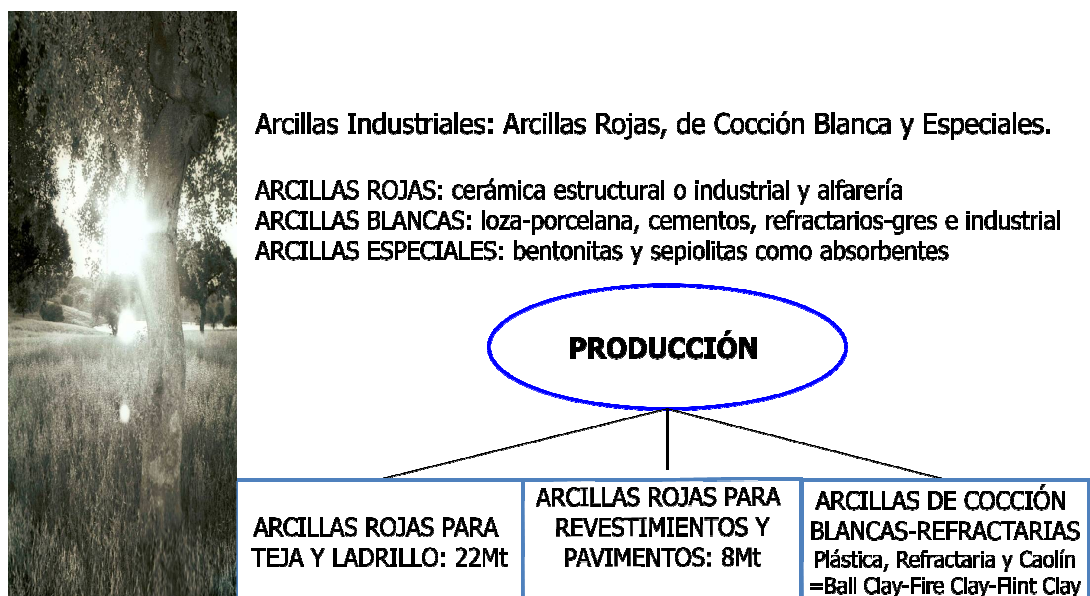
Las *arcillas de cocción blanca o refractarias* se utilizan en las pastas de diversos sectores cerámicos: pavimentos y revestimientos cerámicos (435.000 t/año), y pasta porcelánica (10.000 t/año), si bien también se usan como arcillas de pasta rústica (90.000 t/año), pastas de loza y porcelana (4.000 t/año), pasta sanitaria (8.000 t/año) y arcillas refractarias especiales en esmaltes engobes (3.500 t/año). El consumo total de arcillas refractarias en España alcanza las 700.000 t/año, con un valor mínimo de 60 euros la tonelada.

Las *arcillas rojas* se clasifican en fundentes y refractarias; las fundentes de bajo contenido en carbonato cálcico se suelen utilizar en pavimentos de monococción, mientras que las de alto contenido se emplean en ladrillos, tejas y bloques, también en revestimientos porosos de monococción (a 1000° C). Las arcillas refractarias rojas se usan en la fabricación de

pavimentos de extrusión esmaltados (www.igme.es). Estas arcillas refractarias se explotan en Teruel en los mismos yacimientos de arcillas de cocción blancas y el contenido en óxidos de hierro hace que los tonos tras la cocción sean rojizos.

España produce 0'5 Mt de *arcillas blancas* que son de baja proporción de hierro (<3%) y alta de caolinita, se utilizan para pastas de loza, aislantes, crisoles, cerámica sanitaria y baldosas. Se clasifican en *arcillas plásticas* (Ball Clays, con algo de montmorillonita; las de cocción blanca después de la cocción producen materiales porosos, se emplean en los soportes de los pavimentos y lozas y porcelanas), *arcillas refractarias* (Fire Clays, con bajo óxido e hidróxido de hierro y alto porcentaje de aluminio; soportan temperaturas de más de 1.500°C, asociadas a depósitos de carbón y se usan en cementos) y los *caolines* (Flint Clays, caolinita con bajo contenido en óxido de hierro y otros materiales fundentes; duros, abrasivos y de fractura concóidea que se aplican en refractarios).

Figura II 1. Arcillas industriales



2.2.1. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN CON ARCILLA COCIDA

La producción actual de ladrillos y tejas con arcilla roja ha superado los 20 Mt (29Mt en el año 2007, www.igme.es); la mayor producción pertenece a Toledo, con 3'5 Mt. Las producciones actuales habían recuperado los niveles de hace dos décadas tras la crisis de la construcción de principios de los noventa, la crisis actual todavía no se valora; en los datos del año 2006 sólo 420 empresas competitivas han podido sobrevivir, dando empleo a 14.000 personas (de ellas, 700 empleadas en canteras), con un valor de la producción de 420 MEuros que ascendía a 30 Mt en el año 2006 (www.hispalyt.es).

El 60% de las compañías (80% de la producción) están asociadas en *Hyspalit*. El *Grupo Uralita* consume 180.000 t de arcillas rojas y controla *Cetem* (Valencia), *Nueva Cerámica* en Alfaro (La Rioja) y *Productos Cerámicos Borja* (Alicante). El grupo francés *Poliet* con una capacidad de consumo de 140.000 t en dos fábricas de ladrillos, *Cerámicas del Ter* (Girona) y Alicante. El grupo francés, *Imetal*, consume 70.000 t en *Cerámica Collado* en Almansa (Albacete). La última década se han sumado la empresa inglesa *Watts Blake Bearne y CO (WBB España) subsidiaria del grupo belga Sibelco*, y la sueca *Optiroc España, SL (maxit group)*.

Con consumos de más de 100.000 t/año están: *Hnos. Díaz Redondo*, *Hnos. Ortiz Bravo*, *Ceratres* y *Jumisa* en Sagra (Toledo), *Proceran* en Aguilar (Córdoba), *Malpesa* en Bailén (Jaén), *Almar* en Barcelona, *Tejas Borja* en Valencia y Alicante, *Rubiera* y *Cerámicas González Carreño* en León, *Cerámica Campo* en Galicia.

La tendencia previsible es la reducción de fábricas ya que todavía existen alrededor de doscientos hornos *Hoffman* en pequeñas plantas. Entre los costos de fabricación destacan el energético, que alcanza el 30%, y la arcilla, que supone un 20%.

Como se ha comentado, el consumo de arcilla roja en España es de 22 Mt y se fabrican 20 Mt de productos cocidos: en Andalucía (4'5 Mt), Castilla-La Mancha (3 Mt), Cataluña (3 Mt), Valencia (3 Mt), Castilla-León (2 Mt), Galicia (1'5 Mt)...

Más de 20.000 trabajadores en unos 3.000 alfares mantienen la herencia de la cerámica tradicional española: *Manises* (Valencia), *Talavera de la Reina* y *Puente del Arzobispo* (Toledo), *La Bisbal* (Barcelona), *La Rambla* (Córdoba) y *Bailén* (Jaén).

2.2.2. PAVIMENTOS CERÁMICOS

La producción mundial anual de baldosas cerámicas ha alcanzado los 3.000 millones de m². El ranking esta encabezado por China, con Brasil y España compartiendo el segundo lugar (aunque el presente siglo se inicia con Italia el 19%, China 15%, España 13% y Brasil 11% de la producción mundial). La producción de España dobla el consumo interno y ello representa casi el 2% del total de las exportaciones españolas.

España, con una producción total en el año 2007 de 585 Mm² y un valor de 4166 millones de dólares, se encuentra con capacidad plena, con el 50% de producción de revestimiento y un 50% de pavimentos, exportandose la mitad de la producción y de ella un 65% a Europa, un 10% a Oriente Medio y sólo un 6% a EEUU (Fuente ASCER 1997-2009, www.igme.es).

Actualmente existen más de doscientas empresas que producen baldosas cerámicas y están concentradas (el 80%) en la provincia de Castellón. Este sector emplea a 20.000 trabajadores directos y más de 5.000 indirectos; la compañía media posee 80 trabajadores pero actualmente esta sufriendo la crisis nacional.

El 93% de la producción española de baldosas son pavimentos y revestimientos esmaltados; el 7% restante son pavimentos sin esmaltar, incluido el gres rústico.

Las baldosas españolas se caracterizan por el conformado (el prensado en seco representa el 94% de la producción) y el color (el 88% de las baldosas se produce con pastas rojas). Las baldosas porosas (>10%) se suelen utilizar en revestimientos, mientras que los soportes de baja porosidad se emplean en pavimentos.

La fabricación por bicocción está siendo sustituida por la monococción; también los revestimientos (48-72h para cocer el soporte y 10h para el esmalte) son sustituidos por la bicocción rápida (50 min. para el soporte).

2.3. PLANTEAMIENTO DEL PRODUCTO CERÁMICO

Los productos de pavimento gresificado se caracterizan por presentar una alta resistencia mecánica de las piezas cocidas y una baja porosidad; para ello durante la cocción debe formarse una fase vítrea, la cual se logra mediante el aporte de óxidos alcalinos, arcillas o feldespatos. El sistema de monococción de esmalte y soporte ha aumentado la producción de baldosas para pavimento un 50%. La molienda realizada por vía húmeda permite una molienda más fina, ya que el polvo atomizado obtenido es más apto para la carga de prensas (12), la molienda seca y la extrusión se emplean menos para el gres por no eliminar las impurezas y por la contracción en el secado.

Los productos de revestimiento o azulejos requieren baja contracción en cocción, una alta porosidad que a veces necesita la introducción de un 5% de carbonato cálcico, que forma silicatos de aluminio cálcico (24) (12).

La preparación de la pasta se inicia con una molienda de las materias primas por vía seca o por vía húmeda. Después viene el conformado, que se puede realizar por procesos de prensado y extrusión, posteriormente el secado. La cocción del soporte puede realizarse simultáneamente con la del esmalte; en esta monococción se usan pastas con compuestos que no se descomponen y con pocos carbonatos, además sin impurezas de sulfatos ni carbón (12).

La clasificación europea EN-87 (12) para baldosas cerámicas se realiza en función de su capacidad de absorción de agua (AA), de si están esmaltadas y de la conformación de la pieza. Grupos de prensado importantes son:

B-III GL: Baldosas cerámicas *prensadas* vidriadas de *alta* absorción de agua ($AA > 10\%$).

B-IIa GL: Baldosas cerámicas *prensadas* vidriadas de *mediana* absorción de agua ($3 < AA < 6$). También el gres o pavimento gresificado.

B-I GL: Baldosas cerámicas *prensadas* vidriadas de *baja* absorción de agua ($AA < 3\%$). También el gres o pavimento gresificado.

B-IU GL: Baldosas cerámicas *prensadas* no vidriadas de *baja* absorción de agua ($AA < 3\%$). También el gres porcelánico de vía húmeda.

A-IU GL y A-IIaU GL: Gres *extruido* rústico de vía seca no vidriado, monococción, que puede también esmaltarse, incluido dentro de los grupos de baldosas cerámicas extruidas no vidriadas de *baja* ($AA < 3\%$) y *media* ($3 < AA < 6$) absorción de agua.

2.3.1. CONFORMADO DE LAS CERÁMICAS

Cuando se mezcla el agua y la arcilla (en tamaños máximos de 50 micras) se forma una masa plástica a la cual puede dársele la forma deseada, después es secada y cocida para aumentar su resistencia.

Los ladrillos se fabrican con la técnica más común de conformación hidrolástica o extrusión, en la cual una masa espesa de arcilla es forzada a través de un orificio de una matriz que tiene la sección deseada.

La barbotina es una suspensión muy fluida de arcilla, se vierte en un molde poroso y el agua de la suspensión es absorbida, dejando detrás una capa sólida en las paredes del molde. Cuando la pieza se seca, se contrae y se despegas del molde. La pieza moldeada debe estar sin burbujas y tener poca contracción durante el secado (más agua da mayor contracción). En el secado la distancia entre partículas disminuye; en la parte interna se realiza por difusión de moléculas de agua a superficie, donde ocurre la evaporación, que debe ser lenta. La formación de defectos es más pronunciada en las piezas de gran espesor.

La arcilla funde en un intervalo de temperaturas. Una cerámica densa y resistente puede obtenerse durante el cocido sin fusión completa (800-1.400°C) de manera que la forma deseada se conserve; el vidrio líquido fluye hacia los poros, pero se pueden introducir defectos por tensiones a partir de la contracción no uniforme. Cuando un fundente, como los feldespatos, se mezcla con arcilla, se forma un vidrio que tiene un punto de fusión bajo.

Las cerámicas refractarias tienen la capacidad de soportar altas temperaturas sin fundir o descomponerse, y permanecen inertes sin reaccionar cuando son expuestas a medios agresivos o térmicos. Al cocer, las partículas pequeñas son las responsables de la formación de una fase de unión; la porosidad debe ser reducida (10%) para producir un ladrillo refractario y así la resistencia mecánica y la resistencia al ataque corrosivo aumentan (12). Los ingredientes de las arcillas refractarias son: sílice (50-70%), alúmina (25-45%) y MgO, Fe₂O₃ y TiO₂, con un 1% cada uno (véase la figura II 2). La más alta temperatura que se puede alcanzar sin que se forme líquido es 1.600°C; por debajo, las fases en equilibrio son mullita y sílice. Las pérdidas por calcinación se deben a la descomposición de los minerales arcillosos y carbonatos.

COMPOSICIÓN DE LAS ARCILLAS REFRACTARIAS

La porosidad debe ser reducida, sin CO_3Ca . Soportan altas temperaturas .

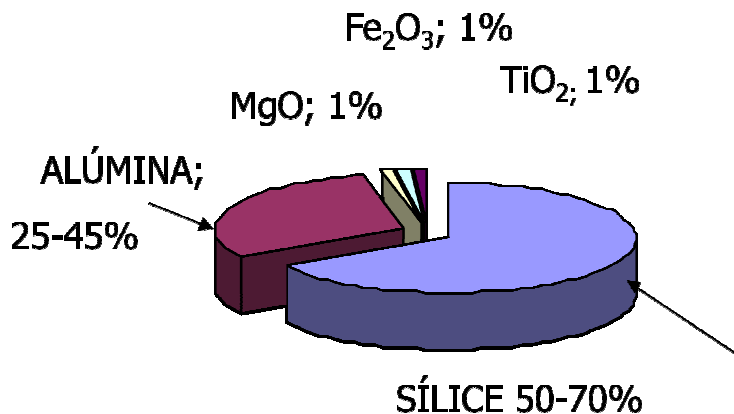


Figura II 2. Arcillas refractarias

2.3.2. ACCIÓN DEL CALOR SOBRE LAS ARCILLAS

Cuando la pasta de arcilla se calienta a la temperatura de 1.000°C experimenta cambios: químicos, permanentes, de inversión (variaciones estructurales sin nuevos enlaces), de estado sólido-líquido y líquido-gas, y de sinterización (modificación de propiedades evolucionando hacia un estado de máxima compacidad). Destacaremos:

- Oxidación de la materia orgánica.
- Descomposición de compuestos con oxígeno.
- Deshidroxilación de la arcilla, dando lugar a una estructura amorfa más desordenada por pérdida de OH^- en forma de vapor de agua.
- Cristalización: el producto amorfo comienza a cristalizar.
- Soluciones sólidas: los cristales de materiales diferentes pero estructura similar reaccionan entre sí, formando una solución sólida.
- La caolinita no experimenta cambios hasta los 500°C , eliminación de iones OH^- , a los 950°C se descompone recristalizando en $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ (Espinela, cúbica, y Mullita, ortorrómbica) y fases amorfas; a los

1.100°C se inicia la fusión, la espinela se transforma en Mullita, que es dura, de gran resistencia y estructura cristalina alargada, esta fase cristalina (Mullita) es la que se obtiene al final del proceso de descomposición de la illita (12).

El análisis termo-gravimétrico sería necesario realizarlo en una futura fase de desarrollo, consiste en determina la pérdida de peso que sufre la arcilla en función de la modificación de la temperatura y/o tiempo a temperatura constante (6).

2.3.3. COMPORTAMIENTO DE LAS ARCILLAS EN FÁBRICA

El control del comportamiento es: a) *Preparación de la pasta por vía seca o húmeda* (desfloculación). b) *Conformado*: plasticidad y compacidad. c) *Secado*: humedad de equilibrio y contracción verde a seco. d) *Cocción*: contracción seco a cocido y absorción de agua.

La vía húmeda produce como resultado las barbotinas cerámicas que son suspensiones concentradas de arcilla en agua, y depende de la desfloculación (*floculación*: aglomeración de arcillas en suspensión que dan estructuras irregulares). El 1% en peso de desfloculantes suele utilizarse para bajar la viscosidad como carbonatos sódicos, fosfatos, silicatos y sosa cáustica. Al desflocular las partículas no se aglomeran debido al elevado potencial de repulsión y se requiere poca cantidad de agua para que la masa fluya.

Aquellas arcillas que presentan mala compactación o un tamaño de partícula pequeño (<1micra) no permiten obtener suspensiones con un contenido en sólidos elevado. El aumento de CO_3Ca dificulta la desfloculación, ya que las sales solubles, los sulfatos y los cationes (como el calcio), actúan como floculantes. Los desfloculantes utilizados son: SiO_4Na_2 , CO_3Na_2 , $(\text{OH})\text{Na}$, fosfatos, calgón e incluso la materia orgánica coloidal favorece la desfloculación.

El uso de arcillas que requieren gran consumo de desfloculante (>1% en peso) para aumentar la viscosidad y que además no permiten alcanzar contenidos en sólidos elevados (>60% en peso) no es recomendable para pastas de pavimento que se procesen por vía húmeda.

Cuando una arcilla se mezcla con una cantidad de agua se obtiene una masa cohesiva que puede ser moldeada fácilmente y retener la deformación, esta propiedad se denomina plasticidad (las arcillas más plásticas soportan

deformaciones mayores) y es fundamental para el conformado sin defectos, ya que si la plasticidad es excesiva se dificulta el secado y da grietas. Se usan desgrasantes, como el cuarzo, para disminuir la plasticidad en las arcillas muy plásticas que darían gran contracción en el secado y baja compacidad.

El prensado en seco es el método utilizado en la fabricación de piezas cerámicas; en el moldeo se utiliza una humedad comprendida entre el 5% y el 8% y una presión de hasta 300 Kg/cm². Últimamente, tras la molienda húmeda, en las piezas se emplean pastas granuladas obtenidas mediante secado por atomización y también se emplea el moldeo por extrusión para baldosas rústicas no esmaltadas. El moldeo por colado sólo se emplea en piezas de geometría difícil.

La velocidad de secado disminuye a medida que aumenta la compacidad o empaquetamiento (*Compacidad*: relación entre volumen de sólidos y el volumen total moldeado; también es igual a uno menos la porosidad; y también es la relación entre densidad aparente seca y la densidad real o de las partículas sólidas. Además, en la cocción, la contracción lineal y la absorción de agua disminuyen linealmente con la compacidad de la pieza prensada.

Se ha comprobado experimentalmente que con la variación de tamaños de partícula de una materia prima es posible obtener distintas compacidades en las piezas conformadas. Así, a medida que aumenta el residuo sobre el tamiz 64 micras se obtienen valores más elevados de densidad aparente y de compacidad (las partículas gruesas, >64 micras, proporcionan una alta densidad aparente); es decir, a medida que aumenta la relación de diámetros se obtienen mezclas con mayor compacidad. Pero una elevada proporción de partículas inferiores a 5 nm no favorece una elevada compacidad y un contenido en cuarzo alto proporciona una alta densidad aparente.

El secado es necesario por que en el horno no se introducen las piezas húmedas, así una corriente de aire caliente y seco evapora primero el agua superficial, luego evapora por capilaridad con la humedad todavía alta y más tarde por difusión. Todo ello hace que todas las partículas se acerquen, estén en contacto, produciéndose la contracción máxima o límite de contracción en el punto de humedad crítica (acaba el secado por difusión) en el que todas las partículas están en contacto y termina la contracción (6).

Cuando la molienda es por vía seca se hace una etapa de secado después del moldeo, pero si es por vía húmeda se realizan dos etapas de secado: la atomización de la suspensión de las materias primas molturadas (el secado por atomización necesita el estudio del defloculante óptimo y el contenido máximo en sólidos) y el secado de la pieza moldeada.

En general, la contracción lineal está comprendida entre el 3% y el 8% para piezas moldeadas en estado plástico; en cambio, las piezas conformadas por prensado presentan valores casi nulos, inferiores al 1%, ya que la humedad de prensado se sitúa por debajo de la humedad crítica. Terminada la contracción el resto del agua se elimina fácilmente, sin riesgo de que se produzcan defectos.

La velocidad de secado es mayor con el tamaño de las partículas. Así, en las arcillas de muy alta plasticidad (baja permeabilidad), la velocidad de secado debe ser baja, porque la contracción es alta, son malas frente al secado, poseen baja compacidad y retienen agua capilar. También el caolín retiene más agua capilar, por su menor compacidad.

La humedad de equilibrio (w_e) nos indica la cantidad de agua que pueden adsorber las piezas, desde que salen del secadero hasta que entran en el horno; w_e para el prensado constante es aproximadamente nueve veces menor que el índice de plasticidad para la fabricación por extrusión.

La utilización de arcillas con contracciones superiores al 6% puede dar problemas en el secado, a no ser que se mezclen con arcillas menos plásticas o que se utilicen desgrasantes. En la cocción de arcillas es importante el margen de temperaturas en el que la contracción y la porosidad no varían.

La *absorción de agua* (AA) de la arcilla cocida depende de los minerales de la arcilla y es la ganancia en peso (%) que experimentan las piezas al introducirlas en agua en ebullición durante un periodo de 2 horas (DIN-52103).

$$AA(\%) = \frac{\text{Masa de agua absorbida}}{\text{Masa del sólido seco}} * 100$$

La porosidad abierta es la absorción de agua por la densidad aparente del sólido. La *contracción lineal* (CL), en tanto por ciento, aumenta con la temperatura hasta 1.200°C, depende de los minerales y de la compacidad de la pieza moldeada y cocida:

$$CL(\%) = \frac{L-LF}{L} * 100$$

(siendo L la longitud inicial en crudo y LF la longitud de la pieza cocida).

Los desgrasantes (feldespato, cuarzo o CO_3Ca) son formadores de fase líquida (fundentes) y aumentan la compacidad de las arcillas, también disminuyen la pérdida por calcinación y reducen la absorción de agua y la

contracción. Los parámetros característicos del comportamiento de las arcillas españolas de cocción blancas a 1.100°C son: contracción lineal de 2 a 6% y absorción de agua de 8 a 11%; a 1.200°C: contracción de 5 a 9% y absorción de 1 a 6% (a una temperatura de 850°C las arcillas de Bailén tienen una contracción del 17%, véase la figura II 3).

El contenido en cuarzo se correlaciona con la fundencia de las arcillas; las de una gran proporción de cuarzo (40%) son las que presentan una menor contracción de cocción, y que son las arcillas de compacidades más altas. El CO₃Ca aumenta la porosidad en las arcillas cocidas.

En la dilatación térmica de los sólidos una alta porosidad confiere a las piezas cocidas un coeficiente de dilatación lineal (α) bajo, este coeficiente de dilatación se incrementa si baja la caolinita de la arcilla, es decir, aumenta con la montmorillonita. También las arcillas calcáreas tienen mayor coeficiente de dilatación hasta los 400°C.

Cuando en el enfriamiento existen contracciones distintas en la arcilla de las baldosas y el esmalte-vidriado, se originan curvaturas. Cuando la arcilla contrae menos que el vidriado se curva cóncavo; si esta fuerza de tracción en el vidriado es superior a su resistencia a tracción (400 Kg/cm²) se origina una fisura que es el cuarteo. En general el coeficiente de dilatación del soporte debe ser algo mayor que el del vidriado, con objeto de que el vidriado esté sometido ligeramente a compresión. La curva dilatométrica se expresa:

$$\frac{L-L_0}{L_0} * 1000 = f(T)$$

Siendo L y L₀ las longitudes de la pieza a la temperatura T y T₀, el coeficiente de dilatación lineal (α) a una temperatura es la pendiente de la curva de dilatación a esa temperatura y suele ser constante hasta 500°C. Entre 500 y 650°C de temperatura se produce un aumento de la dilatación debido al abundante cuarzo; después se reduce este coeficiente de dilatación. El cuarzo y el óxido de hierro poseen doble dilatación que la mullita o la anortita (12).

Las propiedades de la pieza acabada y el aspecto del vidriado no resultan influenciadas por el color de cocido de la arcilla. En productos no vidriados, como el gres porcelánico, los colores finales están influidos por los óxidos colorantes de las materias primas y en general un bajo contenido en Fe₂O₃ y TiO₂ proporciona colores intensos con menor consumo de pigmento. En el producto rústico se emplean arcillas con contenidos en hierro y titanio que proporcionan colores de cocido agradables.

En las arcillas de cocción rojas el contenido de Fe_2O_3 oscila entre el 5% y el 8%; todos los compuestos de hierro se transforman en oligisto cuando la arcilla se cuece en atmósfera oxidante a temperaturas superiores a 300°C y el color de la arcilla cuando es cocida por debajo del punto de vitrificación es rojo, dependiendo de su contenido en hierro, ver figura II 3. A 1.100°C el color cambia de rojo a marrón oscuro. La presencia de óxido de titanio tiende a intensificar el color debido a otros elementos y el grado de blancura aumenta con la disminución del contenido en hierro y el incremento de la caolinita.

Figura II 3. Alimentación de paquetes



2.4. REFERENCIAS

- [1].- A. Daza Sánchez. Aportaciones de la Geofísica a la Geotecnia. Seminario sobre la utilización de las diagráfias en minería. Ed. T. Alonso, Pres. Fernando Pendas. Escuela Superior de Ingenieros de Minas de Oviedo. Fundación "Luis Fernández de Velasco". 1986.

- [2].- I.G.M.E. Mapa de Rocas Industriales. 1976. Hoja 69 (4-9) Pozoblanco 1:200.000 (Compañía General de Sondeos para el IGME).
- [3].- L. Mallada Pueyo. Memoria descriptiva de la Cuenca Carbonífera de Belmez. I.G.M.E. XXVI-Tomo VI. 1900.
- [4].-O. Apalategui, F. Roldan, P. Higuera et al. Mapa Geológico de España. Hojas 879 (Peñarroya) y 880 (Espiel). IGME 1:50.000. 1985. (Realizado por INGEMISA para el I.G.M.E.).
- [5].- F. J. Roldan et al. (Ingemisa). Mapa y memoria explicativa de la hoja 988 (Puente Genil) y 966 (Montilla). Mapa Geológico. 1:50.000 IGME, 1988.
- [6].- A. Daza Sánchez. Investigación para la caracterización y aplicaciones de las lutitas arcillosas de la Cuenca del Guadiato en materiales de construcción y obra civil. Subvencionada por el Ministerio de Fomento (BOE 20-5-2000). 85p.; Grupo RNM244 (UCO) 2001. Colabora el ITC (Informe C001230, Castellón, 18p.): J. García-Ten y otros.
- [7].- Catálogo de las arcillas portuguesas utilizadas en la industria cerámica. Ministerio Industria y Energía. Dirección G. Geología y Minas. 175p. 1985.
- [8].- F. Pérez Lorente. Geología de la Zona de Ossa-Morena al norte de Córdoba (Belmez-Villaviciosa-Pozoblanco). 1979. Tesis doctoral nº 281 Universidad de Granada.
- [9].- W. E. Petrascheck. Yacimientos y Criaderos. Omega. DL B-16260-1965.
- [10].- F.J. Ayala Carcedo y otros. Mapa de arcillas expansivas de España. 1:1.000.000. I.G.M.E. 1987. (Realiza CEDEX- I.G.M.E.).
- [11].- P. J. Sánchez Soto. "Efecto del tratamiento mecánico por molienda en las propiedades texturales de pirofilita". Bol. Soc. Esp. Ceram. Vol. 48, nº2, p 59-68. Marzo-Abril 2009.
- [12].- A. Barba, C. Feliu, J. García-Ten et al. Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas. Castellón: Instituto de Tecnología Cerámica- AICE, 1997. 292p.; ISBN 84-923176-0-4.
- [13].- A. Daza Sánchez. Prospección minera de arcillas en tres zonas de Aguilar de la Frontera-Puente Genil (Córdoba). Para la empresa Proceran. OTRI-UCO. Resolución Rectoral 8/6/2005. XLIX Congreso de la Soc. Esp. Cerámica y V. (SECV), 2009 Linares.

- [14].- J. Coroado, J. Marqués et al. "Propiedades cerámicas de las arcillas de la cantera de Asseiceira (Tomar, Portugal)". Mater. Construcc. Vol. 55. nº279. p 5-16. 2005.
- [15].- A. Binley y A. Kemna, DC Resistivity and Induced Polarization Methods. Hydrogeophysics. Vol. 50. Springer Netherlands. ISBN: 978-1-4020-3101-4. pp 129-156. 2005.
- [16].- E. Orellana. Prospección Geoeléctrica. Ed. Paraninfo. ISBN 84-283-1153-6. DL M-35184-1981.
- [17].- A. López Hidalgo, M. H. Loke, G. O. Fanton, E. C. Rubí. Técnicas prácticas para investigación de resistividad en 2D y 3D (Tomografía Eléctrica). 23/6/2009. <http://www.geoelectrical.com/Articulo.pdf>
- [18].- A. Daza Sánchez. Nueva clasificación geomecánica. Revista Consejo Superior Ing. T. Minas "Minería y Siderurgia" . 2º trimestre 1991. Madrid.
- [19].- A. Daza Sánchez y J. Ayuso Muñoz. "Nueva norma de ensayo de consolidación del terreno con edómetro". Revista ENERGÍA Y MINAS. Edita: Consejo Superior de Ingenieros T. de Minas. Madrid. Vol. 7, año 2009. P. 28-32. ISSN 1699-7743.
- [20].- A. Daza Sánchez. Geotecnia del terreno y del macizo rocoso. Ed. Antonio Daza me1dasaa@uco.es Depósito Legal CO-1557-03. 434pgs en 28 epígrafes. 12 enero 2004. ISBN nº 84-688-4703-8
- [21].- J.A. Jiménez Salas et al. Geotecnia y Cimientos. Ed.Rueda.1975.
- [22].- S. Guggenheim, and R.T. Martin. "Definition of Clay and Mineral: Join Report of the AIPEA Nomenclature and CMS Nomenclature Committees". Clays Clay Miner., 43, 255-256 (1995).
- [23].- L.A. Díaz Rodríguez y R. Torrecillas, (Instituto N. del Carbón)."Arcillas cerámicas: una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones". Bol. Soc. Esp. Cerámica y V. 41 (5) 459-470 (2002).
- [24].- E. Sanchez, J. García-Ten y M. Regueiro. "Materias para la industria cerámica española. Situación actual y perspectivas". Bol. Soc. Esp. Ceramica y Vidrio, 45(1) 1-12 (2006).

CAPÍTULO 3
GEOLOGÍA DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

3. GEOLOGÍA DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

3.1. ESTRUCTURA GEOLÓGICA DE SIERRA MORENA

En la Zona Ossa-Morena se encuentra la Faja de Cizalla Badajoz-Córdoba que se interpreta como el contacto cortical con la Zona Centro Ibérica dentro del Macizo Ibérico (figura III 1). Este sector cortical ha sido dividido estructuralmente en varios dominios separados entre sí por importantes fallas en dirección N130E, que en la Orogenia Hercínica actuaron como una faja de cizalla transcurrente siniestral, que además de acomodar desplazamientos relativos del orden de los 200km, lo que implica longitudes de 4000km y profundidades de 1000km, entre los dos bloques corticales de uno y otro lado, originaron importantes sistemas de fracturas que controlaban la tectónica de toda la zona y la formación de cuencas, como la Cuenca Carbonífera del Guadiato. También desarrolló acortamientos transversales en todo el conjunto debido a los movimientos transcurrente – transpresivos (33) (25), de todo el sistema en el postcarbonífero.

3.1.1. INTRODUCCIÓN A LA ZONA DE OSSA-MORENA (33)

La Faja de Cizalla Badajoz-Córdoba se puede dividir en tres dominios [Delgado Quesada, M. et al, 1977 (64) y Apalategui, O. et al, 1983 (27)], separados entre sí por importantes fallas en dirección N130E que funcionaron como desgarres siniestros durante el paleozoico superior (figura III 2). De SO a NE podremos definir el Dominio Sierra Albarrana separado al SO por la Falla de Malcocinado y al NE por la Falla de Azuaga. Estructuralmente constituye un sinclinal formado de muro a techo por cuarcitas, paragneis, micaesquistos y filitas de la Formación Azuaga, del Paleozoico Inferior.

A continuación, en el centro de la Faja de Cizalla, y separado entre la Falla de Azuaga y la Falla de Villaharta-Guadiato al NE, encontramos el Dominio de Valencia de las Torres-Cerro Muriano, conocido también como Corredor Blastomilonítico, formado en origen por materiales del Proterozoico Superior y representado hoy por los Neises de Azuaga, de Doña Rama y de Villanueva del Rey, y por otro grupo autóctono correlacionable con el Grupo de Sierra Albarrana, con secuencia estratigráfica contraria, localizable en El

Hoyo y la Fuente del Corcho de Belmez.

Más hacia el NE, se define el Dominio Obejo-Valsequillo, cuya sedimentación, durante todo el Paleozoico Superior, le da una afinidad Centro Ibérica; sin embargo existe un sustrato alóctono Precámbrico-Ordovícico (Unidad Obejo-Espiel) integrado por rocas metamórficas de clara afinidad Ossa Morena: filitas de la Formación Azuaga cabalgando al Culm del Guadarbarbo-El Valle y el Peñón de Peñarroya (27).

Dentro de la Faja de Cizalla y debido al rift-graben se generan los puntos calientes saliendo la cámara magmática, así aparece el Eje Magmático de Villaviciosa, prolongación de la Falla de Azuaga y debido al movimiento de esta falla con la de Valdeladrillo al norte, se inicia el emplazamiento de intrusiones Visense Superior al Westfaliense, incluso algunas deben ser consideradas posterior a las fases de plegamientos hercínicos, con la intrusión del granito de La Cardenosa, después el plutonismo básico de Posadilla-Ojuelos-La Coronada que cortan el carbonífero inferior ya plegado (áreas de Villaviciosa-Villanueva del Rey), junto con depósitos volcano-sedimentarios de sulfuros polimetálicos con ascenso hidrotermal desde los escalones de la dorsal lenta, luego la intrusión del granito de la Cañada del Gamo y la milonitización relacionada con la falla de Azuaga, le sigue los granitoides ácidos de Villaviciosa: Castripicón, Peñas Pardas y relleno de los diques del Trabuco. Por último el emplazamiento del stok de los Arenales, que sella fracturas tardías y el subvolcánico básico tardío de Doña Rama-El Alcornocal, (con filones de cobre-oro y barita-fluorita) cuya relación con el Eje es dudosa, posible "rifting" Triásico. Entre las intrusiones del Eje aparecen depósitos del Westfaliense dispuestos en alargadas cuencas tectónicas y cortadas por granitoides (La Gamonosa) y el plutón de los Arenales que es posterior al Westfaliense (posible rifting Triásico).

La emisiones básicas de peridotitas y estibina justo al sur del peñón de Peñarroya y la intrusión "sill" de diabasas, en el Westfaliense de la capa de carbón Cervantes, que entró y fluyó desde el afloramiento del carbón, coquizándolo en su flanco norte, debieron darse una vez acabado el Tardihercínico-fase Palatina y ya en el Triásico Medio-Superior. Todo ello fue plegado nuevamente por la orogenia Alpina. Además la presencia de gabros con serpentina en la cuarcita armoricana de Peñaladrones (Belmez) puede significar que la tectónica del Mesozoico se dejó sentir en la Cuenca del Guadiato, también la elevación de Sierra Palacios, el cerro del Castillo de Belmez y la escama María en Peñarroya, parecen debidas a movimientos orogénicos más recientes como los Alpinos.

Las fallas de Malcocinado, Azuaga, y Valdeladrillo (Villaharta-Guadiato) son grandes fallas longitudinales transcurrentes de la deformación hercínica,

de dirección N130E, de cientos de Kms. de recorrido, son fallas transformantes (no generan ni destruyen, solo desplazan una placa con respecto a otra con cabalgamientos y conectan con las dorsales ortogonalmente) que tienen sistemas satélites de fracturas transversales asociadas al cambio de rumbo de la transformante.

3.1.2. TECTÓNICA DEL NOROESTE DE CÓRDOBA (33)

Se reconoce la existencia de una cadena Pre-hercínica que tuvo su desarrollo durante el Proterozoico Superior, reconocida por una esquistosidad de flujo en los materiales estratificados y caracterizada por el desarrollo de pliegues cilíndricos, observable en el Grupo de Sierra Albarrana en El Hoyo, y por un metamorfismo.

El Ciclo Hercínico comenzaría con separación extensional del continente pérmico "Pangea" (Rifting-acreción-dorsal) que originaría la formación de las cuencas sedimentarias que funcionarían durante todo el Paleozoico Inferior. El primer episodio de deformación hercínica de carácter dúctil y de tipo transcurrente afecta principalmente a las rocas del Corredor Blastomilonítico, asociándosele una esquistosidad (NO – SE) de plano axial en el Estrato Cristalino (precámbrico). Algo posterior, más frágiles y de menor temperatura se desarrolla una milonitización, originada por el funcionamiento de las grandes estructuras de salto en dirección y de componente compresiva, que causaron también un acortamiento transversal en dirección SO – NE. Es la fase de choque océano-continente (subducción-convergente):

- Sistema de fallas longitudinales inversas y sinestrosas N130E (estructuras cabalgantes Cadomienses reactivadas), que desplazaron el sur del Corredor Blastomilonítico más de 200 Kms. desde el NO.
- Cuencas reguladas por la tectónica de estos movimientos transcurrentes: bien transpresivos o transtensivos (fases extensivas), como es la Cuenca Carbonífera del Guadiato y otras menores (Casas de la Reina, Guadalcanal, Valdeinfierno, Berlanga, Benajarafe y Los Santos de Maimona).
- Pliegues asimétricos N130E junto con cabalgamientos-escamas (producidos por la componente transpresiva) y desarrollo de esquistosidad de plano axial (NE – SO), transversal, que forman la disyunción "pencil" del Culm, persistente hasta la crenulación o microplegado (subvertical o buzante al Sur y pliegues isoclinales).

- Sistemas de fallas transversales (N60E) con juego siniestro, asociadas y posteriores a las grandes fallas longitudinales. También existen desgarres dextros (N180) observables en Peñarroya-Espiel.

Se define en general una estructura en flor positiva de dirección NO-SE, mitad suroccidental vergente al SO y en su mitad nororiental todas las estructuras son vergentes al NE, generando una disposición transversal en abanico (figura III 3). En definitiva la Faja de Cizalla Badajoz-Córdoba representaría el eje axial de la cadena hercínica.

Así durante todo el carbonífero se fueron abriendo en el entorno inmediato del Corredor Blastomilonítico diversas cuencas en relación directa con las grandes fallas transformantes de dirección N130E. Este tipo de cuencas se originan como consecuencia de que entre dos fallas, más o menos paralelas, que presentan un cierto enfrentamiento (sistema transcurrente-transpresivo-transtensivo) se individualizan áreas de cizalla que por efecto de una ondulación del borde o irregularidades en la falla transcurrente se producen alternadamente huecos (depocentros sedimentarios) de origen transtensivo (distensión), junto con acortamientos (pliegues y cabalgamientos) transpresivo (compresión), ver figura III 4.

En la zona al oeste de Peñarroya el sinclinal Westfaliense cabecea y bascula al oeste y en la zona al este de Belmez las estructuras basculan hacia el este, como si entre ambas poblaciones existiese una divisoria de agua subterránea. El Dr. Roberto Wagner (comentario personal) distingue dos depocentros diferentes en la sedimentación de los depósitos de carbón en la Cuenca Carbonífera del Guadiato: uno, primero, en la zona El Porvenir-Peñarroya, la segunda área de sedimentación, posterior, instalándose en las inmediaciones de Belmez y extendiéndose unos 50 Kms. hacia el ESE.

Estas cuencas eran a su vez controladas por cabalgamientos en una secuencia de piggi back, que mientras las emplazaban sobre las adyacentes iban siendo progresivamente emergidas (cuencas soportadas por cabalgamientos). Estos cabalgamientos seguramente se desarrollarían sobre lo que antes eran las fallas normales que delimitaban estas cuencas (tectónica de inversión). La inversión tectónica está reconocida en la Zona Subportuguesa, donde se pasa de un régimen extensional producido hasta el Carbonífero Inferior a un régimen convergente, coincidiendo con los primeros depósitos del Culm, provocando plegamientos y fracturación de los materiales como respuesta a un acortamiento progresivo, desde el suroeste. Este acortamiento podía ser debido a la subducción de la Zona Subportuguesa bajo Ossa-Morena, esta subducción tiene forma oblicua por la acomodación de esfuerzos.

3.1.3. SISTEMA DE FALLAS TRANSVERSALES (33)

En relación con las grandes fallas longitudinales siniestrosas (N130E) se originan, por cizalla, una serie de fracturas de desgarre transversales que aparecen como flexiones o cortando dichas fallas longitudinales, produciéndose una geometría escalonada. Tales fracturas son las líneas de tensión creadas en el movimiento transcurrente de la Faja de Cizalla.

Regionalmente, en toda la Faja de Cizalla Badajoz-Córdoba se distinguen tres sistemas de fracturas: N130E que correspondería a las grandes fallas longitudinales de salto en dirección siniestro y con un recorrido de centenares de kms, el sistema N60E que sería un sistema satélite posterior, también con juego siniestral, con desarrollo longitudinal de decenas de kms; el último juego de fracturas es el representado en la dirección N180, sistema de acomodación con un salto de desgarre dextro, de escaso desarrollo, y de unos 2 km de longitud.

Todos estos sistemas están representados en la Cuenca Carbonífera de Belmez, los sistemas que más nos interesan son los desgarres siniestrosos en dirección N60E. Son fallas observables con continuidad según dirección de más de 15 km. En el sector Belmez – Espiel un juego destacado de este sistema de fracturas se puede observar cada km. aproximadamente, en el que a lo largo de 16 km. de NO a SE el salto siniestro de todo este sistema es de 6 km, observable en los tramos en los que el río Guadiato discurre por estas fracturas.

En el Cerro del Castillo de Belmez, Sierra Palacios y Sierra de la Estrella, se pueden ver estas fallas transversales que compartimentan todo el conjunto calcáreo en bloques bien diferenciados (las fallas son reactivadas por la orogenia Alpina y penetran entre los bloques calcáreos por las zonas menos competentes donde encuentran menor resistencia, lo que ocasiona que el bloque calizo, al encontrarse sobre una zona lubricada, “resbale” sobre estos materiales menos competentes). Como observaba Antonio Carbonell la caliza corta los estratos suprayacentes, siendo éstos los más trastornados, ya que la serie hullera se verticaliza y estrecha. Esta tectónica guarda relación con las fallas transversales de cizalla, donde seguramente se ha producido una reactivación posterior al “rifting” Triásico que intruyó con diabasas el carbón de Peñarroya.

Más tarde este sistema de fracturas transversales, N60E, ha sufrido distensión y se observan huecos centimétricos entre los labios de discontinuidad. Es también destacable la presencia de agua en todas estas fallas transversales, que han originado un cortejo hidrotermal que desde el

subvolcánico básico tardío de Doña Rama-El Alcornocal (Eje Magmático de Villaviciosa) han ido formando todas las mineralizaciones filonianas de Cu, Ba y Pb observables en el sector Guadiato-Sierra de los Santos a través de estas fallas transversales. Además todo ello tiene importancia neotectónica y estas fallas suelen denominarse “tipo Plasencia”, zonas tan dispares como el Pirineo, la Meseta y la Costa Levantina están afectadas por fallas transversales del tipo Plasencia. El magmatismo asociado con estas fallas sugiere, además, que no solamente afecta a la Corteza inferior sino que llega a profundidades del Manto.

3.1.4. FALLA DEL GUADALQUIVIR (33)

Ya en el Congreso Geológico Internacional celebrado en España en 1926, D. Antonio Carbonell (34) propuso el término “Línea Tectónica del Guadalquivir” para definir el contacto entre los materiales paleozoicos del Macizo Hespérico con los materiales neógenos de la Depresión Bética. A Antonio Carbonell le chocó la inesperada terminación del paleozoico con el Valle del Guadalquivir “parecían haberse hundido en el seno del sur”.

Tanto A. Carbonell como otros destacados autores (30): McPherson, L. Mallada (3) o E. Hernández Pacheco, interpretaron la línea tectónica como un sistema de fallas que hicieron colapsar parte de este substrato paleozoico sobre el cual se depositarían los materiales terciarios del Guadalquivir, y daría una traza fracturada quebrada, sin relación de continuidad entre las distintas fracturas, pero que en general se prolongarían desde Niebla (Huelva) a La Carolina (Jaén), originando el escarpe de Sierra Morena.

Actualmente diversos autores de la cartografía geológica del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) consideran el relieve existente entre el Macizo Hespérico de la meseta y el Valle del Guadalquivir ha sido originado por una flexura litosférica de los rígidos materiales paleozoicos al verse empujados, a partir del Eoceno Superior por el bloque del Dominio Cortical de Alborán (figura III 5). Correspondería a un modelo flexural para la cuenca de antepaís del Guadalquivir, que estaría controlada por dos parámetros que serían: por un lado la rigidez flexural de la litosfera (Macizo Hespérico), y por otro lado el peso del edificio que soportaría (Dominio Cortical de Alborán). Ello no explicaría, sin embargo, el gran escarpe existente entre la cuenca bética y los materiales paleozoicos del norte, sobre todo en Córdoba, donde en una distancia transversal de 6Km. se salva un desnivel medio de 400 m. Es obligado pensar que este escarpe no está controlado exclusivamente por la flexura litosférica, sino que en mayor grado interviene también el sistema de fallas transversales. Descritos

anteriormente como: N60E, que posteriormente a su juego de desgarre sinestroso sufrieron una distensión, apertura y circulación de agua, que origina una sobrepresión sobre los labios que separan dicha discontinuidad, disminuyendo significativamente la resistencia al corte. Esto originó debilidad frente a la flexura y hay deslizamientos en estas fracturas en el Mioceno.

Dicho sistema de fallas se hace más patente allí donde el escarpe es mayor, ver figura III 6, en la zona comprendida entre Lora del Río y Córdoba, donde las dos componentes, flexural y por falla, originan el paso a la Depresión del Guadalquivir de los materiales paleozoicos. Sin embargo hacia el oeste este escarpe se va haciendo cada vez más pequeño, llegando incluso a desaparecer en Huelva, dicha flexura se fue atenuando progresivamente en esta dirección. Esto guarda relación directa con el empuje del bloque del Dominio Cortical de Alborán (Orogenia Alpina), en el Oligoceno, que es frontal en el sector central de Sierra Morena, como consecuencia de la colisión de las placas europea y africana, que produce hacia el N-NW unos mantos de cabalgamientos, en ambiente submarino y se marcan las directrices béticas N60E de la falla del Guadalquivir (38).

3.1.5. CUENCA DEL GUADIATO (33)

En el centro de la Cuenca del Guadiato, en Belmez, se encuentra la concesión minera San Antonio (Unidad Juliana y al sur la Unidad Aurora) que se ubica en una gran banda formada por secuencias detríticas del Westfaliense B. Dicha banda se encuentra en discordancia angular y erosiva con los materiales precámbricos infrayacentes (zócalo de la Unidad Obejo-Espiel del Dominio Obejo-Valsequillo), cabalgada al sur por el Namuriense.

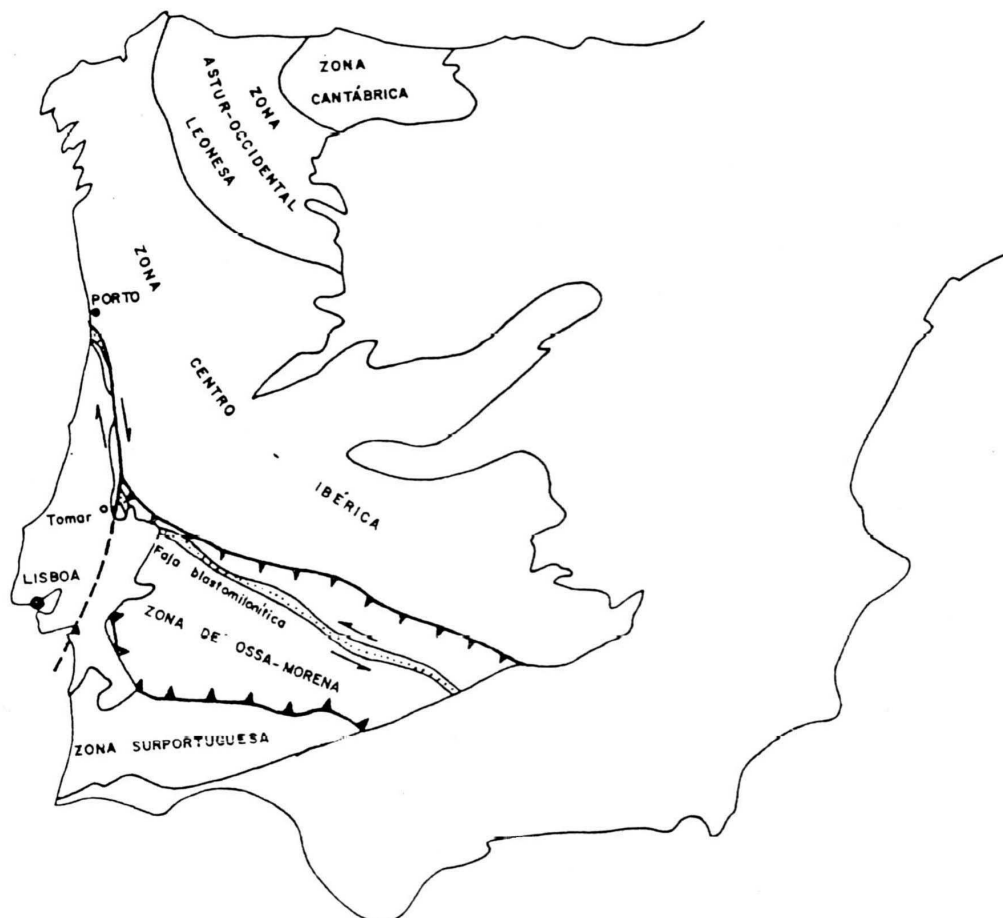
Estratigráficamente, de muro a techo, podemos definir la secuencia comenzando por una brecha de base (63). Son depósitos de abanicos aluviales, sobre esta brecha de base se depositan unos conglomerados fluviales del sistema de canales del propio abanico, niveles lutíticos, variables en potencia y en relación lateral con otros más arenosos, correspondientes a las zonas más distales del sistema de canales. Estos niveles cada vez más lutíticos pasan progresivamente a suelos de vegetación que dan lugar a depósitos de carbón en relación con zonas pantanosas. Aunque en Cabeza de Vaca un conglomerado uniforme parece marino y en la capa Cervantes hay crinoides piritizados, y la lutita Westfaliense da Sodio en similar proporción, 0'5%, que en la Namuriense.

Tras la tectónica Viseense se levantó el macizo precarbonífero del Norte de la Cuenca y en esta se instaura un mar somero donde se deposita la caliza Namuriense, y en el Westfaliense se pasa a continental (63).

Tectónicamente la mina San Antonio se ubica en un sinclinal asimétrico buzante al Sur con flanco sur verticalizado y cabalgado que provoca la desaparición de las charnelas anticlinales, aunque en detalle la estructura se complica algo más: duplicaciones de capas, desconexión de continuidad por laminación, migración de carbón a las zonas de charnelas, ondulaciones de capas tanto en dirección como en buzamiento, deslizamientos sobre la brecha de base e intrusión de diabasa en carbón.

Además de la compresión SW-NE se puede observar también una posterior (Alpina), no coaxial, NW-SE que origina un plegamiento asimétrico suave, con flanco corto vertical, que forma ligeras ondulaciones, que se dan en las fracturas transversales con una dirección N60E (desgarre siniestral) y conforman juntas de cizalla en esta relación con el flanco corto de estos pliegues posteriores. Estas fracturas sufren distensión, originando huecos con circulación de agua, que apoya la consideración del origen en la orogenia Alpina (Oligoceno).

Figura III 1. Zonas Geológicas



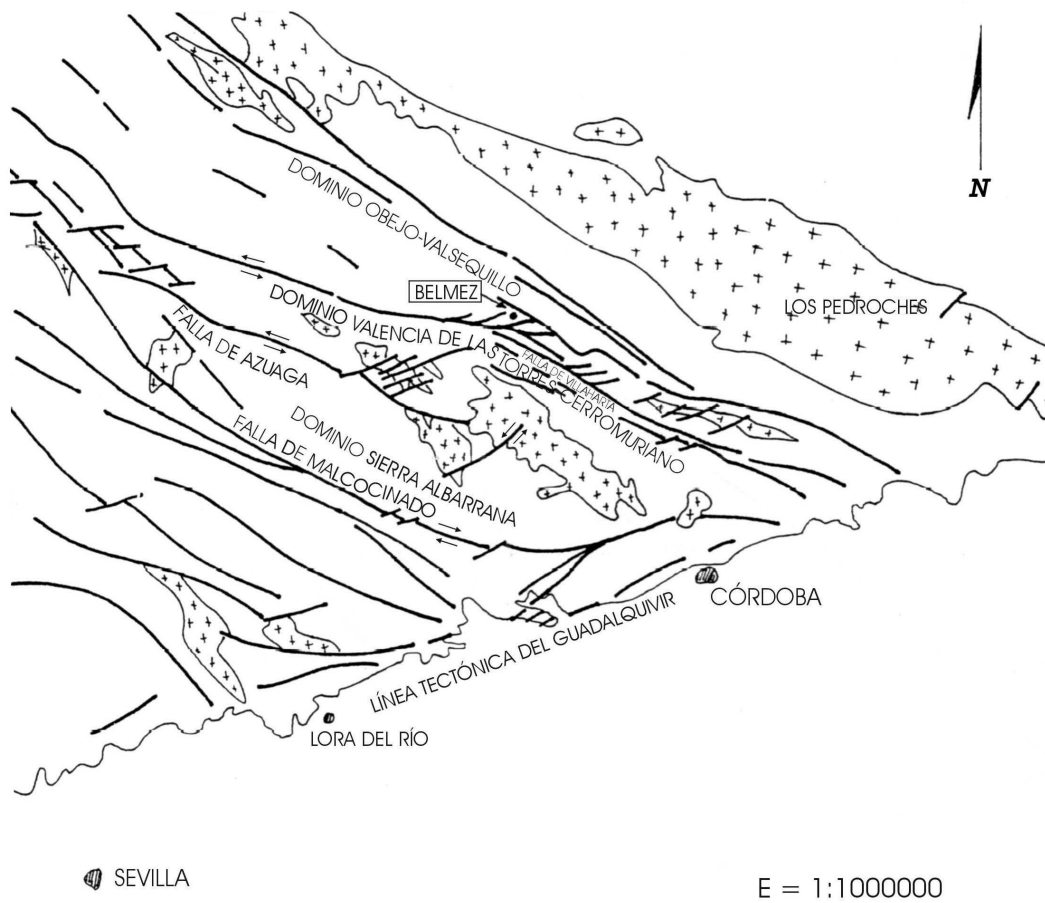


Figura III 2.- Esquema tectónico de Sierra Morena Central.

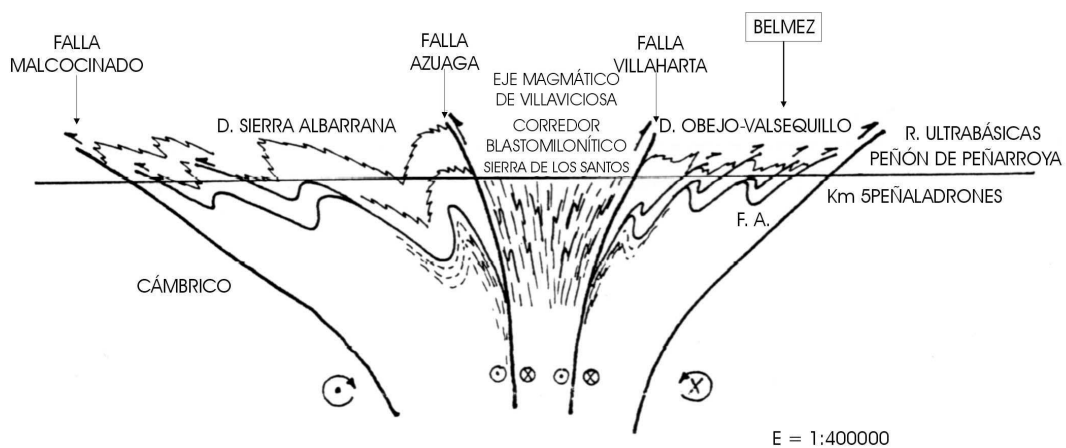


Figura III 3.- Corte geológico de los Dominios de Sierra Albarrana y Obejo - Valsequillo

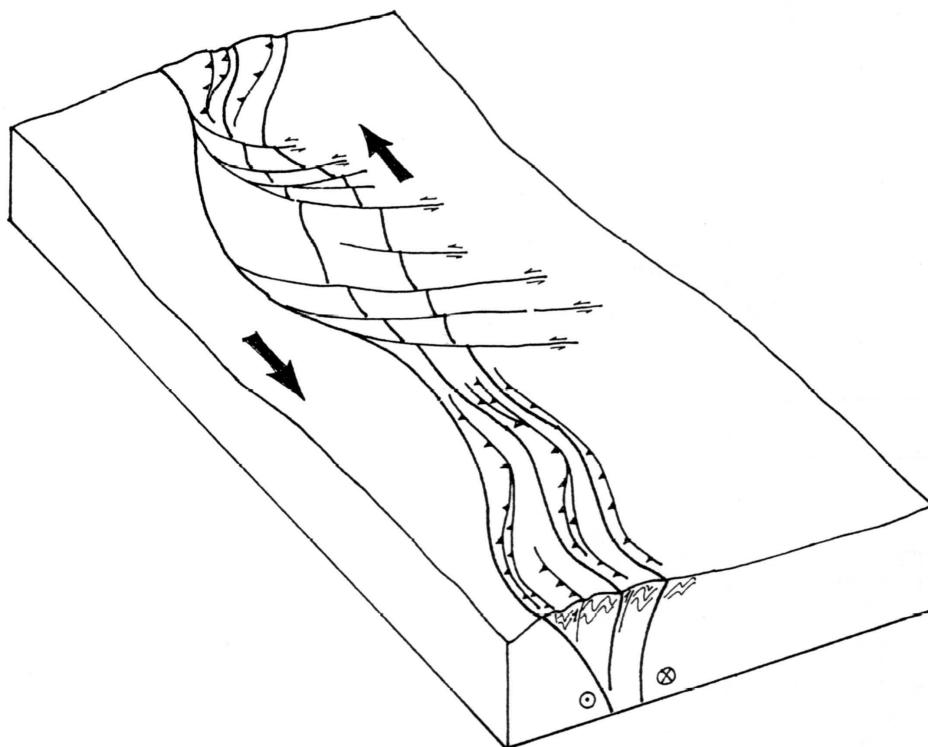


Figura III 4 .- Bloque de los movimientos en la Cuenca del Guadiato

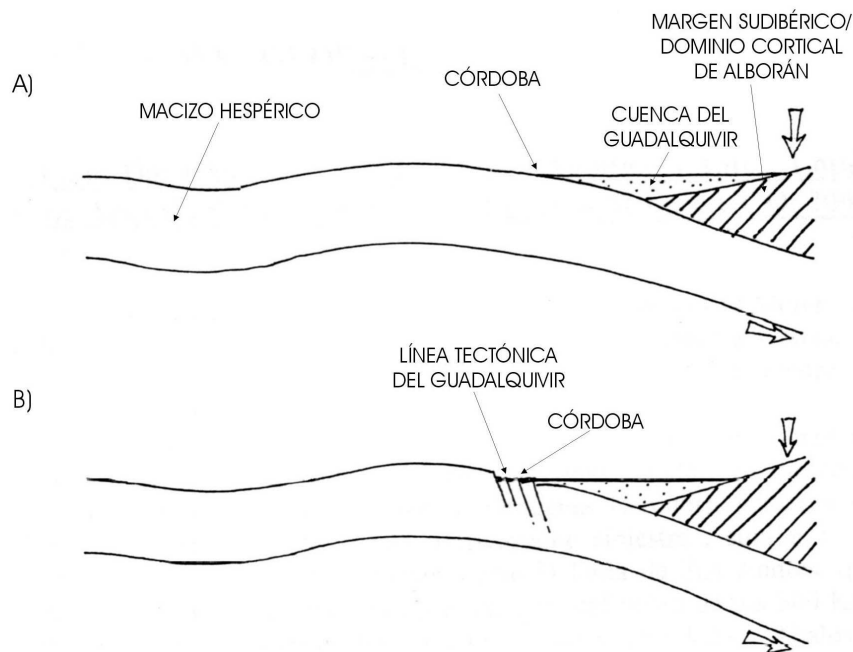


Figura III 5.- Modelo Flexural para el Macizo Hespérico: A) Sin considerar las fallas transversales, B) Considerando estas fallas (Línea del Guadalquivir)

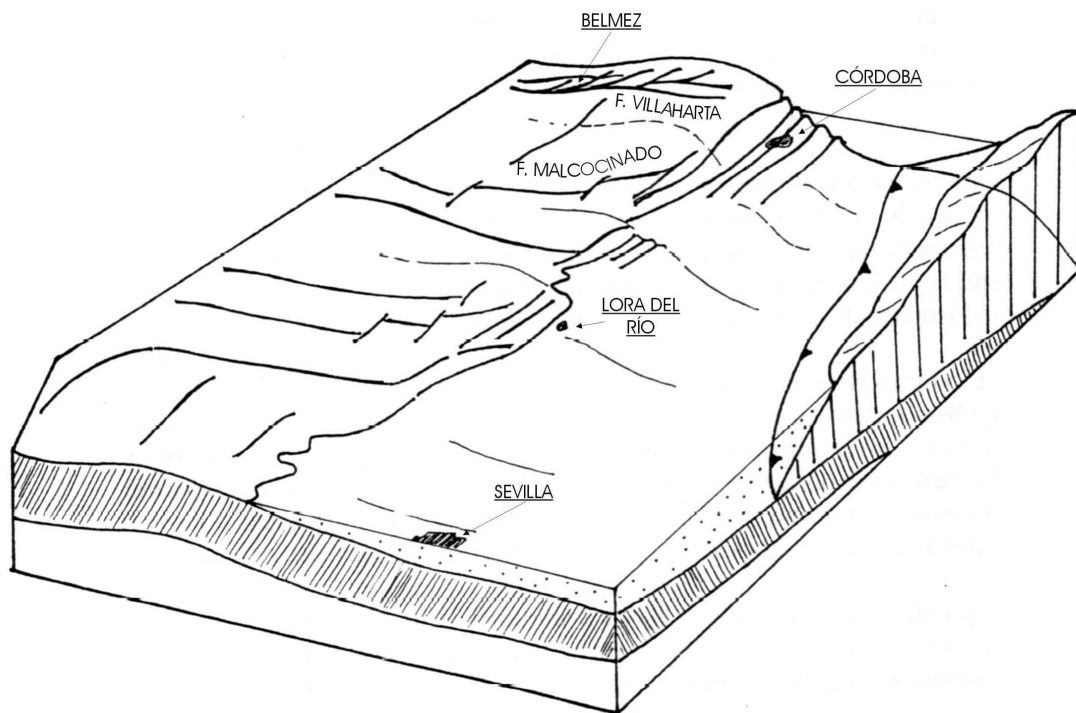


Figura III 6.- Bloque Diagrama de la Cuenca del Guadalquivir. Entre Córdoba y Sevilla, donde se esquematiza la Línea Tectónica del Guadalquivir junto con la flexura litosférica del Macizo Hespérico

3.2. ESTRUCTURA GEOLÓGICA DE LA CAMPIÑA

3.2.1. INTRODUCCIÓN A LA GEOLOGÍA DE LA CAMPIÑA

El mediodía cordobés está representado por la depresión del Guadalquivir y las cordilleras Béticas, que son el extremo occidental de las cordilleras alpinas europeas, los afloramientos más antiguos corresponden al Triásico. Concretamente la Zona Externa (Prebético y Subbético) “ha sufrido fenómenos tectónicos de escala continental durante el Mesozoico y Terciario relacionados con la apertura del atlántico norte y la colisión de las placas europea y africana -Mioceno inferior-” [Díaz de Neira et al, 1992 (37)]. Que posicionan la estructuración definitiva de las cordilleras Béticas, su carácter marino y su hundimiento debido a la falla del Guadalquivir (línea tectónica del Guadalquivir), da origen a la cuenca del Guadalquivir y que pasa en el Plioceno al actual régimen continental. Conviene tener presente, no obstante que el mediodía cordobés siendo actualmente tectónicamente activo.

A esta cuenca del Guadalquivir han ido a parar muchas unidades

alóctonas (principalmente subbéticas) que arrastran a las formaciones autóctonas de margas blancas -albarizas-, dando lugar a grandes masas de olistostrómicas que se emplazaban en el valle del Guadalquivir en forma caótica de deslizamientos gravitacionales en dirección noroeste, que producen la colmatación de la cuenca con la sedimentación de margas azules y calcarenitas en facies someras regresivas. Todo ello finaliza con una pulsación y demolición de masas de arrastre que da lugar al depósito de margocalizas blancas (régimen distensivo) sobre las margas azules.

Durante el Cuaternario, los procesos de encajamiento de la red hidrográfica y el modelado de vertientes han configurado la morfología. Actualmente existe vigilancia sísmica por el acercamiento de las placas europea-africana y la transformante dextral de Azores, y el arco de Gibraltar.

3.2.2. TECTÓNICA E HISTORIA DEL SUR DE CÓRDOBA

En las cordilleras Béticas se distinguen la Zona Externa y la Zona Interna de acuerdo con la concepción clásica de geosinclinal. Al norte está la Zona Externa que son los bordes de los cratones o placa europea (Prebético y Subbético) que se caracteriza por una cobertera plegada en la que llegan a desarrollarse mantos de corrimiento. Mientras que al sur está la Zona Interna que se sitúa en la separación de las placas, comunes a ambos lados del mar de Alborán-Mediterráneo (Circumbético y Bético) y presenta deformaciones profundas que afectan al zócalo.

La zona Subbética se sitúa al sur de la somera zona Prebética y “presenta facies pelágicas con margas, calizas nodulosas y hasta turbiditas, también volcanismo submarino durante el Jurásico” [Roldán et al, Hoja 966, 1988 (5)].

Debido a la intensa erosión que ha sufrido el Triásico en el entorno de la ciudad de Córdoba “el Mioceno está en contacto con el Paleozoico y quedan vestigios de hasta donde llegó la transgresión marina miocénica (Tortonense Superior) donde se distinguen tres tramos de muro a techo: tramo calcáreo del norte del Guadalquivir (conglomerados y calcarenitas -biomicritas-), tramo margoso al sur del Guadalquivir y tramo arenoso regresivo” [Copeiro et al, 1973 (36)].

Al inicio del Mesozoico se acaba cualquier régimen continental, con el lagoon del Triásico de margas rojas yesíferas del Keuper y un volcanismo básico de diabasas augíticas (ofitas) de la cresta oceánica, se produce el cambio paleogeográfico de estos campos hidrotermales (gran diversidad, bajo oxígeno y aguas oscuras). Se instala un régimen marino de plataforma

carbonatada somera, depositándose las margas calizas del Lias, se fractura la plataforma en relación con los procesos de rifting y ligado a la apertura del Atlántico norte, ello da lugar a fallas transcurrentes y distensivas N60E. Con lo que aparece la subsidencia diferencial del Dogger en la zona Subbética y la emisión de materiales volcánicos submarinos.

Antes del Malm ya se han depositado, en la plataforma marina somera, las calizas oolíticas blancas y más tarde un hiato sedimentario importante. Posteriormente en el Malm y Cretácico inferior se depositan calizas nodulosas rosa (ammonítico rosso), más tarde en el Cretácico se pasa a las condiciones pelágicas de margas.

A partir del Eoceno se depositan niveles turbidíticos (laminación paralela y agua sin tracción) y en el Oligoceno colisionan las placas europeas y africanas produciéndose cabalgamientos hacia el norte-noroeste en ambiente submarino, favorecidos por el Triásico basal, que marcan las directrices béticas N60E.

“Esta colisión fue importante en el límite entre las Zonas Interna y Externa y afectó a todas las zonas, pero más intensamente a la zona Circumbética que en su mayor parte fue subduccida. En la zona Subbética se originan cizallas de vergencia norte que hacen cabalgar unos dominios sobre otros. Posteriormente se depositan las albarizas” [Roldan et al, Hoja 988, 1988 (5)].

En la zona Subbética el Triásico y la cobertera de encima presentan un contacto mecánico de falla subhorizontal, también se pueden observar zonas de despegue mecánico dentro de la cobertera que explicarían la presencia de Cretácico y Terciario emplazados directamente sobre el Triásico [Chauve, 1968]. El Subbético no forma un manto continuo, sino que se presenta en forma de placas separadas y despegadas sobre el Triásico, lo más normal es encontrar paquetes del Jurásico al Cretácico inferior, y otros afloramientos con el resto de la serie del Cretácico superior al Terciario. Las margas yesíferas del Triásico es el despegue más importante de esta tectónica tangencial de cizallas y cabalgamientos de dirección noroeste.

En el Mioceno Tortoniense se produce una etapa de transgresión, más tarde aparece una regresión marina que durante el Mioceno superior produce el relleno de la depresión del Guadalquivir. También la última regresión sobre la zona Subbética sedimenta finos depósitos de margas azules, debido al levantamiento del borde sur de la cuenca. “Los sedimentos pertenecientes al Mioceno superior (margas azules) yacen discordantes sobre las margas blancas (albarizas) del Mioceno inferior” [Roldan et al, Hoja

966, 1988. (22)], quizá por observarse que las calcarenitas del este de Aguilar parecen discordantes sobre las albarizas, pero, también estos autores consideran el contacto concordante entre las margas blancas (albarizas) y las margas azules, “sin aparente continuidad” y “Moriles, los materiales margosos del Tortoniense aparecen en suaves sinclinales y anticlinales con ejes en dirección este-oeste” [Roldan et al, Hoja 988 (5)].

En el Mioceno medio se produce una importante elevación de la zona axial del Subbético y entiendo que debe corresponder al diapirismo (domo de sal), como el causante de esta elevación, que lógicamente debió afectar mayormente a las albarizas del Mioceno inferior, con un muy abierto anticlinal y algunas fracturas radiales. Esta hipótesis del diapirismo complementa la cartografía geológica realizada por el IGME

Posteriormente se forma el surco del Guadalquivir y por esta concavidad penetró la transgresión marina del Mioceno superior (Tortoniense), que encontró relieves activos por la tectónica y como consecuencia deslizaron los olistostromas del Subbético que arrastraron albarizas, sobre ellas las margas del Mioceno superior.

Dos familias de orientaciones de fracturas, además de la alpina N60E, *aparecen en la Campiña alta de Córdoba y entre ellas los nuevos descubrimientos* de esta tesis: la falla Fuente Álamo-Aguilar (N20E) y la falla del río Genil (SE-NO), ambas fallas son acuíferos.

El mediodía cordobés se encuentra en la margen izquierda del Guadalquivir, el drenaje superficial se realiza hacia el curso del río Genil (SE-NO), afluente del Guadalquivir. Si se exceptúan los escarpes calizos subbéticos de más al sur, el resto está representado por las formas más alomadas de los terrenos margosos. Son pocos los trabajos de consideración de los primeros investigadores, a excepción de los de D. Antonio Carbonell Trillo-Figueroa (32) (34) que constituyen las primeras contribuciones al conocimiento del terreno del sur de Córdoba, donde realizó todas las hojas geológicas y edafológicas a escala 1:50.000 para el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y se encuentran inéditas en el Seminario Antonio Carbonell de la EUP de Belmez.

3.2.3. LAS MARGAS DE LA CAMPIÑA

Posteriormente al depósito de estas arcillas marinas tienen lugar los procesos diagenéticos que conducen a la litificación del sedimento, así las arcillas coloidales se compactan (pudiendo precipitar calcita y sílice en los

intersticios, reordenándose) y por fin se consolidan (formándose lutita).

Después de la sedimentación se modifican las margas debido al agua que llena los poros con ambiente reductor, que con el CO₂ intersticial se disuelve el carbonato cálcico, luego se expulsa el agua y precipitan nódulos calizos dentro de la porosidad intrínseca encima del nivel freático. En el lavado de margas en climas áridos el precipitado de concreciones se realiza en la zona superficial y disminuye en profundidad.

Estos sedimentos miocenos (Terciario superior) se depositaron después de la estructuración de las Béticas; la presencia de arenas entre estas arcillas margosas azules nos indica la regresión marina del Mioceno superior al terminar los plegamientos.

Las tres unidades estructurales desde el Mediterráneo al Guadalquivir, que representan el extremo occidental de las cadenas alpinas europeas, son las siguientes: la zona Bética (con el Cristalino de Sierra Nevada, las Alpujarrides y el Bético de Málaga); al norte de ésta, la Penibética-Subbética (con las series sumergidas mesozoicas y terciarias, la transgresión del Oligoceno y la regresión Burdigaliense) y, más al norte, el Prebético margoso de la Campiña (autóctono y emergido con la elevación del Eoceno).

Los territorios prospectados están enmarcados en la depresión del Guadalquivir, en el contacto con las cordilleras Béticas (zona externa). Al final del Aquitaniense tuvo lugar el importante despegue (compresión) del Trías hacia el norte con su cobertera. La fase postortonense origina la actual estructura, y afecta incluso a la *albariza moderna* del tortoniense (margas blancas), que procede de porciones más meridionales. Existen dos unidades estructurales, una formación *alóctona* afectada por dicha tectónica (cabalga con vergencia norte; es la zona externa subbética y encima la *albariza moderna*, en parte afectadas por el corrimiento) y otra *autóctona* posterior que no ha sufrido desplazamientos y son nuestras arcillas margosas azules del Tortoniense superior, que yacen discordantes sobre las margas blancas.

En la etapa post tectónica (Mioceno superior y Plioceno) se forman fracturas de distensión N60E y NO-SE que con una transgresión marina dan lugar a la cuenca del Guadalquivir cubriendo parte de la zona subbética. En el Plioceno el área queda emergida y el mar pasa a fase regresiva en dirección NE-SO y hacia el SO, hasta el Golfo de Cádiz, debido al levantamiento del borde sur de la cuenca del Guadalquivir y a los materiales aportados a dicha cuenca. Posteriormente el Cuaternario pasa a ser nuevamente compresivo de colisión entre las placas europea y africana.

3.2.3.1. Margas blancas del Mioceno

Se encuentran a techo de los materiales subbéticos y en contacto

discordante o mecánico; estas margas blancas son las llamadas “albarizas” y presentan una potencia que sobrepasa los 170 m. Hace tiempo que especialistas en micropaleontología marcaron la existencia de “albarizas” desde el Aquitaniense hasta el Tortoniense, distribuidas en un grupo “antiguo” de edad Aquitaniense-Langhiense y otro “moderno” desde el Serravaliense hasta el Tortoniense (5), las *albarizas antiguas* están cabalgadas o son para-autóctonas en las Béticas Occidentales y las *albarizas modernas* son para-autóctonas, como en el valle del Guadalquivir, o bien autóctonas como en la zona gaditana. En las zonas que hemos prospectado de la Hoja de Puente Genil las albarizas constituyen un grupo litológico y por tanto cartográfico muy homogéneo y extendido. No obstante, se puede hacer una diferenciación en tramos en base a la sucesión de ciclos tectosedimentarios. Así, un tramo Inferior, de edad Aquitaniense-Burdigaliense, constituido por margas blancas con calizas bioclásticas intercaladas al este de Puente Genil y un tramo Medio de edad Burdigaliense-Serrevaliense de margo-calizas bioclásticas, corresponden ambos a las *albarizas antiguas*. Por último otro tramo Superior, de edad Tortoniense, compuesto por una sucesión de margas albarizoides, margas grises con niveles arenosos y margas blancas de Moriles (que no afloran en Montilla), es el correspondiente a las *albarizas modernas*.

Se trata de depósitos carbonatados marinos de plataforma externa. Las condiciones térmicas se mantendrían bastante estables y uniformes desde las isotermas cálidas a templados fríos en aguas limpias y oxigenadas.

3.2.3.2. Margas azules del Mioceno Superior

Directamente encima de las margas blancas (albarizas) se disponen los materiales que rellenan la depresión del Guadalquivir, del Mioceno superior, y que presentan variadas facies. Las que nos ocupan son las margas gris-azuladas y en la Hoja de Puente Genil se pasa, sin aparente discordancia, de las margas blancas (albarizas) a otras margas y margas arenosas de color gris-azulado. Hacia el techo de esta serie, que alcanza potencias de 50 m (200 m en Montilla y 700 m en Écija), se observan intercalados unos niveles de limo arenoso y arenas silíceas. Se considera en el mapa geológico como concordante en aquellas partes en que se colocan encima del tramo superior de las margas blancas (Tortoniense), y como discordante cuando lo hacen sobre el resto de la serie aquitaniense (en la Hoja de Montilla las margas azules con las margas blancas se estiman siempre discordantes).

En la zona *este de la planta* de Proceran en Aguilar, se ha localizado una falla con presencia de bastante agua (que se ha dibujado en la figura VII 2), tiene una dirección NNE-SSO hacia Fuente Álamo. Esta falla, en la que

se hunde el bloque oeste, es distensiva y enfrenta las margas azules con las blancas.

En cuanto a los datos industriales de las margas azules se ha consultado el Mapa de Rocas Industriales (escala 1:200.000), la hoja y memoria nº76 [4-10 Córdoba] realizada por la Compañía General de Sondeos –CGS- para el IGME (35) el año 1974 (véase la tabla III 1). En estos antecedentes consultados se recogen el análisis de las calidades de los materiales margo arcillosos de las explotaciones existentes en aquella fecha para fabricación de ladrillos (la cocción es a 850°C). Litológicamente son margas arcillosas de colores blanquecinos o grises, son niveles muy continuos en la horizontal, pudiendo existir zonas con más o menos contenido en carbonatos, así como en la fracción limosa (de naturaleza silícea) las muestras analizadas presentan un contenido del 35% de carbonatos.

Tabla III 1. Análisis químico de las margas (IGME, 1974)

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	P.P.C.
S de Puente Genil	42,9%	6,1%	3,3%	0,05%	18,5%	4,3%	0,8%	0,6%	23,5%
S de Puente Genil	37,7	10,0	4,3	0,07	17,8	2,9	2,4	1,4	23,4
O de La Rambla	42,3	8,0	3,5	0,06	17,5	3,6	2,0	1,0	22,0
N de Aguilar	43,1	9,8	4,1	0,05	18,2	1,5	1,0	0,7	21,6
E de Aguilar	36,9	6,1	5,3	0,05	23,3	1,9	1,0	0,6	24,9

3.2.3.3. Sinéresis

La sinéresis es la retracción lateral espontánea (disminución de volumen) del gel arcilloso. No es desecación, se produce todavía semisaturadas las arcillas en agua (ambiente reductor) y dan superficies fisuradas de retracción lateral en planos verticales (mecanismo químico de consolidación osmótica – ver el Capítulo 7. Nuevas Líneas de Investigación-), débiles con espaciamiento métrico y manchas de óxidos. Ello se observa en las margas azules de la estación M10 (muestras con el 32% de zeolita), en la zona norte de la Cantera de Aguilar. Esto es un caso típico de arcilla marina que ha sido lavada con

agua superficial y subterránea (después de emergida), y se han solubilizado iones. La arcilla margosa del Guadalquivir está fisurada por sinéresis en unas zonas y en otras no, también las lutitas namurienses del Guadiato presentan sinéresis en la zona superficial de la capa activa.

3.3.- REFERENCIAS

- [3].- Mallada Pueyo Lucas. Memoria descriptiva de la Cuenca Carbonífera de Belmez. Boletín de la Comisión del Mapa Geológico de España, XXVI-Tomo VI serie 2. IGME 1900.
- [4].- Apalategui, O., Roldán F.J., Higuera, P., et al. (INGEMISA) Mapa geológico de las hojas de Espiel (880) y Peñarroya (879). IGME 1985.
- [5].- Roldán, Francisco (et al. Ingemisa). Mapa y memoria explicativa de las Hojas 966 (Montilla) y 988 (Puente Genil) del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000 IGME, 1988.
- [8].- Pérez Lorente, F. "Geología de la Zona de Ossa-Morena al norte de Córdoba (Pozoblanco-Belmez-Villaviciosa)". Tesis doctoral, 281, Univ. de Granada 1979.
- [18].- Daza, A. (1991) "Nueva clasificación geomecánica". Rev. Ing. T. Minas. «Minería y Siderurgia» 2 trimestre 1991. Madrid.
- [25].- Ábalos, B. y Eguíluz, L. (Universidad del País Vasco). Deformación Transpresiva Carbonífera en la Cizalla de Badajoz – Córdoba. Rev. S. Geo. España, 4, (3-4), 1991.
- [26].- Baeza Rojano, L et al. Presencia de formaciones volcanosedimentarias y mineralizaciones de hierro en el Eje Magmático de Villaviciosa. Bol. v 89, IGME 1978.
- [27].- Apalategui, O., Borrero, JD., Higuera, P. División en grupos de rocas en Ossa Morena Oriental. Temas Geológicos y Mineros 1985. V Reunión GOM, Belmez 1983.

- [28].- Julivert, M., Fontboté, J.M., Ribeiro, A. y Conde L.A. Mapa tectónico de la Península Ibérica. Escala 1: 1000.000 y memoria. IGME 1974.
- [29].- Chacón J., Oliveira V. y Ribeiro A. La Estructura de la Zona de Ossa-Morena. Libro Jubilar de J.M. Rios. IGME 1983.
- [30].- Hernando Luna R. "Bibliografía geológico-minera de la provincia de Cordoba". Memorias del IGME 1970.
- [31].- Pascual Martínez, E. y Pérez-Lorente, F. La alineación o eje magmático de Villaviciosa de Córdoba-La Coronada", 1987. Pgs. 365-376. Libro Homenaje a García de Figueroa. IGME.
- [32].- Carbonell Trillo-Figueroa, A., "Contribución al estudio de la geología y de la tectónica andaluza". Boletín del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Tomo XLIX: 81-215. 1927.
- [33].- Daza Sánchez, A. y Llanes Agudelo, P., Explicación Geoestructural del Noroeste de Córdoba (Comarca del Guadiato) España. Boletín de la Real Academia de Córdoba de Ciencias, Bellas Letras y Nobles Artes. Enero-Junio 2004. Año LXXXIII-Nº 146. Pgs 171-181.
- [34].- Carbonell Trillo-Figueroa, A. (1926) " La Campiña o Valle Bético" XIV Congreso Geológico Internacional, Exc. A-5. De Sierra Morena a Sierra Nevada. IGME, pg 17-28.
- [35].- Compañía General de Sondeos (CGS). Mapa de Rocas Industriales a escala 1:200.000 IGME, 1974. Hoja y memoria nº 76 (4-10) Córdoba.
- [36].- Copeiro, Jesús Ramírez, (et al): Mapa y memoria explicativa de la Hoja 923 (Córdoba) del Mapa Geológico Nacional 1:50.000. IGME, 1973.
- [37].- Diaz de Neira, J.A. (et al): Mapa y memoria explicativa de la Hoja 989 (Lucena) del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000 IGME, 1992.
- [38].- Uchupi, E. (1988) "The Mesozoic-Cenozoic geologic evolution of Iberia, a tectonic link between Africa and Europe". Rev.Soc.Geol. Spain,1,257-294.

- [39].- Daza Sánchez A., López Sánchez M., Cano Jodar E. y López Pineda G. "Valoración geomecánica del espaciado y condición de discontinuidades, adaptable a la clasificación de Bieniaswki. En revisión. 2010. IGME.
- [40].- Daza Sánchez A. (1986). "Aportaciones de la Geofísica a la Geotecnia. Seminario sobre la utilización de las diagráfias en minería". Ed. Teresa Alonso. ETSIM de Oviedo.
- [41].- Bieniawski, Z.T. (1979). "THE GEOMECHANICS CLASSIFICATION IN ROCK ENGINEERING APPLICATIONS". II INT. CONGRESS ON ROCK MECHANICS, VOL. II. MONTREUX, SUIZA.
- [42].- Hoek, E. & Brown, E.T. (1980). *Underground Excavations in Rock*. London, Instm. Mining Metall.
- [43].- Hoek, E. & Bray, J. (1981). *Rock Slope Engineering*. London, Instm. Mining Metall.
- [44].- Hoek, E., Carranza-Torres, C. & Corkum, B. (2004). "El criterio de rotura de Hoek-Brown. Edición 2002. In C. López Jimeno (Ed). «Ingeotúneles» 2003. Madrid: ETSIMM.
- [45].- Ramírez Oyanguren, P. (1981). "Técnicas modernas para el dimensionamiento de minas metálicas subterráneas". Madrid. Hoja informativa nº 23 del Grupo de Geomecánica de la Asoc.de Ing. de Minas.
- [46].- Ramírez Oyanguren, P. (1980). *Dimensionamiento del sostenimiento en galerías y túneles*. ETS. Ing. Minas, Madrid.
- [47].- Stagg, K.G., Zienkiewicz, O.C., Hoek, E., Deere, D.U., Hendron, A.J., Morgenstern, N.R., Rogerts, A. (1970). *Mecánica de Rocas en la Ingeniería Práctica*. Editorial Blume (Madrid).
- [63].- Ortuño, G. et al. ENADIMSA. Investigación de la Cuenca del Guadiato. 1970 – 1976. Inedito ENCASUR-Peñarroya.
- [64].- Delgado Quesada, M., Liñán, E., Pascual, E., Pérez Lorente, F. Criterios para la diferenciación de dominios en Sierra Morena Central. 1977.

CAPÍTULO 4
MATERIALES Y MÉTODOS

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. MATERIALES

Se seleccionan mediante una sectorización geológica diez estaciones de muestreo de arcillas de las diferentes lutitas paleozoicas de Sierra Morena:

- 1.- Lutita Westfaliense, del sondeo S-307-2 de la concesión San Antonio (Belmez) de Promotora de Minas de Carbón, a 10 m de profundidad en el techo del conglomerado de base (paquete Juliana).
- 2.- Lutita Devónica, de color blanco (A), recogida en la Mina Luisa, en el fondo de cantera a 15 m de profundidad. 15 Km al norte de la población de Belmez y en dirección a Hinojosa.
- 3.- Lutita Namuriense (nº60 del MAGNA), oeste y denominada “Estación Puente”, situada a 200 m W del puente sobre la carretera de las aldeas de Belmez, al sur de la estación de ferrocarril, y con una potencia de 20 m.
- 4.- Lutita Namuriense, zona central y denominada “Cabeza de Vaca vía”, situada al norte de la Estación de Cabeza de Vaca, en el oeste de una corrida de 200 m y 10 m de potencia.
- 5.- Lutita Namuriense (nº50 MAGNA), zona este (Bujadillo) a 5 Km al oeste de la población de Belmez y en la margen izquierda del río Guadiato.
- 6.- Lutita Namuriense, denominada “Cabeza de Vaca vacie”, situada al norte de la Estación de Cabeza de Vaca, en el este de una corrida de 200 m y 10 m de potencia.
- 7.- Lutita Namuriense, denominada “Estación Tejar”, al este de la zona 3 (Estación Puente) y con continuidad de 200 m y 20 m de potencia, hasta el antiguo tejar y fábrica de ladrillos de Belmez.
- 8.- Lutita Namuriense, denominada “Parque”, justo al sur de la población de Belmez y de su Parque Municipal.
- 9.- Lutita Devónica, de color blanco-rojizo (B), recogida en la Mina Luisa a 15 Km al norte de la población de Belmez.
- 10.- Lutita Devónica, de color blanco-rojizo (C) de la Mina Luisa.

El área de estudio de las margas arcillosas de la Campiña se ha dividido en tres zonas de trabajo de 4 km² cada una, asimismo se ha estudiado una cuarta zona que se corresponde con la cantera en explotación de la empresa Proceran en Aguilar, en total se han establecido 18 estaciones para la toma de muestras y su caracterización (ver figura IV 1). Las 4 zonas de estaciones son:

1) Zona **este de la Planta** de Proceran, las estaciones han sido cinco: 2EA, 2EB, 2EC, 2ED y SEV2.

2) Zona **oeste de la Planta** de Proceran, las estaciones han sido cinco: 1WA, 1WB, SEV1, E12 y E48.

3) Zona de **Puente Genil noreste**, se han establecido cuatro estaciones: 3PGA, 3PGB, SEV3 y Cuaternario sur.

4) Zona de la **Cantera de Aguilar**, se han tomado cuatro estaciones: A20, M30, M10 y M10 noroeste.

El control de calidad es esencial en todo el proceso de fabricación con las arcillas cerámicas, así desde la investigación geológico-minera de materias primas mediante la consulta inicial de la cartografía del Instituto Geológico y Minero de España, a los itinerarios geológicos de detalle, a la prospección geofísica, hasta las estaciones de muestreo con el apoyo de sondeos, los ensayos de laboratorio y tecnológicos, el análisis químico y mineralógico, la evaluación de la explotación del yacimiento y el proceso en la planta de fabricación.

Localizadas las arcillas, sobre las muestras tomadas en la campaña de prospección, se realiza un cuarteo y se homogenizan las distintas mezclas o bien el “todo uno” que nos producirán diferentes comportamientos mecánicos. Así en las margas de la Campiña se han realizado análisis granulométrico en las muestras trituradas en la machacadora de mandíbulas (<12’5mm), se ha procedido a su cuarteo y molienda en molino de tres bolas, para realizar los ensayos geotecnológicos descritos anteriormente, los análisis mineralógicos y los ensayos de cocción. Fracciones representativas del “todo uno” de dieciocho muestras han sido pasadas por el tamiz ASTM 200 para obtener la fracción fina de limo y arcilla, además, posteriormente, en el material retenido se ha realizado un lavado de los finos de las arenas del rango de 500 micras a 125 micras, luego se secan las fracciones y se pesan para obtener porcentajes con respecto al “todo uno”. Estos porcentajes son representativos de la valoración de las concreciones diagenéticas que presentan las arcillas, ya que sólo mediante el conocimiento y la valoración de las propiedades intrínsecas como la presencia de nódulos en estas arcillas margosas es posible proyectar adecuadamente el proceso de fabricación.

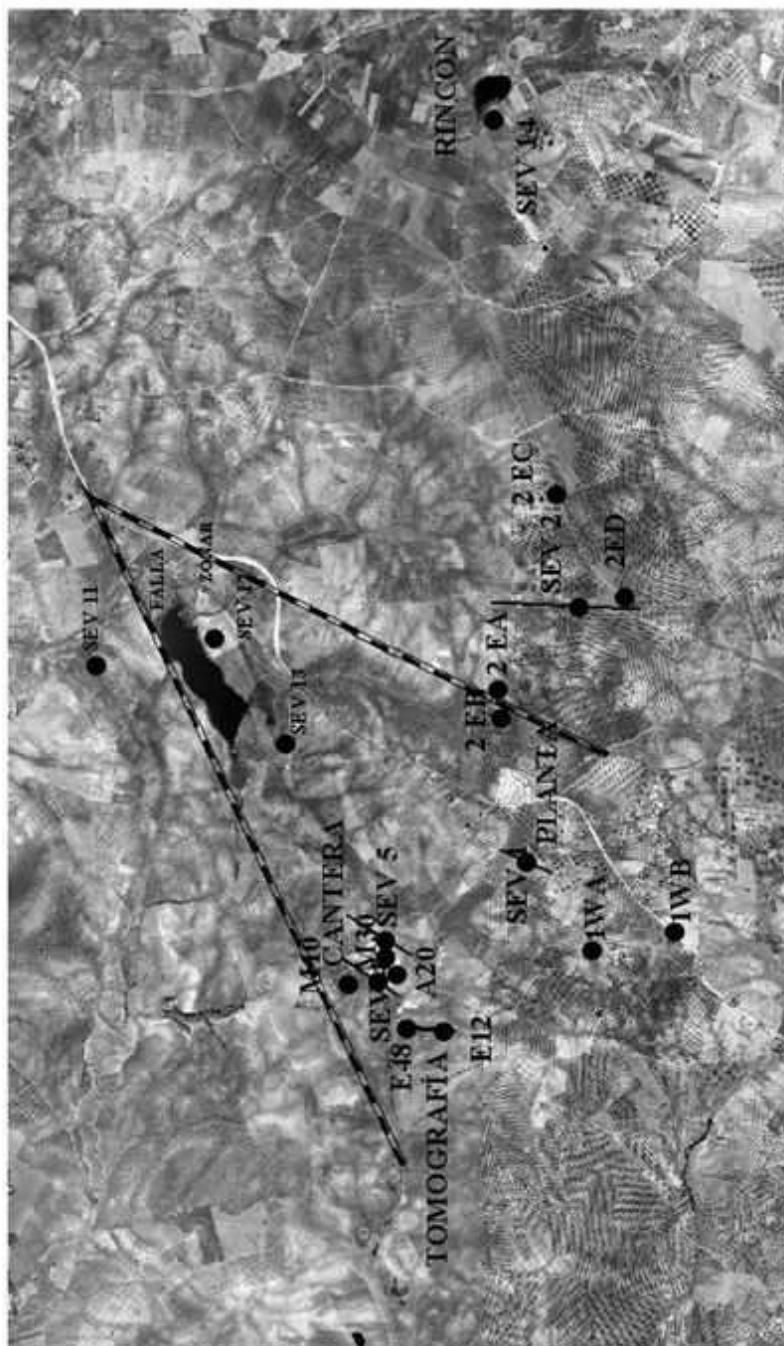


FIGURA IV 1. LAGUNAS ZOÑAR Y RINCON.
SITUACION DE ESTACION Y CANTERA.

Se realizan ensayos de comportamiento a la molturación, como fragmentación en trituradoras de mandíbulas y molinos (calibre máximo de 50 micras) y molturación en laminadores con distintas separaciones (o molinos de bolas de laboratorio), ensayos de amasado-moldeo (plasticidad), consistencia de la pasta a la salida del molde, agua de amasado expresada en porcentaje de peso en arcilla secada a 110° C. Ensayada su plasticidad se puede adicionar un segundo componente de material inerte que produzca el efecto de reducción de desgrasado (como limo o arena fina silíceas), que se mezcla con la arcilla demasiado plástica para evitar que su secado sea lento y su contracción considerable.

También los ensayos de secado como la contracción de secado y el límite de fisuración: o longitud máxima sin grietas de una loseta de 200*10*100 mm secada en las siguientes condiciones: temperatura 30-75 °C, tiempo: 1,50 h y velocidad del aire= 6 m/s.

La carga de rotura a flexión (sobre el material seco) y los ensayos de cocción, como: la contracción de cocción en %, la pérdida de peso expresada en porcentaje de la arcilla secada a 110 °C, la absorción de agua en %, el peso específico aparente, la carga de rotura a flexión, el ensayo mediante dilatómetros para conocer las contracciones y dilataciones que tienen lugar durante la cocción de la arcilla y establecer una curva de cocción de acorde con los mismos. Estos ensayos permiten conocer cuáles son las dosificaciones teóricas más idóneas. Al adoptar el proceso de extrusionado, se contempla:

-La recepción de materias primas, con la descarga de los camiones cargados de arcilla, provenientes de cantera, en la tolva del desmenuzador y se consigue la fragmentación del material para su posterior utilización en los dosificadores y molinos. Los desmenuzadores suelen constar de dos cilindros que giran en sentido inverso y van provistos de dientes, o bien una trituradora de mandíbulas.

-Mediante un alimentador giratorio, se realiza una pila de homogeneización, depositándose el material por tongadas de forma que se carga la arcilla mediante las palas mecánicas, con cada palada se recoge parte de varias tongadas, estas tongadas son de unos 50 cm, que se pueden regar.

-Una vez conseguida la homogeneización previa con una humedad (aproximadamente del 16%) en la mezcla, la arcilla preparada pasa a una tolva de recepción en la que gracias a una báscula continua se pesa acorde al porcentaje en peso fijado en los ensayos tecnológicos. Igualmente la arena fina

silíceo, que sirve de desgrasante, es pesada en su porcentaje respectivo respecto al total de mezcla, incorporándose al proceso de molienda.

-Antes de la molienda, en la cinta transportadora que se sitúa a la salida de las tolvas de alimentación se comprueba su grado de humedad, mediante el proceso indicado en la UNE 7328 (determinación de la humedad mediante secado en estufa) o bien mediante balanzas de infrarrojos corrigiéndose de forma inmediata si fuese necesario.

-La molienda en laminador primario trabaja comprimiendo el material entre dos cilindros de acero, pudiéndose graduar la separación entre los cilindros hasta conseguir la granulometría deseada, en esta parte del proceso inferior a 2 mm, después se pasa a un silo de reposo y maduración, en el que tienen lugar reacciones arcilla-agua, así como reacciones químicas y bacteriológicas en la arcilla. En este silo el material permanece durante un mínimo de 5 días, hasta su utilización.

-Continuamos en el laminador secundario de características similares al descrito anteriormente, la separación entre cilindros es de 0,5 mm, con lo que el material ya laminado poseerá una granulometría de tamaño máximo inferior a 0,5 mm. Esto se comprueba mediante la realización de ensayos granulométricos por tamizado (norma UNE 7139). Tras la adición de agua en forma de líquido o vapor, la arcilla tras su paso por una amasadora de vacío pasa a una máquina extrusora o galletera y los parámetros son: Velocidad de salida por el molde (para su control se hacen varias marcas con un micrómetro, hasta conseguir el llamado equilibrado del molde), estado plástico de la masa (Límites de Atterberg según norma UNE-7002), temperatura y cantidad añadida de agua, amasado de arcilla con vapor caliente, presión de extrusionado (se coloca a la salida de la extrusora un manómetro de aire graduado), también se utiliza un penetrómetro Geotester, en el cual marca la presión al apretar el vastago contra la arcilla moldeada.

Tras el extrusionado, las piezas en estado húmedo (próximo al 16 % de humedad) y ya cargadas en las correspondientes vagonetas, pasan al secado:

- 1.- Secado de agua libre por flujo de agua hacia la superficie de la arcilla.
- 2.-Secado de agua fijada eléctricamente a las partículas arcillosas. De forma que a medida que aumenta el secado se reduce el rendimiento.

En la masa de la arcilla la primera humedad que se pierde es la última adicionada o agua libre. Durante las 2 ½ horas la cantidad de agua evaporada se mantiene constante 2%/hora. Los factores a controlar en el secado son:

- Velocidad de secado (un secado rápido da grietas de secado).

- Cantidad de agua libre (que al aumentar se reduce la consistencia) y se incrementa la contracción de secado.

- Temperatura de la pieza al introducirse en el secadero (si se entra fría en el secadero caliente, queda la superficie hueca y defectuosa), ésta es una de las causas de que se amase con vapor en el proceso de extrusión. El óptimo de temperatura de entrada al secadero es entre 45-60 °C.

- Revenido o rehidratación que la pieza seca experimenta cuando a la salida del secadero queda expuesta a la humedad ambiental. Se utilizar un prehorno (entre 10 a 12 horas) a una temperatura de entre 250°C.

- Contracción en el secado.

- Resistencias mecánicas a flexión en seco, las resistencias han de ser superiores a 30 kg/cm², para evitar las roturas de las piezas durante el apilado. Arcillas entre 30-70 Kg/cm², pueden considerarse normales en las que el secado se realiza con facilidad, y resistencias mayores de 70 kg/cm² son arcillas a las que hay que añadir desgrasantes.

Durante el calentamiento de las arcillas se producen una serie de reacciones, como absorción y desprendimiento de calor, desprendimiento de gases, y dilataciones y contracciones. Las técnicas más usuales para el estudio de las reacciones de cocción son el análisis Térmico Diferencial, el análisis Termogravimétrico, el análisis Termodilatométrico (ATD) que es el cambio de volumen que la pieza experimenta en la cocción, responsable directo de la aparición de grietas en el producto cocido.

La arcilla montmorillonítica tiene grandes riesgos en su uso por el efecto de la contracción. Si introducimos el material frío y húmedo en horno túnel continuo, aparecen desconchados originados por el vapor de agua acumulado en el interior y se presenta entre los 100 y 300 °C, aparecen fisuras y bajas resistencias mecánicas sobre el material cocido. La reducción o corazón negro, se produce al no realizarse la normal combustión de la sustancia orgánica antes de que la pieza entre en zona de fuego y la arcilla comience a vitrificar, el carbono se oxida a expensas de Fe₂O₃, y pasa a ser óxido ferroso de color gris.

Las grietas por enfriamiento se forman entre 600 y 400 °C, como consecuencia de la contracción que acompaña a la transformación de Cuarzo B en su polimorfo Cuarzo A, no se ven a simple vista por ello es necesario golpear a la pieza con un objeto metálico.

4.2. MÉTODO DE ENSAYO Y CARACTERIZACIÓN

4.2.1. ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN CON EDÓMETRO (19)

El ensayo de consolidación unidimensional del terreno en edómetro no se desarrolla en las potencialidades de obtener datos sobre la compresibilidad de los suelos finos (véase la figura IV 2 y IV 3). En las arcillas la consolidación requiere tiempo, la velocidad de expulsión del agua es lenta, las muestras asientan después de superar la presión de hinchamiento. Se obtiene el asiento del terreno y el módulo edométrico, además de la permeabilidad y la presión de consolidación, y permitir cuantificar la erosión que falta por la acción geodinámica.

Figura IV 2. Bancada Edométrica

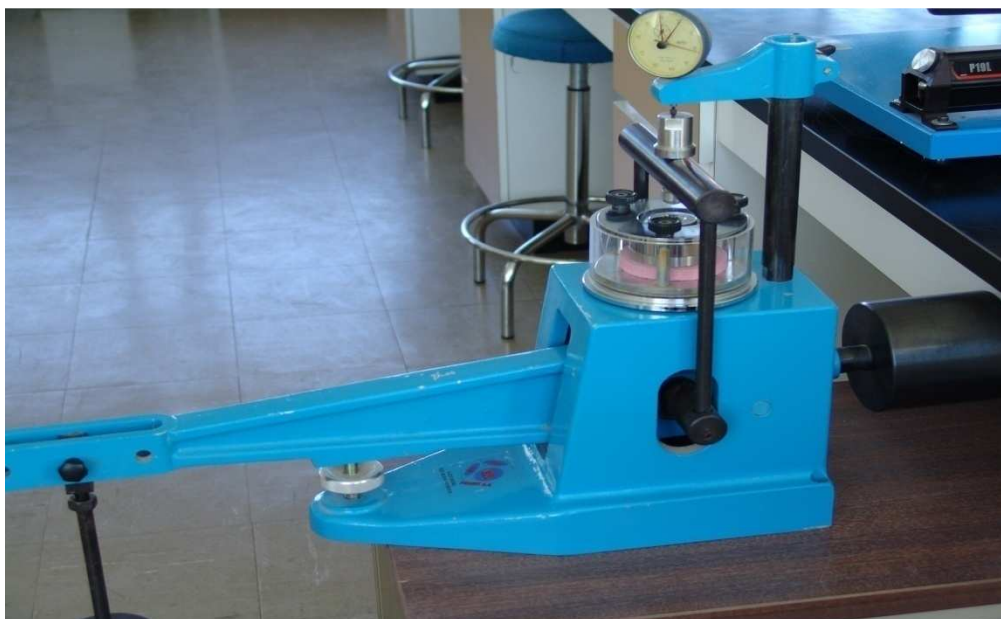


Figura IV 3. Probetas sometidas al ensayo edométrico



El ensayo edométrico basado en la teoría de la consolidación, lleva más de 30 años investigándose, determina las características de consolidación de los suelos finos y el hinchamiento (UNE 103-405-94 y UNE 103-601-96) requeridos por la norma básica de estudios geotécnicos [61], en el año 2003 Xie, K.H. et al [59] aportan una solución analítica. Tratamos la consolidación unidimensional de compresión confinada que depende del tiempo. En finos plásticos la realización del ensayo resuelve problemas en las cimentaciones al estudiar los asentos del terreno, cuando el suelo recibe cargas y existe humedad alta, de manera que se puede llegar al colapso, es decir, al fallo de capacidad de carga en arcillas casi saturadas. También se analiza el hinchamiento para el caso en que la carga sea menor que la presión de hinchamiento [20].

La consolidación primaria se produce cuando los huecos se reducen por eliminación de aire y agua, con disipación intersticial al someter el suelo a carga de compresión, el agua adquiere presión y se inicia su extrusión lenta. Por lo que la consolidación puede requerir años, mediante el edómetro podemos conocerla en escasos días; al disminuir el volumen de vacíos del suelo aparece distorsión de granos y la muestra asienta, sobre todo si la carga es superior a la presión de consolidación (P_c) determinada fácilmente por el método de A. Casagrande [50], aunque la deformación y la tensión no son proporcionales.

La muestra arcillosa inalterada posee un determinado índice de poros inicial (e_0), la probeta con ella realizada tiene una altura H (normalmente de 2 cm) y se somete a una presión P , impidiendo la deformación horizontal, y hasta el equilibrio. Al subir la presión bajan los vacíos y obtenemos el módulo edométrico E_m . Siendo m_v el coeficiente de deformación volumétrica o disminución de volumen.

$$E_m = \Delta P / \Delta H / H = 1/m_v$$

En el ensayo se inunda el edómetro y aplicamos incrementos de carga a la probeta hasta que el comparador llega al reposo, carga de 24 horas, pero 7 horas son suficientes y hace que el suelo no adquiera resistencia en las siguientes medidas al duplicar la carga. Se continúa hasta la máxima presión y se descarga, la probeta aumenta el volumen y medimos su altura, y humedad.

La representación del ensayo edométrico es la curva edométrica que relaciona las presiones con los índices de poros alcanzados al final de cada consolidación [61]. En la ciudad de Méjico, existe subsidencia regional y bajas frecuencias que amplifican los eventos sísmicos, se ha medido durante 10 años

la presión de poro hasta profundidades de 50m y disminuye 0,02 kpa/año [57].

Se mide la deformación vertical a lo largo del tiempo, este asiento se produce por la nueva disposición de granos, cuando la velocidad de consolidación se anula está finalizado el proceso. Se determina el asentamiento o la deformación en función del logaritmo del tiempo, que es la Curva de Consolidación, de ella deducimos el coeficiente de consolidación C_v , que se expresa en $\text{cm}^2/\text{minuto}$ y es el producto de la permeabilidad K por el módulo edométrico E_m (para un peso específico del agua de 1).

$$C_v = 0,197 H^2 / t_{50}$$

En la lutita namuriense de Belmez (Córdoba) se ha obtenido $C_v = 0'01 \text{ cm}^2/\text{min}$ una permeabilidad $K = 13'9 \cdot 10^{-5} \text{ cm}/\text{min}$ y un tiempo para el 100% de consolidación de 17'4 años ($t_{50}=20 \text{ min}$ es el tiempo al 50% de consolidación) y $H=1\text{cm}$ que es $\frac{1}{2}$ del espesor de muestra al drenar por los dos lados). Repetimos la metodología del ensayo aplicando un incremento de presión (ΔP) o escalón de carga y se obtiene la Curva de Consolidación del nuevo escalón de carga; después de aplicar varios incrementos de presión, continuamos haciendo un escalón de descarga, de recuperación de volumen.

El suelo fino normalmente consolidado es aquél que nunca estuvo sometido a sobrecarga o presiones efectivas in situ (P_c) mayores que las existentes en el terreno en el momento actual (P_o), este suelo se comprime más que otro sobreconsolidado. La ciudad de Roma está afectada por los 50m de depósito del valle del Tiber y presenta subsidencia moderada de 0,5cm/año durante 50 años de consolidación primaria [53].

El suelo fino sobreconsolidado o preconsolidado ha sufrido sobrecarga efectiva o presión de preconsolidación (P_c) mayores que las normales existentes en el terreno ($P_o = \text{densidad} \times \text{profundidad}$). Se han formado uniones diagenéticas como consecuencia de la tensión (P_c) a la que ha estado sometido el suelo en la historia geológica y luego se ha eliminado parte de la carga, generalmente por erosión del terreno, otra causa de la preconsolidación (OCR) son las tensiones residuales orogénicas o la variación freática [52].

$$\text{OCR} = P_c / P_o$$

La curva edométrica se presenta en la relación índice de poros (e) y logaritmo de presiones (P). La compactación es reducir poros o vacíos al eliminar aire, a mayor presión aparece la consolidación primaria que produce el inicio de la eliminación de agua con disipación de la presión intersticial; ya en la consolidación secundaria hay resbalamiento de partículas sólidas, continúa la

deformación después de disipar la presión de poro.

La altura de sólidos inicial es H. La relación lineal del asentamiento por consolidación es el coeficiente de compresibilidad (a_v) que es la pendiente de la curva edométrica, el incremento de presión (ΔP) y el cambio de relación de vacíos (Δe). Este Δe es la relación del cambio de espesor de la muestra (ΔH).

$$a_v = m_v (1+e_0) = \Delta e / \Delta P$$

En la lutita namuriense de Belmez se ha obtenido $a_v=0'017\text{cm}^2/\text{kg}$, $m_v=0'014\text{ cm}^2/\text{kg}$, $E_m = 71'43\text{ kg/cm}^2$. En esta fase del suelo y en el edómetro, se puede calcular el asentamiento (ΔH). La variación de volumen es una disminución del índice de vacíos, debido a la expulsión del agua.

$$C_c = (e_0 - e_2) / \lg (P_2 / P_0)$$

$$\Delta V / V = \Delta e / (1+e_0) = \Delta H / H$$

$$(t/H^2) \text{ muestra} = (t/H^2) \text{ suelo}$$

[6]

$$C_c=0,01 \text{ (LL-16,4)}$$

$$C_c=0,99 W_o^{1,315}$$

En la restauración del edificio La Normal de Granada se ejecutó inyección de consolidación, se prospectó hasta 50 m de profundidad, el nivel freático se encuentra a 16 m, la presión de preconsolidación y la capacidad portante no llegaban a 1 kg/cm^2 , se obtiene $E_m=10.000\text{ KN/m}^2$, $C_c=0,13$ y la velocidad de ondas cizalla es $V_s=500\text{ m/sg}$ [55].

La relación con los asentamientos la da la pendiente del tramo de consolidación noval que es el índice de compresión (C_c). En la lutita namuriense de Belmez se ha obtenido para una carga de 2 kg/cm^2 un asentamiento total (ΔH) de $6'1\text{ cm}$, para una capa activa H de 3 m de suelo.

A manera de conclusión se decide que no es necesario el ensayo edométrico en arcillas con un límite líquido menor del 30% de humedad. También baja el hinchamiento a medida que profundizamos en el terreno y se hace mínimo si la carga sobre el terreno se acerca a la presión de hinchamiento. Teniendo en cuenta que el asentamiento es proporcional al cuadrado de su espesor, si retiramos la capa superficial del terreno y rellenamos con una tongada de zahorra calcárea se consigue disminuir el hinchamiento. También las zonas extensas pavimentadas mantienen la humedad del suelo [20]. Pero los rascacielos sobre roca requieren determinar el rock mass rating -RMR- para estimar el módulo de elasticidad [54].

Usualmente la muestra se ha saturado y se estima que el módulo de elasticidad es el 70% del módulo edométrico (E_m) y otros autores han correlacionado E_m con el número de golpes (N) del ensayo estándar de penetración [60]. En el ensayo edométrico se aconseja utilizar una duración de 7 horas para los incrementos de carga, en vez de las 24 horas actuales, porque no modifica los resultados hasta el escalón de 10 kg/cm². Consideramos discutibles y no apropiados los resultados obtenidos de 4 horas para la duración mínima de estos incrementos, en 1994 por Sridharan, A. et al [58]. Las arcillas plásticas se retraen con profundidades de la capa activa de unos 3 m (H) y aparecen grietas de tracción de equilibrio de humedad. Así en terrenos arcillosos blandos se deben excavar para compensar las cargas que se coloquen sobre el cimiento semiprofundo. Además la permeabilidad y el ratio de preconsolidación son resultados aportados por este nuevo ensayo, pero la deformación de la arcilla necesita instrumentación in situ por prevención [51].

4.2.2. CARACTERIZACIÓN EN LUTITAS DE SIERRA MORENA

En lutitas devónicas muy replegadas, con frecuentes vénulas de óxidos de hierro, el IGME (2) ha realizado un análisis químico sobre muestra inalteradas en la extracción de Mina Luisa (carretera de Belmez a Hinojosa):

$SiO_2 = 49'90$, $Al_2O_3 = 35'77$, $Fe_2O_3 = 0'97$, $TiO_2 = 0'60$, $K_2O = 3'37$, $Na_2O = 1'28$, pérdidas por calcinación (ppc) = 8'10, y exenta de S.

Dado el alto contenido en alúmina, se realiza un desmuestre de cinco muestras, en el mismo yacimiento un kilómetro más al este (al límite del término municipal de Hinojosa con Villanueva del Duque), que dieron:

$SiO_2 = 55$ a 60 , $Al_2O_3 = 25$ a 29 , $Fe_2O_3 = 1$ a 5 , $TiO_2 = 0'5$ a $0'6$, $CaO = 0'1$ a $0'3$, $MgO = 0'3$ a $0'4$, $K_2O = 2'5$ a 4 , $Na_2O = 1$ a $1'5$, ppc = 6'5 a 9'5.

También se realiza un desmuestre, por el IGME, dos kilómetros al sureste del anterior y sobre la misma corrida del yacimiento, obteniendo:

$SiO_2 = 57$ a 63 , $Al_2O_3 = 20$ a 25 , $Fe_2O_3 = 2$ a 9 , $TiO_2 = 0'5$, $CaO = 0'05$ a $0'3$, $MgO = 0'4$ a $0'8$, $K_2O = 3$ a 4 , $Na_2O = 0'5$ a 1 , ppc = 6'5 a 7'6.

Sobre la muestra inalterada de la mina Luisa se han realizado difractogramas de rayos X, sobre polvo sin tratar, agregado en polvo con agua, calcinado a 500°C durante 30 minutos y por último con agregado de glicerina; en todos ellos se observan los mismos minerales: pirofilita, caolinita e illita, apareciendo en algunos casos hematites, y es característica la ausencia de cuarzo libre. También se ha realizado un análisis térmico diferencial que confirma la asociación de minerales citada. La sinteración del material se realiza a los 1.150°C con un amplio margen de cocción que llega hasta 1.350°C, produciéndose a partir de 1.400°C una expansión considerable.

Además de las anteriores lutitas devónicas, se han investigado otros dos tipos de lutitas del Guadiato, que son la Namuriense y la Westfaliense (véase la figura IV 4), los materiales se seleccionan mediante una sectorización geológica de diez estaciones de muestreo de diferentes lutitas paleozóicas.

SELECCIÓN DE MUESTRAS

1) Lutita Westfaliense nº 1 : Mina San Antonio (PMC)

2) Lutita Devónica
Mina Luisa { color blanco (A), nº 2
color blanco-rojizo (B), nº 9
color blanco-más rojizo (C), nº 10

3) Lutita Namuriense

Zona Oeste: Estación Puente, nº 3
Zona Central y Norte: Cabeza de Vaca, nº 4 y nº 6
Zona Este: Bujadillo, nº 5
Zona 3: Estación Tejar, nº 7
Zona del Parque Municipal de Belmez, nº 8

Las muestras han sido recogidas con tomamuestras cilíndricos, una vez eliminada la capa superficial y a una profundidad de 1 m (excepción de las lutitas devónica y westfaliense, recogidas en cantera y en sondeos), por lo que pueden poseer trazas orgánicas. El todo-uno se ha cuarteado y han sido sometidas a preparación mineralúrgica, posteriormente se seca al aire y se muelen 5 Kg por muestra, primero por machacadora de mandíbulas (máximo de 2 cm) que trabaja por aplastamiento a compresión entre dos mandíbulas, una fija y la otra móvil, y posteriormente por molturación en seco en el molino de bolas de acero, que actúa por compresión, percusión y fricción. El acabado se realiza en seco en el molino de bolas cerámicas y en el molino de mano, todo en seco, hasta 50 micras.

4.2.2.1. Análisis químico y mineralógico

Se ha realizado un primer grupo de ensayos de microscopía electrónica o de barrido, análisis de energía disipativa por rayos X (EDAX) en varias muestras de la lutita del devónico y de la lutita namuriense, obteniendo:

- Lutita Devónica (Mina Luisa):

Son arcillas refractarias claras "fire clay", en España son pizarras alumínicas o sericíticas, en Brasil se las conoce como filitos cerámicos (mezclas con pirofilita), en Japón se nombran como roseki (arcillas pirofiliticas) y en China se conocen como pagoditas (23).

$\text{SiO}_2 = 51'5$ a $64'5\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 29'5$ a 21% , $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 4'72$ a $4'75\%$, $\text{TiO}_2 = 0'93$ a $1'07\%$, $\text{CaO} = 0'09$ a $0'1\%$, $\text{MgO} = 0'42$ a $0'39\%$, $\text{K}_2\text{O} = 2'75$ a $3'15\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 1'66$ a $2'43\%$, pérdida por calcinación (ppc) = $5'58$ a $7'32$.

- *Lutita Namuriense (Estación de Belmez):*

Es una lutita marina con significativa presencia de hierro, potasio, magnesio, sodio y titanio. El magnesio contribuye a ser fundente esta lutita, además reduce los óxidos y descompone los ácidos.

$\text{SiO}_2 = 56'9\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 17'9\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 10'7\%$, $\text{TiO}_2 = 0'93\%$, $\text{CaO} = 0'53\%$, $\text{MgO} = 1'9\%$, $\text{K}_2\text{O} = 4,6\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 1\%$, ppc = $5'86$ y exenta de S.

- *Lutita Namuriense (El Bujadillo de Belmez):*

Elementos químicos: O = 53 a $57'5\%$, Na = $0'3$ a $0'4\%$, Mg = 1% , Al = $10'6$ a $11'5\%$, Si = 22 a 24% , K = $2'6$ a $3'3\%$, Ca = $0'8\%$, Ti = $0,5$ a $0'6\%$ y Fe = $4'5\%$.

Se han realizado los análisis químicos de energía disipativa de rayos X (EDAX) en las muestras referidas de lutitas devónicas, namurienses y westfalienses (ver tablas IV 1 a IV 9), ensayadas en polvo de <50 micras y también en trozos sin moler, obteniéndose porcentajes de los elementos químicos. En la figura IV 5 se resumen los EDAX de lutitas en óxidos.

TablaIV 1. Lutita nº 1

LUTITA 1 (westfaliense)		
Elemento	Elemento %	Átomo %
O	59,71	73,03
Mg	0,26	0,21
Al	11,40	8,26
Si	22,94	15,98
K	3,15	1,57
Ti	0,62	0,25
Fe	1,88	0,66

TablaIV 2. Lutita nº 5

LUTITA 5 -sin carbonato, aunque tiene-		
Elemento	Elemento %	Átomo %
O	59,31	73,40
Mg	0,88	0,71
Al	10,54	7,73
Si	20,40	14,38
K	2,56	1,29
Ca	1,43	0,70
Fe	4,50	1,566

TablaIV 3. Lutita nº 2

LUTITA 2 (devónico -A-)		
Elemento	Elemento %	Átomo %
O	58,21	71,48
Mg	---	---
Al	12,91	9,40
Si	24,29	16,99
K	2,94	1,47
Ti	1,04	0,42
Fe	0,57	0,20

TablaIV 4. Lutita nº 6

LUTITA 6		
Elemento	Elemento %	Átomo %
O	58,99	72,98
Mg	0,92	0,74
Al	10,30	7,56
Si	22,16	15,62
K	2,39	1,21
Ti	0,33	0,13
Fe	4,87	1,72

Tabla IV 5. Lutita nº 4

LUTITA 4		
Elemento	Elemento %	Átomo %
O	59,51	73,44
Mg	0,91	0,74
Al	10,62	7,77
Si	20,87	14,67
K	2,60	1,31
Ca	0,56	0,27
Ti	0,45	0,18
Fe	4,45	1,57

Tabla IV 6. Lutita nº 7

LUTITA 7 -forzada sin carbonato-		
Elemento	Elemento %	Átomo %
O	53,64	69,04
Mg	0,90	0,76
Al	10,63	8,11
Si	23,81	17,46
K	3,18	1,67
Ti	0,73	0,31
Mn	0,82	0,30
Fe	6,24	2,30

Tabla IV 7. Lutita nº 8

LUTITA 8 -forzada sin carbonato-		
Elemento	Elemento %	Átomo %
O	59.78	73.24
Na	0,46	0,39
Mg	0.93	0.75
Al	10.88	7.90
Si	21.52	15.02
K	2.69	1.35
Ti	0,36	0,15
Fe	3,33	1,16

Tabla IV 8. Lutita nº 9

LUTITA 9 (devónico -B-)		
Elemento	Elemento %	Átomo %
O	57.49	70.93
Al	16.11	11.78
Si	21.55	15.15
K	2.36	1.19
Ti	1.01	0.41
Fe	1.45	0.51

Tabla IV 9. Lutita nº 10

LUTITA 10 (devónico -C-)		
Elemento	Elemento %	Átomo %
O	59.96	74.76
Al	10.39	7.68
Si	18.74	13.31
P	0.34	0.22
K	1.41	0.72
Ti	0.42	0.17
Fe	8.71	3.11

Figura IV 5. Ensayos Químicos de energía disipativa rayos X (EDAX)

Lutita devónico: SiO₂=52, Al₂O₃=30, Fe₂O₃=4`7, TiO₂=1, CaO=0`1, MgO=0`4, K₂O=3, Na₂O=1`8, ppc=7

Lutita namuriense: SiO₂=56, Al₂O₃=18, Fe₂O₃=10, TiO₂=1, CaO=0`5, MgO=2, K₂O=4`5, Na₂O=1, ppc=6

Lutita westfaliense: Tiene una tercera parte del magnesio que posee la lutita namuriense y algo más de silicio.

Por otra parte el método para la identificación de minerales arcillosos se basa en el espectro que resulta de su difracción por rayos X, este análisis es semicuantitativo y supone una suficiente aproximación para los componentes de una mezcla, dependiendo los resultados de los poderes reflectantes atribuidos a cada fase. No se ha distinguido entre clorita y vermiculita, dado que hay poca cantidad de ambas, la vermiculita tiene más capacidad de cambio que la clorita aunque sus picos aparecen juntos en los diagramas de difracción. Se analizan las lutitas 1, 2, 3, 4 y 5 (tabla IV 10).

Las lutitas nº1 (westfaliense) y nº2 (devónica) tienen pocos minerales hinchables como interestratificados y esmectitas, la lutita nº3 (namuriense) tiene trazas, y las lutitas namurienses nº4 y nº5 tienen cantidades apreciables. La lutita nº2 es la única con pirofilita, que es semejante al talco y tiene aluminio en lugar de magnesio, se parece mucho a la mica blanca (illita y moscovita) pero no tiene potasio y es más rica en aluminio.

Tabla IV 10. Análisis por difracción de rayos X de las lutitas

Análisis semicuantitativo por difracción de rayos X								
Lutita	Mineral	Interestratificado	Esmectita	Clorita + Vermiculita	Illita	Pirofilita	Caolinita	Cuarzo
	Poder reflectante	1,5	2,6	2,5	1	1	2,75	3
1	%	0,00	0,00	0,61	70,35	0,00	15,85	13,19
2	%	1,79	1,03	0,54	39,95	49,70	4,61	2,35
3	%	0,00	15,37	11,42	46,92	0,00	17,14	9,16
4	%	33,26	10,96	5,62	26,35	0,00	13,56	10,25
5	%	32,69	10,86	8,85	28,74	0,00	12,42	6,44

Parece correcto adoptar los siguientes valores:

Lutita 1 "Westfaliense": 70% illita, 16% caolinita, 13% cuarzo, 1% clorita/vermiculita.

Lutita 2 "Devónico": 50% pirolilita, 40% illita, 5% caolinita, 2% cuarzo, 1% clorita/vermiculita, 1% esmectita, 1% interestratificados.

Lutitas 3, 4 y 5 "Namuriense": 47% illita, 17% caolinita, 9% cuarzo, 11% clorita/vermiculita, 15% esmectita.

4.2.2.2. Ensayos en productos acabados con las lutitas

Se han recogido productos cerámicos elaborados con lutitas carboníferas para su ensayo, son cuatro muestras sometidas a rotura a compresión uniaxial. La fractura frágil en los productos acabados cerámicos ha sido la respuesta a cualquier carga de tracción, se forman fisuras a través de granos en una dirección perpendicular a la carga. La tenacidad de fractura en las fisuras es inferior a 10 Mpa. La tensión a la fractura se denomina módulo de rotura o resistencia a la flexión (σ).

$$\sigma = \frac{3FL}{2bd^2}$$

F = fuerza de rotura aplicada en el centro.

L = distancia entre apoyos.

b = anchura de la probeta.

d = espesor de la probeta.

Momento de flexión Máximo = M = FL/4.

Momento de inercia de la sección = I = bd³/12

Durante el tratamiento térmico de las arcillas mucha porosidad es eliminada. La porosidad final tiene efecto negativo, disminuye las propiedades elásticas y el módulo de rotura. Los poros reducen al área donde actúa la carga y concentran tensión. Un 10% de porosidad baja el módulo de rotura un 50%. Se han preparado probetas mediante el corte con disco diamantado de los productos acabados en cuatro muestras procedentes de los dos hornos inactivos de Belmez (el Tejar y Cabeza de Vaca) (56). Los ensayos de las muestras han verificado la resistencia a compresión en frío, midiendo la deformación, módulo de elasticidad de Young, porosidad, densidad aparente y solubilidad a los ácidos de los ladrillos.

Muestra A: Ladrillo rojo, prensado, con dimensiones 21'5 x9'5 x5'5 cm. Posee una porosidad del 5%, una densidad aparente de 2'2 T/m³; La resistencia a

compresión es $\sigma_c=667 \text{ Kg/cm}^2$ y el módulo de deformación es de $E=8.120 \text{ Kg/cm}^2$, con rotura de frágil de la probeta en cuatro fracturas.

Muestra B: Teja maciza hecha a mano, con huecos y clastos. Tiene 1'5 cm de espesor, una porosidad del 14%, densidad aparente de $2'01 \text{ T/m}^3$, resistencia a compresión $\sigma_c=280 \text{ Kg/cm}^2$ y el módulo de deformación $E=7.143 \text{ Kg/cm}^2$, con una rotura en cinco fracturas con presencia de polvos.

Muestra C: Ladrillo macizo basto hecho a mano, con huecos y clastos, con dimensiones de 25 x12 x5 cm. Posee una porosidad del 14%, una densidad aparente de $2'1 \text{ T/m}^3$, resistencia a compresión de 200 Kg/cm^2 y módulo de deformación $E =4.545 \text{ Kg/cm}^2$, con una rotura en cinco fracturas.

Muestra D: Ladrillo refractario de Cabeza de Vaca, prensado con marca "Ladrillera de Belmez", con dimensiones de 22 x10 x5'5 cm. Posee una porosidad del 6%, una densidad aparente de $2'2 \text{ T/m}^3$, resistencia a compresión de $\sigma_c =500 \text{ Kg/cm}^2$, y su módulo de deformación es de $E =11.218 \text{ Kg/cm}^2$.

4.2.2.3. Absorción, peso específico y porosidad

Ha sido recogido un abundante muestreo, para el estudio de detalle, de las estaciones de las cinco lutitas en las que se ha realizado técnicas de difracción de rayos X, para la determinación mineralógica. Las muestras de lutitas namurienses n^{os} 3, 4 y 5 (en Belmez), han sido extraídas del terreno coherente mediante calicatas. Las muestras de la lutita westfaliense n^o1 procede del sondeo S-307-2 (mina San Antonio en Belmez) y el muestreo de la lutita devónica n^o 2 ha sido tomada del fondo de la cantera Luisa (Hinojosa del Duque). Se han ensayado repetidas muestras con calibre inferior a 2 mm, mediante técnicas de densimetría con picnómetro

- N^o 1. Lutita Westfaliense

El peso específico aparente seco (relación del peso de sólidos al volumen total) es: $\gamma_d = 2'2 \text{ T/m}^3$ (para el calibre 2-8 mm), $\gamma_d = 2'1 \text{ T/m}^3$ (para el calibre <2 mm). El peso específico aparente saturado-superficie-seca (que incluye los huecos accesibles al agua) es: $\gamma_{ap \text{ sss}} = 2'3 \text{ T/m}^3$ (calibre 2-8 mm), $\gamma_{ap \text{ sss}} = 2'16 \text{ T/m}^3$ (calibre <2mm). El peso específico real o de partículas sólidas (excluyendo el volumen de huecos accesible al agua) es: $\gamma_s = 2'43 \text{ T/m}^3$ (calibre 2-8 mm), $\gamma_s = 2'18 \text{ T/m}^3$ (calibre <2 mm). El peso específico aparente "in situ" o total es: $\gamma = 2'4 \text{ T/m}^3$. La absorción de agua es del 3'51% y la porosidad de la roca intacta es del 9%.

- Nº 2. Lutita Devónica

$$\gamma_d = 2 \text{ T/m}^3$$

$$\gamma_{ap \text{ sss}} = 2'03 \text{ T/m}^3$$

$$\gamma_s = 2'05 \text{ T/m}^3$$

$$\gamma = 2'1 \text{ T/m}^3. \text{ Absorción de agua} = 2'7\%. \text{ Porosidad de la roca intacta} = 15\%$$

- Nº 3. Lutita Namuriense (Estación Puente)

$$\gamma_d = 2'2 \text{ T/m}^3$$

$$\gamma_{ap \text{ sss}} = 2'25 \text{ T/m}^3$$

$$\gamma_s = 2'3 \text{ T/m}^3$$

$$\gamma = 2'4 \text{ T/m}^3. \text{ Absorción de agua} = 1'9 \text{ a } 2'1\%. \text{ Porosidad de la roca} = 12'5\%$$

- Nº 4 y Nº 6. Lutita Namuriense (Cabeza de Vaca)

$$\gamma_d = 2'2 \text{ T/m}^3$$

$$\gamma_{ap \text{ sss}} = 2'3 \text{ T/m}^3$$

$$\gamma_s = 2'35 \text{ T/m}^3$$

$$\gamma = 2'4 \text{ T/m}^3. \text{ Absorción} = 2'5 \text{ a } 2'92\%. \text{ Porosidad de la roca intacta} = 6'5\%$$

- Nº 5. Lutita Namuriense (Bujadillo).

$$\gamma_d = 2'25 \text{ T/m}^3$$

$$\gamma_{ap \text{ sss}} = 2'35 \text{ T/m}^3$$

$$\gamma_s = 2'4 \text{ T/m}^3$$

$$\gamma = 2'5 \text{ T/m}^3, \text{ Absorción} = 3'5\%. \text{ Porosidad de la roca intacta} = 8'5\%.$$

4.2.2.4. Ensayos de plasticidad, compactación y penetración

- Plasticidad

Se han realizado los ensayos en las diez muestras lutíticas relacionadas con anterioridad. Éstas han sido sobre los límites líquido (LL), plástico (LP) y de retracción o contracción (LS), que son los respectivos límites del paso de

líquido a plástico, plástico a semisólido y semisólido a sólido. Según los ensayos de límites de Atterberg NLT 105/72 y NLT 106/72 en porcentaje de humedad, basados en Casagrande, y sobre las muestras molidas en las granulometrías: menor de 250 micras, de 250 a 500 micras y de 500 a un milímetro. Todo lo anterior caracteriza a estas lutitas como arcillas inorgánicas de media plasticidad ($LL < 50$), tipo CL, ver figura IV 6, con un límite de retracción del 4 al 6% de humedad. También se ha obtenido el índice de plasticidad (IP) o diferencia entre el límite líquido y el plástico.

Nº 1. Lutita Westfaliense.

<250 μ LL = 30 LP = 21..... IP = 9LS = 5
250-500 μ LL = 27 LP = 18..... IP = 9LS = 5

Nº 2. Lutita Devónica (A).

<250 μ LL = 49 LP = 32..... IP = 17LS = 4
250-500 μ LL = 50 LP = 33..... IP = 17LS = 5
500-1000 μ LL = 48 LP = 32..... IP = 16LS=4

Nº 3. Lutita Namuriense (Estación Puente).

<250 μ LL = 32'5..... LP = 22'5 IP = 10LS = 4

Nº 4. Lutita Namuriense (Cabeza de Vaca-vía).

<250 μ LL = 35 LP = 22..... IP = 13LS = 4
250-500 μ LL = 27 LP = 18'5 IP = 8'5.....LS = 4

Nº 5. Lutita Namuriense (Bujadillo).

<250 μ LL = 35 LP = 24..... IP = 11LS = 4
250-500 μ LL = 31 LP = 21..... IP = 10LS = 4

Nº 6. Lutita Namuriense (Cabeza de Vaca-vacie).

<250 μ LL = 33'5LP = 21'5.....IP = 12.....LS = 4

Nº 7. Lutita Namuriense (Estación Tejar).

<250 μ LL = 34 LP = 23..... IP = 11LS = 4

Nº 8. Lutita Namuriense (Parque).

<250 μ LL = 37 LP = 25..... IP = 12LS = 4

Nº 9. Lutita Devónica (B).

<250µ LL = 37'5..... LP = 26'5..... IP = 11LS = 4

Nº 10. Lutita Devónica (C).

<250µ LL = 47 LP = 28'5..... IP = 18'5.....LS = 6

Tabla IV 11. Plasticidad por el método de indentación.

Muestra: Lutita nº 1		Muestra: Lutita nº 2	
Límite líquido	32'5%	Límite líquido	50'0%
Límite plástico	20'0%	Límite plástico	24'0%
Índice de plasticidad.....	12'5%	Índice de plasticidad.....	26'0%
Muestra: Lutita nº 3		Muestra: Lutita nº 4	
Límite líquido	35'5%	Límite líquido	39'5%
Límite plástico	21'5%	Límite plástico	20'5%
Índice de plasticidad.....	14'0%	Índice de plasticidad.....	19'0%
Muestra: Lutita nº 5			
Límite líquido	39'5%		
Límite plástico	20'5%		
Índice de plasticidad.....	19'0%		

Figura IV 6. Plasticidad y carga admisible



➤ **ENSAYOS DE PLASTICIDAD**

Lutita westfaliense: LL=27-30 y LP=18-21

método indentación: LL=32,5 y LP=20

Lutita devónica: LL=38-50 y LP=27-33

método indentación: LL=50 y LP=24

Lutita namuriense: LL=27-37 y LP=19-25

Método indentación: LL=35,5-36,5 y LP=20,5-21,5

➤ **ENSAYO DE PENETRACIÓN** (carga admisible)

Lutita westfaliense: en LL=0,25kg/cm², en LP=1kg/cm²

Lutita devónica: en LL=0,2-0,3kg/cm², en LP=0,7-1kg/cm²

Lutita namuriense: en LL=0,2-0,3kg/cm², en LP=0,7-1,5

(con el 25% de humedad menos del LP=3-5kg/cm²)

- Penetración

Estas lutitas arcillosas han sido molidas a finos inferiores a 250 micras y se han realizado las determinaciones de los límites de Atterberg en diez muestras, obteniendo en la clasificación por el sistema unificado, el valor de CL, arcillas inorgánicas de media plasticidad y compresibilidad (presión de hinchamiento <math><1 \text{ Kg/cm}^2</math>), comprobándose en los ensayos realizados que poseen una resistencia dura en el límite de retracción (de 5 Kg/cm^2), una tenacidad o consistencia media en el entorno del límite plástico (de 0'6 a 2 Kg/cm^2) a firme (de 2 a 4 Kg/cm^2) y una consistencia en la cercanía del límite líquido de muy blanda a blanda ($0'3$ a $0'6 \text{ Kg/cm}^2$).

Se ha determinado en las diez muestras la resistencia a la penetración de varias puntazas (6, 10, 15, 20 y 25 mm) la principal es de 15 mm, utilizando un penetrómetro de laboratorio (*Geotester*) calibrado sobre las muestras cohesivas. El resultado es la carga admisible (figura IV 6) o resistencia a compresión, en el LL y en el LP, y la cohesión se considera la mitad de ésta.

La saturación o relación volumen de agua a volumen de vacíos, puede ser considerada máxima en las proximidades del 50% de humedad (todo ello a la vista del límite líquido que da menos de 50), en las diez muestras analizadas se considera un 40% de saturación en el límite plástico, un 80% de saturación en el límite líquido y un 10% en el límite de retracción, ver tabla IV 12.

- Compactación

Los ensayos de apisonado y de corte directo realizados se resumen en la figura IV 7. Siguiendo la norma NLT-107/72, con las lutitas tratadas en una machacadora de mandíbulas. Las humedades óptimas Proctor obtenidas son valores próximos al límite plástico. Con el ensayo Proctor se conoce la densidad seca máxima y una vez comparada con la densidad aparente del macizo rocoso *in situ*, obtenemos el tanto por ciento de esponjamiento o reducción de densidad, es decir, el aumento de volumen que se produce con el arranque del macizo rocoso lutítico. Obtenemos el 30% de esponjamiento (densidad seca máxima Proctor de 2 gr/cm³ y densidad aparente de 2'5 gr/cm³), el cual es considerado en la valoración de reservas (apartado 5.1.4) como lutita desaprovechable, por haberse considerado una densidad de 2 gr/cm³ en lugar de 2'5 gr/cm³; así, el 70% de recuperación supone el coeficiente de aprovechamiento de estas lutitas.

Se observa la tendencia de que las mayores porosidades corresponden a las muestras que dan la mínima humedad óptima (Proctor) y las mínimas porosidades las dan las muestras con la máxima humedad óptima de compactación. También que las muestras con mínimas absorciones son las que necesitan mayor humedad óptima.

Nº 1. *Lutita Westfaliense (Sondeo-307-2)*. Densidad seca máxima = 1'95 gr/cm³ y humedad óptima = 10%. Otros ensayos realizados en escombreras de carbón de minas dan valores mínimos de densidad seca máxima de 1'85 gr/cm³ y el 7% de humedad óptima.

Nº 2. *Lutita Devónica (incluidas las nº 9 y nº 10)*. Densidad seca máxima = 1'9 gr/cm³ y humedad óptima = 8%

Nº 3. *Lutita Namuriense (Estación Puente) (incluida la nº 8)*. Densidad seca = 1'9 gr/cm³ y humedad óptima = 13%

Nº 4. *Lutita Namuriense (Cabeza de Vaca)*. Densidad seca máxima = 1'9 gr/cm³ y humedad óptima = 13%

Nº 5. *Lutita Namuriense (Bujadillo) (incluida la nº 7)*. Densidad seca máxima = 1'9 gr/cm³ y humedad óptima = 12%

TablaIV 12. Capacidad de carga para diferentes porcentajes de saturación

Muestra	Carga admisible en el límite líquido (LL) Muy blanda	Carga admisible al 25% menos del LL Blanda	Carga admisible en el LP Media	Carga admisible al 25% menos del LP Firme
1	0,25 Kg/cm2		1 Kg/cm2 (4 horas)	
2	0,2 Kg/cm2		1 Kg/cm2 (4 horas)	
3	0,2 Kg/cm2		1 Kg/cm2 (4 horas)	5 Kg/cm2 (6 horas)
4	0,3 Kg/cm2		1'5 Kg/cm2 (3 horas)	3 Kg/cm2 (6 horas)
5	0,3 Kg/cm2		0'7 Kg/cm2 (4 horas)	
6	0,2 Kg/cm2	0,4 Kg/cm2 (2 horas)		
7	0,3 Kg/cm2	0,5 Kg/cm2 (3 horas)		
8	0,25 Kg/cm2	0,4 Kg/cm2 (3 horas)		
9	0,2 Kg/cm2		0'9 Kg/cm2 (5 horas)	
10	0,3 Kg/cm2		0'7 Kg/cm2 (5 horas)	
	80% saturación	60% saturación	40% saturación	20% saturación

Figura IV 7. Apisonado y corte directo

<p>PRUEBA PROCTOR</p> <p>Índice = 1,9</p> <p>Índice de compactación = 10, Índice de compactación = 12-13</p> <p>PRUEBA DIRECTA</p> <p>Índice de compactación = 24°</p> <p>Índice de compactación = 21°</p>

4.2.3. CARACTERIZACIÓN EN LAS MARGAS DE LA CAMPIÑA

4.2.3.1. Introducción

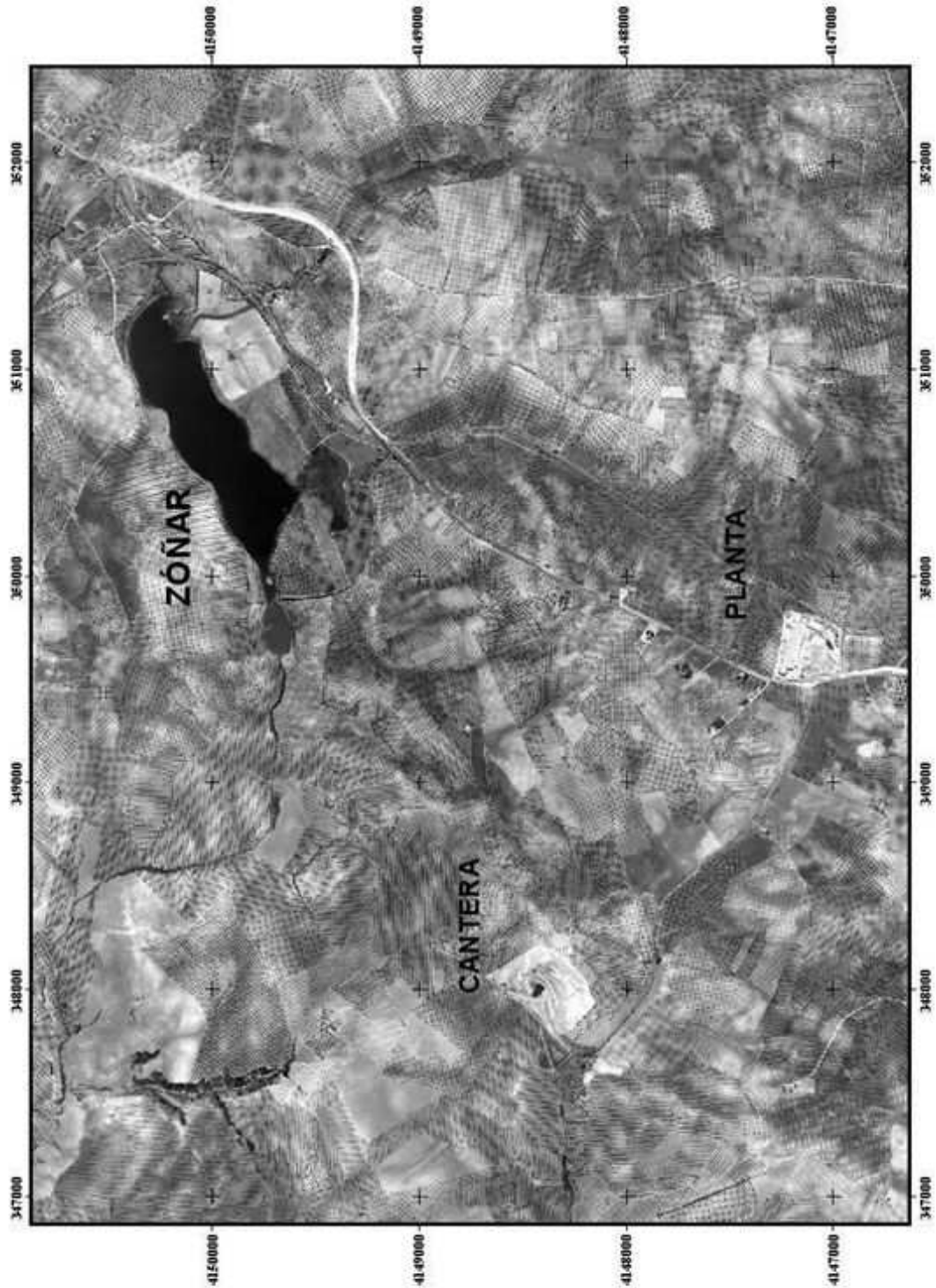
Los depósitos de margas se modifican después de la sedimentación con la diagénesis, debido al agua que llena los poros y el ambiente reductor. El agua, con el CO₂ intersticial, disuelve el carbonato cálcico y luego es drenada, precipitando en forma de concreciones o nódulos calizos por encima del nivel freático. El crecimiento de los nódulos es por precipitación (cementando) dentro de la porosidad intrínseca del sedimento, la difusión, el flujo y la permeabilidad controlan la formación de los nódulos y se va precipitando soluto sobre la superficie del nódulo para formar la estructura cristalina.

Los nódulos se emplazan por reacciones químicas entre la solución y el terreno, hay reemplazamiento de cementos y de granos. Estas concreciones suponen un problema en la fabricación de cerámica estructural, la mayor presencia de carbonato cálcico (y algún nódulo de sulfato) dificulta todo el proceso de cocción de los materiales, además estas concreciones son más abundantes en superficie y disminuyen en profundidad (en el lavado de margas en clima árido el depósito de precipitado se realiza en la zona superficial), ello es conocido en la cantera y en la planta de Procerán (figura IV 8). La molienda en seco es incapaz de reducir a pequeño tamaño estos materiales más duros, por efecto de colchón que ejerce la arcilla, ello se considera en la investigación.

Los terrenos arcillosos de la Campiña de Córdoba compuestos por margas azules y blancas son lutitas del Mioceno continuas en la horizontal y en zonas de mal drenaje desarrollan vertisuelos. Además poseen una alta proporción de carbonato cálcico y esta arcilla cerámica está condicionada a una temperatura de cocción de 850°C, por tener nódulos y concreciones.

Inicialmente, el planteamiento de la investigación de arcillas con baja proporción de carbonatos ha consistido en la selección de aquellas áreas más interesantes en la cartografía geológica; en ellas se realizan y aplican los métodos geofísicos de prospección de detalle, además la caracterización de las estaciones de muestreo y los ensayos geotecnológicos, para obtener información del subsuelo. Además, se ha precisado del conocimiento de la geología de la provincia de Córdoba como base de esta Tesis. Para poder interpretar las anomalías geofísicas, se ha llevado a cabo una prospección por medio de la técnica de tomografía de resistividades en el término municipal de Aguilar de la Frontera (Córdoba) que define la morfología y distribución de las formaciones litológicas en profundidad, con el fin de evaluar su explotación.

FIGURA IV.8. SITUACION DE LA CANTERA, PLANTA Y LAGUNA DE ZOÑAR (AGUILAR).



La presente prospección está orientada al descubrimiento de depósitos de arcilla de interés económico y su caracterización, supone además el conocimiento de la importancia industrial con vista a futuras investigaciones del terreno para la fabricación de productos cerámicos. Se han seguido dos criterios, uno litológico de caracterización con toma de muestras superficiales en campo (con la base de la cartografía Magna) y otro criterio geofísico de campo con sondeos eléctricos verticales, principalmente, en un programa de exploración que ha detectado las arcillas en profundidad. La integración de los trabajos realizados ha permitido conocer la distribución del CO_3Ca , la caracterización y continuidad de la arcilla y la estimación de su cocción.

El análisis mineralógico ha consistido en la difracción de rayos X (DRX) en muestras recogidas en las estaciones de campo. Las muestras “todo uno” han sido tomadas en diversas estaciones de las tres zonas prospectadas; además, se han muestreado tres frentes de la explotación de la cantera y otros dos en la futura cantera proyectada. En ellos se han realizado ensayos geotécnicos de caracterización. Previamente, las muestras “todo uno” se han homogeneizado mediante trituración primaria con machacadora de mandíbulas, análisis granulométrico y posterior molienda con molino de bolas. Con posterioridad, en el material retenido en tamiz ciento veinticinco micras se ha procedido al lavado de finos, y la arena resultante es significativa de la valoración de nódulos existentes en el “todo uno”.

En esta caracterización se ha prospectado materia prima apropiada para la elaboración de material cerámico poroso y aislante, arcilla aligerada apropiada para fabricar termoarcilla, que posee espesores de 8 a 5 mm, 50% perforada, resistencia de 130 kg/cm² y densidad menor o igual a 1'85 gr/cm³.

La unidad litoestratigráfica llamada “margas azules” depositadas durante el Mioceno superior es la actualmente en explotación. Existen afloramientos en un área amplia en la Hoja Geológica de Puente Genil. Estas capas alternas de margas y limos poseen abundantes nódulos o concreciones diagenéticas de carbonato cálcico.

4.2.3.2. Prospección geofísica (80)

La Prospección Geofísica Eléctrica consiste en una serie de técnicas que permiten la determinación de las diversas formaciones litológicas del subsuelo, aprovechando la diferencia de resistividad, o su inversa, la conductividad, entendidas como la dificultad o la facilidad con la que una corriente eléctrica puede fluir a través del terreno. Desde el punto de vista eléctrico el terreno se puede considerar, por un lado, como un agregado de minerales, y por otro, de fluidos y gases que rellenan sus poros. La resistividad de dicho agregado viene

determinada por factores como la porosidad, las discontinuidades presentes, los minerales de la arcilla, la materia orgánica presente, la humedad, la salinidad y la temperatura (16).

Inicialmente se valora la prospección contemplando la aplicación del método Geofísico Eléctrico VLF (baja frecuencia) para prospeccionar el terreno. Después de la realización de un perfil de tomografía eléctrica y al obtenerse muy bajas resistividades en estas margas, se constata que estamos fuera del campo de aplicación del método VLF así, con este método, la penetración a alcanzar llegará a 3'5 m para las resistividades de 4 Ω m de las arcillas cerámicas. Por ello se descarta el VLF y se prospecciona mediante los sondeos eléctricos verticales -SEV- y la tomografía eléctrica, para investigar el subsuelo en profundidad.

Para esta prospección se ha utilizado el método, desarrollado recientemente, de Tomografía Eléctrica 2-D (15) (17). Dicho método ha sido aplicado en la zona "suroeste de Aguilar" mediante la realización de un perfil en el que se utilizan 48 electrodos, separados 6 m. entre sí y conectados a un cable multi-conductor, utilizando un resistivímetro de corriente alterna de baja frecuencia. En esta metodología ensayada, se obtiene una sección geoelectrica utilizando un dispositivo Schlumberger (17) (figura IV 9), que se interpreta con el apoyo del criterio "a priori" obtenido en las observaciones de campo de los afloramientos litológicos, atribuyendo las resistividades obtenidas (tabla IV 13).

Tabla IV 13. Criterio "a priori" de resistividad aparente de las litologías que afloran

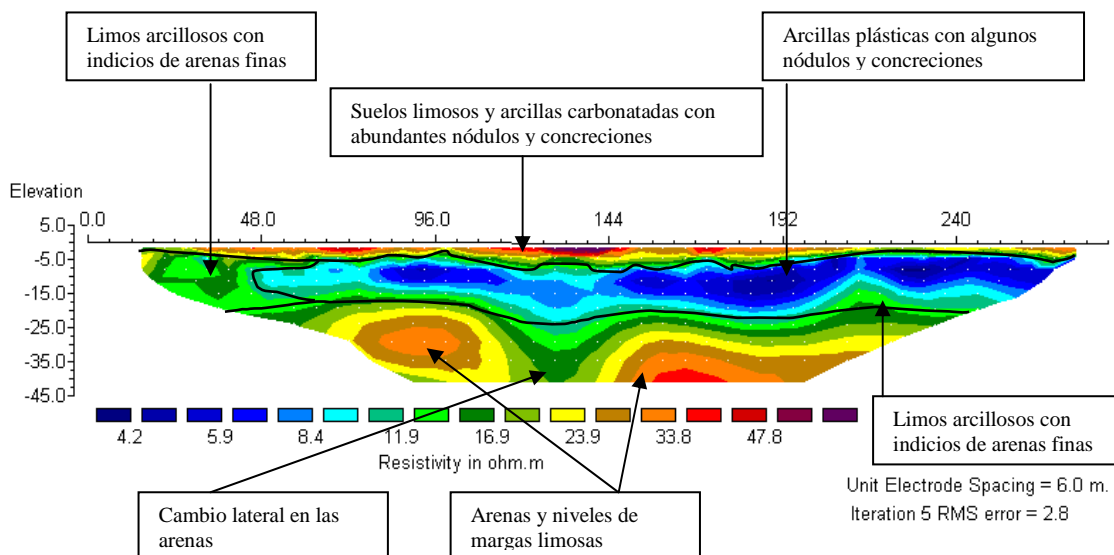
LITOLOGÍA ATRIBUIDA	RESISTIVIDAD APARENTE (Ω .m)
Suelos limosos y arcillas carbonatadas con abundantes nódulos y concreciones. (área marrón)	25
Arcillas plásticas con algunos nódulos y concreciones. (área azul)	4-10
Limos arcillosos con indicios de arenas finas. (área verde)	10-20
Arenas y niveles de margas limosas. (área amarilla-naranja)	20-50

Según este criterio, en el perfil de tomografía eléctrica (figura IV 9) se contemplan unidades horizontales con las siguientes profundidades:

- Suelos limosos y arcillas carbonatadas con abundantes nódulos y concreciones de calcita: es la unidad superficial y presenta una potencia de 1 m (área marrón).
- Arcillas plásticas con algunos nódulos y concreciones de calcita: se trata de la unidad margas azules "arcillas cerámicas", que representa un nivel guía de baja resistividad. Aparecen con una potencia de 20 m (área azul).

- Limos arcillosos con indicios de arenas finas que conforman los cambios laterales de facies (área verde).
- Arenas y margas limosas a 20 m de profundidad, (área amarilla-naranja).

Figura IV 9. Tomografía Eléctrica en la zona “suroeste de Aguilar”



resistividades y espesores de las diferentes formaciones presentes en la zona, mediante el empleo del dispositivo Schlumberger. En la zona “suroeste de Aguilar u oeste de la Planta de termoarcilla” se hacen los SEV nº 1, nº 4 y nº 5, en la zona “oeste de Moriles o este de la Planta” se ejecuta el SEV nº 2 y en la zona “norte de Puente Genil” el SEV nº 3. El SEV1 tiene una dirección de 200°, el SEV2 tiene dirección norte, el SEV 3 tiene una dirección de 40° y los SEV 4 y SEV 5 se realizaron en una cantera de margas azules en explotación.

Las curvas de resistividades aparentes de los cinco SEV se recogen en los parámetros de las capas del subsuelo (espesor-resistividad) de la tabla IV 14, que muestran aspectos muy similares, indicando cierta homogeneidad en los materiales investigados. Si bien el SEV nº 3 presenta al final de la curva un cambio de tendencia originado por la inclusión de un nivel resistivo de 49,1 Ω .m de posibles arenas saturadas. Todos los SEV muestran una capa con 4,0 Ω .m de resistividad aparente atribuido a las margas azules “arcillas cerámicas”. En el SEV nº 2 se atribuye a las margas blancas, y a muro de éstas aparecen resistividades de 1,5 Ω .m, que se interpretan como un diapiro salino existente en esta hoja de Puente Genil (nº988), al sureste de la laguna Zóñar. Así, en Moriles se registra una anomalía gravimétrica negativa un 20% inferior al entorno, lo que supone tener déficit de terreno en cuanto a densidad con una alta conductividad (www.igme.es).

Las curvas de los SEV se han suavizado e interpretado utilizando el

método del punto auxiliar con las curvas de Orellana (16). Posteriormente los resultados obtenidos se han optimizado, la diferencia entre los valores reales medidos en campo y las curvas teóricas viene indicada por el error mínimo cuadrático (rms), el cual constituye un indicador de similitud entre ambos grupos de datos.

Tabla IV14. Espesores de capas del subsuelo y resistividad: SEV n° 1, n° 2 y n° 3

SEV n°1 “SUROESTE DE AGUILAR”		
0,157 rms	Espesor	Resistividad (Ω.m)
Capa 1	3,9 m	23,7
Capa 2	48,7 m	11,0
Capa 3	∞	3,7
SEV n°2 “OESTE DE MORILES”		
0'458 rms	Espesor	Resistividad (Ω.m)
Capa 1	0,6 m	28,2
Capa 2	2,7 m	10,0
Capa 3	45,2 m	4,0
Capa 4	∞	1,5
SEV n°3 “NORTE DE PUENTE GENIL”		
0'283 rms	Espesor	Resistividad (Ω.m)
Capa 1	0,7 m	43,2
Capa 2	4,3 m	20,7
Capa 3	9,4 m	4,0
Capa 4	6,7 m	49,1
Capa 5	∞	2,9

Los SEV n° 4 y n° 5 no profundizan en el subsuelo, sino que se realizan en la cantera de explotación, ver figura IV 10, de la zona “suroeste de Aguilar” para recoger datos paramétricos, obteniéndose resistividades de 3,7 y 9,6 Ω .m respectivamente. En el SEV n° 5, a partir del metro de profundidad, se registra 3,7 Ω .m, lo que implica la presencia de la unidad margas azules “arcillas cerámicas”.



Figura IV 10. Cantera de margas azules de Procerán en Aguilar

El SEV4 se ha realizado en las proximidades de la estación A20, en el fondo de la cantera. El SEV5 se ha realizado en la explanada superior, arriba y al sur, junto a la estación M30. El objetivo de estos sondeos eléctricos verticales era conocer exactamente la resistividad de los materiales margosos que se extraen de la cantera para que a ser posible pudieran correlacionarse con los niveles de resistividad obtenidos en los sondeos eléctricos verticales en las tres zonas prospectadas. El SEV4 ha prospectado la marga azul del fondo de cantera, que es la de mejor calidad (pocos nódulos, y corresponde a la muestra A20 que dio menos del 1% de ARENA después de la molienda y el lavado de finos), obteniendo una resistividad de 3'7 Ω m.

El SEV5 ha prospectado la marga azul en la zona sur de la cantera y a una cota más alta (abundantes nódulos, y corresponde a la muestra M30, que dio algo más del 3% de ARENA después de la molienda y el lavado de finos), y el resultado es de 9'6 Ω m hasta la profundidad de 0'7 m; debajo, ya reconoce la marga de pocos nódulos que da 3'7 Ω m a 3'7 m de profundidad. Bajo este paquete aparece una resistividad de 10 Ω m en una potencia indiferenciable, pero la tendencia a más profundidad de la curva obtenida es a 4 Ω m.

También se han realizado cuatro SEV en las lagunas de Zóñar y Rincón (ver figura VII 2), específicos para caracterizar en las lagunas los yesos y los diapiros, estos son los SEV nº 11, 12, 13 y 14 que han reconocido profundidades superiores a los 50 m. Los resultados han sido muy representativos, de correcta interpretación, y su aportación para el estudio de estas lagunas y de los yesos se presentan en el capítulo 7 “Nuevas líneas de investigación” de esta Tesis Doctoral.

4.2.3.3. Plan de trabajo

El área de estudio se ha dividido en tres zonas de trabajo de 4 km² cada una. Asimismo se ha estudiado una cuarta zona que se corresponde con la cantera de explotación de Proceran en Aguilar (Córdoba). En las zonas se han establecido dieciocho estaciones para la toma de muestras y su caracterización. En cada una de las tres zonas de trabajo, además de la cantera de Aguilar, se han tomado diversas muestras para los distintos ensayos y se ha mantenido en cada una de ellas la nomenclatura de su estación para su inventario y proceso. Las cuatro zonas de estaciones son:

-En la zona **Este de la Planta** las estaciones han sido cinco: 2EA, 2EB, 2EC, 2ED y SEV2.

-En la zona **Oeste de la Planta** las estaciones han sido también cinco: 1WA, 1WB, SEV1, E12 y E48.

-En la zona de **Puente Genil Noreste** se han establecido cuatro estaciones: 3PGA, 3PGB, SEV3 y Cuaternario sur.

-Además, en la **Cantera de Aguilar** se han tomado cuatro estaciones: A20, M30, M10 y M10 noroeste.

El análisis mineralógico ha consistido en la difracción de rayos X de las muestras tomadas en campo. Las muestras “todo uno” se han homogeneizado mediante trituración primaria con machacadora de mandíbulas, análisis granulométrico y posterior molienda con molino de bolas. Con posterioridad se ha procedido a su lavado de finos, y la arena resultante es significativa de la valoración de nódulos diagenéticos de carbonato cálcico. Se han realizado ensayos de plasticidad, de corte directo, de apisonado y ratio de California (CBR). Se han realizado probetas con la humedad del límite plástico, se han secado y luego cocido en horno eléctrico a una temperatura de 850° C. Sobre las probetas cocidas se ha medido la capacidad de absorción de agua, las pérdidas por calcinación y la contracción lineal. En la pieza cocida se mide la porosidad y la reducción de volumen. Para la descomposición del carbonato cálcico se precisa alcanzar unos 850° C, liberando CO₂ que provoca agrietamiento, además de la granulometría ultrafina del carbonato cálcico presente en la margas, existen también las concentraciones nodulares, que en cocción se desintegran.

La toma de muestras de campo ha sido realizada en cada estación después de eliminar la capa superficial, a pequeña profundidad, de medio metro, para evitar las trazas de material orgánico de la capa vegetal. Todas las muestras recogidas de las distintas estaciones han sido sometidas a preparación mineralúrgica. El todo uno de cada muestra ha sido secado al aire y se procede a tratamiento con una machacadora de mandíbulas en laboratorio (obtiene un calibre máximo de 2 cm), a continuación se cuartea y reduce la muestra; a una parte representativa se le realiza el análisis granulométrico y a otra se le somete a molienda en seco en un molino de tres bolas de laboratorio que consigue micronizar las muestras hasta menos de 40 micras. No obstante, el calibre máximo llega a 500 micras. Posteriormente tamizamos por el tamiz 0,1mm para separar la fracción fina de limo y arcilla.

No obstante, le repetimos el paso por el tamiz 0'1mm al rechazo anterior, una vez tratado en molino de cerámica de mano, por si existiesen terroncillos de arcilla; apartado el material que se ha pasado por este tamiz, procedemos al lavado del retenido hasta obtener una "arena" lavada que es representativa para cada muestra de los materiales más duros y gruesos, como los nódulos existentes en el todo uno inicial.

4.2.3.4. Caracterización geotécnica de las margas

En caracterización geotécnica de estas margas y los ensayos y análisis que garantizan el proceso de cocción (80), partimos de que los cambios de volumen en suelos arcillosos saturados ocurren a largo plazo debido a su baja conductividad hidráulica, así los parámetros que controlan su comportamiento hidro-mecánico en el tiempo son la compresibilidad, que relaciona los cambios de volumen con los cambios de tensiones efectivas, y la permeabilidad, que es una medida de la aptitud del suelo para conducir fluidos en sus poros (19).

- Peso específico y plasticidad.

Se ha determinado el peso específico aparente o relación entre la masa al aire del sólido y su volumen aparente, incluyendo huecos accesibles al agua, tabla IV 15, los huecos accesibles al agua representan la absorción y es la diferencia entre la muestra saturada y seca (UNE 103-302, UNE 103-300 y DIN 52103), ver tabla IV 15.

Muestras	3PGA	SEV2	E48	SEV1	M10	M30	2EA	1WA	3PGB	1WB
Densidad ap. En seco (gr/cm ³)	1,95 a 2,06	1,95 a 1,90	1,91 a 1,87	2,09 a 1,95	1,96 a 2,00	1,85	2,03	2,20	2,06	2,03
Densidad ap. A 850°C (gr/cm ³)	1,79 a 1,75	1,90 a 1,60	1,65	1,77 a 1,75	1,75	1,73	1,85	1,65	1,63	1,82 a 1,80

Tabla IV 15. Densidad aparente de muestras (en seco y a 850°C)

También se han ensayado las diferentes muestras superficiales de las arcillas margosas, el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP), según los ensayos de Atterberg de NLT 105/72 y NLT 106/72 en tanto por ciento de humedad, basados en Casagrande sobre muestras molidas en granulometría menor de 200 micras (tabla IV 16).

Estos ensayos de las margas azules se realiza en la parte superficial de las estaciones (0,2 m) y la caracterización ha resultado con una plasticidad intermedia, con límite líquido (LL) de 35% a 50% de contenido en agua, ver tabla IV 16. No obstante, alguna es de alta plasticidad (con límite líquido mayor de 50), que son malas para el secado, requieren una baja velocidad de secado y dan alta contracción.

Muestra	SEV2	3PGA	3PGB	E48	E12	1WA	1WB	2EA	M30	A20	SEV3	SEV1	M10
LL	36,5	38	32	35,5	24	33	30	32	48	50	25	23	56
LP	22,5	20	21	24	18	24	22	21	29	26	17	15	23
IP	14	15	11	11,5	6	9	8	11	19	24	8	8	33

Tabla IV 16. Límites de Atterberg de muestras

- Apisonado, carga portante y corte directo

Los ensayos de apisonado permiten conocer la relación la relación existente entre la densidad aparente seca y la humedad del suelo para la energía de compactación del ensayo Proctor (NLT-107). Los ensayos realizados en muestras de las estaciones de la cantera en explotación (A20 y M30) han sido tratadas en machacadora de mandíbulas a material inferior a 20mm, las humedades óptimas obtenidas dan medias del 19'6%, que son valores próximos a los obtenidos para el límite plástico, y el valor medio de la densidad

seca máxima es $1'6 \text{ kg/cm}^3$. El esponjamiento debido al movimiento de tierras es de aproximadamente del 20% a resultar una media de densidad aparente de 2 kg/cm^3 .

La capacidad de soporte del suelo para uso en coronación de terraplenes viene dado por el ensayo California Bearing Ratio (CBR), descrito en la norma NLT-111. En los diversos CBR realizados en las margas azules de Puente Genil y Aguilar se ha obtenido un hinchamiento del 1 al 2%, bajo carga del molde CBR de 4,54 kg, y el índice CBR entre 2'25 y 2'30, que es característico de un suelo marginal (S00) y no debe utilizarse en zonas inundables.

Los ensayos de Corte Directo realizados en muestras de la cantera en explotación (A20), no consolidados y no drenados, se han preparado y remoldeadas con la humedad del límite plástico y apisonada la tongada en el molde del proctor normal, los resultados medios obtenidos son los parámetros geomecánicos de cohesión de $0'25 \text{ kg/cm}^2$ y un ángulo de fricción de 14° . La resistencia a compresión de las muestras ensayadas es de 1 kg/cm^2 .

4.2.3.5. Análisis químico mediante microscopía electrónica

Se ha realizado en las muestras la microscopía electrónica de barrido y microanálisis por energía dispersiva de rayos X (EDAX) en el servicio de la Universidad de Córdoba, también se ha realizado microscopía electrónica de transmisión, que tiene alguna aplicación en el estudio de muestras geológicas y análisis cristalográficos por difracción de electrones, aunque no obstante este método es de gran aplicación en biología.

Los ensayos realizados en el Servicio de microscopía electrónica de la Universidad de Córdoba han sido los de barrido y energías dispersivas de rayos X (EDAX) en las diversas muestras que han dado resultados representativos en cuanto al análisis químico, además se ha valorado con repeticiones de muestras, que se han interpretado al ser fiables sus variaciones, pero en la microscopía electrónica de transmisión no se han encontrado criterios de relación. Las tablas de resultados (80) se expresan en la tabla V 8, también los resultados obtenidos en los ensayos de cocción se detallan en la tabla V 8 del Capítulo 5 de esta Tesis Doctoral.

4.2.3.6. Análisis mineralógico con difracción de Rayos X

El método habitual para la identificación de minerales se basa en el espectro característico que resulta de su difracción por rayos X. Se ha realizado el análisis más completo y cuantitativo de componentes cristalinos y amorfos en diecinueve muestras "todo uno" molidas a menos de 40 micras. Todos ellos se han representado en diagramas triangulares de porcentaje de cuarzo-calcita-amorfos.

Las muestras son muy semejantes, por lo que también se ha determinado el carbonato cálcico equivalente en todas ellas.

Las muestras micronizadas y analizadas que corresponden a la denominación “arena” (ARE) son aquéllas obtenidas tras el lavado de eliminación de finos (limos y arcillas) de la molienda de las muestras “todo uno”. Por tanto, esta denominación de “arena” va a valorar normalmente la presencia de nódulos-concreciones, por lo que deben poseer más carbonato cálcico que las muestras “todo uno”. No obstante, la muestra 3PGA “arena” obtiene un 7% menos CO_3Ca que la muestra “todo uno”; en la muestra 3PGA corresponde este porcentaje a yeso y cuarzo. En la M10 se ha descubierto un importante porcentaje de gismondina, del grupo de las zeolitas lo que anula su utilización como arcilla cerámica (ver figura IV 11).

El yeso indica clima árido y evaporación (cuenca evaporítica), y en el agua marina nos indica una mayor salinidad de las albuferas. La distribución de sus precipitados suele ser con forma de corona circular.

Finalmente, como era de esperar, la muestra cuaternaria de tierra roja denominada SEV1 es la que menos proporción de CO_3Ca presenta (7%), ya que el terreno rojizo cuaternario es el equivalente al margoso mioceno que se ha descarbonatado.

Para este proyecto se ha realizado difracción de rayos X (DRX) y calcimetría a trece muestras de finos (1WA, 1WB, 2EA, 3PGA, 3PGB, A20, E12, E48, M10, M30, SEV1, SEV2, SEV3). De ellas se escogieron seis muestras y se les realizó la misma analítica a su material grueso (3PGA, A20, E48, M10, M30, SEV2).

La técnica utilizada para DRX ha sido la del polvo cristalino, y la radiación usada ha sido de $\text{Cu K}\alpha$ (0'15406) a 35 KV y 15 mA, con una velocidad de rodadura de $0'05^\circ$ (2θ) y un tiempo de paso de 1 segundo. Las muestras fueron molidas a menos de $40\ \mu\text{m}$ y se empleó un portamuestras de carga lateral.

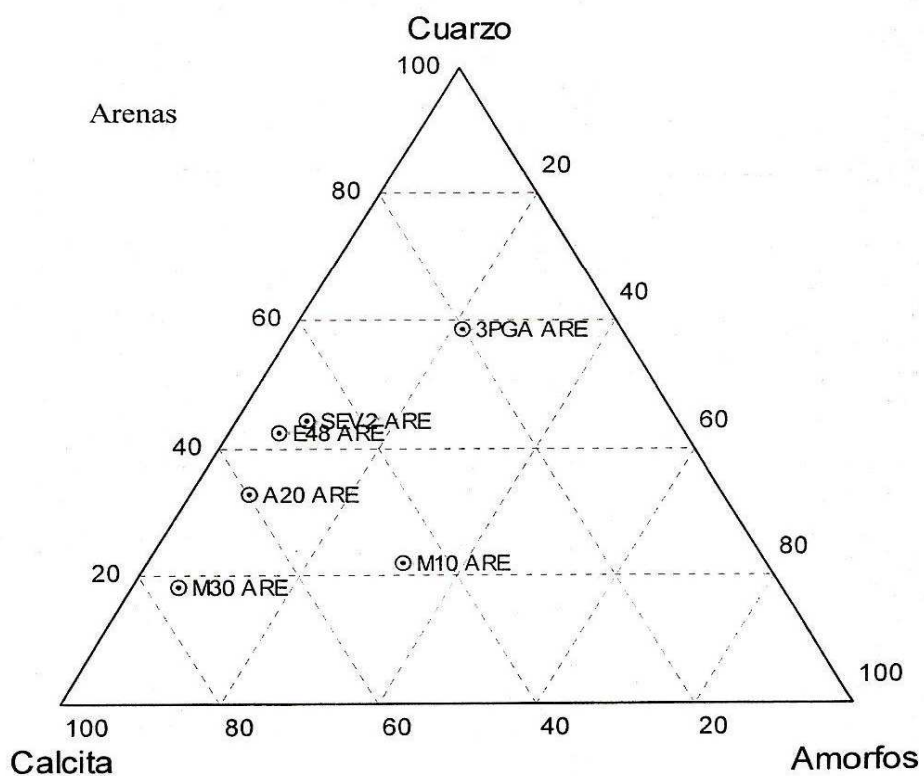
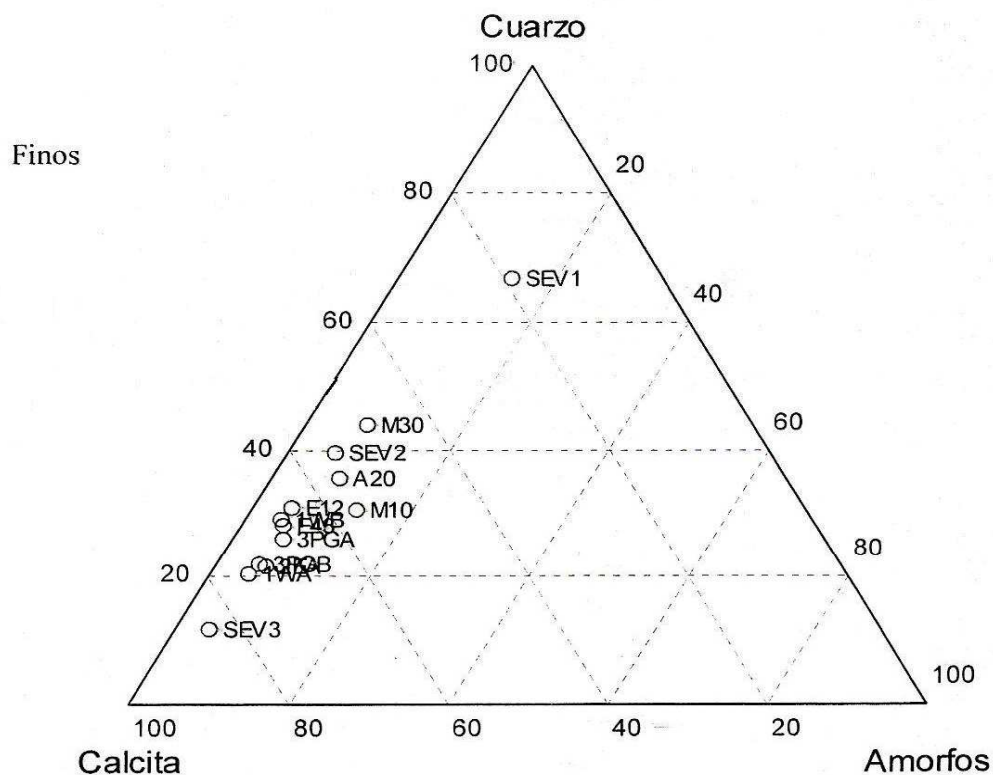


Figura IV 11. Diagramas triangulares de muestras, finos y arenas, en DRX

Los difractoramas resultantes (trece de finos y seis de gruesos) fueron estudiados mediante el programa XPOWDER, con la colaboración del autor del programa Dr. J.D. Martín Ramos (Departamento de Mineralogía y Petrología de la Universidad de Granada).

La determinación del carbonato de las muestras se realizó por volumetría, midiendo el CO₂ desprendido al reaccionar los carbonatos de la muestra de suelo, finamente molidos, con CIH 1:1 en el calcímetro de Bernard (ensayo realizado en el Departamento de Edafología y Química Agrícola de la Facultad de la Universidad de Granada).

4.3. MÉTODOS DE COCCIÓN

4.3.1. ENSAYOS PARA PROCESOS DE COCCIÓN EN LUTITAS

4.3.1.1. *Desarrollo experimental*

Para el desarrollo experimental con ensayos para muestras procesables mediante ciclos de cocción en lutitas, se ha ensayado cinco muestras de lutitas arcillosas:

- Lutita nº 1 (Westfaliense).
- Lutita nº 2 (Devónica).
- Lutita nº 3 (Namuriense, zona oeste).
- Lutita nº 4 (Namuriense, zona central).
- Lutita nº 5 (Namuriense, zona este).

La finalidad era realizar sobre ellas unos ensayos de cocción para caracterizar los materiales arcillosos con vistas a evaluar su uso en la fabricación de productos cerámicos tradicionales, considerándose, en concreto, los siguientes:

- Materiales de construcción (ladrillos y tejas).
- Baldosas cerámicas (gres esmaltado y azulejos).

- Las arcillas para fabricación de *materiales de construcción* (ladrillos y tejas) deben proporcionar al producto sus propiedades características (porosidad, resistencia mecánica, etc.) y deben comportarse adecuadamente durante las diferentes etapas de que consta el proceso:

Trituración y molienda vía seca de las materias primas.

Amasado hasta obtener una masa plástica fácilmente conformable.

Extrusión de la masa, obteniéndose un producto con la geometría adecuada.

Secado de la pieza para eliminar el agua presente y conferirle resistencia.

Cocción, habitualmente en hornos túnel, a temperaturas del orden de 900-950°C y con un ciclo de varias horas.

Las características que han de reunir las arcillas en este proceso son:

El agua requerida para ser moldeada (agua de amasado) no ha de ser demasiada, pues en la etapa de secado debe poder eliminarse fácilmente y sin generar defectos.

La contracción experimentada durante la etapa de secado ha de ser la menor posible para evitar variaciones en las dimensiones del producto o defectos tales como grietas o deformaciones.

La plasticidad debe ser la suficiente para que el proceso de moldeo se desarrolle bien y la resistencia mecánica del producto crudo sea elevada.

La fundencia tiene que ser la idónea para proporcionar a la pieza la resistencia mecánica requerida a la temperatura de cocción.

- En cuanto al proceso de fabricación de baldosas cerámicas (gres y azulejos), consta de las siguientes etapas:

Preparación de la composición: Generalmente se realiza por molienda vía húmeda y secado por atomización para aumentar la reactividad de la composición y obtener un polvo granulado de buenas propiedades.

Conformado de la pieza: El prensado es el método de conformado mayoritariamente utilizado (más del 95% de la producción).

Secado de la pieza para eliminar el agua presente y conferirle resistencia.

Esmaltado y decoración: En esta etapa se efectúa una serie de aplicaciones superficiales sobre las piezas que, tras la cocción, le confieren sus características estéticas.

Cocción con ciclo rápido (60 minutos) a temperaturas de 1.100-1.150°C.

En los procesos de monococción pueden existir interacciones entre las desgasificaciones que experimenta el soporte en el transcurso de la cocción y la capa de esmalte fundida. Por ello deben utilizarse preferentemente composiciones con una baja proporción de compuestos que sufran descomposiciones. Así mismo, no se suelen emplear arcillas con un contenido en materia orgánica superior al 0'2% en peso para evitar el defecto denominado "corazón negro" en el producto final. Este defecto consiste en la formación de un núcleo oscuro en la pieza debido a una oxidación incompleta de la materia orgánica, pudiendo acarrear las siguientes consecuencias:

Hinchamiento de las piezas.

Deformaciones pirolásticas.

Deterioro de las características técnicas y estéticas de los esmaltes.

Alteración del tono del soporte y/o esmalte.

El material debe comportarse adecuadamente durante la etapa de molienda, permitiendo la obtención de suspensiones de elevada densidad con bajas proporciones de desfloculante (aditivo empleado para regular la viscosidad de las suspensiones) y, durante la etapa de prensado, proporcionando valores de compacidad elevados. Al igual que en el caso de la fabricación de materiales de construcción, la plasticidad debe ser la necesaria para que la resistencia mecánica en crudo del soporte sea elevada, permitiendo el correcto desarrollo de la etapa de esmaltado.

La primera característica que se ha tenido en cuenta para conocer la aplicación cerámica de las muestras ha sido su contenido en materia orgánica. Así, la presencia de esta impureza en porcentajes elevados (>0'2%) limita su aplicación en aquellos productos procesados mediante ciclos rápidos de cocción (azulejos y gres esmaltado), debiéndose orientar, entonces, hacia la fabricación de materiales de construcción, en que los ciclos de cocción son mucho más largos.

Aquellas lutitas con bajos contenidos en materia orgánica (<0'2%) podrán ser empleadas en la fabricación de baldosas cerámicas. Pero el precio en el mercado de las arcillas para fabricación de baldosas cerámicas es muy superior al de las arcillas para materiales de construcción.

- Determinación de carbono orgánico

El contenido en materia orgánica se evaluó determinando el carbono orgánico presente en las muestras. La determinación de carbono orgánico se llevó a cabo con un analizador de carbono modelo CM-150 de la firma *U.I.C. Coulometrics*. Para la realización del ensayo se tomó una porción de muestra, aproximadamente 0'2 g pesada con una precisión de 0'1 mg. Posteriormente se

sometió dicha muestra a una temperatura de 500°C en un horno con atmósfera de O₂ y se midió el desprendimiento de CO₂ por culombimetría.

- Determinación de la plasticidad

El índice de plasticidad también se calculó por el método de indentación. Este método consiste en determinar la fuerza necesaria para introducir un punzón con terminación cónica en masas preparadas a distintos contenidos en humedad. El valor de la fuerza cuando el cono está introducido totalmente se considera como el valor de consistencia de la masa a esa humedad. Representando en coordenadas logarítmicas la consistencia frente a la humedad, se obtiene una recta, a partir de la cual se determinan los contenidos de humedad correspondientes a los límites de Atterberg.

4.3.1.2. Ensayos para procesos lentos de cocción (materias primas para materiales de construcción)

En estos ensayos para muestras lutíticas procesables mediante ciclos lentos de cocción, dichas muestras de lutita se amasaron a una consistencia, determinada por penetrometría, de 6 Kg/cm², aproximadamente con 10-15% de humedad, (utilizando la puntaza de 1,5 cm de diámetro) y se dejaron reposar con el objeto de homogeneizar la humedad. El conformado de probetas se realizó por prensado en plástico a una presión de 300 Kg/cm², lo más similar posible al proceso industrial de extrusión.

Las probetas obtenidas se secaron al ambiente durante 24 horas y posteriormente en estufa a 110°C hasta pesada constante y se calculó la densidad aparente por el método de inmersión en mercurio, así como la contracción de secado y el agua de amasado. Una vez secas las probetas se cocieron en horno eléctrico de laboratorio con un tiempo de permanencia, a las temperaturas de 900° y 1.000°, de 60 minutos y un ciclo de cocción aproximado de 3 horas.

Ya cocidas, las probetas fueron pesadas de nuevo, determinándose su densidad aparente por el método indicado anteriormente. La contracción de cocción se evaluó por diferencia entre el diámetro en seco y en cocido, definiéndose este parámetro en base seca. La absorción de agua se calculó midiendo la ganancia de peso experimentada por las probetas al introducirlas en agua en ebullición por un periodo de dos horas. El contenido en carbonatos, por su parte, se determinó mediante un calcímetro Bernard.

4.3.1.3. Ensayos para procesos rápidos de cocción (materias primas para baldosas cerámicas)

En estos ensayos para muestras lutíticas procesables mediante ciclos rápidos de cocción, dichas muestras de lutita se molturaron por vía húmeda en un molino de bolas de laboratorio durante 10 minutos, secándose la barbotina obtenida en lámparas de infrarrojos. Con el polvo de prensas conseguido se conformaron probetas cilíndricas (de 4 cm de diámetro y aproximadamente 0'7 cm de espesor) por prensado unidireccional, a una humedad de prensado del 5'5% (base seca) y una presión de 300 Kg/cm². La lutita nº 2, con una composición mineralógica y un comportamiento durante el proceso de fabricación similar al de los caolines utilizados en la industria cerámica, se prensó con un contenido en humedad del 8'0% y a una presión de 150 Kg/cm².

Las probetas se secaron a 110°C en una estufa eléctrica de laboratorio, con recirculación de aire, hasta pesada constante. Posteriormente, se pesaron, se midió su diámetro y se determinó su densidad aparente por el método de inmersión en mercurio. Las probetas, una vez secas, se cocieron en un horno eléctrico de laboratorio con un ciclo rápido de cocción y un tiempo de permanencia a la temperatura de 1.100 y 1150°C de 60 minutos para las lutitas de color de cocción rojo y de 30 minutos para el de las de color de cocción blanco. La velocidad de calentamiento fue de 25°C/minuto.

Una vez cocidas, las probetas se pesaron de nuevo, determinándose su densidad aparente por el método indicado anteriormente. La contracción de cocción se evaluó por diferencia entre el diámetro en seco y en cocido, definiéndose este parámetro en base seca. La absorción de agua se calculó midiendo la ganancia de peso experimentada por las probetas al introducirlas en agua en ebullición por un periodo de dos horas. Como antes, el contenido en carbonatos se determinó mediante un calcímetro Bernard.

4.3.2. PLANTEAMIENTO DE LA COCCIÓN EN LAS MARGAS

Una vez realizados los análisis granulométricos en las muestras trituradas, el planteamiento del proceso de cocción en las margas trata de conocer el comportamiento de estas arcillas cerámicas (margas) en el proceso de fabricación de bloques de termoarcilla. En la actualidad se prepara la arcilla cerámica con una molienda por vía seca, el conformado, el secado y la cocción. Estos bloques de cerámica requieren alta porosidad, alta absorción de agua, arcillas que no sean refractarias (no forma fase vítrea en la cocción) y

que poseen baja proporción de CO_3Ca .

En las muestras cocidas se mide la porosidad abierta y la absorción de agua. Para la estabilidad dimensional se tiene en cuenta la reducción del volumen total de la pieza que se denomina contracción o retracción.

En la dilatación térmica de los sólidos una alta porosidad da a las piezas cocidas un coeficiente de dilatación lineal bajo, que puede aumentar con la alta plasticidad de la montmorillonita. Las margas tienen el mayor coeficiente de dilatación hasta los 400°C .

Una vez conformadas y presionadas las probetas desde la humedad del límite plástico, se han secado al aire durante un día, a continuación en estufa fría hasta 110°C , durante varias horas, y luego en el horno eléctrico (HD-150) con una elevación de la temperatura (de unos 10°C al minuto) hasta la temperatura máxima de 850°C y manteniéndola una hora.

Sobre las probetas cocidas se han medido la contracción y la capacidad de absorción de agua (que disminuyen con la compacidad), y las pérdidas por calcinación (PPC) por la descomposición de minerales (el cuarzo disminuye las PPC y la contracción).

No hemos realizado en probetas, curvas de absorción-contracción en función de la temperatura, ya que usualmente se trabaja con la temperatura de cocción óptima (resultado de la estabilización de las curvas), que no supera los 800°C por las dificultades con las concreciones de calcita.

Para la descomposición del carbonato cálcico de los nódulos se precisa alcanzar unos 850°C (pasa a CaO y desprende CO_2); el calor comunicado a la masa para alcanzar este nivel térmico es la energía de activación. Al llegar a esta temperatura se desarrolla la destrucción del carbonato, liberando CO_2 desde el interior de la pieza (lo que provoca agrietamiento). Esta reacción endotérmica absorbe un calor (o entalpia) llamado de reacción.

Además de la granulometría ultrafina de carbonato cálcico presente en las margas, que no dan problemas en la cocción, existen también estas concentraciones nodulares, ya referidas anteriormente, que en cocción se desintegran y el resultado final es muy diferente en función del tamaño de partículas de carbonato. El aumento del CO_3Ca dificulta la desfloculación, ya que las sales solubles (cálcio y sulfatos) actúan como floculantes (que aumentan plasticidad), y a veces se requiere para bajar la viscosidad el uso de desfloculantes — $(\text{OH})\text{Na}$, Co_3Na_2 o silicatos —.

Las arcillas de alta contracción en el secado (> 6%) son de alta plasticidad y pueden dar problemas a no ser que se mezclen con arcillas menos plásticas o se utilice cuarzo (desgrasante) para disminuir el índice de plasticidad. Si al contrario, lo que pretendemos es aumentar la plasticidad, entonces debemos usar floculantes, que dan más viscosidad, menos poros y mayor compacidad (que es la relación volumen de sólidos al volumen total moldeado, es decir, Y_a/Y_{real}), y que requieren una baja velocidad de secado.

Por otra parte, la humedad de equilibrio nos indica la cantidad de agua que pueden reabsorber las piezas desde que salen del secadero hasta que entran en el horno, la cual es aproximadamente nueve veces menor que el índice de plasticidad ($IP = LL - LP$) para la fabricación por extrusión.

La caolinita $—Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O—$, la moscovita $—KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2—$ y otros minerales de arcilla, desprenden agua de constitución a partir de los 500°C y se van destruyendo los silicatos (fase amorfa); ésta es la reacción cerámica (empieza a cristalizar el producto amorfo) para la termoarcilla, que requiere mayoría de fase amorfa. Se continúa al segregar SiO_2 y Al_2O_3 (descomposición recristalizando a 950°C), y estos silicatos fundidos son viscosos y producen al enfriarse fase vítrea (las margas apenas dan fase vítrea). La presencia de Al_2O_3 reduce la viscosidad del vidrio, y el SiO_2 segregado forma nuevos compuestos con los óxidos, dando sinterización (modificación de propiedades hasta la máxima compacidad). A los 1.100°C se forma mullita y cristobalita; la secuencia sería: sólido, sinterizado, vitrificado y fundido a los 1.400°C.

La formación de líquido empieza a los 750°C (a partir del punto eutéctico). La fase vítrea es reducida por debajo de 1.000°C, salvo que existan álcalis que tienen punto eutéctico bajo. Si sobrepasamos la temperatura de cocción la formación de líquido hace derrumbar la estructura debido a la fusión parcial.

4.4. REFERENCIAS

- [2].- I.G.M.E. Mapa de Rocas Industriales. Hoja 69 (4-9) 1:200.000. 1976. (Realizado por CGS para I.T.G.E.).
- [3].- Mallada Pueyo, L. Memoria descriptiva de la Cuenca Carbonífera de Belmez. I.G.M.E. 1900.

- [4].- O. Apalategui et al. (I.G.M.E.) Mapa Geológico de España. 879 y 880. 1:50.000. 1985. (Realizado por INGEMISA para I.G.M.E.).
- [6].- Daza Sánchez A. "Investigación para la caracterización y aplicaciones de las lutitas arcillosas de la Cuenca del Guadiato en materiales de construcción y obra civil". Subvencionado por el Ministerio de Fomento, 27 abril (BOE 20-5-2000). 85p; Grupo de Ingeniería Geoambiental y Geofísica, RNM244 (UCO) 2001. Colabora el Instituto de Tecnología Cerámica. Informe ITC, nº C001230, Castellón, 18p: J. García-Ten y otros.
- [7].- Catálogo de las arcillas portuguesas utilizadas en la industria cerámica. Ministerio de Industria y Energía. Dirección G. de Geología y Minas. 1985.
- [8].- Pérez Lorente, F. Geología de Belmez-Villaviciosa-Pozoblanco. Tesis Doctoral nº 281. Universidad de Granada. 1979.
- [10].- Ayala Carcedo F.J., Ferrer Gijón M., Oteo Mazo C. y Salinas Rodríguez J.L. Mapa predictor de riesgos por expansividad de arcillas en España. 1:1.000.000. I.G.M.E. 1986. (Realizado por Instituto Geológico y Minero de España con el Centro de Experimentación de Obras Públicas).
- [12].- Barba, A.; García-Ten, J. y otros. Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas. I.T.C. Castellón. 1997.
- [15].- A. Binley y A. Kemna, DC Resistivity and Induced Polarization Methods. Hydrogeophysics. Vol. 50. Springer Netherlands. ISBN: 978-1-4020-3101-4. pp 129-156. 2005.
- [16].- E. Orellana. Prospección Geolétrica. Ed.Paraninfo. ISBN 84-283-1153-6. DL M-35184-1981.
- [17].- A. López Hidalgo, M. H. Loke, G. O. Fanton, E. C. Rubí. Técnicas prácticas para investigación de resistividad en 2D y 3D (Tomografía Eléctrica). 23/6/2009. <http://www.geoelectrical.com/Articulo.pdf>
- [19]. Nueva norma de ensayo de consolidación del terreno con edómetro. Daza, A. y Ayuso, J. Revista Energía y Minas. Vol: 7. Consejo de Colegios de Ingenieros T. Minas de España. 2009.

- [20]. Daza, A. "Geotecnia del terreno y del macizo rocoso". 2003-UCO.ISBN 84-688-4703-8. me1dasaa@uco.es
- [21].- Jiménez Salas, J.A. y otros. Geotecnia y Cimientos (Vol I, II, III1 y III2). Ed. Rueda. 1975.
- [39].- Daza Sánchez A., López Sánchez M., Cano Jodar E., y López Pineda G. "Valoración del espaciado y la condición de las discontinuidades, adaptable a la clasificación de Bieniaswki". En revisión, 2011. IGME.
- [48].- Morante Carballo F.E. "Las zeolitas de la costa de Ecuador: geología, caracterización y aplicaciones". Tesis Doctoral de la UPM (ETSIM de Madrid). 2004.
- [49].- Soca Olazabal N., Blanco Toledo F. y Pizarro Camacho D. "Uso combinado de zeolitas naturales y microalgas en la desnitrificación de aguas residuales". Revista Tecnología del agua, nº 162, marzo 1997. Pgs 61-65.
- [50]. Casagrande, A. (1936). Proceedings of the first international conference on soil mechanics and foundation engineering, 3, 60-64.
- [51]. Sánchez Caro, Francisco Javier, Seguridad de presas: aportación al análisis y control de deformaciones como elemento de prevención de patologías de origen geotécnico. Mayo 2007, Tesis doctoral dirigida por Antonio Soriano Peña. 19-7-2007.
- [52]. A. Bochs Montoro, Características geotécnicas de los suelos en la ciudad de Huelva: parámetros de identificación y ensayos de consolidación. Geogaceta, ISSN 0213-683X, Nº. 39, 2006, pags. 79-82. Sociedad Geológica de España (SGE), semestral 1986.
- [53]. S. Stramondo, F. Bozzano, F. Marra, U. Wegmuller, F.R. Cinti, M. Moro, M. Saroli. Subsidence induced by urbanisation in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigations. Remote Sensing of environment, Vol 112, Issue 6, 16 June 2008, Pag 3160-3172. (United States).
- [54]. J.L. Justo, E. Justo, P. Durand, J.M. Azañón. Validation of models and empirical equations to estimate deformations in jointed rock through the monitoring of a 40-storey tower foundation. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Available online 24 September 2008. (England).

- [55]. A. Barrios Padura (US), J. Barrios Sevilla (US), J. Garcia Navarro (UPM), E. Yanes Bustamante (US), E. Parra Grego (U. Alfonso X). Study of the soil consolidation using reinforced jet grouting by geophysical and geotechnical techniques: "La Normal" building complex (Granada). Construction and Building Materials, XXX.2008.
- [56]. Daza Sánchez A. "Síntesis minera y calzadas romanas de Belmez-Villaviciosa". Boletín Geológico y Minero. Vol. 109-3 Año 1998 (307-316).
- [57]. Efraín Ovando-Shelley, Alexandra Ossa, Miguel P. Romo. The sinking of Mexico City: Its effects on soil properties and seismic response. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 27, Issue 4, April 2007, p 333-343. (England).
- [58]. Sridharan, A; Sivapullaiah, PV; Stalin, VK. Effect of short-duration of load increment on the compressibility of soils. Geotechnical Testing Journal. Vol: 17 Issue: 4, Pgs: 488-496. DEC 1994. (United States).
- [59]. Xie, KH; Leo, CJ. Analytical solutions of one-dimensional large strain consolidation of saturated and homogeneous clays. Computers and Geotechnics.V:31 Issue:4.301-314.Published:2004.England.
- [60]. Yagiz, S; Akyol, E; Sen, G; Relationship between the standard penetration test and the pressuremeter test on sandy silty clays:a case study from Denizli. Bulletin of engineering geology and the environment.V:67 Issue:3.405-410.Published:2008.Germany.
- [61]. ASTM, 2004. Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils. D2435-04 Book of ASTM vol.04.08 American Society for Testing and materials. Philadelphia. UNE103-405-94.Ensayo Consolidación Unidimensional de suelo en edómetro.
- [62].- Gutierrez Duque M., Herrera Vasconcelos T. y Laria Piedra N. "Influencia de la zeolita tratada con ácido sulfúrico y con hidróxido de sodio en el proceso de coagulación en aguas superficiales". Revista Tecnología del agua, nº 131, noviembre 1994. Pgs 41-47.
- [80].- Daza Sánchez, A. y Ayuso Muñoz, J. (2010). "Prospección de arcillas cerámicas en la Campiña de Córdoba (España)". Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio (Consejo Superior de Investigaciones Científicas), Mayo-Junio 2010, 49 (3), pp215-220.

CAPÍTULO 5
RESULTADOS Y APLICACIÓN CERÁMICA

5. RESULTADOS Y APLICACIONES CERÁMICAS

5.1. RESULTADOS DE LUTITAS DE SIERRA MORENA

En la tabla V 1 se indican las propiedades físicas y de cocción de las muestras de lutitas analizadas. Considerando la composición porcentual de minerales (ver tabla V 2) de las lutitas y destacando que las lutitas namurienses (n^{os} 3, 4 y 5) han podido sufrir una pequeña contaminación de materia orgánica de raicillas en las catas de un metro de profundidad, por lo que la presencia del carbono orgánico se debe a este motivo y no a su composición. Estas lutitas se han dividido en dos grupos en función del contenido en carbono orgánico de cada muestra (ver la tabla V 3).

En la Tabla V 2 se muestra la clasificación de las lutitas, así como los posibles campos de aplicación en función de su contenido en carbono orgánico, que tendría que ser el adecuado para evitar la formación de corazón negro. Se ha considerado que la lutita namuriense, con un contenido en materia orgánica límite, también podría utilizarse en composiciones de baldosas cerámicas.

Tabla V 1. Propiedades físicas de la arcilla cocida a varias temperaturas			
Muestra: Lutita nº 4			
Contracción de secado		7,3 %	
Agua de amasado		3,4 %	
Densidad aparente en seco		2,01 g/cm ³	
Carbonatos		0,9 %	
Tiempo de permanencia a temp. máxima		60 Minutos	
Temperatura (°C)	Contracción lineal (%)	Absorción de agua (%)	Densidad aparente (g/cm ³)
900	0,03	14,0	1,925
1.000	2,91	9,2	2,067

Tabla V 1.
Propiedades físicas de la arcilla cocida a varias temperaturas

Muestra: Lutita nº 5

Contracción de secado	7,0 %
Agua de amasado	23,4 %
Densidad aparente en seco	2,01 g/cm ³
Carbonatos	1,4 %
Tiempo de permanencia a temperatura máxima ..	60 Minutos

Temperatura (°C)	Contracción lineal (%)	Absorción de agua (%)	Densidad aparente (g/cm ³)
900	0,16	13,6	1,904
1.000	2,80	10,6	2,041

Propiedades físicas de la arcilla cocida a varias temperaturas

Muestra: Lutita nº 1

Humedad	5,5 %
Presión...	300 Kg/cm ²
Rechazo a 60 µm	4,9 %
Pérdida por calcinación a 1.100EC	5,9 %
Densidad aparente en seco	2,009 g/cm ³
Carbonatos	<0,5 %
Tiempo de permanencia a temp. máxima	60 minutos

Temperatura (°C)	Contracción lineal (%)	Absorción de agua (%)	Densidad aparente (g/cm ³)
1.100	3,4	9,5	2,115
1.150	6,1	4,8	2,301

Tabla V 1.
Propiedades físicas de la arcilla cocida a varias temperaturas

Muestra: Lutita nº 2

Humedad	8,0 %
Presión...	150 Kg/cm ²
Rechazo a 60 µm	4,1 %
Pérdida por calcinación a 1.120EC	5,4 %
Densidad aparente en seco	1,808 g/cm ³
Tiempo de permanencia a temp. máxima	30 Minutos

Temperatura (°C)	Contracción lineal (%)	Absorción de agua (%)	Densidad aparente (g/cm ³)
1.120	1,7	14,6	1,861
1.220	6,4	4,8	2,240

Propiedades físicas de la arcilla cocida a varias temperaturas

Muestra: Lutita nº 5

Humedad	5,5 %
Presión...	300 Kg/cm ²
Rechazo a 60 µm	4,6 %
Pérdida por calcinación a 1.100EC	6,2 %
Densidad aparente en seco	2,046 g/cm ³
Carbonatos	1,4 %
Tiempo a temp. máxima = 60 minutos	

Temperatura (°C)	Contracción lineal (%)	Absorción de agua (%)	Densidad aparente (g/cm ³)
1.100	6,5	3,3	2,367
1.150	7,7	0,0	2,447

TABLAV 2. Composición mineralógica de las lutitas					
Fase cristalina	Lutita nº 1	Lutita nº 2	Lutita nº 3	Lutita nº 4	Lutita nº 5
Illita	ALTO	MEDIO	ALTO	MEDIO	MEDIO
Caolinita	MEDIO	BAJO	MEDIO	MEDIO	MEDIO
Cuarzo	MEDIO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO
Clorita/Vermiculita			BAJO	BAJO	BAJO
Esmectita			MEDIO	BAJO	BAJO
Interestratificados				MEDIO	MEDIO
Pirofilita		ALTO			

TABLA V 3. Clasificación de las lutitas en función de su contenido en materia orgánica			
Muestra	Carbono orgánico	Grupo	Posible aplicación cerámica
Lutita nº1	0,11	2	Baldosas cerámicas, material construcción
Lutita nº2	0,03	2	Baldosas cerámicas, material de construcción
Lutita nº3	0,4	1	Baldosas y materiales de construcción
Lutita nº4	0,4	1	Baldosas y materiales de construcción
Lutita nº5	0,2	1 y 2	Baldosas cerámicas, material de construcción

Grupo 1. Lutitas nº 3, 4 y 5, alto contenido en carbono orgánico (>0'2%).

Grupo 2. Lutitas nº 1 y 2, bajo contenido en carbono orgánico (<0'2%).

5.1.1. VIABILIDAD PARA MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

En la TABLA V 4 se muestran las características más significativas de las muestras pertenecientes al *grupo 1 (ladrillos)*, que contiene una proporción de materia orgánica >0'2%. El contenido en materia orgánica, la composición mineralógica y la plasticidad de las lutitas nº^{as} 3, 4 y 5 son muy similares. Por lo que se investigan conjuntamente las lutitas nº^{as} 4 y 5 y como material representativo de ambas lutitas namuriense se toma la lutita nº 4, con una plasticidad ligeramente superior.

TABLA V 4. Características de las lutitas n^{os} 3, 4 y 5			
	Lutita 3	Lutita 4	Lutita 5
Carbonatos (%)		0,9	1,4
Carbono orgánico (%)	0,41	0,41	0,25
Índice de plasticidad	14	16	19
Agua de amasado (%)		23,4	23,4
Contracción de secado		7,3	7,0
Densidad aparente		2,01	2,01
Pérdida por calcinación		5,9	6,2
Contracción lineal*		0,03	0,16
Absorción de agua*		14,0	13,6
<i>* Propiedades determinadas a la temperatura de 900°C</i>			

5.1.1.1. Lutita Namuriense n° 4

Es una muestra que desarrolla un color rojizo tras la cocción, con un contenido en carbonatos muy baja y una plasticidad media. El hecho de que la plasticidad tenga un límite líquido de 35 conduce a que su utilización venga condicionada a la mezcla con algo de otra materia prima de plasticidad un poco superior. Así mismo, los valores del agua de amasado y contracción de secado están incluidos dentro del intervalo habitual que presentan las arcillas utilizadas en la fabricación de materiales de construcción, como ladrillos y tejas, siguiendo las apreciaciones del Instituto de Tecnología Cerámica (12).

En la fabricación de este tipo de productos se requiere una baja contracción durante la cocción, dado que se cuecen apilados en vagonetas. Por tanto, la lutita 4, con una baja contracción lineal en el intervalo de temperaturas de cocción de dicho producto (900-950°C), se considera adecuada. Por otra parte no se han detectado velos de secado, que tras la cocción del producto, suelen perjudicar su coloración.

5.1.1.2. Lutita Namuriense n° 5

Es una muestra con propiedades similares a las lutitas n^{os} 3 y 4. Con valores del agua de amasado y de la contracción de secado adecuados para la fabricación de materiales de construcción. Sus propiedades en cocido (baja contracción lineal), al igual que en el caso de las lutitas n^{os} 3 y 4, se consideran aceptables. Además, al ser la plasticidad superior (39,5 por indentación) se pueden utilizar en mayor proporción.

5.1.2. VIABILIDAD PARA FABRICAR BALDOSAS CERÁMICAS

Las baldosas cerámicas como gres y azulejos, se clasifican en función de su porosidad:

Baldosas de elevada absorción de agua (igual o superior al 6%), utilizadas para el revestimiento de paredes (conocidas como azulejos).

Baldosas de absorción de agua inferior al 6%, empleadas para el revestimiento de suelos (conocidas como gres esmaltado).

Dentro de cada grupo se puede distinguir entre baldosas de color de cocción rojo y baldosas de color de cocción blanco, ya que las arcillas usadas en cada caso difieren en su contenido en óxidos. En productos de gres esmaltado, se requiere una elevada resistencia mecánica, por lo que durante la cocción se debe desarrollar la fase líquida necesaria para eliminar en gran medida la porosidad presente en la pieza cruda.

En baldosas de azulejo no se precisa una elevada resistencia mecánica, siendo prioritaria una elevada estabilidad dimensional, lo cual se consigue con bajas contracciones durante la cocción. A continuación mostramos las características de las lutitas de baja proporción de materia orgánica (<0'2%).

TABLA V 5. Características de las lutitas n^{os} 1, 2 y 5			
	Lutita 1	Lutita 2	Lutita 5
Carbonatos (%)	<0,5	<0,5	1,4
Carbono orgánico	0,11	0,03	0,25
Índice de plasticidad	12,5	27	19
Humedad (%)	5,5	8,0	5,5
Presión (Kg/cm ²)	300	150	300
Densidad aparente	2,009	1,808	2,046
Pérdida por	5,9	5,4	6,2
Contracción lineal*	6,1	6,4	7,7
Absorción de agua*	4,8	4,8	0,0
* Variables determinadas a la temperatura de 1.150° C para las lutitas n^{os} 1 y 5 a 1.220° para la lutita n° 2.			

5.1.2.1. Lutita Westfaliense nº 1

Es una muestra de coloración marrón tras la cocción, por lo que su campo de aplicación son las baldosas de color de cocción rojo. Posee baja plasticidad (30), exenta de carbonatos, con una densidad aparente tras el prensado alta. Presenta una fundencia muy moderada, como se desprende de los valores de la absorción de agua. Por todo ello se emplearía en la obtención de composiciones de pavimento de gres. A consecuencia de su baja plasticidad, se debería utilizar en combinación con arcillas más plásticas al objeto de que la resistencia mecánica en seco de las piezas fuera la adecuada.

También se puede utilizar en las composiciones de azulejo para reducir el contenido en carbonatos de las arcillas calcáreas (margas) hasta los valores requeridos por este tipo de composiciones.

5.1.2.2. Lutita Devónica nº 2

Es una muestra de coloración crema-marfil tras la cocción, por lo que su campo de aplicación podrían ser las baldosas de color de cocción blanco. Su comportamiento refractario durante el proceso es similar al de los caolines, materiales que se emplean para aumentar la blancura de los soportes de estas baldosas. Al igual que los caolines, presenta un mal comportamiento durante el prensado, lo que se manifiesta en laminaciones y en una baja compacidad.

Como habitualmente se observa en los caolines, la lutita nº 2 presenta un índice de plasticidad de $IP=26$ (método de indentación), pero se ha obtenido también un $IP=17$ (método de Casagrande). Esto es consecuencia del tipo de ensayo realizado, ya que la plasticidad es inferior a lo que correspondería en función del valor obtenido por el método de indentación y parece más acertado el obtenido por el método de Casagrande.

Teniendo en cuenta que los caolines utilizados en la industria presentan blancuras muy superiores, esta muestra no se considera en principio para cocción blanca y si para la fabricación de baldosas cerámicas, pero qué duda cabe de que podrían usarse para azulejo, que requiere la presencia de arcillas carbonáticas o carbonato cálcico micronizado en una proporción del 10 al 12%.

Para ladrillos, se utiliza mezclando con otros materiales con el fin de rebajar su punto de sinterización que alcanza la temperatura de 950°C , el producto acabado es de gran calidad (IGME-Compañía General de Sondeos).

5.1.2.3. Lutita Namuriense nº 5

Es una muestra de coloración rojiza tras la cocción, por lo que su principal campo de aplicación son las baldosas de color de cocción rojo. Presenta una

plasticidad media, baja proporción de carbonatos y un buen comportamiento en el prensado, como se deduce del alto valor de la densidad aparente en seco.

Durante la cocción desarrolla una fundencia elevada, lo que se traduce en la obtención de composiciones de muy bajos valores de la absorción de agua y altas contracciones de cocción. Por todo ello se emplearía mayoritariamente en la obtención de composiciones de pavimento de gres, donde se requiere el desarrollo de una elevada proporción de fase vítrea. La proporción en que se podría utilizar en materiales de construcción sería muy alta, dada su elevada fundencia, del 75%. Para obtener gres esmaltado podemos mezclarla con arcillas menos fundentes, como la westfaliense nº 1.

5.1.3. APLICACIÓN CERÁMICA DE LUTITAS INVESTIGADAS

El campo de aplicación de estas lutitas se presentan en la Tabla V 6, las arcillas ensayadas no contraen mucho, ni en el secado ni en la cocción, por lo que son susceptibles de aplicarse en cerámica y ello ha sido confirmado por un informe del Instituto de Tecnología Cerámica (6).

Tabla V 6. Campos de aplicación de las lutitas		
Muestra	Aplicación cerámica preferente	Observaciones
Lutita nº1 westfaliense	Gres esmaltado y azulejo de cocción roja	En proporción media (50%), dada su baja plasticidad. Debería utilizarse con arcillas más plásticas como namuriense o devónica..
Lutita nº 2 Devónica	Azulejo de cocción blanca y cementos alumínicos	En media proporción (30%), debido a su mal comportamiento en el prensado, baja blancura y plasticidad media.
Lutita nº 3	Materiales de construcción y gres	En proporción alta (70%), mezclada con arcillas más plásticas. También en gres esmaltado en media proporción (50%).
Lutita nº 4	Materiales de construcción y gres	
Lutita nº 5	Materiales de construcción y gres	

La aplicación cerámica en productos procesados por vía húmeda (baldosas cerámicas) queda sujeta a que las muestras presenten una adecuada desfloculación, aspecto no contemplado en esta investigación. Tampoco hemos obtenido la temperatura óptima para la fabricación de ladrillos, lo que debería realizarse en una futura investigación con ensayos reales en productos conformados, no obstante se han realizado ensayos en productos acabados de arcillas namurienses (muestras A, B, C y D) cocidos a 800°C.

Las lutitas están exentas de carbonatos, la westfaliense posee fundencia muy moderada. La lutita devónica es crema-marfil tras la cocción y su comportamiento es refractario. La lutita namuriense presenta buen comportamiento en el prensado, pero durante la cocción desarrolla una fundencia elevada, obteniendo composiciones de muy bajos valores de la absorción de agua y utilizable en pavimento de gres, la proporción en que se podría utilizar en materiales de construcción sería muy alta y podría mezclarse con arcillas menos fundentes, como la westfaliense.

5.1.4. VALORACIÓN DE RESERVAS

Todas las escombreras de la minería del carbón a cielo abierto de la Cuenca del Guadiato son interesantes para la obtención de la lutita westfaliense y en ellas estimamos más de 100 Mt de las minas de San Antonio-PMC, Corta Cabeza de Vaca y Corta Cervantes. No obstante en esta Tesis Doctoral solo se han evaluado arcillas de nuevos laboreos (no de escombreras mineras). A continuación se detallan las zonas in situ que podrían ser concesiones de explotación y donde se podría excavar estas canteras de arcilla con una capacidad de producción anual de 0,3 millones de toneladas año. Se han evaluado inicialmente un total 28'5 millones de toneladas de reservas de las diversas lutitas:

- *Zona 1:* Corresponde a la *lutita westfaliense* del sondeo S-307-2 (x: 319.010, y: 4.232.500, z: 530), a 10 m de profundidad, en la Mina San Antonio (Belmez) de PMC en el paraje Juliana Oeste (880, 1-2). Polígono 5: parcela 22 (400 Ha), parcela 51 (53 Ha de PMC) y parcela 50 (69 Ha de PMC).
 - Potencia = 10 m.
 - Fondo Corta = 60 m. (cotas 550 a 490)
 - 25 Ha aflorantes.
 - 500 m corrida.
 - Volumen = 7'5 Mm³.
 - Toneladas = 15 Mt (producción de 0'3 Mt/año durante 50 años).

- **Zona 2:** Corresponde a la *lutita devónica* de la Mina Luisa, carretera de Hinojosa, kilómetro 15 (Hoja 858, 1-3, Mapa Topográfico de Andalucía 1:10.000).
 - Potencia = 30 m.
 - Fondo Corta = 20 m. (cotas 610 a 630)
 - 10 Ha aflorantes.
 - 200 m x 400 m.
 - Volumen = 1'5 Mm³.
 - Toneladas = 3 Mt (reservas de 10 años para 0'3 Mt/año).

- **Zona 3:** Lutita namuriense entre la Estación de Ferrocarril de Belmez y el río Guadiato (Hoja 879, 4-2), paraje Tejares. Polígono 9: parcela 12a (4 Ha Antonio Martín Murillo), parcela 12b (1Ha) y otras de Renfe.
 - Fondo Corta=25m (cota Guadiato 460 y cota ferrocarril 495).
 - 12 Ha aflorantes.
 - 200 m x 500 m.
 - Volumen = 2,25 Mm³.
 - Toneladas = 4,5 Mt (reservas de 15 años para 0'3 Mt/año).

- **Zona 4:** Lutita namuriense de Cabeza de Vaca, al norte de la Estación (Hoja 879, 4-2), entre la vía férrea, las instalaciones de Cabeza de Vaca, el polvorín de ERT y el camino. Polígono 9: parcela 137a (1 Ha), 137b (5 Ha) y 137c (11 Ha), todas ellas del Ayuntamiento de Belmez
 - Fondo Corta = 30 m (cota 470 (vía ferrea-Guadiato y cota 500).
 - 5 Ha aflorantes.
 - 200 m x 200 m.
 - Volumen = 0'75 Mn³.
 - Toneladas = 1'5 Mt (reservas de 5 años para 0'3 Mt/año).

- **Zona 5:** Lutita namuriense del Bujadillo, entre la vía férrea y la carretera N-432 antigua, en el PK6 (Hoja 880, 1-3). Polígono 10: parcela 7a (15 Ha Francisco Daza) y parcela 8a (4'5 Ha de M. Dolores Risquel López).
 - Fondo Corta = 30 (cota 480 de la vía ferrea y cota 510 al norte).
 - 15 Ha.
 - 400 m x 400 m.
 - Volumen = 2'25 Mn³.
 - Toneladas = 4'5 Mt (Reservas de 15 años para 0'3 Mt/año).

La lutita wesfaliense no requiere evaluación por el gran volumen disponible en las escombreras mineras y la lutita devónica requiere una futura

investigación y evaluación por la presencia de pirofilita como mineral principal. Así las cuadrículas mineras seleccionadas en esta investigación para la explotación, corresponden a las lutitas namurienses de tres estaciones de muestreo, la 3, la 4 y la 5:

- *Estación, Guadiato y Tejares (zona nº3) con 4'5 Mt seguras:*
x = 5° 12' 40" 5° 12' 20" longitud oeste.
y = 38° 16' 38° 15' 40" longitud norte.
- *Cabeza de Vaca (zona nº4) con 1'5 Mt seguras:*
x = 5° 11' 20" 5° 11'.
y = 38° 15' 40" 38° 15' 20".
- *Bujadillo (zona nº5) con 4'5 Mt seguras:*
x = 5° 09' 20" 5° 09'.
y = 38° 14' 40" 38° 14' 20".

Las cuadrículas mineras corresponden a los arcos de meridiano referidos al de Greenwich y de paralelas determinadas por la unión de los vértices referidos anteriormente en grados sexagesimales. Los perímetros así definidos pertenecen todos al término de Belmez.

Las zonas 3, 4 y 5 de lutitas namurienses son las más favorables inicialmente para la explotación de las lutitas namurienses para gres, que suponen 10'5 millones de toneladas (explotación para 35 años a un ritmo máximo de 300.000 toneladas/año).

El valor de las reservas seguras iniciales en el terreno de las zonas 3, 4 y 5 depende de los costes de explotación. Como no se pueden capitalizar de una vez todas las reservas, se reduce el valor actual según la duración de explotación conforme a la regla de interés compuesto.

El Valor Actual del Tonelaje, V :

$$V = (T \cdot p / n) \cdot \{ (1 + (i / 100))^n - 1 \} / \{ (1 + (i / 100))^n \cdot (i / 100) \}$$

p = canon por tonelada.

T = toneladas de arcillas.

n = duración de la explotación en años (35 años)

i = interés bancario.

En las tres zonas seleccionadas (3, 4, 5) de lutita namuriense se han evaluado un total 10'5Mt de reservas seguras (tipo de interés bancario 5%). Se proyecta extraer 300.000 T/año y una explotación de 35 años.

Precio de venta del arcilla para gres = 40 euros/tonelada.

Precio de venta de arcilla para ladrillos = 4 euros/tonelada

Para gres el valor de la tonelada no explotada se establece en el 5% del precio de venta, $p = 2 \text{ €/tonelada}$. Y para ladrillos $0,2 \text{ €/tonelada}$.

$$V = 60.000 (4,516/0,2758) = 982.450 \text{ €}.$$

El valor actual del tonelaje total de arcilla, 10'5 millones de toneladas, para ladrillos es de 982.450 euros.

5.2. RESULTADOS PARA ARCILLA CERÁMICA EN LA CAMPIÑA

La muestra tomada dentro de la cantera en la parte norte, denominada M10 presenta dos minerales que son silicatos de aluminio: Gismondina ($\text{Ca Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 2,5 \text{ H}_2\text{O}$, grupo de las Zeolitas, que se utilizan para absorción selectiva de moléculas, secado de fluidos, descontaminación de gases industriales, separación de hidrocarburos y como catalizadores) y Forsterita (se emplea como arena refractaria en fundición). La forsterita o peridoto pertenece al grupo de los olivinos y es un accesorio de las rocas eruptivas básicas, su fórmula es SiO_4Mg_2 , aparece en las zonas de fracturas, sobre todo en la remoción durante el mioceno de antiguas fracturas.

Ultimamente se han realizado cuatro determinaciones cuantitativas (a posteriori) de difracción de rayos X –PXRD- en cuatro nuevas muestras tomadas y confirman los resultados, para el análisis mineralógico, son las SEV2, A20, M30 y M10 noroeste (se adjuntan en este apartado).

Los resultados obtenidos en la difracción de rayos X, ver tabla IV 7, confirman que todas las muestras poseen características mineralógicas similares, con presencia de yeso, son semejantes y ello justifica que no existen grandes variaciones intrínsecas entre las margas azules y las margas blancas albarizas.

Durante el último año se han recogidos más muestras del entorno de las estaciones SEV2 (margas blancas), A20 y M30 (margas azules de la cantera en explotación), y en la zona noroeste de la estación M10. Todo ello con el objetivo de confirmar el análisis mineralógico en el entorno de las estaciones de muestreo, sobre todo de la M10 que es una estación con gismondina en media proporción.

Los análisis PXRD realizados con la colaboración del Dr. J. D. Martín Ramos (UGR) en cuatro muestras con la fracción fina <40 micras, sólo pasadas por el tamiz, obtienen para las margas blancas (SEV 2) unos resultados con mayor porcentaje de calcita que en las margas azules, y también en estas margas blancas se obtiene un menor porcentaje de glauconita-illita que en las

margas azules. El porcentaje del mineral yeso-brushita ronda en las muestras el 3% y es similar en las margas blancas y en las azules. También se han cuantificado cuatro tipos diferentes de montmorillonita en todas las muestras (por lo que deben sumarse sus porcentajes parciales) y este mineral se presenta en menor proporción en las margas blancas que en las margas azules. Los amorfos también presentan menor proporción en las margas blancas que en las margas azules.

En la muestra recogida unos 25m al noroeste de la estación M10, el análisis mineralógico ha resultado negativo para la gismondina, en cambio cuantifica una proporción importante de microclina (feldespato potásico) del 19%, que no esta presente sólo un 4% en el resto de las muestras ya sea margas blancas o margas azules. Este resultado presupone que la gismondina procede de la alteración de la microclina en una falla-acuífero y que las reservas de esta zeolita en la Campiña son limitadas al entorno próximo de fallas reactivadas en el mioceno.

Qualitative and quantitative analysis by Powder X-Ray Diffraction (65)

J. Daniel Martín. Universidad de Granada.

Instrumental: Secondary graphite monochromatic copper radiation. Automatic 1°-2-theta slit.
Bragg-Brentano geometry/Dynamic digital scan.Philips PW1000/PW1712 diffractometer.
Four varied montmorillonites have been analyzed (Total montmorillonite= Sum 85-0183, 85-0219, 85-0232 & 85-1499
PDF-2004 database patterns). Brushite 85-0293 pattern includes gypsum.

C:\XPowder\Samples\Daza\SEV 2

Card	Phase	RIR	%W Unc m/R	Mu/rho	%W Xtal	%W Xtal+A
85-0795	Quartz · ·Si	03.46	31.9(0.8)	0034.5	30.6(0.8)	30.0(0.8)
85-2340	Calcite · ·C	07.93	28.4(0.4)	0104.8	30.2(0.4)	29.6(0.4)
85-0622	Dolomite = Calc	03.17	02.8(1.2)	0075.1	02.7(1.2)	02.6(1.2)
85-0705	Microcline = Po	03.00	02.2(1.3)	0067.7	02.2(1.3)	02.2(1.2)
85-0685	Illite-2\ITM\RG	01.05	08.6(1.2)	0075.4	08.9(1.2)	08.7(1.2)
85-0293	Brushite = Calc	02.49	01.8(1.3)	0077.3	01.8(1.3)	01.8(1.2)
85-0527	Kaolinite = Alu	01.00	06.3(1.3)	0029.8	05.6(1.3)	05.5(1.2)
85-0183	Clinochlore-\IT	01.00	04.4(1.3)	0028.4	05.7(1.3)	05.5(1.2)
85-0219	Montmorillonite	03.00	03.7(1.2)	0028.9	03.4(1.2)	03.3(1.2)
85-0232	Montmorillonite	03.00	02.9(1.2)	0042.8	02.8(1.2)	02.7(1.2)
85-0135	Montmorillonite	03.00	03.8(1.2)	0031.1	03.5(1.2)	03.4(1.2)
85-1499	Montmorillonite	03.00	03.0(1.2)	0026.1	02.7(1.2)	02.6(1.2)
	Global amorphous stuff	00.50	06.2(2.5)	02.0(1.3)

Sev_2: R-according factor= 0.0146
Density= 7.956(g·cm⁻³) μ/Dx of the mixture= 59.8 cm²·g⁻¹

C:\XPowder\Samples\Daza\A20

Card	Phase	RIR	%W Unc m/R	Mu/rho	%W Xtal	%W Xtal+A
85-0795	Quartz · ·Si	03.46	44.5(0.5)	0034.5	43.2(0.5)	41.7(0.5)
85-2340	Calcite · ·C	07.93	16.7(0.7)	0104.8	18.0(0.7)	17.3(0.6)
85-0622	Dolomite = Calc	03.17	05.3(1.6)	0075.1	05.1(1.6)	04.9(1.5)
85-0705	Microcline = Po	03.00	02.6(1.7)	0067.7	02.6(1.7)	02.5(1.6)
85-0685	Illite-2\ITM\RG	01.05	08.8(1.7)	0075.4	09.2(1.7)	08.9(1.6)
85-0293	Brushite = Calc	02.49	01.1(1.1)	0077.3	01.2(1.2)	01.1(1.1)
85-0527	Kaolinite = Alu	01.00	04.6(1.7)	0029.8	04.1(1.7)	04.0(1.6)
85-0183	Clinochlore-\IT	01.00	03.6(1.7)	0028.4	04.7(1.7)	04.5(1.6)
85-0219	Montmorillonite	03.00	02.6(1.7)	0028.9	02.4(1.7)	02.3(1.6)
85-0232	Montmorillonite	03.00	04.6(1.6)	0042.8	04.4(1.6)	04.3(1.6)
85-0135	Montmorillonite	03.00	03.1(1.7)	0031.1	02.9(1.7)	02.8(1.6)

85-1499 | Montmorillonite | 03.00 | 02.5(1.7) | 0026.1 | 02.3(1.7) | 02.2(1.6)
 Global amorphous stuff | 00.50 | 08.0(2.8) | | | 03.6(1.7)
 A₂₀: R-according factor= 0.0324
 Density= 6.967(g·cm⁻³) μ/Dx of the mixture= 52.8 cm²·g⁻¹

C:\XPowder\Samples\Daza\M30

Card	Phase	RIR	%W Unc m/R	Mu/rho	%W Xtal	%W Xtal+A
85-0795	Quartz · ·Si	03.46	29.1(1.0)	0034.5	28.0(1.0)	27.3(1.0)
85-2340	Calcite · ·C	07.93	24.4(0.5)	0104.8	26.0(0.5)	25.4(0.5)
85-0622	Dolomite = Calc	03.17	03.1(1.6)	0075.1	02.9(1.6)	02.8(1.6)
85-0705	Microcline = Po	03.00	03.8(1.6)	0067.7	03.8(1.6)	03.7(1.5)
85-0685	Illite-2\ITM\RG	01.05	14.6(1.6)	0075.4	15.2(1.6)	14.9(1.5)
85-0293	Brushite = Calc	02.49	01.3(1.3)	0077.3	01.3(1.3)	01.3(1.3)
85-0527	Kaolinite = Alu	01.00	05.8(1.6)	0029.8	05.1(1.6)	05.0(1.6)
85-0183	Clinochlore-\IT	01.00	03.1(1.6)	0028.4	03.9(1.6)	03.8(1.6)
85-0219	Montmorillonite	03.00	03.2(1.6)	0028.9	03.0(1.6)	02.9(1.6)
85-0232	Montmorillonite	03.00	04.5(1.6)	0042.8	04.3(1.6)	04.2(1.5)
85-0135	Montmorillonite	03.00	04.5(1.6)	0031.1	04.2(1.6)	04.1(1.5)
85-1499	Montmorillonite	03.00	02.6(1.6)	0026.1	02.3(1.6)	02.2(1.6)
Global amorphous stuff		00.50	07.8(2.7)	02.3(1.4)

M₃₀: R-according factor= 0.0275
 Density= 6.272(g·cm⁻³) μ/Dx of the mixture= 60.1 cm²·g⁻¹

C:\Samples XPowder\ \Daza\M10 noroeste

Card	Phase	RIR	%W Unc m/R	Mu/rho	%W Xtal	%W Xtal+A
85-0795	Quartz · ·Si	03.46	16.1(1.5)	0034.5	15.4(1.5)	15.0(1.4)
85-2340	Calcite · ·C	07.93	20.0(0.6)	0104.8	21.2(0.6)	20.8(0.5)
85-0622	Dolomite = Calc	03.17	03.5(1.8)	0075.1	03.3(1.8)	03.2(1.8)
85-0705	Microcline = Po	03.00	16.9(1.5)	0067.7	16.8(1.5)	16.5(1.5)
85-0685	Illite-2\ITM\RG	01.05	12.1(1.8)	0075.4	12.5(1.8)	12.2(1.8)
85-0293	Brushite = Calc	02.49	06.4(1.8)	0077.3	06.5(1.8)	06.4(1.8)
85-0527	Kaolinite = Alu	01.00	06.4(1.9)	0029.8	05.6(1.9)	05.5(1.8)
85-0183	Clinochlore-\IT	01.00	04.4(1.9)	0028.4	05.6(1.9)	05.5(1.9)
85-0219	Montmorillonite	03.00	03.1(1.9)	0028.9	02.9(1.9)	02.8(1.8)
85-0232	Montmorillonite	03.00	05.3(1.8)	0042.8	05.0(1.8)	04.9(1.8)
85-0135	Montmorillonite	03.00	03.7(1.8)	0031.1	03.4(1.8)	03.3(1.8)
85-1499	Montmorillonite	03.00	02.1(1.9)	0026.1	01.9(1.9)	01.8(1.8)
Global amorphous stuff		00.50	09.2(2.9)	02.1(1.3)

M_{10_NW}: R-according factor= 0.0300
 Density= 7.821(g·cm⁻³) μ/Dx of the mixture= 62.7 cm²·g⁻¹

Summary of quantitative analysis of crystalline components

Sample	Quartz	Calcite	Dolomite	Microclin	Illite-2\	Brushite	Kaolinite	Clinochlo	Montmoril
Montmoril	Montmoril	Montmoril	R-acc	Densit	C.Mas				
SEV 2	30.6(0.8)	30.2(0.4)	02.7(1.2)	02.2(1.3)	08.9(1.2)	01.8(1.3)	05.6(1.3)	05.7(1.3)	03.4(1.2)
	02.8(1.2)	03.5(1.2)	02.7(1.2)	0.0146	7.956	59.8			
A20	43.2(0.5)	18.0(0.7)	05.1(1.6)	02.6(1.7)	09.2(1.7)	01.2(1.2)	04.1(1.7)	04.7(1.7)	02.4(1.7)
	04.4(1.6)	02.9(1.7)	02.3(1.7)	0.0324	6.967	52.8			
M30	28.0(1.0)	26.0(0.5)	02.9(1.6)	03.8(1.6)	15.2(1.6)	01.3(1.3)	05.1(1.6)	03.9(1.6)	03.0(1.6)
	04.3(1.6)	04.2(1.6)	02.3(1.6)	0.0275	6.272	60.1			
M10 noroeste	15.4(1.5)	21.2(0.6)	03.3(1.8)	16.8(1.5)	12.5(1.8)	06.5(1.8)	05.6(1.9)	05.6(1.9)	02.9(1.9)
	05.0(1.8)	03.4(1.8)	01.9(1.9)	0.0300	7.821	62.7			

Summary of quantitative analysis of crystalline components and amorphous stuff

Sample	Quartz	Calcite	Dolomite	Microclin	Illite-2\	Brushite	Kaolinite	Clinochlo	Montmoril
Montmoril	Montmoril	Montmoril	Amorp	R-acc	Densit	C.Mas			
SEV 2	30.0(0.8)	29.6(0.4)	02.6(1.2)	02.2(1.2)	08.7(1.2)	01.8(1.2)	05.5(1.2)	05.5(1.2)	03.3(1.2)
	02.7(1.2)	03.4(1.2)	02.6(1.2)	02.0(1.3)	0.0146	7.956	59.8		
A20	41.7(0.5)	17.3(0.6)	04.9(1.5)	02.5(1.6)	08.9(1.6)	01.1(1.1)	04.0(1.6)	04.5(1.6)	02.3(1.6)
	04.3(1.6)	02.8(1.6)	02.2(1.6)	03.6(1.7)	0.0324	6.967	52.8		
M30	27.3(1.0)	25.4(0.5)	02.8(1.6)	03.7(1.5)	14.9(1.5)	01.3(1.3)	05.0(1.6)	03.8(1.6)	02.9(1.6)
	04.2(1.5)	04.1(1.5)	02.2(1.6)	02.3(1.4)	0.0275	6.272	60.1		
M10 noroeste	15.0(1.4)	20.8(0.5)	03.2(1.8)	16.5(1.5)	12.2(1.8)	06.4(1.8)	05.5(1.8)	05.5(1.9)	02.8(1.8)
	04.9(1.8)	03.3(1.8)	01.8(1.8)	02.1(1.3)	0.0300	7.821	62.7		

Siguiendo normas geotécnicas se han caracterizado (en el apartado 4.2.3.4.) las margas azules de la zona “suroeste de Aguilar”, la plasticidad obtenida por límites de Atterberg (UNE 103-103-94 y UNE 103-104-93) es de intermedia a alta, los ensayos de corte directo (ASTM-STP-479 y ASTM D-3080/90) dan ángulos de fricción de 14° y cohesiones de $0,25 \text{ kg/cm}^2$. Los ensayos de compactación (NLT-107/76) proporcionan una densidad seca máxima de $1,6 \text{ gr/cm}^3$ para una humedad óptima del 20% (similar al límite plástico).

También se han realizado ensayos de capacidad de soporte CBR – California Bearing Ratio- (NLT-111/78) en la zona “norte de Puente Genil”, que dan un índice CBR muy bajo de 2,3 con el 2% de hinchamiento, por lo que estas arcillas margosas se clasifican como “suelo marginal”.

Las muestras estudiadas no contraen excesivamente en cocción (<12%) por lo que son susceptibles de aplicación cerámica, presentan altas pérdidas de peso en la cocción y la absorción de agua es mayor del 10%, los resultados de cocción se presentan en la Tabla V-8. Además, se ha estudiado el contenido en carbonato cálcico, por los problemas en la cocción, los resultados obtenidos en las distintas muestras tratadas con machacadora y molino se presentan en tanto por ciento de “arena” (representativa de la valoración de nódulos) y se correlacionan con la resistividad según la geolétrica realizada en el entorno de las distintas muestras.

Los valores de resistividad obtenidos se han aportado en el Capítulo 4, en la Figura IV 8, en la Tabla IV 13 y en la Tabla IV 14, los criterios a priori han sido eficaces para la interpretación de los perfiles de Tomografía Eléctrica. Los resultados relacionados en la Tabla V 9 han permitido correlacionar la resistividad aparente con el porcentaje de nódulos en las muestras (“arena”).

Así el yacimiento explotable de la mejor calidad de arcilla y del máximo interés es el de 3 a $10 \Omega\text{m}$ de resistividad en arcillas con bajos porcentajes de nódulos y concrecciones de calcita (CO_3Ca en nódulos aislados) en las margas azules o margas blancas albarizas. Los materiales limo arcillosos con indicios de arena fina y margas que registran resistividades entre 11 a $28 \Omega\text{m}$ corresponden a la presencia de abundantes nódulos (bastantes nódulos de CO_3Ca) que dan lugar a porcentajes del 6% al 12% en la fracción arenosa “arena” de las muestras “todo uno”. Las arenas y margas limosas con resistividades superiores a $28 \Omega\text{m}$ corresponden a arenas y margas limosas con cambio lateral de facies y presencia de agua subterránea (tabla V 9).

5.2.1. RESULTADOS DE LA PROSPECCIÓN EN LA CAMPIÑA (80)

El sur de la provincia de Córdoba está conformado por la depresión del Guadalquivir y las cordilleras Béticas, que son el extremo occidental de las cordilleras alpinas europeas. Los afloramientos más antiguos corresponden al sistema Triásico, que ha sufrido fenómenos tectónicos de escala continental durante el Mesozoico y el Cenozoico (38) (5). En el sistema Neógeno se forma la depresión del Guadalquivir o campiña de Córdoba, del Mioceno superior, con margas de carácter marino, originada por el hundimiento debido a la falla del Guadalquivir y a la distensión post-tectónica con la transgresión marina. Durante el Plioceno la campiña de Córdoba experimenta el proceso de emersión.

En los pisos Burdigaliense-Tortonense del Mioceno se sedimentan las margas blancas que están en la serie estratigráfica a techo de los materiales del sistema Triásico, en contacto discordante, y constituyen un grupo litológico muy homogéneo y extendido por las hojas geológicas de Montilla y Puente Genil (5). Directamente encima de las margas blancas se disponen las margas azules del Tortonense superior, de gran continuidad horizontal, con intercalaciones limo-arenosas y arenas silíceas con abundantes nódulos de calcita. Después de la sedimentación marina el ambiente es reductor, los depósitos se modifican debido al dióxido de carbono presente en los intersticios, que con el agua disuelve parte del carbonato cálcico. Más tarde, con la compactación de las margas, se inicia la expulsión del líquido, apareciendo el mecanismo de crecimiento de la estructura cristalina de estos nódulos por precipitación, cementando dentro de la porosidad intrínseca del sedimento (65).

Además las margas presentan una granulometría fina de carbonato cálcico y en estos climas áridos se produce su lavado y el precipitado posterior de concreciones, que se realiza en la zona superficial y disminuye en profundidad.

Un fin de este trabajo ha sido realizar la prospección de materia prima arcillosa, con poca calcita, en la campiña de Córdoba (arcillas cerámicas) para la fabricación de bloques de material cerámico, poroso, ligero y resistente. Para ello se ha realizado en el sur de la provincia de Córdoba una clasificación del terreno con ensayos tecnológicos en tres zonas, de 4 km² cada una, seleccionadas con el apoyo de las hojas del Mapa Geológico de España (MAGNA) de Puente Genil y Montilla (5). Estas zonas son: “suroeste de Aguilar”, “oeste de Moriles” y “norte de Puente Genil”, en las tres áreas de trabajo se han establecido diversas estaciones de muestreo de campo; también

se aplican métodos geofísicos de campo artificial como Tomografía Eléctrica y Sondeos Eléctricos Verticales SEV (16), para caracterizar las arcillas y aportar información del subsuelo como la estructura geológica y la continuidad de yacimientos de arcillas, para valorar la presencia de nódulos de calcita.

La naturaleza y disposición estructural que conforman el subsuelo de la campiña de Córdoba se han determinado mediante prospección geofísica eléctrica, complementaria de las observaciones de campo. Esta prospección nos aporta la resistividad aparente de las capas del subsuelo, que se ha cotejado con los análisis de las muestras recogidas en las distintas zonas, con el propósito de localizar yacimientos minerales que presenten una conductividad que contraste con el terreno adyacente (16). Así, la prospección de las margas del Mioceno de la Campiña de Córdoba está orientada al descubrimiento de depósitos de arcilla cerámica (23), con baja proporción de calcita, y a realizar los análisis que valoren las posibilidades de uso en la fabricación de materiales cerámicos (13).

Las estaciones de muestreo de campo donde se ha recogido materia prima “todo uno” para los análisis tecnológicos han sido: A20, M30, M10, E12, E48, 1WA, 1WB y SEV1 en la zona “suroeste de Aguilar” de la unidad margas azules; 2EA, 2EB, 2EC, 2ED y SEV2 en la zona “oeste de Moriles” de la unidad margas blancas; y los muestreos 3PGA, 3PGB y SEV3 en la zona “norte de Puente Genil” de la unidad margas azules. Ambas margas poseen una alta proporción en nódulos de calcita y se requiere una temperatura máxima de cocción de 850° C, debido a la calcinación de la calcita de los nódulos y concreciones, que produce gas carbónico y óxido de calcio, absorbiendo calor y produciendo agrietamiento.

Para la caracterización se habían establecido diversas zonas de trabajo con estaciones de muestreo para estas margas, las muestras representativas se recogen después de eliminar la capa edáfica a 0,5-1 m de profundidad, y constituye el “todo uno” (UNE 103-100 y NLT 101/72). Posteriormente han sido secadas al aire y tratadas con machacadora de mandíbulas para obtener una homogeneización y un calibre máximo de $\frac{1}{2}$ "=12,5 mm, a continuación se reducen mediante cuarteo y a una parte se le realiza análisis granulométrico (UNE 103-101 y NLT 104/72). El resto del triturado “todo uno” es sometido a molienda en seco mediante un molino de tres bolas metálicas.

Las muestras trituradas se someten a análisis químico EDAX, y las molidas en fracción menor de 40 μ m se analizan con DRX, utilizando polvo cristalino y radiación CuK α (0'15406) a 35 KV y 15 mA, con una velocidad de rodadura de 0,05°(2 θ) y un tiempo de paso de 1 s. Los difractogramas fueron estudiados con el programa X Powder (66), ver tabla V 7.

Se realizó en todas las muestras “todo uno” una molienda en seco durante diez minutos con molino de bolas. Sánchez Soto (11) considera que es

posible inducir alteraciones importantes en las propiedades texturales de silicatos laminares con un tratamiento de molienda con molino de bolas en seco durante más de treinta minutos.

Con posterioridad se procede a obtener la fracción de finos (arcilla y limo) pasando por el tamiz 0,1 mm (NLT 152/72), y el material retenido en este tamiz conforma la fracción arenosa o “arena”, que tiene una granulometría menor de 0,5 mm. Esta “arena” corresponde a los nódulos y concreciones de calcita, referentes al “todo uno”, ello es debido a que la molienda en seco es incapaz de reducir toda la muestra a granulometría fina debido a que estos nódulos y concreciones son de más dureza, y también al efecto colchón que ejerce la granulometría más fina.

Siguiendo normas geotécnicas se han caracterizado las margas azules de la zona “suroeste de Aguilar”. La plasticidad obtenida por límites de Atterberg (UNE 103-103-94 y UNE 103-104-93) es de intermedia a alta, los ensayos de corte directo (ASTM-STP-479 y ASTM D-3080/90) dan bajos ángulos de fricción (14°) y cohesiones ($0,25 \text{ kg/cm}^2$). Los ensayos de compactación (NLT-107/76) proporcionan una densidad seca máxima de $1,6 \text{ gr/cm}^3$ para una humedad óptima del 20% (similar al límite plástico). También se han realizado ensayos de capacidad de soporte CBR –California Bearing Ratio- (NLT-111/78) en la zona “norte de Puente Genil”, que dan un índice CBR muy bajo de 2,3 con el 2% de hinchamiento, por lo que este material se clasifica como “suelo marginal” no utilizable en zonas inundables ni en coronación de obras de tierra. Esta caracterización geotécnica no se suele contemplar en los resultados para arcillas cerámicas, sólo se considera la plasticidad.

Con la fracción fina de las muestras molidas se realizan probetas que son conformadas con una humedad de amasado menor que el límite plástico, se dejan reposar y se prensan en el edómetro a más de 10 kg/cm^2 durante siete horas. Continuando como se ha comentado en el apartado 4.3.2. (planteamiento de la cocción). Debido al porcentaje de nódulos de calcita, alguna probeta cocida se descompone o agrieta. El comportamiento durante el proceso de secado, se presenta en la tabla V 8, en ella, se aprecia que la contracción es menor del 8%. Para preparar la cocción se han tenido en cuenta un correcto secado. Así como los ensayos geotécnicos que también aplicamos en un proyecto de investigación del Ministerio de Fomento (6) (12). Finalmente, en las probetas cocidas se ha medido la contracción y la absorción de agua (DIN-52103).

Tabla V 7. Análisis DRX de Componentes Cristalinos y Amorfos (amorfos + arcilla de baja cristalinidad)

Muestra	%							
	Calcita	Cuarzo	Moscovita	Yeso	Amorfos			
1WA	56,5	15,4	21,0	3,3	3,7			
1WB	47,1	20,5	26,2	2,7	3,5			
2EA	54,9	16,6	23,8	NO	4,7			
3PGA	48,9	18,8	24,2	3,8	4,4			
3PGB	53,5	16,2	23,2	3,1	4,0			
A20	32,5	22,8	32,8	6,4	5,4			
A20 "arena"	40,2	22,0	30,5	2,4	5,0			
E12	44,0	21,3	27,2	4,3	3,2			
E48	47,2	20,0	26,3	2,7	3,7			
E48 bis	32,5	27,0	33,1	3,3	4,1			
M10 "arena"	17,6	8,4	30,7	30,9	12,4			
M30 bis	57,9	14,0	21,5	2,2	4,4			
M30	29,3	26,6	34,7	4,6	4,8			
SEV1	9,7	34,4	43,0	5,7	7,3			
SEV2	33,0	24,6	33,9	4,0	3,6			
SEV2 "arena"	28,0	26,5	33,9	6,2	5,4			
SEV3	69,6	9,9	12,9	4,1	3,6			
M10	Calcita	Cuarzo	Hercinita	Gismondina	Fosterita	Cuprita	Moscovita	Amorfos
	25,1	13,7	1,6	32,1	4,9	0,5	16,4	5,8

Los análisis químicos EDAX de las muestras de margas azules (23) han dado el siguiente intervalo composicional: $\text{SiO}_2=35-42\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3=6-16\%$, $\text{CaO}=15-20\%$, $\text{MgO}=3-4\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3=3-4\%$, $\text{CO}_2=3\%$, $\text{K}_2\text{O}=2-2,5\%$, $\text{Na}_2\text{O}=0,5-1\%$, $\text{SO}_2=0,5\%$, $\text{WO}=1\%$, $\text{TiO}=0,5\%$ y $\text{Cl}_2\text{O}=0,2\%$. En la marga blanca de la muestra SEV2 se ha obtenido el siguiente resultado (% en peso): $\text{SiO}_2=25\%$, $\text{CaO}=25\%$, $\text{CO}_2=23\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3=5\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3=3\%$, $\text{MgO}=1\%$, $\text{K}_2\text{O}=1\%$ y $\text{TiO}=0,2\%$. También se han realizado ensayos de microscopía electrónica de transmisión MET: la tabla V 8 presenta los valores medios del elemento calcio, junto a los datos obtenidos por el EDAX.

La determinación en porcentaje del carbonato cálcico de las muestras se realizó por volumetría, midiendo el gas carbónico desprendido al reaccionar los carbonatos de las muestras (23), con clorhídrico 1:1 en el calcímetro de Bernard, obteniendo los siguientes resultados: A20 = 31,4%, A20 arena = 39,5%, M30 = 32,8%, M30 arena = 57,4%, M10 = 29,7%, 1WB = 48,1%, E48 arena = 35,9%, SEV1 = 7,3%, SEV2 = 29,6%, SEV2 arena = 31,4%, 3PGA = 44,3% y 3PGB = 42,8%.

Los resultados del análisis mineralógico DRX indican que todas las muestras poseen características mineralógicas similares con calcita, cuarzo, moscovita y yeso. También se han valorado, con DRX, en la tabla V 7, la escasa proporción de interestratificados o amorfos de capas mixtas irregulares

de arcillas expansivas y la presencia de algo de yeso (66) (13). Las muestras de la zona oeste de Moriles denominadas 2EA, 2EB, 2EC y 2ED no poseen yeso, son cuaternarias y se estudian conjuntamente. Los porcentajes de moscovita-illita (67) son de media proporción en ambas margas, desde el 21% al 43%, incluyendo también la glauconita, con su presencia aporta al suelo potasio y cationes que lo fertilizan. En la muestra M10, tomada al “suroeste de Aguilar” en la fractura Jogina-Zóñar, aparece gismondina como mineral principal, lo que hace muy difícil el secado sin grietas. Entre 50-200° C se pierde agua higroscópica (adsorbida) y zeolítica de los minerales de arcilla (14).

En la fractura Jogina-Zóñar se presenta como mineral principal la gismondina (grupo zeolita), que tiene que ver con la disolución-precipitación en sistemas hidrológicos cerrados, como acuíferos en fracturas, también contiene forsterita (grupo olivino). Además, la distensión en el Mioceno superior de una antigua fractura provocaría un acuífero que disuelve los yesos triásicos y la formación de la laguna Zóñar en Aguilar.

La agrupación de aves en esta laguna puede relacionarse con la zeolita. Su propiedad como filtro molecular que reemplaza sus cationes por H⁺ protones, permite que las aves al ingerirla junto a proteínas alimentarias, podrían beber algo de agua marina durante sus migraciones. El comportamiento como membrana en la zeolita permite que se retenga el sodio en los poros, liberando proteínas que atraviesan esta membrana. Un tamaño de poro mayor en la membrana de zeolita supone la mínima presión (68).

Tabla V 8. Absorción de agua (AA), Contracción lineal (CL), Pérdidas por calcinación (Pc) en la arcilla cocida, Elemento calcio, Plasticidad y Contracción de secado.

Muestras	AA (%) 850 °C	CL (%) 850 °C	Pc (%) 850 °C	Límite Líquido	Contracción del Secado (%)	Elemento Ca (% peso) EDAX
SEV3	NO	2	27	25	2	Ca=25,7%
M10	12	10,0	21,0	55,0	8,0	Ca=9,1%
A20	18	10,0	20,0	50,0	7,0	Ca=11,4%
M30	17	10,0	21,0	48,0	7,0	Ca=12,4%
SEV2	23-26	6,5-8,5	13,0-19,0	36,6	7,0	Ca=19,7%
E48	NO	8,0-8,3	26,0	35,5	6,0-7,0	Ca=15,8%
E12	NO	4,0	27,0	24,0	4,0	Ca=16,4%
3PGA	21-30	8,0-10,0	22,0-24,5	38,0	7,0	Ca=9,0%
1WA	28	4,3	14,7	33,0	4,5	Ca=32,0% MET
1WB	18	4,0	11,6	30,0	4,0	Ca=25,6% MET
2EA,2EB,2EC,2ED	20	8'3	17,9	32,0	7,0	Ca=15,5% MET
3PGB	25	4,5-5,0	18,7	32,0	4,5-5,0	Ca=28,9% MET
SEV1	18	4,0	7,0	23,0	4,0	Ca=1,0% MET

Las muestras ensayadas no contraen excesivamente a 850° C (< 10%) y la absorción de agua es superior al 10%, por lo que son susceptibles de aplicación cerámica (tabla V 8). Presentan altas pérdidas de peso por calcinación, no habiéndose realizado, en esta fase de investigación, la curva de absorción-contracción en función de la temperatura, a priori puede considerarse la estabilización a la temperatura de cocción óptima de 800° C.

Se han estudiado los nódulos y concreciones de las muestras “todo uno” tratadas con machacadora y molino de bolas. En la tabla V 9 se presentan los porcentajes de fracción arenosa “arena”, referente al “todo uno”, representativo de la valoración de nódulos de calcita. Este porcentaje se ha correlacionado con las resistividades obtenidas en el entorno de las distintas muestras. Al tratarse de materias primas naturales presentan una variabilidad intrínseca a los propios yacimientos, por lo que para obtener una calidad constante es necesario proceder al mezclado y homogeneización de las diferentes capas (24). La presencia de nódulos y concreciones en estas arcillas margosas hace difícil proyectar adecuadamente el proceso de fabricación cerámica. Como resultado se ha obtenido una relación lineal entre la resistividad aparente (δ) y el porcentaje de nódulos en las muestras o “arena”, con un coeficiente de correlación de 0,92. La expresión (según la tabla V 9) es:

$$\text{Nódulos (\%)} = 0'93 + 0'42 \delta$$

5.2.2. DISCUSIÓN PARA LAS ARCILLAS CERÁMICAS DE LA CAMPIÑA DE CÓRDOBA

En la síntesis de este trabajo de prospección de la campiña de Córdoba (80) se justifica que el yacimiento de arcilla de buena calidad, comentado anteriormente en este Capítulo, para la fabricación de material cerámico de construcción corresponde al rango de resistividades de 3 Ω .m a 10 Ω .m que representa bajos porcentajes de nódulos y concreciones de calcita (entre el 0,1% y el 5%), en las margas azules y margas blancas del Mioceno superior.

Las resistividades menores del intervalo (3 Ω .m) corresponden a las arcillas cerámicas o margas azules de mejor calidad que poseen sólo nódulos aislados (como en la cantera en explotación al suroeste de Aguilar).

Se estima de interés una futura investigación de las margas blancas del oeste de Moriles, que corresponden al paquete arcilloso de 4 Ω .m que se presenta a partir de los 3,3 m de profundidad y posee una potencia de 45,2 m. A su vez al norte de Puente Genil se debería explorar la continuidad lateral de la capa arcillosa de 9,4 m de potencia con 4 Ω .m.

Tabla V 9.- Relación de resistividades aparentes y nódulos en muestras.

Muestras	Porcentaje de nódulos en las muestras o "arena"	δ = Resistividad aparente
2ED	7,7%	22,0 Ω .m SEV n°2 (ponderada)
SEV2	3,3%	10,0 Ω .m SEV n°2
SEV3	12,1%	24,0 Ω .m SEV n°3 (ponderada)
3PGB	11,5%	24,0 Ω .m SEVn°3 (ponderada)
3PGA	1,0%	4,0 Ω .m SEV n°3
A20	0,1%	3,7 Ω .m SEV n°5
M30	3,1%	9,6 Ω .m SEVn°5
E12	7,5%	25,0 Ω .m Tomografía
E48	3,3%	7,0 Ω .m Tomografía (ponderada)
1WA	9,5%	23,7 Ω .m SEV n°1
1WB	7,0%	23,7 Ω .m SEV n°1
SEV1	6,8%	23,7 Ω .m SEV n°1
2EC	8,9%	28,2 Ω .m SEV n°2
2EB	14,0%	28,2 Ω .m SEV n°2
2EA	11,5%	28,2 Ω .m SEV n°2
M10	0,2%	3,7 Ω .m SEV n°4

5.3. REFERENCIAS

- [2].- I.G.M.E. *Mapa de Rocas Industriales. Hoja 69 (4-9) 1:200.000*. 1976. (Realizado por CGS para I.T.G.E.).
- [3].- Mallada Pueyo, L. *Memoria descriptiva de la Cuenca Carbonífera de Belmez*. I.G.M.E. 1900.
- [4].- I.G.M.E. *Mapa Geológico de España. 879 y 880. 1:50.000*. 1985. (Realizado por INGEMISA para I.G.M.E.).
- [5].- F. Roldan et al. (Ingemisa). Mapa y memoria explicativa de la hoja 988 (Puente Genil) y 966 (Montilla). Mapa Geológico N. 1:50000 IGME, 1988.
- [6].- A. Daza Sánchez. Investigación para la caracterización y aplicaciones de las lutitas arcillosas de la Cuenca del Guadiato en materiales de construcción y obra civil. Subvencionado por el Ministerio de Fomento, 27 abril (BOE 20-5-2000). 85p.; Grupo de Ingeniería Geoambiental y Geofísica, RNM244 (UCO) 2001. Colabora el ITC (Informe inédito C001230, 18p.): J. García-Ten, F. Quereda y otros.
- [7].- Catálogo de las arcillas portuguesas utilizadas en la industria cerámica. Ministerio de Industria y Energía. Dirección G. de Geología y Minas. 1985.
- [8].- Pérez Lorente, F. *Geología de Belmez-Villaviciosa-Pozoblanco*. Tesis doctoral nº 281. Universidad de Granada. 1979.
- [10].- Ayala Carcedo F.J., Ferrer Gijón M., Oteo Mazo C. y Salinas Rodríguez J.L. *Mapa previsor de riesgos por expansividad de arcillas en España*. 1:1.000.000. I.G.M.E. 1986. (Realizado por Instituto Geológico y Minero de España con el Centro de Experimentación de Obras Públicas).
- [11].- P. J. Sánchez Soto. "Efecto del tratamiento mecánico por molienda en las propiedades texturales de pirofillita". Bol. Soc. Esp. Ceram. Vol. 48, nº2, p 59-68. Marzo-Abril 2009.

- [12].- A. Barba, C. Feliu, J. García-Ten et al. Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas. Castellón: Instituto de Tecnología Cerámica- AICE, 1997. 292p.; ISBN 84-923176-0-4.
- [13].- A. Daza Sánchez. Prospección minera de arcillas en tres zonas de Aguilar de la Frontera-Puente Genil (Córdoba). Para la empresa Proceran. OTRI-UCO. Resolución Rectoral 8/6/2005. XLIX Congreso de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio (SECV), 28-30 octubre 2009. Linares.
- [14].- J. Coroado, J. Marqués et al. "Propiedades cerámicas de las arcillas de la cantera de Asseiceira (Tomar, Portugal)". Mater. Construcc. Vol.55. nº279. p5-16. 2005.
- [15].- A. Binley y A. Kemna. DC Resistivity and Induced Polarization Methods. Hydrogeophysics. Vol. 50. Springer Netherlands. ISBN: 978-1-4020-3101-4. pp 129-156. 2005.
- [16].- E. Orellana. Prospección Geoeléctrica. Paraninfo. ISBN 84-283-1153-6. DL M-35184-1981.
- [17].- A. López Hidalgo, M. H. Loke, G. O. Fanton y E. C. Rubí. Técnicas prácticas para investigación de resistividad en 2D y 3D (Tomografía Eléctrica 2D-3D). <http://www.geoelectrical.com/Articulo.pdf> (23/06/2009).
- [21].- Jiménez Salas, J.A. y otros. *Geotecnia y Cimientos (Vol I, II, III1 y III2)*. Ed. Rueda. 1975.
- [23].- L. A. Díaz Rodríguez y R. Torrecillas. Arcillas cerámicas: una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones. Bol. Soc. Esp. Ceram. V., Vol. 41, nº5, p 459-470, (2002).
- [24].- E. Sánchez, J. Garcia-Ten et al. "Materias para la industria cerámica española. Situación actual y perspectivas". Bol. Soc. Esp. Ceram. V., 45 (1), 1-12, (2006).
- [38].- E. Uchipi. The Mesozoic-Cenozoic geologic evolution of Iberia, a tectonic link between Africa and Europe. R.Soc. Geol. España, 1, 257-294, (1988).
- [39].- Daza Sánchez A., López Sánchez M., Cano Jodar E. y López Pineda G. "Valoración del espaciado y la condición de las discontinuidades, adaptable a la clasificación de Bieniaswki". En revisión, 2010. IGME.

- [48].- Morante Carballo F.E. “Las zeolitas de la costa de Ecuador: geología, caracterización y aplicaciones”. Tesis Doctoral de la UPM (ETSIM de Madrid). 2004.
- [49].- Soca Olazabal N., Blanco Toledo F. y Pizarro Camacho D. “Uso combinado de zeolitas naturales y microalgas en la denitrificación de aguas residuales”. Revista Tecnología del agua, nº 162, marzo 1997. Pgs 61-65.
- [62].- Gutierrez Duque M., Herrera Vasconcelos T. y Laria Piedra N. “Influencia de la zeolita tratada con ácido sulfúrico y con hidróxido de sodio en el proceso de coagulación en aguas superficiales”. Revista Tecnología del agua, nº 131, noviembre 1994. Pgs 41-47.
- [66].- F. J. Torrijo Echarri, J. Mandado Collado y M. E. Bona Artazos. “Modelización genética de nódulos y concreciones. Propuesta de clasificación”. Estudios Geol., 60 (3-6): 95-110, (2004).
- [67].- J. D. Martín Ramos. “Using X Powder: A software package for Powder X-Ray diffraction analysis” www.xpowder.com D.L. GR 1001/04. ISBN 84-609-1497-6. 105p. Spain.
- [68].- J. D. Martín-Martín, T. Sanfeliu et al. “Caracterización litológica y mineralógica de los materiales permo-triásicos de Castellón utilizados como materia prima cerámica: la arcilla de Moró”. Bol. Soc. Esp. Ceram. V., 45 (4), 239-244, (2006).
- [69].- J. M. Benito, A. Conesa et al. “Membranas cerámicas. Tipos, métodos de obtención y caracterización”. Bol.Soc.Esp.Ceram.,43 (5), 829-842, (2004).
- [80].- A. Daza Sánchez y J. Ayuso Muñoz. “Prospección de arcillas cerámicas en la Campiña de Córdoba (España)”. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio (Consejo Superior de Investigaciones Científicas), Mayo-Junio 2010 -49 (3)- pp215-220.

CAPÍTULO 6
CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

1.- La Zona de Ossa-Morena es una estructura compleja de sistemas de fallas, donde se ha resaltado el desgarre siniestral, NO-SE, del sector de cizalla Badajoz-Córdoba. Las lutitas investigadas en diez estaciones de muestreo están exentas de carbonatos, la westfaliense posee fundencia muy moderada, en la devónica su comportamiento es refractario tras la cocción y es de color crema. La lutita namuriense presenta buen comportamiento en el prensado pero durante la cocción desarrolla una fundencia elevada, obteniendo composiciones de muy bajos valores de la absorción de agua y utilizable en pavimento de gres, la proporción en que se podría utilizar en materiales de construcción sería muy alta y podría mezclarse con arcillas menos fundentes como la westfaliense.

2.- Se concluye que las lutitas de Sierra Morena no contraen mucho, y son aptas para la fabricación rentable de materiales de construcción (ladrillos y tejas), a tenor de los análisis e investigación realizados. La composición óptima debe ser de lutita namuriense en alta proporción (70%), admite la lutita westfaliense por su moderada y menor fundencia, y también admite la lutita devónica por su plasticidad media. En el análisis de los costes se resalta la mayor rentabilidad de la fabricación de pavimento impermeable de gres, para ello se justifica la aplicación de una composición de lutita namuriense en media proporción (50%) y también hasta una proporción media de lutita westfaliense o de la lutita devónica. La expectativa más interesante sería la cerámica del azulejo, que con determinadas arcillas investigadas (lutitas devónica y westfaliense) tendría un 5% de absorción a 1150°C. Las proporciones adecuadas serían el empleo de una mezcla de lutita westfaliense (adyacente al carbón) en una proporción media del 50%, además de lutita devónica en media proporción del 30%, y admite algo de caliza en un 10% de proporción, pero no a la lutita namuriense por su nula absorción de agua a 1150°C.

3.- Los análisis mineralógicos realizados en las margas de la Campiña indican que todas las muestras poseen características mineralógicas similares con calcita, cuarzo, moscovita y yeso. También se concluye la escasa proporción de interestratificados o amorfos de capas mixtas irregulares de arcillas expansivas y la presencia de algo de yeso, salvo las muestras cuaternarias de la zona oeste de Moriles que no poseen yeso.

4.- Las margas de la Campiña ensayadas no contraen excesivamente a 850°C (<10%) y la absorción de agua es superior al 10%, por lo que son susceptibles de aplicación cerámica, y dan altas pérdidas de peso por calcinación. La estabilización es a temperatura de cocción óptima de 800°C.

5.- Los análisis PXRD realizados concluyen que en las margas blancas (SEV 2) se obtienen unos resultados con mayor porcentaje de calcita que en las margas azules, y también se obtiene en estas margas blancas un menor porcentaje de glauconita-illita que en las margas azules. El porcentaje del mineral yeso-brushita es del 3%, inferior a resultados anteriores, y es similar en las margas blancas y en las azules, salvo al noroeste de M10 que obtiene el 8%. También se han cuantificado cuatro tipos de montmorillonita en todas las muestras, por lo que deben sumarse los porcentajes, ésta se presenta en menor porcentaje en las margas blancas que en las margas azules.

6.- En la muestra de arcilla margosa recogida unos 25 m al noroeste de la estación M10, el análisis mineralógico ha resultado negativo para la gismondina y en cambio cuantifica una proporción importante de microclina (feldespato potásico) del 19%, Aunque en el resto de las muestras esta presente con un 4% ya sea margas blancas o margas azules. Este resultado presupone que la gismondina procede de la alteración de la microclina en una falla-acuífero y que las reservas de esta zeolita en la Campiña son limitadas al entorno próximo de fallas reactivadas en el mioceno.

7.- Los ensayos de capacidad de soporte CBR –California Bearing Ratio- en las margas azules de la zona “norte de Puente Genil” dan índices CBR muy bajos de 2,3 con el 2% de hinchamiento, se clasifica como “suelo marginal”.

8.- En la síntesis del trabajo de exploración de la campiña de Córdoba se justifica que el yacimiento de arcilla de buena calidad, con algunos nódulos, para la fabricación de material cerámico de construcción corresponde al rango de resistividades aparentes de 3Ωm a 10Ωm que representa bajos porcentajes de nódulos y concreciones de calcita entre el 0,1% y el 5%, en las margas azules y margas blancas del Mioceno superior. Las resistividades menores del intervalo corresponden a las arcillas cerámicas o margas azules de mejor calidad que poseen sólo nódulos aislados (suroeste de Aguilar).

9.- Los materiales limo arcillosos con indicios de arena fina que registran resistividades aparentes de $11\Omega\text{m}$ a $28\Omega\text{m}$ corresponden a la presencia de abundantes nódulos que dan lugar a porcentajes del 6% al 12% en la fracción arenosa "arena" de las muestras "todo uno". Los valores de resistividad superiores a $29\Omega\text{m}$ corresponden a arenas y niveles de margas limosas con cambios laterales y con presencia de acuíferos.

10.- Se estima de interés una futura investigación de las margas blancas del oeste de Moriles, que corresponden al paquete arcilloso de $4\Omega\text{m}$ que se presenta a partir de los 3,3 m de profundidad y posee una potencia de 45,2 m. A su vez al norte de Puente Genil se debería explorar la continuidad lateral de la capa arcillosa de 9,4 m de potencia con $4\Omega\text{m}$.

11.- En las muestras de las margas azules zeolíticas de la estación M10, que presenta el 33% de Gismondina, se ha observado "in situ" como la arcilla semisaturada es químicamente activa, se retrae lateralmente la capa doble y se disipa lentamente la presión intersticial positiva, por sinéresis o consolidación osmótica que produce las fisuras verticales visibles, más tarde debe producirse un asentamiento vertical al aumentar la tensión efectiva por presión intersticial negativa, el flujo ácido drena al exterior con succión capilar y por estas fisuras verticales.

CAPÍTULO 7
NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

7. NUEVAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

7.1. APLICACIÓN INMEDIATA Y FUTURA DE LA PIROFILITA

La pirofilita está presente en media proporción (50%) en la lutita del devónico (arcillas sericíticas), debido al metamorfismo regional de materiales con alto contenido en aluminio, es un silicato hidratado de alúmina, dioctaédrico ($Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$), de color blanco y en cocción es refractario, con fases cristalinas de mullita y cristobalita, el punto de fusión es de $1800^\circ C$ y se utiliza en cerámica especializada de alta temperatura, la NASA la utiliza para la cerámica de los exteriores de las naves espaciales. También se usa en cosméticos, satinados de papel, aislantes y cementos aluminicos. Ya se ha comentado el parecido con el talco, pero en vez de magnesio tiene aluminio, la pirofilita se suele presentar en láminas con un crivaje micáceo que la hace untuosa.

Aunque existen varios afloramientos de pirofilita en Belmez, hemos seleccionado las muestras de la explotación minera de Mina Luisa, donde el IGME ha realizado determinaciones de análisis químico (2), localizada a unos quince kilómetros al sur de Hinojosa del Duque, en el límite del término municipal con Belmez (paraje "El Cuartanero"). También se ha dispuesto de otra explotación minera de similares lutitas devónicas con pirofilita de la Mina La Zarza, en la Zarza de Alange (Badajoz), donde también se han recogido muestras "todo uno" para la determinación del análisis químico con técnicas de fluorescencia de rayos X (certificado de análisis nº0508053 realizado por el Laboratorio Técnico Cerámico S.L. para Minas La Zarza S.L., 2005). Ambos yacimientos son quizá los más importantes de España.

Tabla VII 1. Análisis químico de dos muestras con el 50% de pirofilita

Análisis Químico	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	P.P.C.
MINA ZARZA	54-56	27	5.5	1.2-1.3	0.1	0.2-0.1	3.7-4.8	0.45	5.9-6.4
MINA LUISA	52-65	21-30	2-4.7	1.1	0.1	0,4	2.8-3.1	1.7	5.6-7.3

Como aplicación in mediata de la pirofilita se han experimentado morteros preparado para revoque con una mezcla de muestras recogidas de la Mina Luisa, evitando las de color más claro, y también se ha experimentado otro mortero con una muestra "todo uno" de la Mina Zarza, ambos con composiciones químicas similares (ver tabla VII 1).

Ambos morteros se han elaborado con muestras de lutita devónica (con

pirofilita al 50% según DRX), previamente triturada y molida, y se han dosificado en un porcentaje de una tercera parte de $(OH)_2Ca$ respecto al peso de la muestra arcillosa (333gr de cal por 1000gr de muestra), con una proporción de agua de amasado de 2/3 de la muestra (666gr de agua por 1000gr de muestra). Después de extendido el mortero y a los 21 días de curado, se estima un 5% de humedad residual, la dureza se ha medido con un penetrómetro modelo Proctor y resulta una resistencia baja ($>60 \text{ kg/cm}^2$).

Se ha aplicado como mortero elástico grueso de 2cm sobre pared maestra a restaurar en un sótano de vivienda en Belmez que presenta humedad y abundantes eflorescencias de sodio, observándose buena adherencia, la contracción en el secado se estima en el 5% y la resistencia es baja, el periodo de observación ha sido de cuatro meses y posteriormente se ha cubierto esta capa intermedia con mezcla para enlucido y pintura.

La línea de investigación podría desarrollarse con probetas para que tengan en el ensayo de resistencia: 70% de muestra arcillosa (con el 50% de pirofilita), 25% de $(OH)_2Ca$ y 5% de humedad. Así este mortero elástico (y débil) es susceptible de aplicación como base de revoque o como capa intermedia en enlucido de zonas de absorción capilar y presencia de sales solubles, por su estabilidad a la humedad y al sodio (figura VII 1). En este mortero futuro se debe conseguir más endurecimiento y quizá en el amasado la utilización de agua con gas carbónico que reaccionaría con la cal para formar caliza, y si conseguimos que penetre en los huecos, se daría más resistencia o estabilidad a este mortero después del fraguado.

Figura VII 1. Mortero de pirofilita y cal



7.2. MATERIALES EVOLUCIONADOS EN LA CAMPIÑA

Los materiales especiales encontrados en los terrenos arcillosos de la Campiña de Córdoba (ver figura IV 1) merecen ser mencionados para futuras investigaciones, así esta Tesis está en la interfaz de varias áreas de conocimiento como la ingeniería del terreno, la ingeniería de la construcción y la prospección e investigación minera, por ello contemplamos en conjunto algunas aplicaciones y posibles desarrollos.

La depresión del Guadalquivir fue un fluctuante mar semicerrado que durante el mioceno superior se conforma una gruesa capa de sedimentos finos margosos en más de 300m, ricos en materia orgánica de diatomeas.

En las margas, el carbonato cálcico está finamente dividido y el agua de formación de éstas, está cargado de carbónico (CO_2), con lo que se disuelve la caliza fácilmente y se carga de bicarbonato, a más profundidad o bien al perderse el carbonato del agua, se precipita la calcita en forma de nódulos irregulares carbonatados y de concreciones que poco a poco van hacia la superficie, característico de la génesis de sedimentos arcillosos. “Es típico en Andalucía la capa de nódulos calizos un poco por encima del nivel freático” (21) (Jiménez Salas y De Justo Alpañes).

Los nódulos presentan zonación mineralógica que es reflejo de la química de las aguas intersticiales durante el crecimiento de la concreción desde el centro (zona primitiva) al exterior (zona tardía) del nódulo o concreción, en estratos paralelos.

Por otra parte las evaporitas se forman por la precipitación de sales a partir de la evaporación de aguas marinas concentradas, como los precipitados primarios de sulfato cálcico y cloruro sódico. Que se suma a la presencia de arcillas expansivas.

Otros precipitados resultan de reacciones químicas que pueden efectuarse entre los materiales disueltos y el sedimento más fino en suspensión, variaciones de acidez o ambiente de reducción. La glauconita se incluye en este grupo, posee el 50% de sílice, un 25% de óxidos de hierro, el 15% de potasio y el 10% de silicatos de aluminio y magnesio. La glauconita forma gránulos elípticos con 0,5 mm de color verde brillante a oscuro, se forman en aguas marinas de sedimentación lenta.

Los minerales de la arcilla presentes en estas margas, también cambian con la presencia de sílice o carbonatos, así la illita cuando se corroe pasa a moscovita, que tiene más potasio y es similar a otra mica: la glauconita, se da el caso de confundirlas en el análisis de difracción de rayos X.

7.2.1. Glauconita

La glauconita aparece en capas delgadas y es indicadora de un periodo de no sedimentación, es una mica pesada, de mayor densidad que otros minerales de sedimentación marina, y los granos son verdosos del tamaño arena “mica arcillosa hidratada con hierro y potasio” (Corrales et al).

Las lutitas margosas verdes-azuladas del mioceno superior presentan caliza microcristalina (micrítica) de precipitación química en porcentajes del 10% al 35% y glauconita, que puede representar un hiato, umbral o parón sedimentario en las formaciones transgresivas (tortonense). La glauconita es un silicato hidratado de aluminio y hierro con potasio, sodio, magnesio y calcio, es una mica rómbica –filosilicato- $\text{Si}_4\text{O}_4 \text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{KNa})(\text{Fe}^3\text{AlMg})_2$. Está presente en un rango batimétrico amplio y es característica de la diagénesis y del ambiente reductor de la cuenca del Guadalquivir.

La glauconita es un fertilizante agrícola por el contenido en potasio que enriquece la tierra, pertenece a los hidroxil-silicatos de color intenso verde-azulado oscuro, el tamaño normal de este mineral rómbico es de 0,1 a 0,5 mm y además de potasio posee sodio, magnesio, calcio y aluminio.

7.2.2. Yeso

La presencia de esta roca evapolita de sulfato cálcico hidratado ($\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en el terreno lo convierte en expansivo y por tanto se deben tomar con ellos las mismas precauciones que con los que contienen montmorillonita.

Los yesos son solubles y suelen provocar subsidencia del terreno que ocasionan colapsos con apertura de una oquedad hacia el exterior, pasando sus paredes de ser verticales a adoptar formas de embudo que al rellenarse parcialmente esta depresión de arcillas puede conformarse una laguna. Ello se da en los terrenos abigarrados del keuper (trias) del mediodía cordobés, donde también existen diapiros salinos y dan lugar a manantiales.

Estos fenómenos de diapirismo y disolución de yesos se dan más acusadamente en las fracturas y se generan lagunas de agua permanente en el sur de Córdoba (ver figura IV 1): Zóñar (al suroeste de Aguilar), Rincón (al sureste de Aguilar) y Amarga (al noroeste de Benameji). Otras pequeñas lagunas formadas por la baja permeabilidad del terreno, la escasa erosión del sistema fluvial y los fenómenos citados son: Tiscar-Salada (al noroeste de Puente Genil), Jarales-Prados de Antón (al noroeste de Benameji) y Conde-Salobral (al este de Luque). Todas ellas conforman una reserva natural contemplada en la Ley 2/1989 de 18 de julio.

Destacamos dos lagunas las de Zóñar y Rincón por su proximidad, sus aguas permanentes y la presencia de gran volumen de aves invernantes, unas cincuenta especies entre ellas el muy conocido malvasía y la rareza del pez *Atherina boyeri* en Zóñar, que es un reducto de condiciones marinas.

- *Laguna Zóñar.*

En la laguna de Zóñar se encuentra el centro de visitantes de El Lagar, en el km 75 de la carretera C329 de Aguilar a Puente Genil, en esta laguna existía una mina 500 pasos al este en el arroyo del Moro, según argumenta Antonio Carbonell en sus estudios inéditos (Seminario Antonio Carbonell de la EUP de Belmez), sin citar el mineral, esta mina todavía no se ha localizado.

La laguna es muy extensa, con 37 ha, de aguas con una profundidad de 15 m y una cota de 294 m, la recarga es subterránea y sin emisarios superficiales (figura VII 2). El origen de ésta laguna debe estar relacionado con la tectónica, por la presencia de la falla Jogina-Zóñar (que hemos descubierto), y por el colapso-disolución de formaciones yesíferas triásicas, en la karstificación de ellos ha influido el agua salada por la disolución de la halita del diapiro existente al sureste de la laguna (80).

Se han realizado tres SEV para caracterizar la laguna, el SEV11 en la orilla noreste, el SEV12 en el talud vertical del norte y el SEV13 en el suroeste. Destacamos en el SEV11 una capa de 66 m de potencia con 8,5 Ω m, localizada a 5 m de profundidad, entre limos con arena y abundantes nódulos. Indica que al menos 70 m de margas azules han sufrido deformación por el karst colapsado de yesos del trias. El SEV12 localiza 4 Ω m debajo de 62 m de potencia de arenas compactas y margas limosas con cambios laterales, los 10 m superficiales dan 200 Ω m (calcarenitas) que corresponden al talud norte de la laguna. El SEV13 es similar al anterior, localiza 8 Ω m debajo de 70 m de potencia arenas compactas y margas limosas, los 26 m superficiales dan 104 Ω m (calcarenitas).

Figura VII 2. Laguna Zóñar en Aguilar de la Frontera (Córdoba)



- *Laguna Rincón.*

Aunque existe una influencia tectónica, la laguna está originada por el colapso del karst en yesos debido al agua salada al disolverse diapiros salinos. Con recarga subterránea y muy similar a la laguna Zoñar. La cota de la laguna Rincón es la 332 m y se ha realizado también un SEV es el SEV14, a 13 m de profundidad localiza resistividades de 1,7 Ω m con 59 m de potencia y ello se razona con la génesis kárstica de la laguna por disolución de yesos y presencia de halita en diapiros y agua subterránea. También existen margas blancas en los 13 m superficiales encima de los yesos, con ello se han conformado taludes de pequeño ángulo en el colapso de esta laguna.

7.2.3. Gismondina

La gismondina es un mineral alumino-silicato hidratado de calcio que pertenece al grupo de las zeolitas, y dentro de este es muy similar a la chabacita (famosa es la de Arizona), su composición es $(\text{Si}_4\text{Al}_4)\text{Ca}_2\text{O}_{16}+9\text{H}_2\text{O}$ y tiene poros uniformes que constituyen un tamiz molecular cuya propiedad es el intercambio de cationes (en la adsorción). Reemplaza sus cationes metálicos selectivamente por los siguientes cationes: H^+ protones, Pb, Cu, Zn, Cr, Hg, etc. También es importante la adsorción del amoníaco, de los microorganismos nocivos y, particularmente, de las proteínas alimentarias.

La formación de la gismondina tiene que ver con con procesos hidrotermales ligados a sulfuros, también en depósitos alterados de ambiente volcanosedimentario marino y postalpinos del mioceno. Pero en la Campiña alta de Córdoba, quizá, sobre todo aparece gismondina en las fallas con disolución-precipitación y la alteración de feldespatos (microclina), en estos pequeños sistemas hidrológicos cerrados (acuíferos en fallas). Aunque no se descarta la formación de zeolita en ambiente sedimentario donde se producen depósitos por precipitación de sustancias disueltas, generándose in situ zeolitas y glauconitas.

La difracción de rayos X (DRX) realizada en la estación de muestreo M10 (figura VII 3) ha descubierto una concentración de zeolita del 32% en los terrenos arcillosos de las margas azules (mioceno superior) afectados por fallas transversales NE-SO neotectónicas. Pero una docena de metros al norte de la muestra M10 se toma otra y en vez de gismondina presenta el 17% de microclina, que justifica el argumento de formación de la gismondina en fallas-acuíferos y alteración de feldespato.

La gismondina es un mineral cálcico de baja temperatura (150°) hidrotermal, se da en las ventilas marinas, de aguas someras. Suele colapsar a partir de 160°, en el horno, por ello no es utilizable como material cerámico, y además en el secado presenta una gran retracción.

En la gismondina los tetraedros de SiO_4 y AlO_4 están unidos por átomos de oxígeno y forman poliedros, donde existen espacios de interconexión a la manera de red de canales y cavidades, donde se sitúan los cationes Ca, Na, K, en los puntos donde se equilibran las cargas negativas de los tetraedros AlO_4 .

Emmet Culligan en Minnesota, en el año 1924 patentó el descalcificador de agua mediante zeolita, que actuaba de filtro molecular y quita la dureza del agua, iones Ca y Mg, elimina los olores y es sellante.

Adsorbe los gases SO_2 , CH_4 , SH_2 y NH_4 , reducen el contenido de amonio y pueden ser utilizadas como fertilizantes (49), adsorbe metales pesados, hidrocarburos y residuos nucleares en suelos contaminados, aguas ácidas de minas, flocula aguas superficiales (50), además ejerce de filtro de estanques (48) y antialgas (en una proporción 1:1000/año), regula nitratos y fósforo causante de la eutrofización. Es conocida la regeneración de la zeolita mediante el lavado en sal común, también las propiedades antimicóticas en una proporción de 25-50gr de zeolita por kg de semilla grano, y el que las aves alimentadas con zeolita engordan un 25% más (48). Por último el uso de ella como detergente ha llevado a la fabricación de zeolita sintética.

La zeolita absorbe hasta el 55% de su peso en agua u otro líquido (como NH_4) manteniendo los nutrientes, por ello es una garantía frente a la sequía y suelos ácidos, también como sustrato y semillero de césped (48).

Por otra parte el cemento puzolánico de uso en obras marítimas está compuesto por cemento portland y un 20% de puzolana zeolítica, aproximadamente, junto a la estabilidad e insolubilidad que parece manifestar la zeolita con el $(\text{OH})_2\text{Ca}$ y el agua, que forma una vía topoquímica similar al cemento fraguado, la hacen útil como material de morteros. Aunque por nuestra parte ha resultado negativo la fabricación de un mortero de cal con esta gismondina, de baja proporción (30%), descubierta en el "todo uno" margoso, aplicándolo como revoco y enlucido de pared con humedad capilar y eflorescencias de sodio. No obstante es sólo una primera fase de investigación.

Los morteros actuales poseen características aglomerantes pero no poseen propiedades químicas de intercambio iónico y se comportan de forma parecida a las cerámicas. Por ello se ha abierto una línea de investigación en morteros estables a la humedad y al sodio mediante zeolitas, aunque destacamos que las primeras pruebas realizadas en muestras de la estación M10 han sido negativas debido a la plasticidad, con límite líquido superior al 50%, que han actuado desfavorablemente en estos morteros.



Figura VII 3. Zona de Gismondina al norte de la cantera de Proceran.

7.3. LAS MARGAS AZULES COMO ARCILLAS TERAPÉUTICAS.

El apilamiento de las arcillas está basado en la alternancia de laminas de tetraedros (T) y octaedros (O) de átomos de oxígeno que rodean átomos de Si, en el primer caso, y de Al, Mg, Fe, en el segundo. Cuando el catión que entra en los huecos octaédricos es trivalente se clasifica en dioctahédricos y cuando el catión es divalente existe un balance de cargas completo y se clasifica en trioctahédricos. Según el número de laminas que se alternan, en los filosilicatos tenemos TO (1:1) que no hinchan y TOT (2:1) que si lo hacen, como en las margas azules que poseen cuatro tipos de montmorillonita (rica en magnesio) y glauconita-illita (rica en potasio), también, calcita, sodio, hierro y microclina. Además la escasa zeolita está presente con las margas azules en yacimientos locales que requieren una futura investigación para uso terapéutico por la capacidad de cambio catiónico que es cinco veces mayor que en la montmorillonita.

La aplicación de la arcilla contra las inflamaciones era conocida por médicos egipcios en la antigüedad, que aplicaban los fangos calientes del río Nilo para tratar deformaciones reumáticas, quizá vinculado a la observación de su utilización por diversos animales. En la Historia Natural del romano Plinio el

Viejo (23-79 a.C.), obra que fue considerada durante 1.500 años como base imprescindible del saber médico, se habla de una tierra blanca, recogida en las colinas de Nápoles y de gran acción curativa.

Las arcillas basan su acción terapéutica en su gran poder de absorción, su capacidad de neutralizar la acidez, su efecto estimulante de la cicatrización y su uso en varios tipos de patologías de la piel. Una capa de lodo aplicada sobre la piel absorbe las toxinas del sistema periférico del tejido conjuntivo y elimina tóxicos linfáticos de la dermis. Por su conductividad tienen aplicación como antiinflamatorios en casos de reumatismo, artritis, gota y rehabilitaciones después de fracturas óseas.

El laboratorio de desarrollo galénico de arcillas (LDGA), ubicado en las instalaciones del Departamento de Farmacia y Tecnología Farmacéutica de la Universidad de Granada, estudia la caracterización galénica de arcillas de empleo en farmacia. Partiendo de la caracterización mineralógica, química y textural de estos materiales, se llevan a cabo ensayos destinados a determinar su aplicabilidad en farmacia. Junto a las aplicaciones tradicionales, se investigan nuevos usos, como el empleo en la liberación modificada de fármacos (www.ugr.es/~cviseras/). Este LDGA presentó una comunicación en el XIV Congreso Nacional Farmacéutico del año 2004 sobre “Empleo de Peloides en la terapéutica Balnearia”, además el profesor Cesar Viseras Iborra dirige el proyecto de investigación del Plan Nacional “Empleo de arcillas especiales en terapéutica y estética: caracterización mineralógica, química, textural y tecnológica. Desarrollo de formulaciones farmacéuticas y valoración de efectos antioxidantes” (MAT2006-05231).

También existe recientemente una empresa de base tecnológica que surge a partir de las investigaciones del grupo del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Vigo, en colaboración con el Departamento de Medicina de la Universidad de La Coruña, se trata de Peloides Termales, S.L. que tiene el registro de marca: Thermal Peloides®. Los peloides son productos naturales consistentes en la mezcla de agua con materias inorgánicas u orgánicas, resultantes de procesos geológicos y/o biológicos, que se utilizan en terapéutica en forma de emplastos o baños, son termoterápicos y el agua puede ser mineromedicinal, de mar o de lago salado. Una línea de investigación interesante es la utilización de las margas azules del Guadalquivir, de baja resistividad como arcillas en preparación de peloides para terapia termal (II Congreso Iberoamericano de Peloides. Sociedad Española de Peloides Termales SEPETER. Lanjarón-Universidad de Granada. 14-16 de julio de 2010 www.congresopeloides.org/).

7.4. NUEVAS LÍNEAS EN INGENIERÍA DEL TERRENO

Poco se ha investigado sobre la influencia de la química en el comportamiento mecánico de los suelos arcillosos, falta estudiar las reacciones de intercambio de cationes o los ensayos de compresibilidad isótropa expuestos a soluciones salinas. Así en la provincia de Córdoba destacamos los problemas de las sales solubles de las lutitas namurienses y las margas azules.

Además en los resultados obtenidos para estas margas azules del Guadalquivir se presenta una capacidad portante muy baja, con un CBR de 3, y a efectos de construcción de obras lineales sólo son tolerables en el cimiento o núcleo de terraplenes, nunca en la coronación ni utilizable en explanadas de ningún tipo. Incluso algunos ensayos de capacidad portante dan valores de $CBR=2,3$ (y 2% de hinchamiento), ello no asegura la estabilidad estructural del cimiento del firme de carreteras, por tanto la base del firme se deformaría irreversiblemente y requiere su estabilización, ello se puede constatar en las diferentes obras lineales en la Campiña de Córdoba, así la eliminación de estas margas como explanada e incluso como últimas tongadas del núcleo del terraplén requiere la reposición con materiales como calcarenitas con $CBR>10$ (figura IV 4). Además en los deslizamientos de taludes en estas margas se presentan ineficaces algunas actuaciones a pie de talud con pantallas de micropilotes atados, parece que la solución se centra en la escollera (sin debilitar el pie) y también en fijar la cara de los deslizamientos con sondeos “Jet-Grouting” inyecciones de chorro de lechada a modo de pilotes pasivos.

Figura VII 4. Talud en margas azules (Aguilar-Lucena).



Es necesaria una línea de investigación experimental donde tenga importancia los ensayos de compresibilidad isótropa y la caracterización geoquímica del terreno, lo más completa posible, estudiando la retracción lateral (sinéresis) en arcillas semisaturadas con la mínima humedad en el estado plástico, ya que son capaces de inducir deformaciones y flujos de origen osmótico importantes, así poco se conoce sobre los efectos químicos en el comportamiento mecánico de las arcillas compactadas utilizados en el sellado de vertederos y de acopios, suelos contaminados o escombreras mineras y, finalmente, almacenamientos de residuos radiactivos.

Se necesitan también el estudio de ensayos de compresión isótropa y triaxiales en arcillas expuestas a soluciones salinas y con reacciones de intercambio de cationes. Esta Tesis argumenta que la *sinéresis* comentada en el apartado 3.2.3.3., es una forma de expresar este fenómeno químico que produce la retracción lateral con fisuración vertical sin desecamiento del terreno (todavía con media saturación observada en la estación M10), y ello es más importante en las margas azules con alta proporción de zeolitas, por su mayor capacidad de cambio catiónico.

Esta Tesis también ha presentado una aplicación inmediata, con la discusión expuesta sobre una nueva norma de ensayo edométrico (compresión confinada) y consolidación de arcillas inalteradas (19), con más parámetros y que contempla experiencias en arcillas sobreconsolidadas y con algo de sodio, potasio y magnesio en su composición, se trata de la lutita namuriense.

Los mecanismos de cambios de volumen de probetas de arcillas, en ensayos en celdas de compresión isótropa y edométricos (74-78), expuestas a soluciones salinas concentradas consideran dos mecanismos potenciales:

-Consolidación osmótica o sinéresis. Relacionado con las interacciones electrostáticas de las partículas de arcilla y el agua con iones transportada en sus poros por difusión, así un aumento de la concentración de los iones provoca una mayor retracción lateral al quedar los iones en la doble capa (74-78). Entonces aparece la tendencia de origen químico al disminuir el volumen del suelo, aparece la retracción lateral de la capa doble con fisuración vertical en espaciados métricos (sinéresis) en arcillas semisaturadas, aún sin peso encima, disminuyendo el índice de huecos del suelo. La respuesta no drenada del suelo debida a la baja permeabilidad es la generación de presiones de poro positivas (*internas*) que *disminuye la tensión efectiva* del suelo (afectando a la componente horizontal), aunque mantiene a corto plazo su volumen constante y el exceso de presiones de poro se disipa lentamente con la deformación con fisuras verticales de estas arcillas sin soportar peso encima (esto ocurre con la mínima humedad en estado plástico). Además la consolidación osmótica permite el despegue y el amasado de las pastas arcillosas.

-Consolidación inducida. Que se debe al flujo de agua que sale hacia el exterior de la arcilla (drenaje), inducido por los gradientes de potencial (o succión) osmóticos –flujo inducido-, generando presión de poro negativa y *aumento de tensión efectiva* (74-78). Que aumenta la propia carga vertical en la arcilla, provocando succión capilar hacia el exterior y adsorción por planos de sinéresis con aumento de la disolución de sales que posteriormente ascienden. Esto se produce cuando la arcilla ha pasado al estado semisólido, con $\frac{1}{4}$ parte de saturación de agua. El aumento de la tensión efectiva produce la retracción de la arcilla en la vertical, asentamiento análogo a la consolidación mecánica (compresibilidad), que da presión y permite el paso de más iones solubles al exterior. Todo esto no parece afectar directamente al problema mecánico de las arcillas, lo hace indirectamente si la permeabilidad es muy baja y entonces aumenta este flujo inducido, pero este mecanismo es de menor importancia que la consolidación osmótica o sinéresis.

Resultados experimentales en estas arcillas expuestas a solución salina (74-78), van en la línea que los flujos inducidos hacia el exterior (drenaje) es el mecanismo de cambio con retracción del volumen vertical. Esta Tesis considera además que esta retracción debida al aumento de la tensión efectiva que aparece después de la consolidación osmótica, el terreno disminuye la saturación y pasa al estado semisólido, la sinéresis a su vez disminuye la tensión efectiva y supone una fisuración vertical aun sin desecarse la arcilla que esta semisaturada (además sin influir el peso de la posible carga encima), es de origen químico y aparece generalmente en arcillas sobreconsolidadas, teniendo máxima importancia. Si éstas tienen sales solubles, salen al exterior por capilares de adsorción de agua, finalizando el periodo de lluvias. Aún siendo adecuados los ensayos geotécnicos (mecánicos) se ha argumentado que por si sólo no solucionan el problema de estas arcillas (afloramiento de lutitas namurienses y margas azules) ya que en el edómetro no se estudia la sinéresis por estar la muestra confinada, así ocurre con la lutita namuriense que tiene un límite líquido de 30 a 35 y los resultados de los ensayos de consolidación con edómetro (19) son eficaces y se puede razonar que las investigaciones futuras estarán en esta línea geoquímica de consolidación osmótica e inducida (las lutitas namurienses inalteradas dan ángulos de fricción de 20° y disminuye a la mitad con el remoldeo).

También en la ingeniería de sondeos, el flujo inducido contribuye a la estabilización mecánica de las paredes del sondeo, los lodos bentoníticos de perforación también se utilizan en las excavaciones para la construcción de pilas y muros de contención excavados.

Esta Tesis quiere resaltar que con independencia de la consolidación mecánica que los mecanismos de consolidación osmótica e inducida son importantes en la lutita sobreconsolidada namuriense del Guadiato y en las

margas del Guadalquivir por presentar solubilidad iónica, poseen el problema geotécnico de originar grietas de tracción y capas activas importantes (consolidación osmótica –sinéresis-) aún sin cargar el suelo y asentamiento con drenaje por el flujo inducido. Si además tenemos un periodo seco prolongado y la consolidación mecánica debida a cargas externas (sobrepeso), hace que aumente el riesgo geotécnico en estas épocas de sequía y aparecen inestabilidades con las primeras lluvias (grietas en edificios e inestabilidades).

Las lutitas namurienses están sobreconsolidadas y presentan propiedades de membrana con eficiencia osmótica alta, por su baja permeabilidad, en presencia de concentraciones electrolíticas diluidas. Aunque también la carga de un edificio provoca en las lutitas un aumento de presión que puede disolver cationes de la capa doble y ascender por capilaridad y por fisuras verticales, hasta los muros de edificios donde precipita.

En la línea con el mecanismo de consolidación inducida es la utilización de la electroósmosis artificial para el drenaje de arcillas blandas, para utilizarlas por ejemplo como tierra armada (79), el agua va del ánodo (electrodo +) al cátodo (electrodo -), separados medio metro, y es un frente ácido de agua que se mueve rápidamente, así se genera presión intersticial negativa (consolidación inducida –drenaje-) alrededor del ánodo de H⁺ (donde ocurre la oxidación), baja el pH, causando el aumento de la tensión efectiva. Por otra parte el agua drena hacia el catodo donde se encuentra el hidróxido (OH⁻) que sube el pH. La electroósmosis requiere más investigaciones ya que produce el drenaje de arcillas blandas y con ello la mejora del terreno. También una reflexión, si el frente ácido de agua disuelve los carbonatos, la consolidación inducida (electroósmosis natural) tiene mucho que ver con la causa de formación de nódulos calcáreos en las margas azules del Guadalquivir.

7.5. VALORACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES Y SU ESPACIAMIENTO (39)

Para la predicción del comportamiento de las lutitas sacamos a la luz en el año 1991 una valoración geomecánica (18) basada en la relación del parámetro “*espaciado de discontinuidades*” (nº 3 de Bieniawski) y las resistividades obtenidas en 50 sondeos realizados en la Cuenca del Guadiato. La estructura del macizo rocoso es consecuencia de su historia geológica, destacando el papel de los esfuerzos tectónicos a que ha estado sometido causantes del grado de fracturación. Éste se relacionó con la testificación de resistividades en lutitas (40) sin considerar la zona alterada somera y otras litologías más competentes presentes en la zona de estudio.

Se plantea la modificación del parámetro “*condición de las discontinuidades*” (nº 4 de Bieniawski) en función de datos experimentales

sobre la meteorización, el relleno, la rugosidad y la continuidad. La clasificación geomecánica de Bieniawski (41) evalúa el macizo rocoso y su aplicación define el diseño de sostenimiento de las obras subterráneas y la sectorización.

Una clasificación geomecánica pretende caracterizar y evaluar el macizo rocoso, además de predecir su comportamiento, basándose en la aplicación de unos criterios, para permitir diseñar el sostenimiento de la obra subterránea y la planificación del método constructivo, especialmente de túneles con secciones de 100 m².

La obra subterránea modifica el equilibrio del macizo rocoso y una clasificación geomecánica debe contrastar los índices de calidad con el seguimiento de los sectores de la excavación y también extrapolar sus resultados (45).

Aunque las clasificaciones geomecánicas para túneles se han utilizado aprovechando los afloramientos y zonas superficiales, nosotros estimamos que el reconocimiento debe ser mayormente obtenido de sondeos a testigo continuos -*wire line* "NQ"- bien planificados y con la utilización de prospección geofísica (registros de resistividad en sondeos y perfiles de tomografía eléctrica). La toma de datos geomecánicos en los testigos continuos de sondeos permite la caracterización del terreno con un tratamiento sistemático (en cada maniobra de 3m de perforación); además, es conveniente aplicar la clasificación de Bieniawski (41) por su claridad, en todo tipo de macizo rocoso, incluso rocas blandas, para el sostenimiento del túnel, con bulonado de hastiales, cerchas arriestradas, chapa Bernold y hormigón de revestimiento.

Para evitar incrementos del presupuesto del túnel la U.S. National Com. On Tunnel Techn. aconseja realizar un metro de sondeo por cada metro de traza de túnel. Ello sería razonable para rocas blandas, terrenos plásticos o fracturados; en otros terrenos la realización de un sondeo hasta la traza cada 200 m de túnel evitaría algunos imprevistos (42) (47).

7.5.1. METODOLOGÍA PARA CLASIFICAR LAS LUTITAS

La estructura del macizo rocoso es consecuencia de la tectónica y de las características mecánicas de cada tipo de terreno, según su comportamiento elástico-plástico, asume deformaciones y fracturación (40).

La testificación geofísica en un importante número de sondeos en la Cuenca del Guadiato realizados en el año 1991 (18) permitió precisar con detalle el espaciado de las discontinuidades y fracturas, se realizaron diagráfias de resistividades normal corta, en macizos rocosos de litología lutítica y se evitó los registros en la zona más superficial.

Previamente se hicieron chequeos para ajustar la velocidad del registro geofísico para obtener medidas representativas, resultando adecuada una velocidad de registro menor de 2 m por minuto, ya que con esta velocidad no se detectaron variaciones bruscas de 20 Ωm y se quedaba sin registrar las fallas de pequeño espesor existentes en rocas competentes.

Se realizó un estudio de la relación entre registros de resistividades aparentes (normal corta) y la fracturación o espaciado de discontinuidades, en las lutitas atravesadas por los sondeos (figura VII 6). En las anomalías más resistivas aumenta la calidad de la roca y disminuye la fracturación (40).

Aunque en macizos rocosos con varias litologías y bajo grado de fracturación se pueden aplicar las diagráfias eléctricas de resistividad para correlaciones cronoestratigráficas, esta investigación trata de los macizos rocosos formados por una litología uniforme de lutitas. Así, la fracturación y la alteración superficial es lo que incide en los registros eléctricos de resistividad, obteniendo una relación entre la resistividad y la fracturación en lutitas (tabla VII 2), al evitar la influencia de la alteración y la variación litológica.

Tabla VII 2. NUEVA VALORACIÓN PARA LUTITAS	
ESPACIAMIENTO DE DISCONTINUIDADES	RESISTIVIDAD Ωm (aparente y normal corta)
TRITURADO O FALLA (T) < 10 mm	< 15 Ωm
	15'5 – 17'5
MUY ESPEJADO (ME) 10 mm – 50 mm MUY PRÓXIMAS	17'5 – 22'5
ESPEJADO O CERRADO (E) 50 mm – 300 mm PRÓXIMAS	22'5 – 27'5
	27'5 – 32'5
ALGO ESPEJADO (AE) 300 mm – 1 m MEDIANAMENTE SEPARADAS	32'5 – 40
MASIVO (M) 1 m – 3 m	40 – 70
MUY SEPARADAS 3 m – 10 m	>70

El mayor inconveniente de la testificación con registros geofísicos (Log) es el mantenimiento de la caña del sondeo sin entubar, desde la retirada del equipo de perforación hasta el posterior llenado de agua. Ello requiere la obtención del registro geofísico justo en el momento de la finalización de cada uno de los sondeos. Este problema se ha solucionado con la entubación continua de una tubería corrugada de PVC (glassidren-65 mm) ranurada uniformemente. Las testificaciones se han realizado también en un sondeo paramétrico (Sondeo 175), previamente a la entubación, ambos representados en los registros del sondeo de la figura VII 5. Donde se caracteriza mediante testificación geotécnica la fracturación del terreno y se registra el Log de resistividad. El grado de detalle obtenido fue superior en el registro geofísico que en la caracterización mediante testificación geotécnica de la fracturación, sobre todo en las lutitas muy fracturadas que, o bien no se observaron en la geotécnica o eran pérdidas del testigo de la ejecución del sondeo como se observa a 67m, 77m y 81m en la figura VII 7.

7.5.2. ROCK MASS RATING: RESULTADOS DEL DISCONTINUO

Bieniawski publicó su clasificación geomeánica *Rock Mass Rating* (RMR) el año 1979 (41) -después de modificaciones de la inicial del año 1973- empleándose para obtener los índices de calidad del macizo rocoso. Siempre en sectorizaciones basadas en la estructura geológica, es válida para el diseño de medidas del sostenimiento de túneles, y se adapta también al seguimiento y control de la excavación; está contrastada ampliamente, no obstante siempre ha de aplicarse con espíritu crítico (45) (46) y disminuir el grado de subjetividad. El RMR se correlaciona con el módulo elástico, la resistencia al corte, la presión sobre el sostenimiento y los coeficientes para el criterio de rotura de Hoek-Brown (42) (43) (44).

No hemos tratado de revisar la clasificación geomecánica, sino de optimizar su aplicación. Consideramos exclusivamente el reconocimiento sistemático en sondeos a testigo y cada sector corresponde a maniobras de perforación. El índice de calidad RMR básicamente es la suma de cinco parámetros valorados y caracterizados (Tabla VII 3) y su resultado entre 1 y 100.

Figura VII 5. Diagramas de resistividades en la pared de sondeo y entubación PVC

LOG EN LUTITA (B=30°S) DEL SONDEO 175 Y LOG ENTUBADO DE P.V.C. RANURADO

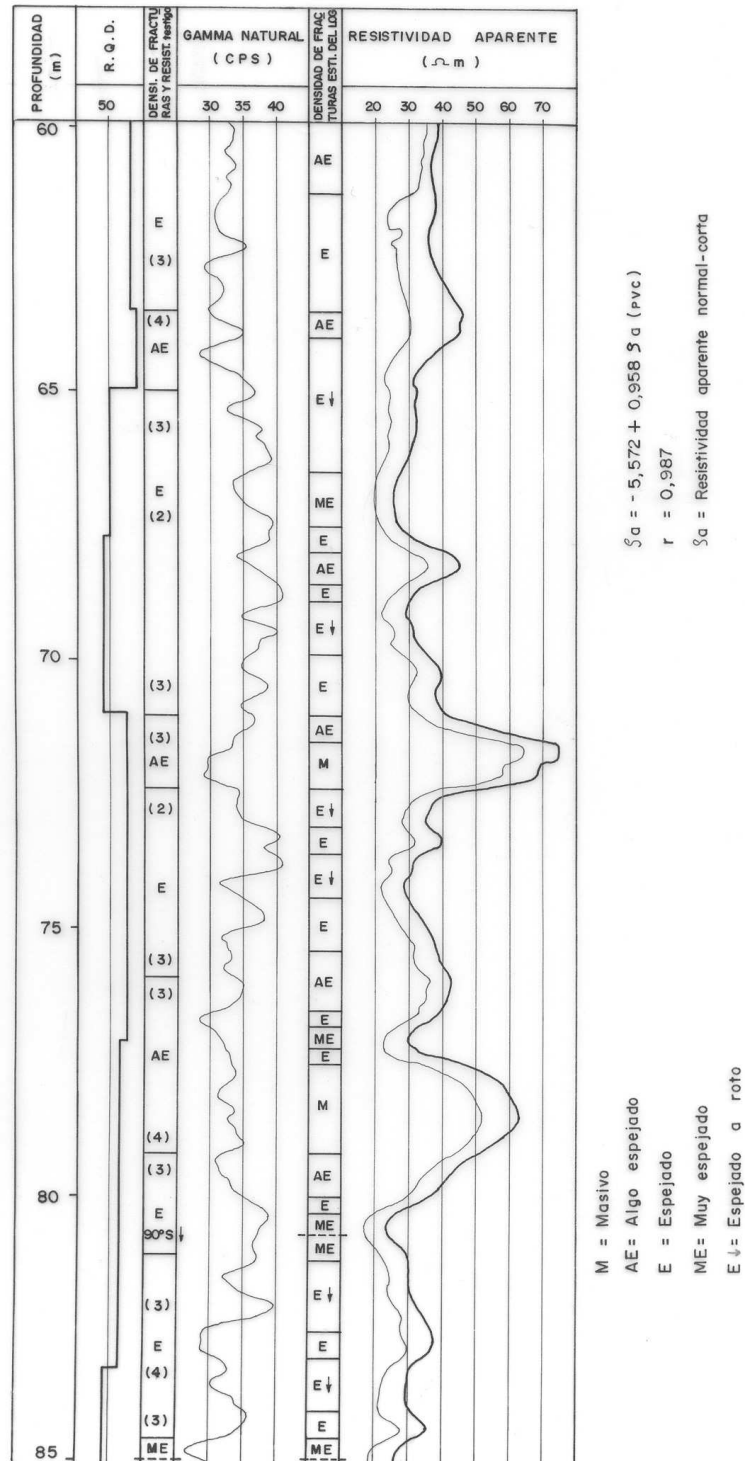


Tabla VII 3. Clasificación de Bieniawski

1	Resistencia de la roca intacta		R6= > 2.000 kg/cm ²	R5= 1.000-2.000	R4= 500-1.000	R3= 250-500 kg/cm ²	R2=100-250	R1=30-100	10-30
	Valor		15	12	7	4	2	1	0
2	R.Q.D.		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	< 25%		
	Valor		20	17	13	8	3		
3	Espaciado de discontinuidades		> 3 m Muy separadas	1-3 m Masivo (M)	0,3-1 m Medianamente separadas o algo espejado (AE)	50-300 mm Próximas o espejado (E)	< 50 mm Muy espejado (ME) y Triturado o Falla (T)		
	Valor		30	25	20	10	5		
4	Condición de las discontinuidades		Muy rugosa sin continuidad. Cerradas, labios duros.	Rugosa separación < 1 mm, labios duros	Ligeramente rugosa separación < 1 mm, labios blandos	Espejo de falla o relleno de espesor < 5 mm o abiertas 1-5 mm continuas	Relleno blando de espesor > 5 mm		
	Valor		25	20	12	6	0		
5	AGUA	Flujo cada 10 m de túnel	Ninguno		< 25 l/min	25-125	125 l/min		
		Presión del agua	0		0-0,2	0,2-0,5	0,5		
	Valor		Completamente seco		Húmedo intersticial	Agua presión moderada	Agua presión fuerte		
Valor		10		7	4	0			

Según la tabla de valores de los cinco parámetros (Tabla VII 3), se considera el primer parámetro a la “*resistencia a compresión*” promedio resistente de la roca intacta para cada maniobra del sondeo; el 2º parámetro es el “*Rock Quality Designation*” (RQD por maniobras), y, en el caso de no disponer de sondeos continuos, el RQD se estima con el tercer parámetro y se multiplica por 2/3 su valor. El tercer parámetro es el “*espaciado de las discontinuidades o densidad de fracturación*” en cada maniobra del sondeo, que hemos correlacionado en el apartado anterior con la resistividad. El parámetro nº 4 se ha optimizarlo, en la tabla VII 4, se trata de la “*condición o estado de las discontinuidades*” que considera la meteorización, el relleno, la rugosidad y la continuidad. Por último, en el parámetro nº 5 las “*filtraciones o agua freática en el macizo rocoso*”.

El resultado final es el sumatorio de los cinco parámetros del RMR y da un valor que es representado por el rango de una de las siguientes categorías del macizo rocoso: Clase I (81-100), Clase II (61-80), Clase III (41-60), Clase IV (21-40) y Clase V (<20).

En esta investigación no se ha considerado revisable el RMR en cuanto a la orientación del túnel y respecto a las discontinuidades, aunque el terreno puede comportarse de forma diferente y se ha podido observar una penalización a la estratificación subvertical en la excavación de túneles en la dirección de los estratos, pero quizá las tensiones residuales manifiestas en la convergencia de varios túneles en Málaga, que hemos observado recientemente, obliga a esta consideración conservadora.

Las categorías III y IV tienen un rango de aplicación amplio, dependiendo de la posibilidad o no de cerchas para la categoría III, y del tipo de excavación para la categoría IV, al aplicar el RMR en el criterio de rotura de Hoek-Brown (42) de 1980 -que introduce el GSI *Geological Strength Index*, aunque se continúa aplicando el RMR- y modificado por el Hoek-Brown en 2002 (44).

Este último criterio de rotura es ampliamente utilizado en el método de las curvas características, que es un diagrama de presión-deformación y de las curvas correspondientes al terreno y su sostenimiento, cuya intersección es el equilibrio en ese instante (45) (46).

ROSS MASS RATING PARÁMETRO 4	Tabla VII 4. CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES				
Continuidad (Tamaño Campo)	Muy pequeña 5	2 m 4	6 m 2	Alta 12 m 1	Fallas y superficies de estratificación 0
Rugosidad (JRC)	JRC = 20 7	JRC = 14 Rugoso 5	JRC = 8 3	JRC = 3 Liso 1	JRC = 0 Pulido Triturado 0
Relleno	Cerrada y sin relleno 10	< 1 mm Pared dura y relleno 8	Pared blanda-dura Relleno 1-5 mm 6	Pared y relleno blando Muy fracturado 5 mm 4	Triturado Espesor 10 mm 0
Meteorización del entorno de las discontinuidades (Moye)	Sana-Grado 1 3	Grado 2 2	Moderado Grado 3 1	Grado 4 0	Completa Grado 5 0

7.5.3. CONSIDERACIONES

Las consideraciones para el parámetro nº 4 de la clasificación de Bieniawski “*condición o estado de las discontinuidades*”, se recogen en nuestra tabla VII 4, y se quiere resaltar que el subparámetro “*continuidad*” (o dimensiones de las juntas) es de amplia consideración en las estaciones geomecánicas de campo, pero al ser utilizado en los sondeos, requiere una valoración pesimista.

Los otros subparámetros de éste parámetro nº 4, son:

- “*Rugosidad*”: tabla basada en perfiles JRC de valor 0 (espejo pulido) a valor 20.
- “*Meteorización*”: tabla basada en D.G. Moye -1 a 5-.
- “*Relleno*”: se tiene en cuenta la resistencia de las paredes de las juntas, su apertura y su espesor de relleno.

Finalmente, queremos resaltar el peso de esta modificación del parámetro nº 4 “*condición de las juntas*” para las estaciones geomecánicas, así como para la toma de datos de sondeos; además, el valor final de éste parámetro nº 4 coincide con el valor otorgado por Bieniawski en su clasificación geomecánica, tan sólo modificándose el procedimiento sistemático que se aporta en el presente artículo.

7.6. MODELO DE LA TECTÓNICA DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

La Zona de Ossa-Morena es una estructura compleja de sistemas de fallas, donde se ha resaltado el desgarre siniestral-transformante, NO-SE, del sector de cizalla varisca Badajoz-Córdoba. En este artículo se presenta un modelo con el objetivo amplio de una nueva forma de ordenación tectónica, basada en argumentos razonados de estos sistemas montañosos y se adscriben las estructuras al periodo orogénico del tiempo geológico. El modelo se conforma en los terrenos cordobeses que se han deformado reactivando sus fallas, varias veces con intervalos activos de unos 50 Ma.

La armonía del esfuerzo principal de las distintas orogenias, orientado con desfase de 45° en sentido contrario a las agujas del reloj, justifican las distensiones interorogénicas que disipan las tensiones residuales y se estima que la actual concentración de tensiones horizontales del terreno, son debidas a la compresión neotectónica. Ante el choque de la placa africana, se plantea necesario el control de coordenadas y presiones intersticiales en fallas alpinas con dirección NE-SO.

Es conocido que la corteza es rígida y flota sobre placas más o menos pastosas, estas placas litosféricas se mueven y chocan horizontalmente al ser empujadas por fallas de desgarre transformantes desde las dorsales (régimen extensional). Existe una corriente del manto fluido (astenosfera) girando en torno a un diámetro de expansión o polo de rotación, así los continentes estarían divididos sobre placas litosféricas elastoplásticas curvadas, al ser esférica la Tierra, y sometidos a un estado simétrico de esfuerzos que ha movido los continentes a distinta velocidad. También existieron movimientos verticales en el manto móvil para las subsidencias de las cuencas, favorecidos por el núcleo externo líquido y situado a 3000 km de profundidad, donde se realiza el movimiento de rotación terrestre y se genera el campo magnético.

Las fallas de desgarre con la dirección de la cizalla varisca, el eje magmático de Villaviciosa-La Coronada, la deformación de la cuenca carbonífera del Guadiato (Hernandez-Pacheco, 1926)[72], la línea tectónica del Guadalquivir (Carbonell, 1927)[32], la distensión en el mioceno que provoca el escalón de la sierra de Córdoba, y la neotectónica por el choque de la placa africana; ayudan a conformar hipótesis válidas para la discusión de este modelo, donde la complejidad disminuye por separar claramente los movimientos tectónicos.

El funcionamiento de las fallas de desgarre siniestral ha conformado las cuencas carboníferas, controladas por cabalgamientos, de tal forma que mientras las emplazaban sobre las adyacentes iban siendo progresivamente emergidas. La inversión tectónica está reconocida en la zona subportuguesa

que pasa de régimen extensional a régimen convergente antes de los primeros depósitos del Culm, que supone la subducción de la zona subportuguesa bajo el borde de placa de la zona Ossa Morena. Los cortes teóricos realizados por Dewey [71], representados en la figura VII 6, observan cierta semejanza con las zonas Subportuguesa y Ossa Morena, así relacionamos el corte A con el cadomiense, en el corte C el varisco, el corte E con el tardihercínico y el G con el ciclo alpino.

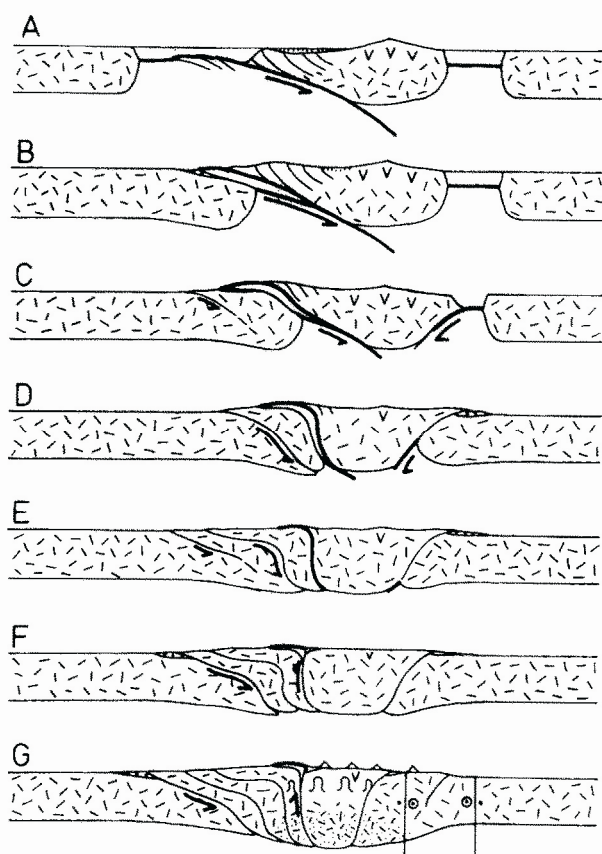


Figura VII 6. Cortes de Dewey.

En la actualidad el cinturón de sismicidad es consecuencia del choque de la placa africana contra la europea y justifica la actividad de la falla alpina siniestral del Guadalquivir, que pasó a tener un desplazamiento dextral con la distensión del mioceno, y es activa actualmente debido a la neotectónica del choque de la placa africana. Los desplazamientos en Andalucía de 20 mm/año en dirección NE, justifica el estudio de las fallas transversales NE-SO como la del Guadalquivir, la de Plasencia y la del estrecho de Gibraltar, las tres convergen al oeste en una que es la transformante de las Azores.

Se presenta un modelo simplificado de deformación estructural del territorio cordobés, que puede ser válido para la interpretación de la sucesión de orientaciones tectónicas, la cartografía geológica, la prospección de

materias primas y la neotectónica. En esta aproximación se admite que el estado de tensiones en el interior del macizo rocoso virgen es triaxial, en los terrenos elásticos las tensiones se liberan rápidamente y en los plásticos o dúctiles la liberación de tensiones es lenta. El estado de esfuerzos se corresponde con un elipsoide de esfuerzos principales (σ_1 , σ_2 , σ_3) y en los ensayos triaxiales con presión de confinamiento se observa, en un episodio temprano, que aumenta la resistencia a la deformación elastoplástica y en un episodio tardío que aumenta la resistencia a la cizalla (planos de desgarre con ángulos menor de 45° con la carga axial σ_1), pero suelen darse ambas deformaciones-roturas, la primera con salto según el buzamiento y la segunda con salto según la dirección. La deformación elastoplástica implica la acomodación de esfuerzos y en la parte comprimida se producen fallas inversas-cabalgamientos, cabalga lo más próximo al esfuerzo y luego lo alejado. Aunque con alta presión de confinamiento el comportamiento es sólo dúctil. El arrastre supone en primer lugar una deformación dúctil y continua con fractura de cizalla de movimiento heterogéneo.

Una nueva fractura puede estar condicionada por un plano de debilidad preexistente y la orientación del salto de esta nueva falla depende de los esfuerzos principales. En el modelo que presentamos σ_2 es la tensión vertical litológica y paralela a la línea intersección de las dos cizallas, σ_3 es el esfuerzo de confinamiento lateral y el esfuerzo principal mayor σ_1 es el movimiento compresional.

7.6.1. MODELO DE DEFORMACIÓN TECTÓNICA

La zona de Ossa Morena se caracteriza por la estructuración en dominios o sectores estrechos y alargados, con la dirección de la cizalla varisca NO-SE. Al N de la Cuenca de Peñarroya-Belmez aparecen filitas cámbricas del dominio de Obejo-Valsequillo (incluido en la zona Centro Ibérica). Al S de la citada Cuenca y de la falla de Villaharta se dispone el grupo de rocas de Córdoba-Fuenteobejuna: con los neises de Azuaga, los cuarzoesquistos y esquistos (del precámbrico) y también las arcosas de la formación Torrearboles con el detrítico carbonatado (del cámbrico) en la cizalla Badajoz-Córdoba. Finalmente el grupo de rocas de la Albarrana (de alto grado): con filitas de la formación Azuaga, micaesquistos, anfibolitas, neis y cuarcitas (del cámbrico), que aparecen en la cizalla Badajoz-Córdoba y también en el dominio de Sierra Albarrana (que se sitúa al S de la falla de Azuaga-eje magmático de Villaviciosa).

En la zona de Ossa Morena se han estimado restos de las orogenias Proterozóicas que no vamos a referir. El conocimiento estructural de la zona de Ossa-Morena requiere modelos iniciales de análisis dinámico de la fracturación que intente aproximaciones a las diversas sucesiones de orientación

geométrica de deformaciones, pero sin olvidar la trayectoria de los movimientos de los continentes (Condie [70], Bastida [65]), así en el viaje de Eurasia se aprecia una vuelta circular completa (figura VII 8), un polo de rotación que da un cicloide esférico de placas [73], cuyo cruce se hace hace 120 Ma y hace 45 Ma, en este intervalo se deben dar posiciones geométricas de esfuerzos de deformación similares por ello se contempla conjuntamente como ciclo alpino, ello hace que el periodo orogénico Kimérico (jurásico superior-cretácico inferior, 154 a 96 Ma) se enmascare con la orogenia alpina (paleógeno, 65 a 20 Ma), y los consideremos conjuntamente como un único ciclo alpino con estas dos fases. La velocidad del continente Eurasia se duplica entre el triásico superior y el jurásico inferior, es un rifting que representa una parte de curva cerrada de la figura VII 7.

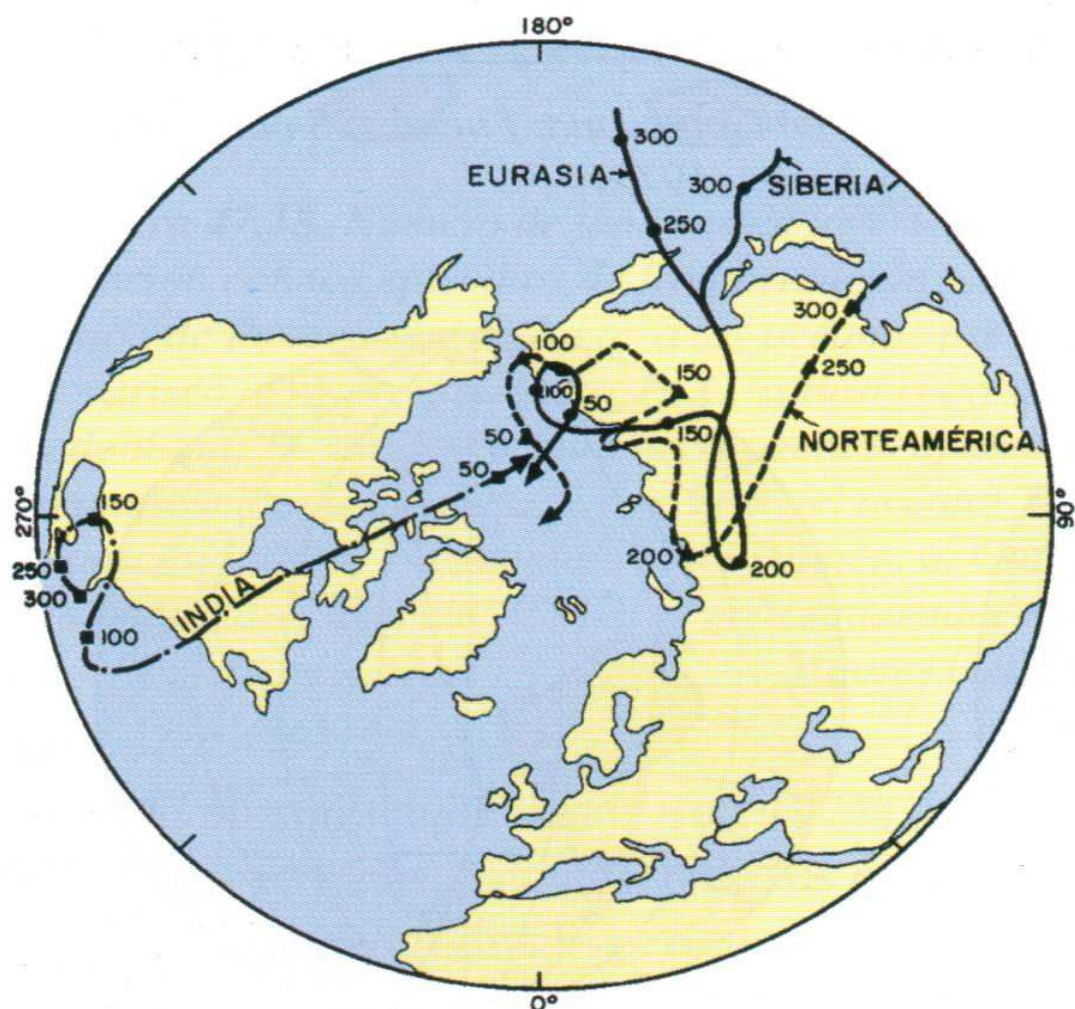


Figura VII 7. Trayectoria de movimientos de continentes. Según Condie [70]

Se estudia la fracturación-deformación individualizada de los diversos periodos orogénicos con argumentos razonados de estructuras reales y la aplicación de la mecánica de rocas con el criterio de fractura del estado triaxial

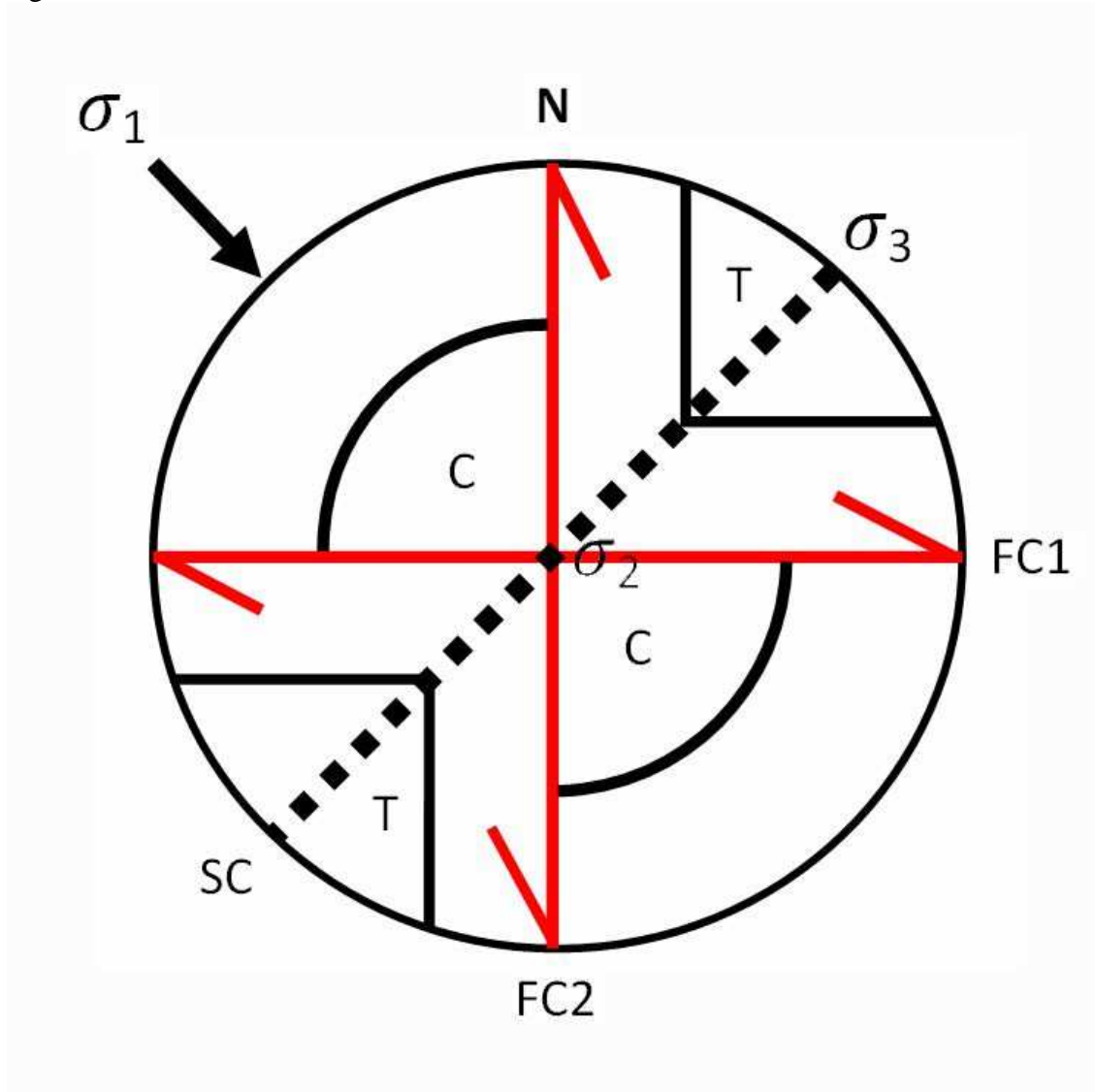
de esfuerzos. Se consideran esferas de terreno que se convierten en elipsoides con los esfuerzos, así en primer lugar se produce una deformación elastoplástica, más tarde las fracturas de cizalla que pueden dar en su entorno cuencas tempranas de tensión, posteriormente la distensión y subsidencia.

Para ello se ha realizado una representación bidimensional en un círculo, con los puntos cardinales, cuyo centro es σ_2 y se simplifican los acortamientos con sectores de compresión y los alargamientos con sectores de tensión (cuencas tempranas). En la figuras 3, 4, 5 y 6 se puede ver una visualización inicial de esfuerzo-deformación de los cuatro periodos orogénicos, que en realidad serían cinco por la duplicidad del alpino y que llamaremos ciclo alpino. Cada uno con una duración de unos 50 Ma de fricción entre placas, y la evolución tectónica de la provincia de Córdoba está controlada los siguientes orógenos: **Ciclo Cadomiense/Caledónico**(finiprecámbrico-cámbrico/ordovícico medio-silúrico medio), **Varisco** (devónico superior-carbonífero viseense), **Tardihercínico** (pérmico-triasico inferior) y el **Ciclo Alpino** que incluye la fase Kimérica y la fase Alpina (jurásico-cretácico superior y paleógeno, respectivamente).

-Ciclo Cadomiense/Caledoniano : (Finiprecámbrico-Cámbrico 570 a 540 M.a./Ordovícico medio-Silúrico medio, 470 a 410 M.a.).

El gran continente Gondwana migra al norte hacia los continentes Laurentia y Báltica. Con la colisión aparece en los límites de las placas el periodo orogénico Caledónico, éste movimiento en la zona Ossa-Morena se produce como consecuencia de una expansión de dorsal y desplazamientos horizontales de desgarre, también influidos por el inicio de la subducción desde el O de la zona subportuguesa (ver figura VII 6). La fase caledoniana es un orógeno heterogéneo con características diferentes según donde afecte, en la figura VII 8 se representan los sectores circulares de deformación en compresión "C" (acortamiento y disolución) y tensión "T" (predistensivos y precipitación).

Figura VII 8. Ciclo Cadomiense/Caledoniano



1º) *Deformación elastoplástica, SC.*

Cámbrico inferior del N de Córdoba con direcciones NE-SO, pliegues isoclinales y esquistosidad de plano axial. Aparece un metamorfismo en facies anfibolitas en el grupo de rocas de la Albarrana (en la fuente del corcho de Belmez, con peridotitas). Pliegues angulares Kink presentes en las filitas y micaesquistos del grupo de la Albarrana en la Sierra de los Santos (que pliega una esquistosidad de flujo), también en las filitas del puerto de las Cabezas y en el Albardado, y en las filitas del basamento de la Cuenca de Peñarroya-Belmez, que podrían representar la deformación elastoplástica "SC" por estar orientado NE-SO el plano axial.

2º) *Fracturas de cizalla, FC1 dextral y FC2 sinistral.*

Existen microestructuras y boudines paralelos a la dirección de σ_1 (NO-SE) y crenulación S y SE, todo ello indica bajo confinamiento y la rotura evita el desarrollo del cizallamiento. Se observa una esquistosidad de flujo en los neis de Azuaga (en Doña Rama) y los esquistos del grupo de rocas Córdoba-Fuenteobejuna tienen volcanitas antiguas (en Sierra de Gata). Más tarde se desarrolla una esquistosidad de fractura o micropliegues con plano axial E-O (en el Albardado del dominio Obejo-Valsequillo), también pliegues cilíndricos de plano axial vertical y dirección N-S y E-O (en el Hoyo, en el grupo de la Albarrana). También los micaesquistos del grupo de la Albarrana presentan la cizalla sinistral N-S y existen discontinuidades en dirección NO-SE.

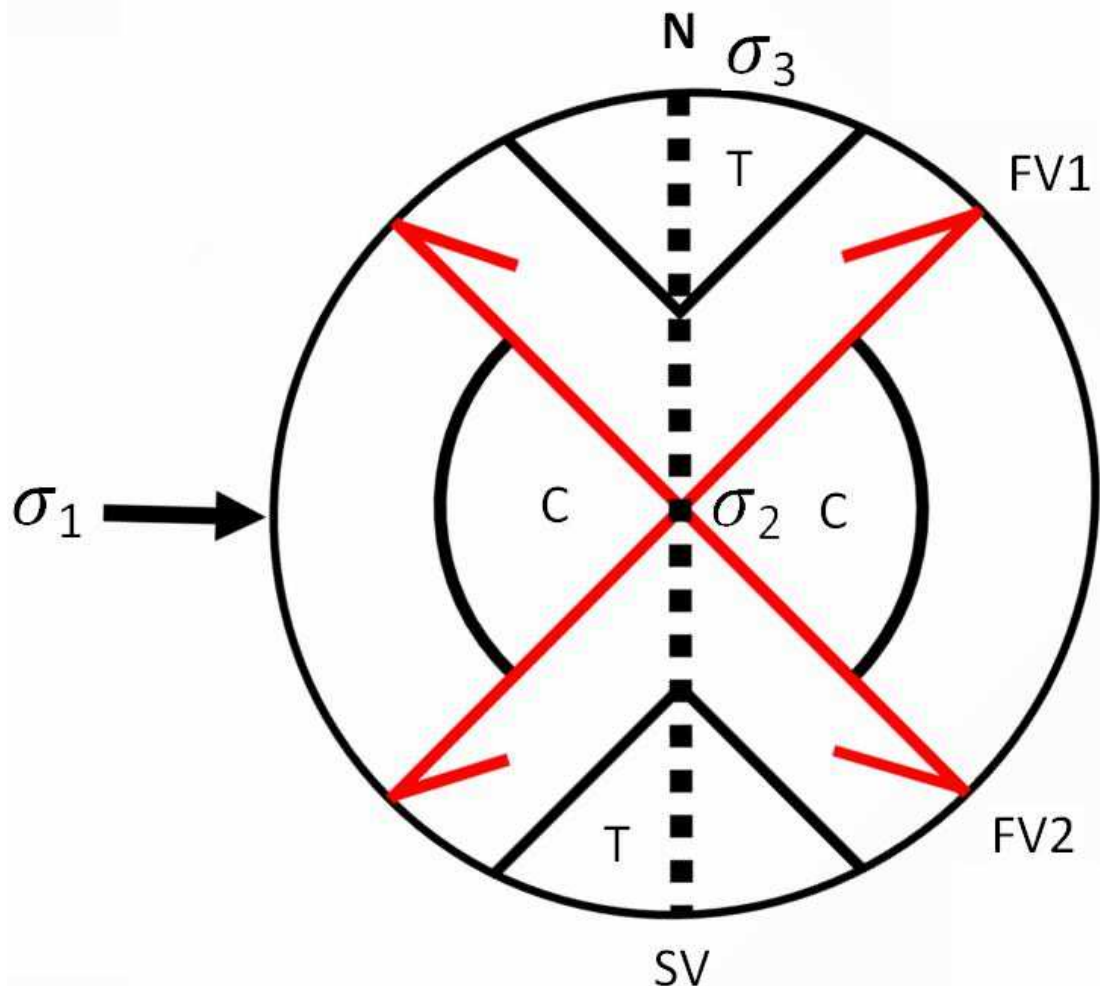
3º) *Distensión/subsidencia posterior al caledónico.*

Falta el devónico inferior en el S de Belmez que indica que podía haber estado emergido. Se forman las cuencas marinas del devónico superior y Culm, también la intrusión de pegmatitas en el grupo de la Albarrana.

-Varisco : (Devónico superior-Carbonífero viseense, 375 a 325 M.a.).

Colisionan los continentes Gondwana, Laurentia, Báltica y Siberia, uniéndose formando Pangea. Es un gran choque continental que conforma como la deformación principal a la zona de cizalla sinistral (transformante), de bajo grado, de Badajoz-Córdoba, con rocas miloníticas y es una posible zona de sutura (ver figura VII 9). En los sectores de tensión sinorogénicos (T) se desarrolla el eje magmático de Villaviciosa.

Figura VII 9. Varisco.



1º) *Deformación elastoplástica, SV.*

La zona de Ossa Morena es la parte interna del orógeno varisco hercínico y presenta la foliación tectónica primaria "SV". (El namuriense es un sinorógeno olitostromico varisco, no ligado a la distensión). El devónico del N de la zona presenta esquistosidad de plano axial. Las pizarras devónicas de la zona Subportuguesa en Las Pajanosas-Sevilla están verticales y con dirección N-S. También el Culm de Ossa Morena esta verticalizado en el N de Alcolea-Córdoba, con esquistosidad de fractura, tiene una dirección N-S, el Culm del Guadiato se presenta NNO-SSO en la carretera Belmez-Espiel, discordante con el namuriense. Además el cámbrico del grupo de la Albarrana en la fuente del corcho-Belmez (filitas de la formación Azuaga, micaesquistos, ortoneis, anfíbolitas y cuarcitas) están en dirección N-S, posee exfoliación de crenulación (y esquistosidad de fractura) y pliegues cilíndricos con plano axial vertical N-S.

2º) *Fracturas de cizalla, FV1 dextral y FV2 sinistral.*

La transformante FV2 sinistral (NO-SE) es la deformación principal de bajo grado y gran dislocación, la zona de cizalla dúctil Badajoz-Córdoba o de las rocas miloníticas, junto a las fallas de desgarre de Azuaga y Villaharta presentan la dirección NO-SE, conforman la zona interna de la cadena hercínica o varisca con pliegues isoclinales, con desarrollo de primeros cabalgamientos a saltos en las fallas de desgarre.

En las pizarras devónicas subportuguesas de las Pajanosas-Sevilla hay desgarres verticales con rumbo NO-SE y presencia de agua. Las filitas de la formación Azuaga de el Porvenir-Fuenteobejuna están con milonita de falla y con la dirección de la cizalla hercínica NO-SE en su foliación principal. También las pizarras del Culm del N de Alcolea, con traquitas, presentan en ambas rocas las esquistosidades verticales NO-SE y NE-SO (FV1) que conforman el *crivaje pencil*, también pliegues abiertos suaves de dirección NE-SO; igualmente se dan estas esquistosidades en el Culm del Guadiato (arroyo Fresnedoso-Belmez). Estas fallas FV1 dextral son transversales NE-SO, se observan en subverticales buzando N y con agua en el devónico de las Pajanosas-Sevilla. También esta dirección NE-SO es el eje de los pliegues abiertos suaves del Culm del N de Alcolea.

3º) *Distensión/subsidencia posterior al varisco o hercínico.*

Es un Rift activo posterior al varisco con fracturación y desplazamiento en valles relacionados con una dorsal, que se ha producido después del magmatismo inicial del eje magmático de Villaviciosa-La Coronada, más tarde se fractura el borde del continente y aparece la subducción (subducción de la zona Sudportuguesa bajo la zona Ossa Morena) y la colisión continental. El eje magmático de Villaviciosa-La Coronada (Plutónico básico Ojuelos-Posadilla y plutónico ácido Villaviciosa-La Cardenchoa) se atribuye a la etapa sinorogénica de los sectores de tensión y no está ligado a la distensión, por ser anterior a la deformación del Culm.

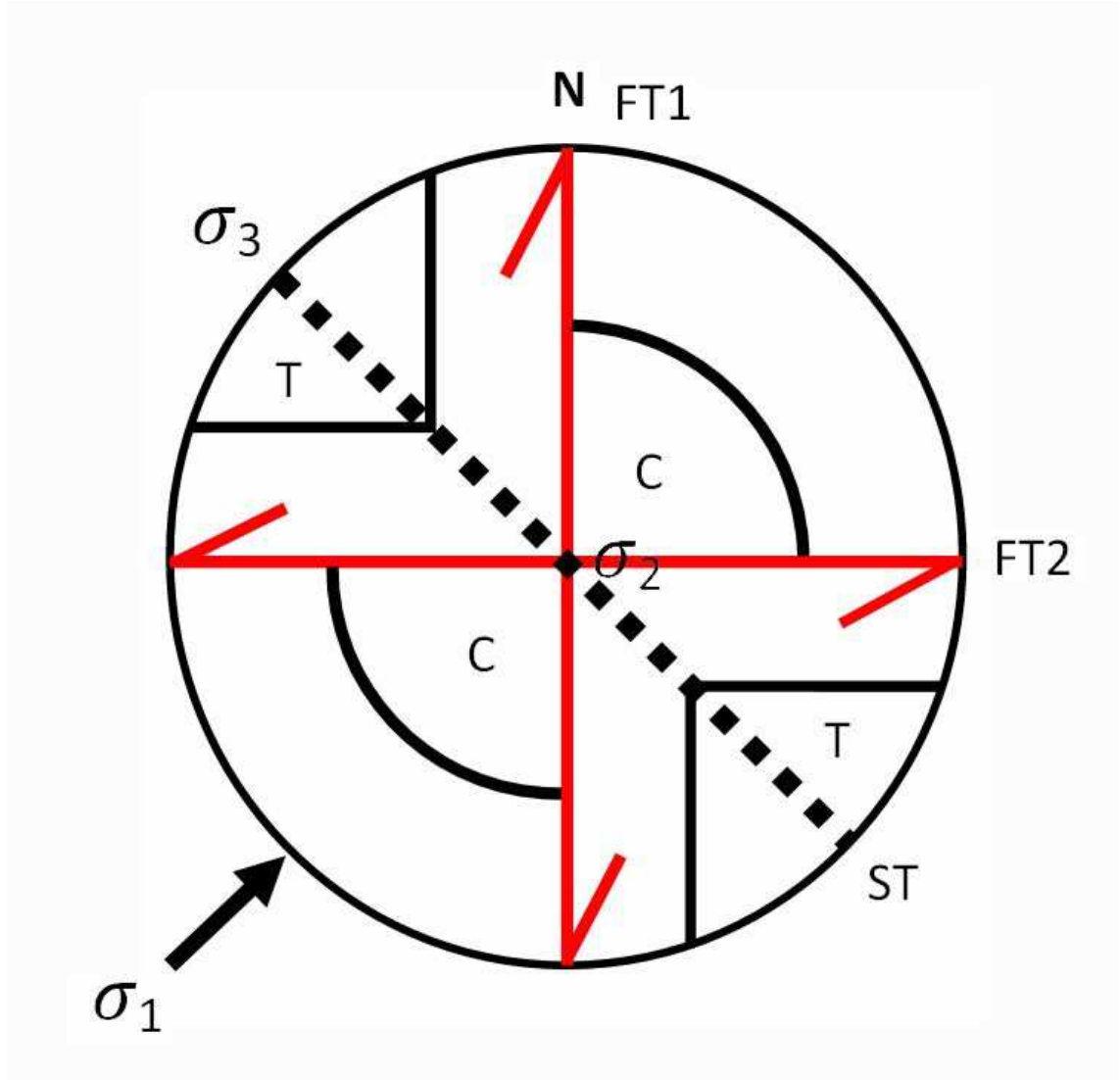
En esta distensión/subsidencia se rellenan las cuencas carboníferas westfaliense, y se conforman los filones hercínicos, con cuarzo y huecos con agua, en la distensión de las fracturas FV2 con dirección NO-SE, y también los sulfuros polimetálicos hercínicos de las lomas del Paredón. Las traquitas volcánicas encajadas en el Culm (flysch) de Alcolea corresponden a esta distensión hercínica, N-S y verticales, que presentan diaclasas conjugadas y húmedas con direcciones NO-SE y NE-SO.

-Tardihercínico : (Pérmico-Triásico inferior, 300 Ma a 245 Ma).

Colisionan la agrupación de Pangea (Eurasia y Siberia). Existe una alta presión intersticial en las Cuencas de cobertera y ello reduce σ_2 y con ello las

fracturas de cizalla tardihercínicas que son mayormente diaclasas sistemáticas con pequeño movimiento, debido a que la tensión normal efectiva se reduce con el agua (ver figura VII 10). En los sectores de tensión sinorogénicos (T) se constituye el batolito de los Pedroches (Estefaniense-Pérmico). En la distensión aparece el volcanismo triásico keuper, rompiéndose Pangea, y el gran rift del jurásico, que separa Norteamérica y África y la apertura del Atlántico Norte.

Figura VII 10. Tardihercínico.



1º) *Deformación elasto-plástica, ST.*

Deformación por cataclasis que dan fallas con triturados de rotura de granos sin orientación y deslizamiento friccional, escasa presión de confinamiento, favorecida por la humedad de materiales de cobertera (westfaliense) y la presión de agua en discontinuidades. También deformación de cobertera en masa poco densa con importantes movimientos.

Aparece el sinclinal dúctil westfaliense de Peñarroya-Belmez, las fallas inversas longitudinales de bajo ángulo como San Rafael y Cabeza de Vaca, los

cabalgamientos tardihercánicos imbricados hacia arriba del namuriense, cabalgamientos activados del culm y precámbrico con la dirección de la transformante-milonítica varisca "FV2" que coincide con la "ST".

En las superficies de estratificación de las lutitas westfalienses "ST" aparecen espejos de fricción formados al iniciarse la curvatura de pliegues paralelos en estos estratos, sin cambio de espesor que indica charnela recta, una vez plegada se rigidiza al desaparece el deslizamiento y conserva las superficies pulimentadas.

2º) Fracturas de cizalla, FT1 dextral y FT2 siniestral.

Diaclasas sistemáticas de cizallas J1 y J2 son conjugadas y sincrónicas, respectivamente con la orientación de FT1 dextral y FT2 siniestral en toda la Cuenca de Peñarroya-Belmez. La J1 son dextrales N-S y verticales, la J2 sinestrales E-O y verticales, y las respectivas FT1 son cizallas dextrales N-S que se presentan con salto de centenares de metros y las FT2 se observan en la Cuenca de Peñarroya-Belmez como una flexión de los ejes de los pliegues. Estas últimas afectan a las traquitas del N de Alcolea fallándolas E-O con buzamiento de gran ángulo al N y rugosidad. Las FT2 son visibles en las pizarras devónicas (subportuguesa) de Las Pajanosas en dirección E-O y verticales, con agua y sericita de 0,5 m de relleno.

En la carretera Belmez-Espiel en el Culm se ven las FT1 (N-S con estrias, variado buzamiento y filoncillos de cuarzo) y las más modernas FT2 (cizallas tardihercánicas E-O, verticales y el N sube), también contienen un filón de cuarzo con milonita en la dirección alpina NE-SO. Esta disposición estructural del Culm podría indicar la rotación de 45º de la deformación y en realidad se enmascaran fracturas de cizalla variscas como tardihercánicas.

3º) Distensión/subsidencia posterior al Tardihercánico.

En la distensión de ET con la dirección NO-SE aparece la diabasa en el flanco N de la capa Cervantes, entrando por el afloramiento, y las rocas abisales y volcanitas básicas de El Alcornocal. Esta distensión tardihercánica a desarrollado el volcanismo de diabasas augíticas del Keuper-Jurásico en la Subbetica, el río Genil también corre en esta dirección. Además la distensión y subsidencia permiten conformar las Cuencas jurásicas. Es en el jurásico superior cuando la transformante FV2 siniestral (milonitas) cede el protagonismo a la transformante falla del Guadalquivir del ciclo alpino NE-SO.

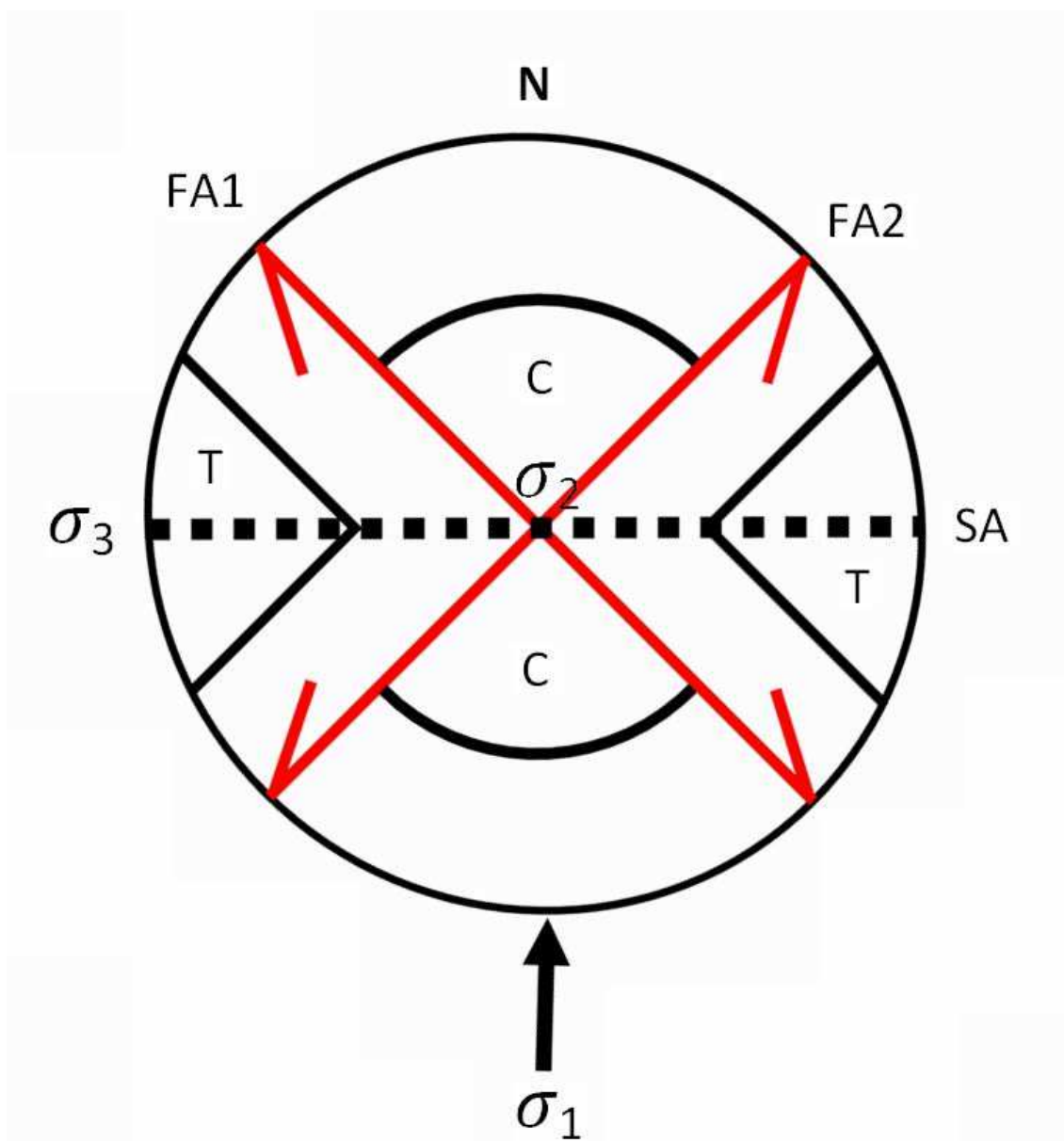
-Ciclo Alpino: Fase Jurásico sup.-Cretácico inf. (Kimérico-Aústrico, 154-96 Ma) y Fase Paleógeno. (Alpino, 65-20 Ma).

Este ciclo alpino contempla dos fases, en realidad se trata de dos

periodos orogénicos, son el Kimérico en el Jurásico superior-Cretácico inferior y el Alpino en el Paleógeno. Ello es debido a la migración de los polos magnéticos de la Tierra (considerados coincidentes con los polos de rotación) obtenidos a partir del movimiento de los continentes con relación a sus posiciones actuales, figura VII 8, se trata de la repetición de las orientaciones de esfuerzos en estas dos fases, ello establece semejanzas de deformación hace 120 Ma y, posteriormente, hace 45 Ma (ver figura VII 11).

Ibería, África y Europa están en colisión en el Cretácico inferior y la placa Africana se acerca a la Europea en el Paleógeno.

Figura VII 11. Ciclo Alpino.



1º) *Deformación elastoplástica, SA.*

Que pliega el eje del sinclinal carbonífero de la Cuenca de Peñarroya-

Belmez y se pliega-falla el flanco N de éste con un plegamiento asimétrico suave NOO-SEE con flanco corto vertical relacionado con las fallas alpinas FA2, el carbón se acumula en bolsadas, como un rosario, y se desarrolla la gran escama María (Peñarroya) y otras con la ayuda de las fallas FA1. Por otra parte el cabalgamiento alpino con dirección E-O, reactiva la débil zona de cizalla FT2, y aparece en el S de Córdoba (es submarino y subhorizontal), despegándose los yesos triásicos.

2º) Fracturas de cizalla, FA1 dextral y FA2 sinistral.

Entre las fracturas FA1 dextrales están la cizalla de falla San Rafael (reactivación que se bifurca hacia el E en Peñarroya), la cizalla de la gran escama María y la cizalla de la falla de muro de la capa Cervantes (incluye un eje sinclinal de diabasas con 13ºE de plunge y NO-SE). Las fallas transversales de cizalla sinistral FA2 se dan también en las dos fases citadas, así las generadas en la fase Kimérica (Jurásico sup.-Cretácico inf.) cambian su sentido de desplazamiento a dextral [38] con la distensión del Cretácico sup. y más tarde en el paleógeno vuelven a ser sinistral, para pasar nuevamente a dextral en la distensión del Mioceno y hasta la actualidad.

Las fracturas FA2 sinistral son reactivaciones de la FV1 del Varisco y son muy abundantes, cortan todas las deformaciones anteriores, llegando al manto, el salto direccional en la zona de Ossa Morena es normalmente de 0,5 km y el espaciado es muy a menudo de 1 km y menos. Entre ellas consideramos la falla del Guadalquivir y otras cizallas tangenciales alpinas, las fallas transversales sinistral de Sierra Palacios-Belmez, las fallas tipo Plasencia, los filones hidrotermales con cuarzo, F, Ba, Cu, Pb en la posterior distensión dextral, el volcanismo básico del Guadiato y el geotermalismo. También las fallas de cizalla sinistral alpinas de Fuente Alamo y Jogina-Zoñar en Aguilar están NNE-SSO (y son acuíferos al iniciarse el mioceno distensivo).

3º) Distensión/subsidencia posterior al alpino.

En el Oligoceno el límite de placa se trasladó a hasta su posición actual en el estrecho de Gibraltar (Uchipi, 1988 [38]). La distensión del Cretácico sup. corresponde a un rifting, aparece al acabar la fase Kimérica y las fallas de cizalla FA2, con dirección NO-SE, pasan a ser dextrales.

En el Mioceno inferior se inicia la distensión de la fase Alpina, se depositan margas blancas en sectores de tensión o cuencas tempranas y aparece el diapirismo, en el sur de Córdoba. La distensión provoca que las fallas de cizalla sinistral FA2 pasan a ser dextrales y de gravedad, también las deformaciones E-O, más tarde la distensión/subsidencia provoca el hundimiento de la falla del Guadalquivir, apareciendo una transgresión en el mioceno superior que provoca olitostromas (deslizamientos submarinos caóticos) hacia el NO. Mientras en el N de Córdoba sedimentan las secuencias granocrecientes de calcarenitas. La regresión marina del tortoniense superior

rellena la depresión del Guadalquivir con margas azules, por la neotectónica compresiva del plioceno con el choque de la placa africana que continua la actividad tectónica al reactivar las fallas alpinas NO-SE con compresión dextral.

En la mina San Antonio y en la mina Fosforita de Belmez se observa estas fallas sinestrales alpinas NO-SE que la distensión dextral las abre con huecos de dos centímetros y diez centímetros, respectivamente, con agua y precipitados, y la actual compresión neotectónica esta modificando. Las fracturas E-O y NE-SO, ambas dextrales con estrias y escalones, buzando S, se han observado en las calcarenitas del N de Córdoba y con pliegues de arrastre de subir el bloque S sobre el N, todo ello indica compresión neotectónica.

7.6.2. DISCUSIÓN

Desde que acabó el Precámbrico ha funcionado la tectónica en la provincia de Córdoba con continuidad de reactivaciones de fallas y en armónicos movimientos de periodos orogénicos de unos 50 Ma de duración. Este modelo inicial de esfuerzo-deformación se ajusta bien a las observaciones de campo y puede ayudar al conocimiento de la compleja estructura de Ossa Morena y de la provincia de Córdoba.

La armonía de la tensión principal de los movimientos orogénicos en saltos de 45° en sentido contrario a las agujas del reloj justifican las distensiones y se estima que la concentración de tensiones horizontales/residuales del terreno, exceptuando las tensiones naturales litológicas, son sólo debidas a la neotectónica. Así las tensiones horizontales-residuales de anteriores orogénias, posiblemente, se han distendido y relajado. Se debe controlar la presión intersticial de los acuíferos confinados en las aberturas de las fallas FA2 transversales-siniestrales alpinas de dirección NE-SO, que funcionan en sentido dextro desde el mioceno superior y actualmente se encuentran en compresión por el choque de la placa africana, finalmente el geotermalismo y la microsismicidad de estas fallas se hace interesante ante la deformación horizontal de 20 mm/año hacia el NE obtenidas en Andalucía y que debe ser mayor entre las paredes de las fracturas.

Los argumentos razonados presentados resaltan la importancia de la neotectónica, además los piezómetros de sondeos pueden auscultar presiones intersticiales para cuantificar tensiones o concentración de tensiones residuales orogénicas del terreno, al medir presiones intersticiales en acuíferos no libres y en las fallas FA2 transversales alpinas NE-SO, del tipo Plasencia. En Peñarroya-Belmez diversas medidas de tensiones horizontales cercanas a fallas de cizalla NO-SE resultan un 20% superior a las verticales. Localmente es interesante instalar extensómetros y el control de coordenadas topográficas anuales en las aberturas de algunas fallas FA2, como las de Sierra Palacios y

en el Castillo de Belmez.

Actualmente, como se puede observar en la síntesis sismológica del Instituto Geográfico Nacional que la transformante dextral de las Azores-estrecho de Gibraltar se abre desde el SO de forma continua con la falla de Plasencia y la falla del Guadalquivir, ambas son FA2. La deformación horizontal de la placa europea controlada en las estaciones topográficas de la red de posicionamiento europea, EUREF, miden movimientos anuales de 20 mm hacia el NE y la red de posicionamiento de Andalucía, LAGC, obtiene también similares resultado medidos (www.rap.uca.es).

Recesión del Dr. Andrés Pérez-Estaun (Investigador del CSIC y Catedrático de Tectónica de la U. Oviedo), andres@ija.csic.es : “creo que es una aportación original. Arriesgada porque muchas afirmaciones se basan en posibilidades, pero me parece interesante porque eso abre nuevas posibilidades de mirar a la estructura de la corteza continental del sur con nuevas perspectivas”.

7.7. REFERENCIAS.

- [4].- Apalategui Octavio et al. Magna IGME, hoja de Espiel (880) y Peñarroya (879). 1985.
- [8].- Pérez Lorente Felix. “Geología de la Zona Ossa-Morena al norte de Córdoba (Pozoblanco-Belmez-Villaviciosa)”. Tesis doctoral nº 281 de la Universiadd de Granada. 1979.
- [18].- Daza, A. (1991) “Nueva clasificación geomecánica”. Rev. Ing. T. Minas. «Minería y Siderurgia» 2 trimestre 1991. Madrid.
- [19].- A. Daza Sánchez y J. Ayuso Muñoz. “Nueva norma de ensayo de consolidación del terreno con edómetro”. Revista ENERGÍA Y MINAS. Edita: Consejo Superior de Ingenieros T. de Minas. Madrid. Vol. 7, año 2009. P. 28-32. ISSN 1699-7743.
- [32].- Carbonell Trillo-Figueroa, Antonio (1927). “Contribución al estudio de la geología y de la tectónica andaluza”. Boletín del Instituto Geológico y Minero de España. Tomo XLIX: 81-215.
- [38].- Uchipi E. (1988). “ The Mesozoic-Cenozoic geologic evolution of Iberia, a tectonic link between Africa and Europe”. Rev. Soc. Geol. Española, 1, 257-294.
- [40].- Daza, A. (1986). “Aportaciones de la Geofísica a la Geotecnia. Seminario sobre la utilización de las diagráfias en minería”. Ed. Teresa Alonso. ETSIM de Oviedo.

- [41].- Beniawski, Z.T. (1979). "THE GEOMECHANICS CLASSIFICATION IN ROCK ENGINEERING APPLICATIONS". II INT. CONGRESS ON ROCK MECHANICS, VOL. II. MONTREUX, SUIZA.
- [42].- Hoek, E. & Brown, E.T. (1980). *Underground Excavations in Rock*. London, Instm. Mining Metall.
- [43].- Hoek, E. & Bray, J. (1981). *Rock Slope Engineering*. London, Instm. Mining Metall.
- [44].- Hoek, E., Carranza-Torres, C. & Corkum, B. (2004). "El criterio de rotura de Hoek-Brown. Edición 2002. In C. López Jimeno (Ed). «Ingeotúneles» 2003. Madrid: ETSIMM.
- [45].- Ramírez Oyanguren, P. (1981). "Técnicas modernas para el dimensionamiento de minas metálicas subterráneas". Madrid. Hoja informativa nº 23 del Grupo de Geomecánica de la Asociación de Ing. de Minas.
- [46].- Ramírez Oyanguren, P. (1980). *Dimensionamiento del sostenimiento en galerías y túneles*. ETS. Ing. Minas, Madrid.
- [47].- Stagg, K.G., Zienkiewicz, O.C., Hoek, E., Deere, D.U., Hendron A.J., Morgenstern, N.R., Rogerts, A. (1970). *Mecánica de Rocas en la Ingeniería Práctica*. Editorial Blume (Madrid).
- [65].- Bastida, Fernando (2005). *Geología*. Volumen II. Ed. Trea. Gijón (Asturias).
- [70].- Condie Kent, C. (2003). *Plate tectonics and cristal evolution*. IV edición. Pergamon Press, Nueva York, 301 pp. ISBN=07506-3386-7.
- [71].- Dewey, J.F. (1977). Suture zone com plexities: a review. *Tectonophysics*, 40, 53-67.
- [72].- Hernandez-Pacheco, Eduardo (1926). "La Sierra Morena y la LLanura Bética". XIV Congreso Geológico Internacional. Instituto Geológico de España. Madrid, 150pgs.

- [73].- Sager; William W. Divergence Between Paleomagnetic and Hotspot Model Predicted Polar Wander for the Pacific Plate with Implications for Hotspot Fixity. Departamento de Oceanografía. Universidad de Texas. College Station, TX 77845 wsager@ocean.tamu.edu 2006. "Plates, Plumes, and Planetary Processes".
- [74].- Santamarina, J. C. Soil behavior at the microscale, Proc. Symp. Soil Behavior and Soft Ground Construction, in honor of Charles C. Ladd, Octubre. MIT. 31pp. 2001.
- [75].- Santamarina, J. Klein, K. y Fam, M., Soils and Waves, J.Wiley & Son, Inc.553p. 2001.
- [76].- Santamarina, J. C., y Cho, G.C., 2001, Determination of critical state parameters in sandy soils - Simple procedure, Geotechnical Testing Journal, Vol. 24, No. 2, 185-192.
- [77].- Narsilio Guillermo A. y Santamarina J. C. "Clasificación de suelos: Fundamento Físico, prácticas actuales y recomendaciones". Georgia Institute of Technology. 790 Atlantic Dr., Atlanta, GA. 30332. USA. Email: carlos.santamarina@ce.gatech.edu
- [78].-www.tdr.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX0930102-092135//04CAPITULO2.pdf CHAPTER 2 SOIL USED IN THE INVESTIGATION. (Santamarina and Fam, 1995), but at pH = 10 an opposite trend has also been ... Santamarina and Fam, 1995). However, part of this experimental scatter may.
- [79].- Pugh R.C. y Jones C.J.F.P. "Electroósmosis como técnica de mejora y su uso en tierra cohesiva armada". Revista Ingeopres, julio 2003, nº 117. Pg 38-40.
- [81].- Red de posicionamiento de Andalucía (LAGC). <http://www.rap.uca.es>

CAPÍTULO 8
BIBLIOGRAFÍA

8.- BIBLIOGRAFÍA

- [1].- A. Daza Sánchez. Aportaciones de la Geofísica a la Geotecnia. Seminario sobre la utilización de las diagrfias en minería. Ed. T. Alonso, Pres. Fernando Pendas. Escuela Superior de Ingenieros de Minas de Oviedo. Fundación "Luis Fernández de Velasco". 1986.
- [2].- I.G.M.E. Mapa de Rocas Industriales. 1976. Hoja 69 (4-9) Pozoblanco 1:200.000 (Compañía General de Sondeos para el Instituto Geológico y Minero de España).
- [3].- L. Mallada Pueyo. Memoria descriptiva de la Cuenca Carbonífera de Belmez. Boletín de la comisión del mapa geológico de España. I.G.M.E. XXVI-Tomo VI. 1900.
- [4].- O. Apalategui, F. Roldan, P. Higuera et al. Mapa Geológico de España. Hojas 879 (Peñarroya) y 880 (Espiel). IGME 1:50.000. 1985. (Realizado por INGEMISA para el I.G.M.E.).
- [5].- F. J. Roldan et al. (Ingemisa). Mapa y memoria explicativa de la hoja 988 (Puente Genil) y 966 (Montilla). Mapa Geológico Nacional escala 1:50000 IGME, 1988.
- [6].- A. Daza Sánchez. Investigación para la caracterización y aplicaciones de las lutitas arcillosas de la Cuenca del Guadiato en materiales de construcción y obra civil. Subvencionado por el Ministerio de Fomento, 27 abril (BOE 20-5-2000). 85p.; Grupo de Ingeniería Geoambiental y Geofísica, RNM244 (UCO) 2001. Colabora el ITC (Informe C001230, Castellón, 18p.): J. Garcia-Ten y otros.
- [7].- Catálogo de las arcillas portuguesas utilizadas en la industria cerámica. Ministerio de Industria y Energía. Dirección G. de Geología y Minas. 175pg. 1985.
- [8].- F. Pérez Lorente. Geología de la Zona de Ossa-Morena al norte de Córdoba (Belmez-Villaviciosa-Pozoblanco). 1979. Tesis doctoral nº 281 de la Universidad de Granada.
- [9].- W. E. Petrascheck. Yacimientos y Criaderos. Ed. Omega. DL B-16260-1965.

- [10].- Ayala Carcedo F.J., Ferrer Gijón M., Oteo Mazo C. y Salinas Rodríguez J.L. Mapa predictor de riesgos por expansividad de arcillas en España. 1:1.000.000. I.G.M.E. 1986. (Realizado por Instituto Geológico y Minero de España con el Centro de Experimentación de Obras Públicas).
- [11].- P. J. Sánchez Soto. "Efecto del tratamiento mecánico por molienda en las propiedades texturales de pirofilita". Bol. Soc. Esp. Ceram. Vol. 48, nº2, p 59-68. Marzo-Abril 2009.
- [12].- A. Barba, C. Feliu, J. García-Ten et al. Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas. Castellón: Instituto de Tecnología Cerámica- AICE, 1997. 292p.; ISBN 84-923176-0-4.
- [13].- A. Daza Sánchez. Prospección minera de arcillas en tres zonas de Aguilar de la Frontera-Puente Genil (Córdoba). Para la empresa Proceran. OTRI-UCO. Resolución Rectoral 8/6/2005. XLIX Congreso de la Soc. Esp. Cerámica y V. (SECV), 2009 Linares.
- [14].- J. Coroado, J. Marqués et al. "Propiedades cerámicas de las arcillas de la cantera de Asseiceira (Tomar, Portugal)". Mater. Construcc. Vol. 55. nº279. p 5-16. 2005.
- [15].- A. Binley y A. Kemna, DC Resistivity and Induced Polarization Methods. Hydrogeophysics. Vol. 50. Springer Netherlands. ISBN: 978-1-4020-3101-4. pp 129-156. 2005.
- [16].- E. Orellana. Prospección Geolétrica. Ed.Paraninfo. ISBN 84-283-1153-6. DL M-35184-1981.
- [17].- A. López Hidalgo, M. H. Loke, G. O. Fanton, E. C. Rubí. Técnicas prácticas para investigación de resistividad en 2D y 3D (Tomografía Eléctrica). 23/6/2009.<http://www.geoelectrical.com/Articulo.pdf>
- [18].- A. Daza Sánchez. Nueva clasificación geomecánica. Revista del Consejo Superior de Ingenieros T. de Minas "Minería y Siderurgia" 2º trimestre 1991. Madrid.
- [19].- A. Daza Sánchez y J. Ayuso Muñoz. "Nueva norma de ensayo de consolidación del terreno con edómetro". Revista ENERGÍA Y MINAS. Edita: Consejo Superior de Ingenieros T. de Minas. Madrid. Vol. 7, año 2009. P. 28-32. ISSN 1699-7743.

- [20].- A. Daza Sánchez. Geotecnia del terreno y del macizo rocoso. Ed. Antonio Daza me1dasaa@uco.es Depósito Legal CO-1557-03. 434pgs en 28 epígrafes. 12 enero 2004. ISBN nº 84-688-4703-8
- [21].- J.A. Jiménez Salas et al. Geotecnia y Cimientos. Ed.Rueda.1975.
- [22].- S. Guggenheim, and R.T. Martin. "Definition of Clay and Mineral: Join Report of the AIPEA Nomenclature and CMS Nomenclature Committees". Clays Clay Miner., 43, 255-256 (1995).
- [23].- L.A. Díaz Rodríguez y R. Torrecillas, (Instituto Nacional del Carbón)."Arcillas cerámicas: una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones". Bol. Soc. Esp. Cerámica y Vidrio, 41 (5) 459-470 (2002).
- [24].- E. Sanchez, J. García-Ten y M. Regueiro. "Materias para la industria cerámica española. Situación actual y perspectivas". Bol. Soc. Esp. Ceramica y Vidrio, 45(1) 1-12 (2006).
- [25].- Ábalos, B. y Eguíluz, L. (Universidad del País Vasco). Deformación Transpresiva Carbonífera en la Cizalla de Badajoz – Córdoba. Rev. S. Geo. España, 4, (3-4), 1991.
- [26].- Baeza Rojano, L et al. Presencia de formaciones volcanosedimentarias y mineralizaciones de hierro en el Eje Magmático de Villaviciosa. Bol. v 89, IGME 1978.
- [27].- Apalategui, O., Borrero, JD., Higuera, P. División en grupos de rocas en Ossa Morena Oriental. Temas Geológicos y Mineros 1985. V Reunión GOM, Belmez 1983.
- [28].- Julivert, M., Fontboté, J.M., Ribeiro, A. y Conde L.A. Mapa tectónico de la Península Ibérica. Escala 1: 1000.000 y memoria. IGME 1974.
- [29].- Chacón J., Oliveira V. y Ribeiro A. La Estructura de la Zona de Ossa-Morena. Libro Jubilar de J.M. Rios. IGME 1983.
- [30].- Hernando Luna R. "Bibliografía geológico-minera de la provincia de Córdoba". Memorias del IGME 1970.
- [31].- Pascual Martínez, E. y Pérez-Lorente, F. La alineación o eje magmático de Villaviciosa de Córdoba-La Coronada", 1987. Pgs. 365-376. Libro Homenaje a García de Figueroa. IGME.

- [32].- Carbonell Trillo-Figueroa, A., “Contribución al estudio de la geología y de la tectónica andaluza”. Boletín del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Tomo XLIX: 81-215. 1927.
- [33].- Daza Sánchez, A. y Llanes Agudelo, P., Explicación Geoestructural del Noroeste de Córdoba (Comarca del Guadiato) España. Boletín de la Real Academia de Córdoba de Ciencias, Bellas Letras y Nobles Artes. Enero-Junio 2004. Año LXXXIII-Nº 146. Pgs 171-181.
- [34].- Carbonell Trillo-Figueroa, A. (1926) “ La Campiña o Valle Bético” XIV Congreso Geológico Internacional, Exc. A-5. De Sierra Morena a Sierra Nevada. IGME, pg 17-28.
- [35].- Compañía General de Sondeos (CGS). Mapa de Rocas Industriales a escala 1:200.000 IGME, 1974. Hoja y memoria nº 76 (4-10) Córdoba.
- [36].- Copeiro, Jesús Ramírez, (et al): Mapa y memoria explicativa de la Hoja 923 (Córdoba) del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000 IGME, 1973.
- [37].- Diaz de Neira, J.A. (et al): Mapa y memoria explicativa de la Hoja 989 (Lucena) del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000 IGME, 1992.
- [38].- Uchupi, E. (1988) “The Mesozoic-Cenozoic geologic evolution of Iberia, a tectonic link between Africa and Europe”. Rev. Soc. Geol. España, 1, 257-294.
- [39].- Daza Sánchez A., López Sánchez M., Cano Jodar E. y López Pineda G. “Valoración geomecánica para la condición de las discontinuidades y el espaciamento, adaptable a la clasificación de Bieniaswki”. En revisión. 2010. Boletín del IGME.
- [40].- Daza , A. (1986). “Aportaciones de la Geofísica a la Geotecnia. Seminario sobre la utilización de las diagráfias en minería”. Ed. Teresa Alonso. ETSIM de Oviedo.
- [41].- Bieniawski, Z.T. (1979). “THE GEOMECHANICS CLASSIFICATION IN ROCK ENGINEERING APPLICATIONS”. II INT. CONGRESS ON ROCK MECHANICS, VOL. II. MONTREUX, SUIZA.
- [42].- Hoek, E. & Brown, E.T. (1980). *Underground Excavations in Rock*. London, Instm. Mining Metall.

- [43].- Hoek, E. & Bray, J. (1981). *Rock Slope Engineering*. London, Instm. Mining Metall.
- [44].- Hoek, E., Carranza-Torres, C. & Corkum, B. (2004). "El criterio de rotura de Hoek-Brown. Edición 2002. In C. López Jimeno (Ed). «Ingeotúneles» 2003. Madrid: ETSIMM.
- [45].- Ramírez Oyanguren, P. (1981). "Técnicas modernas para el dimensionamiento de minas metálicas subterráneas". Madrid. Hoja informativa nº 23 del Grupo de Geomecánica de la Asociación de Ing. de Minas.
- [46].- Ramírez Oyanguren, P. (1980). *Dimensionamiento del sostenimiento en galerías y túneles*. ETS. Ing. Minas, Madrid.
- [47].- Stagg, K.G., Zienkiewicz, O.C., Hoek, E., Deere, D.U., Hendron, A.J., Morgenstern, N.R., Rogerts, A. (1970). *Mecánica de Rocas en la Ingeniería Práctica*. Editorial Blume (Madrid).
- [48].- Morante Carballo F.E. "Las zeolitas de la costa de Ecuador: geología, caracterización y aplicaciones". Tesis Doctoral de la UPM (ETSIM de Madrid). 2004.
- [49].- Soca Olazabal N., Blanco Toledo F. y Pizarro Camacho D. "Uso combinado de zeolitas naturales y microalgas en la denitrificación de aguas residuales". Revista Tecnología del agua, nº 162, marzo 1997. Pgs 61-65.
- [50].- Casagrande, A. (1936). Proceedings of the first internacional conference on soil mechanics and foundation engineering, 3, 60-64.
- [51].- Sánchez Caro, Francisco Javier. "Seguridad de presas: aportación al análisis y control de deformaciones como elemento de prevención de patologías de origen geotécnico". Mayo 2007, Tesis doctoral dirigida por Antonio Soriano Peña. 19-7-2007.
- [52].- Características geotécnicas de los suelos en la ciudad de Huelva: parámetros de identificación y ensayos de consolidación. A. Bochs Montoro, Geogaceta, ISSN 0213-683X, Nº. 39, 2006, pags. 79-82. Sociedad Geológica de España (SGE), semestral 1986.

- [53].- S. Stramondo, F. Bozzano, F. Marra, U. Wegmuller, F.R. Cinti, M. Moro, M. Saroli. Subsidence induced by urbanisation in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigations. *Remote Sensing of environment*, Vol 112, Issue 6, 16 June 2008, Pag 3160-3172. (United States).
- [54].- J.L. Justo, E. Justo, P. Durand, J.M. Azañón. "Validation of models and empirical equations to estimate deformations in jointed rock through the monitoring of a 40-storey tower foundation". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Available online 24 September 2008. (England).
- [55].- A. Barrios Padura (US), J. Barrios Sevilla (US), J. Garcia Navarro (UPM), E. Yanes Bustamante (US), E. Parra Grego (U. Alfonso X). Study of the soil consolidation using reinforced jet grouting by geophysical and geotechnical techniques: "La Normal" building complex (Granada). *Construction and Building Materials*, XXX.2008.
- [56].- Daza Sánchez A. "Síntesis minera y calzadas romanas de Belmez-Villaviciosa". *Boletín Geológico y Minero*. Vol. 109-3 Año 1998 (307-316).
- [57].- Efraín Ovando-Shelley, Alexandra Ossa, Miguel P. Romo. "The sinking of Mexico City: Its effects on soil properties and seismic response". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol 27, Issue 4, April 2007, p 333-343. (England).
- [58].- Sridharan, A; Sivapullaiah, PV; Stalin, VK. "Effect of short-duration of load increment on the compressibility of soils". *Geotechnical Testing Journal*. Volume: 17 Issue: 4 Pages: 488-496 Published: DEC 1994. (United States).
- [59].- Xie, KH; Leo, CJ. "Analytical solutions of one-dimensional large strain consolidation of saturated and homogeneous clays". *COMPUTERS AND GEOTECHNICS* Volume: 31 Issue: 4 Pages: 301-314 Published: 2004. (England).
- [60].- Yagiz, S. Akyol, E. y Sen, G. "Relationship between the standard penetration test and the pressuremeter test on sandy silty clays: a case study from Denizli". *BULLETIN OF ENGINEERING GEOLOGY AND THE ENVIRONMENT*. Volume: 67 Issue: 3 Pages: 405-410 Published: 2008.(Germany).
- [61].- ASTM, 2004. Standard test methods for one-dimensional consolidation

properties of soils. D2435-04 *Book of ASTM* vol.04.08 American Society for Testing and materials. Philadelphia. UNE103-405-94. Ensayo Consolidación Unidimensional de suelo en edómetro.

- [62].- Gutierrez Duque M., Herrera Vasconcelos T. y Laria Piedra N. "Influencia de la zeolita tratada con acido sulfurico y con hidróxido de sodio en el proceso de coagulación en aguas superficiales". Revista Tecnología del agua, nº 131, noviembre 1994. Pgs 41-47.
- [63].- Ortuño, G. et al. ENADIMSA. Investigación de la Cuenca del Guadiato. 1970 – 1976. Inedito ENCASUR-Peñarroya.
- [64].- Delgado Quesada, M., Liñán, E., Pascual, E., Pérez Lorente, F. Criterios para la diferenciación de dominios en Sierra Morena Central. 1977.
- [65].- Bastida, Fernando (2005). Geología. Volumen II. Ed. Trea. Gijón (Asturias).
- [66].- F. J. Torrijo Echarri, J. Mandado Collado y M. E. Bona Artazos. "Modelización genética de nódulos y concreciones. Propuesta de clasificación". Estudios Geol., 60 (3-6): 95-110, (2004).
- [67].- J. D. Martín Ramos. "Using X Powder: A software package for Powder X-Ray diffraction analysis" www.xpowder.com D.L. GR 1001/04. ISBN 84-609-1497-6. 105p. Spain.
- [68].- J. D. Martín-Martín, T. Sanfeliu et al. "Caracterización litológica y mineralógica de los materiales permo-triásicos de Castellón utilizados como materia prima cerámica: la arcilla de Moró". Bol. Soc. Esp. Ceram. V., 45 (4), 239-244, (2006).
- [69].- J. M. Benito, A. Conesa et al. "Membranas cerámicas. Tipos, métodos de obtención y caracterización". Bol. Soc. Esp. Cer. V. 43 (5), 829-842, 2004.
- [70].- Condie Kent, C. (2003). Plate tectonics and cristal evolution. IV edición. Pergamon Press, Nueva York, 301 pp. ISBN=07506-3386-7.
- [71].- Dewey, J.F. (1977). Suture zone com plexities: a review. Tectonophysics, 40, 53-67.
- [72].- Hernandez-Pacheco, Eduardo (1926). "La Sierra Morena y la Llanura Bética". XIV Congreso Geológico Internacional. Instituto Geológico de España. Madrid, 150pgs.

- [73].- Sager, William W. Divergence Between Paleomagnetic and Hotspot Model Predicted Polar Wander for the Pacific Plate with Implications for Hotspot Fixity. Departamento de Oceanografía. Universidad de Texas. College Station, TX 77845 wsager@ocean.tamu.edu 2006. "Plates, Plumes, and Planetary Processes".
- [74].- Santamarina, J. C. Soil behavior at the microscale, Proc. Symp. Soil Behavior and Soft Ground Construction, in honor of Charles C. Ladd, Octubre. MIT. 31pp. 2001.
- [75].- Santamarina, J. Klein, K. y Fam, M., Soils and Waves, J.Wiley & Son, Inc.553p. 2001.
- [76].- Santamarina, J. C., y Cho, G.C., 2001, Determination of critical state parameters in sandy soils - Simple procedure, Geotechnical Testing Journal, Vol. 24, No. 2, 185-192.
- [77].- Narsilio Guillermo A. y Santamarina J. C. "Clasificación de suelos: Fundamento Físico, prácticas actuales y recomendaciones". Georgia Institute of Technology. 790 Atlantic Dr., Atlanta, GA. 30332. USA. Email: carlos.santamarina@ce.gatech.edu
- [78].-www.tdr.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0930102-092135//04CAPITULO2.pdf CHAPTER 2 SOIL USED IN THE INVESTIGATION. (Santamarina and Fam, 1995), but at pH = 10 an opposite trend has also been ... Santamarina and Fam, 1995). However, part of this experimental scatter may.
- [79].- Pugh R.C. y Jones C.J.F.P. "Electroósmosis como técnica de mejora y su uso en tierra cohesiva armada". Revista Ingeopres, julio 2003, nº 117.
- [80].- Daza Sánchez, A. y Ayuso Muñoz, J. (2010). "Prospección de arcillas cerámicas en la Campiña de Córdoba (España)". Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio (Consejo Superior de Investigaciones Científicas), Mayo-Junio 2010, 49 (3), pp215-220. Incluida en el Journal Citation Records -J.C.R.- sección de Materials Science: Ceramics con un factor de impacto de 0.53 y en el Índice Scopus -SJR- con impacto de 0.812.
- [81].- Red de posicionamiento de Andalucía (LAGC). <http://www.rap.uca.es>

ANEXOS

- ANEXO 1: NORMATIVA DE CONTROL DE CALIDAD**
 - ANEXO 2: GESTIÓN DE LA INVERSIÓN INDUSTRIAL**
 - ANEXO 3: MUESTRAS DE LUTITAS**
-

APÉNDICE 1: NORMATIVA DE CONTROL DE CALIDAD.

Tras la cocción de arcillas, la última parte del proceso es la toma de muestras para la realización de ensayos normalizados de laboratorio sobre el material cocido, las normas a aplicar son las UNE. Para los productos de arcilla cocida los ensayos normalizados de control de calidad, actualmente en vigor son:

UNE7060. Determinación de Resistencia a Flexión de ladrillo de arcilla cocida

UNE67019. Ladrillos de arcilla cocida. Definiciones, clases-especificación.

UNE 67020. Bovedillas de Arcilla cocida para forjados unidireccionales . Definiciones, clases y características.

UNE 67024. Tejas de Arcilla cocida. Definiciones, clasificación- especificación.

UNE 67026. Ladrillos y bloques cerámicos de arcilla cocida. Determinación de la Resistencia a compresión.

UNE 67026 1-M. Ladrillos y bloques cerámicos de arcilla cocida. Determinación de la resistencia a compresión.

UNE 67027. Ladrillos de Arcilla cocida .Determinación de la absorción de agua.

UNE 67028. Ladrillos de Arcilla cocida. Ensayo de Helacidad.

UNE 67029. Ladrillos de arcilla cocida. Ensayo de eflorescencia.

UNE 67030. Ladrillos de Arcilla cocida. Medición de las dimensiones y comprobación de la forma.

UNE 67030 erratum. Ladrillos de Arcilla cocida. Medición de las dimensiones y comprobación de la forma.

UNE 67031. Ladrillos de Arcilla cocida. Ensayo de Succión.

UNE 67031 Erratum. Ladrillos de Arcilla cocida. Ensayo de Succión.

UNE 67032. Tejas de arcilla cocida. Ensayo de Resistencia al impacto.

UNE 67033. Tejas de arcilla . ensayo de permeabilidad al agua.

UNE 67034. Tejas de arcilla cocida. Ensayo de helacidad.

UNE-67035. Tejas de arcilla cocida. Ensayo de resistencia a Flexión.

UNE 67036. Productos cerámicos de arcilla cocida. Ensayo de expansión por humedad.

UNE-67037. Bovedillas de arcilla cocida. Ensayo de resistencia a Flexión.

UNE 67038. Bovedillas de arcilla cocida. Determinación de la resistencia a compresión.

UNE 67039. Productos cerámicos de arcilla cocida. Determinación de

intrusiones calcareas.

UNE 67040. Fábrica de ladrillo. Determinación de la resistencia a compresión.

UNE 67041. Tableros cerámicos de arcilla cocida para cubiertas. Designación y especificaciones.

UNE 67042. Piezas cerámicas de arcilla cocida de gran formato. Determinación de la resistencia a flexión.

UNE 67043. Piezas cerámicas de arcilla cocida de gran formato. Medición de las dimensiones y comprobación de la forma.

UNE67044. Ladrillos cerámicos huecos-gran formato. Designación-especificación

UNE 67045. Bloques cerámicos de arcilla cocida. Designación-especificaciones.

UNE 67047. Bloques cerámicos de Arcilla cocida. Ensayo de eflorescencia.

UNE-697048. Bloques cerámicos de arcilla cocida. Ensayo de helacidad.

UNE 136001. Paneles prefabricados de cerámica y yeso. Definiciones y especificaciones.

UNE 136002. Paneles prefabricados de cerámica y yeso. Métodos de ensayo.

UNE EN 538. Tejas de Arcilla cocida. Ensayo de resistencia a la flexión.

UNE EN 539. Tejas de arcilla cocida. Determinación de características físicas.

APENDICE 2. GESTIÓN DE LA INVERSIÓN INDUSTRIAL

A) Planificación de la explotación de las lutitas namurienses

La campaña de prospección de lutitas namurienses determinó varias zonas idóneas a explotar y se seleccionó una de 16 Ha de terreno que constituye la zona prevista para una primera explotación. Un criterio adecuado para el diseño de esta primera explotación de las lutitas namurienses es el que genera un mínimo razonable de operaciones en la explotación, se estima una explotación tipo banqueo con alturas de banco de 6 m (12 m en doble banco), con un talud final de 60°.

En el arranque se podría utilizar una retroexcavadora de un cúbico de capacidad de cazo, transportando el todo-uno a la planta de tratamiento mediante dos dumpers de 20 t de capacidad de carga. Para la descarga se dispondría de una plataforma de 10.000 m² acopiándose el todo-uno para la alimentación no húmeda de la tolva de la planta de tratamiento no húmeda (trituradores giratorios de cono y molino para 200 t/hora).

El ritmo de explotación previsto máximo es de 300.000 T/año, la potencia eléctrica instalada es de 2.000 Kw, el consumo de gasoil en máquina será de 2 litros/t de arcilla y el precio de venta de la arcilla oscila en el rango de 4 a 40 euros la tonelada. Con este planteamiento en una topografía a media ladera y los menores ciclos de transporte, se procede además a iniciar el nivel aprovechable de arcillas a partir de un metro de profundidad. El criterio de la delimitación geométrica de la explotación se obtiene a partir del grado de calidad de la lutita y del volumen a suministrar a la planta de molienda. Para ello se ha definido un área cuadrada de 400 m de lado y el límite de explotación en profundidad se ha considerado variable entre 108 m a 38 m.

El coste medio del metro cúbico de lutita arcillosa explotada, operación de arranque, carga, transporte, mantenimiento de pistas y otros servicios como conceptos directos de mano de obra, reparaciones y amortización de maquinaria se estima en un máximo de 3 euros/m³; , sin considerar la

molienda; por otra parte, se prevé en 3000 euros/Ha el coste de la restauración de terrenos que en 16 Ha supone un total de 48.000 euros.

La sección tipo transversal de las fases de explotación tiene una superficie de 24.700 m² que dan un volumen canterable de 8.400.000 m³ para un fondo de cantera a 108 m de profundidad (supondría 16'8 Mt). El rango de explotación considerado óptimo en función de las reservas seguras en cantera se determina en 300.000 m³/año durante 28 años, dando una producción máxima de 25.000 m³/mes (no obstante, a los criterios de dilución, selectividad, imponderables y fallos se le atribuye un coeficiente de 2, lo que supone referir los metros cúbicos como toneladas, al considerar el peso específico de 2 t/m³).

El primer metro superficial requiere consideraciones específicas por presentar meteorización y también horizontes edáficos, no se aprovecha, se acopia para la restitución de terrenos; para ello se prevee un vertedero exterior con capacidad de 100.000 m³.

Considerando 25.000 m³/mes de producción, en 28 años se puede planificar que al final del cuarto año se acabaría una fase de desmonte hasta la rasante a 36 m de profundidad y en los doce últimos años se explotaría en excavación con taludes.

Se entiende que si el ciclo de producción es de 300.000 t/año, como se ha previsto, de 300.000 m³/año como máximo, así las reservas explotables de 8.400.000 m³ en las 16 Ha supone una explotación durante veintiocho años.

B) Gestión de la planta, inversiones, mercado y costes

En la empresa de ingeniería se realiza por un parte el cómputo de los costes de investigación-explotación, por otro los ingresos obtenidos por la venta de la arcilla y si el valor actualizado de los ingresos supera el de los pagos, entonces el proyecto se considera viable. Estos criterios corresponden al análisis coste-beneficio y a la teoría de la inversión.

La capacidad financiera de una empresa ingeniería no es suficiente, en general, por su periodo de retorno superior a cinco años, para abordar este proyecto requerimos financiación, España posee una política fiscal que favorece el desarrollo de la industria (Ley 6/1977, de 4 de enero, de Fomento de la Minería), donde se introduce el concepto de factor de agotamiento, que consiste en una deducción fiscal, como máximo, del 30% de la base imponible del Impuesto de Sociedades, quedando esta parte exenta de dicho impuesto.

La presente planificación de desarrollo pretende establecer la viabilidad de la explotación de una cantera de lutitas arcillosas (sección A) para ladrillos y

una planta de trituración-molienda para cerámica y otras aplicaciones; analizaremos la rentabilidad prevista para la aplicación en material de construcción (ladrillos y tejas) con arcilla que posee un valor mínimo de 4 euros la tonelada. Las lutitas namurienses extraídas serán utilizadas para la fabricación de arcillas cerámicas para material de construcción. Una vez realizada la investigación de recursos que determina la localización y disponibilidad de arcillas, se contemplan unas reservas seguras que permiten una explotación de 35 años y más de 300.000 T/año.

A continuación exponemos los gastos financieros de inversiones iniciales, que son 2 millones de euros (incluidos el 16% del IVA soportado). La inversión inicial presupuestada para los proyectos mineros de estas arcillas cerámicas se estiman en:

1. *Proyectos de investigación, explotación y restauración* 90.000 euros.
El proceso productivo consiste en arrancar lutita arcillosa y transportarla a la instalación de molienda y acopio para su fabricación o venta.
2. *Adquisición de terrenos (27,5Ha a 6.000euros./Ha)...* 165.000 euros.
Las labores preparatorias son los caminos y accesos a los diferentes bancos de trabajo, desbroce y explanadas para la planta de molienda y acopios de mineral.
3. *Labores preparatorias subcontratadas*30.000 euros.
La fase de arranque, carga y transporte consiste en la utilización de maquinaria como un tractor escarificador, dando pasadas sucesivas a las lutitas hasta el tamaño de entrada en la trituradora.
4. *Maquinaria propia*535.000 euros.
Carga y transporte de arcillas mediante camiones dumpers, en la instalación de trituración-molienda el objeto es obtener producciones de 160 a 180 T/hora.
5. *Instalación de trituración-molienda a pie de cantera...* 1 millón de euros.
Instalación de trituración-molienda, electricidad y obras.
6. *Carga en explotación y molienda*..... 180.000 euros.
Maquinaria para la carga de arcillas.

El total del desembolso inicial o inversión inicial, con IVA, es de 2 millones de euros (sin el Iva la cifra asciende a 1.724.140 euros).

Estimamos una producción anual entre 200.000 y 300.000 t de arcillas sobre la base de una producción anual de 1.600 a 1.800 horas, en un turno, con una producción por hora media de 160 a 180 toneladas. En nuestra

estimación de ventas de arcilla para materiales de construcción (ladrillos y tejas) al precio de 4€/t, las citadas toneladas se estiman un mínimo de unos ingresos anuales de la explotación de 1'2 millones €.

Suponemos que la competencia se encuentra a más de 20 Km de nuestra cantera, que para vender nuestra producción entramos en competencia de precios y que no existen precios pactados; también suponemos la venta en planta, por lo que el transporte debe estar repercutido en el precio de venta. Se puede estimar el transporte a un puerto andaluz, *stock* y carga en el puerto, todo 6 euros/T; por lo tanto, como se verá en este caso, existe margen para la fabricación de gres, pero no para ladrillos o tejas.

Vamos a estimar los costes de producción para definir la rentabilidad de nuestro proyecto (las amortizaciones de las instalaciones han sido consideradas costes durante diez años) con seis miembros de personal (administrativo, operadores de Dumpers, operador de retroexcavadora, operador de pala y responsable de planta). Los costes totales de explotación:

1. *Honorarios fijos de dirección facultativa*..... 18.000 euros.
2. *Costes administrativos y otros* 40.000 euros.
(Administrativo, teléfono, seguros, báscula y oficina)
3. *Arranque y carga* 200.000 euros.
(Amortización 50.000 euros, retroexcavadora y camión, excavación variable, operadores de retroexcavadora y camión, combustible y mantenimiento)
4. *Transporte interno*..... 100.000 euros.
(Operadores de camión, combustible, mantenimiento, amortización de camiones 48.500 euros)
5. *Fabricación de arcilla-molienda* 200.000 euros.
(Responsable, amortización de la instalación 100.000 euros, 1000 Kw/h de energía y mantenimiento.)
6. *Carga de arcilla y final* 40.000 euros.
(Operador y amortización de Pala para carga final)
7. *Servicios de prevención y otros* 12.000 euros.
- Subtotal*.....610.000 euros.
8. *Gastos financieros de inversiones iniciales* ... 2 millones de euros.
(incluido el 16% IVA soportado).

(Proyectos, adquisición de terrenos, labores preparatorias, maquinaria, instalación de molienda y carga final.)

Se puede proceder a financiar las inversiones con un préstamo del Instituto de Crédito Oficial (ICO), con un periodo de amortización de 5 años + 1 de carencia; la inversión en máquinas es financiada al 70% de la base imponible (maquinaria propia de 374.000 euros, instalación de molienda a pie de cantera 700.000 euros y la pala para la carga final 126.000 euros): en total, 1'2 millones € a financiar. Estos créditos ICO suelen estar indexados al MIBOR más un punto y tienen una subvención de un punto, por lo que estimamos como coste el tipo MIBOR de cada momento; en esta financiación no va incluido el valor del terreno.

Los gastos financieros de inversión o totales son de 2 millones de euros y para una financiación ICO de 1,2 millones de euros (374.000+700.000+126.000) el capital que resta es de 800.000 euros.

Los gastos financieros de intereses fijos son de 60.000 euros el primer y segundo año, y la amortización de capital en los otros 5 años es de 240.000 euros/año.

MIBOR 5%	Inversión a amortizar (capital) (intereses)	Fijos
1 año.....	1.200.000 euros.....	60.000 euros
2 año.....	1.200.000 euros.....	60.000 euros
3 año.....	960.000 euros.....	48.000 euros
4 año.....	720.000 euros.....	36.000 euros
5 año.....	480.000 euros.....	24.000 euros
6 año.....	240.000 euros.....	12.000 euros
7 año.....	0 euros.....	0 euros

Así los costes totales de explotación en el primer año son de 670.000 euros al considerar unos gastos financieros de sólo 60.000 euros, que son los Fijos-Intereses.

Como se observa, el préstamo ICO lo hemos considerado como una amortización; para mayor simplificación siempre se podría aplicar la fórmula del interés, que obtiene la anualidad, es decir, la parte de capital más intereses a pagar por año:

$$a = \frac{C(1+r)^t * r}{(1+r)^t - 1}$$

$t = \text{años.}$

$r = i/100.$

$i = \text{interés.}$

$C = \text{capital.}$

C) Análisis de la rentabilidad del proyecto

El umbral de rentabilidad de la empresa es el nivel de producción donde se igualan los costes totales con los ingresos totales.

Los costes totales de explotación para el primer año, para 300.000 T de arcillas producidas, ascienden a 670.000 euros:

1. Honorarios.....18.000 €
2. Costes administración....40.000 €
3. Arranque y carga. 200.000 € (incluye 50.000 € de amortización)
4. Transporte interno. 100.000 € (incluye 48.500 € de amortización)
5. Fabricación de arcilla. 200.000 € (incluye 100.000 € de amortización)
6. Carga final. 40.000 €
7. Servicios de prevención. 2.000 €
8. Gastos e interes (1^{er} año). 60.000 €

El umbral de rentabilidad se consigue el primer año con una producción de 125.000 toneladas, que es donde los beneficios son 0 y se iguala el coste con el ingreso de 500.000 € (para unos ingresos mínimos de 4 euros por tonelada de arcilla para ladrillos). El primer año se representa en el siguiente cuadro, teniendo en cuenta que en los costos totales sin producción se suman las amortizaciones anteriores (puntos 3, 4 y 5) a los puntos 1, 2, 6, 7 y 8 :

Producción (T)	Costes totales	Ingresos	Beneficios
0.....	378.500 €(fijos)	0.....	-378.500 €
50.000.....	427.100 €.....	200.000 €.....	-227.100 €
100.000.....	475.700 €.....	400.000 €.....	-75.700 €
150.000.....	524.300 €.....	600.000 €.....	+75.700 €
200.000.....	572.900 €.....	800.000 €.....	+227.100 €
250.000.....	621.400 €.....	1.000.000 €.....	+378.600 €
300.000.....	670.000 €.....	1.200.000 €.....	+530.000 €

En el cuadro se consideran los gastos financieros anuales para el primer bienio (años 1 y 2), en este primer y segundo año el umbral de rentabilidad está en una producción de 125.000 toneladas (beneficio = 0). En el siguiente quinquenio (año 3 al año 7) supone 240.000 €/año la amortización de capital del préstamo ICO, por lo que el umbral de rentabilidad en estos cinco años, es

decir, hasta el séptimo año, se aproxima a las 210.000 T (beneficio = 0), es decir unos ingresos mínimos de 840.000 €.

Si el proyecto fuese arcilla para gres (con precio de 40 €/T), que posee un precio diez veces superior a la arcilla para ladrillo (4€/T = 667 ptas./T), el umbral de rentabilidad para el primer bienio es 10 veces menor y con tan sólo una producción de 12.500 T/año. Para los siguientes años hasta el séptimo (que se pagaría capital de préstamos ICO) la producción mínima para el beneficio cero es de 21.000 T/año de arcilla para gres.

Valor actual neto de la inversión o valor capital (VAN):

En el supuesto de una duración de la inversión de 10 años, se valora la inversión en este periodo con iguales costes todos los años. Con este procedimiento intentamos trasladar una serie de cobros y pagos futuros al momento actual, con el tipo de interés normal del mercado, o bien un tipo superior si exigimos un coeficiente de seguridad a la inversión. Los flujos de caja netos (para producir 300.000 T/año y sin considerar el Iva) es el *cash-flow* y representa los fondos netos generados, diferencia entre ingresos y gastos sin amortización.

ENTRADAS	GASTOS sin amortización o	FLUJO NETO o
COBROS O INGRESOS	COSTES TOTALES sin amortización	cash-flow
Inicio0	A= 1.724.140 € (inversión-IVA)	-1.724.140 €
Año 11,2 M€.	490.000 €.	Q=710.000 €
Año 21,2 M€.	490.000 €.	710.000 €
.....
Año 101,2 M€.	490.000 €.	710.000 €

$$VAN = -A + \sum \left(\frac{Q}{(1 + K)^M} \right) = -A + Qa_{Mk}$$

k = Tipo de actualización o descuento, que suele ser el interés del mercado 7%.

M = Número de años.

Q = Flujo neto o cash-flow del primer año y sucesivos.

A = Desembolso inicial o inversiones, sin IVA.

$$VAN = -1.724.140 \text{ €} + 710.000 \text{ €} * 7'0235 = 3.262.545 \text{ €}$$

El importe del valor actual neto (VAN), actualizando hoy lo que vamos a hacer en 10 años, asciende a 3.262.545€, por lo que la inversión es rentable e incrementa riqueza.

Tasa de rentabilidad interna o tasa de retorno (TRI).

$$VAN = -A + \sum \left(\frac{Q}{(1 + K)^M} \right) = 0$$

$K = r = \text{rentabilidad interna} = \text{TRI}$

$0 = -3.262.545 \text{ €} + 710.000 \text{ €} * a_{nr}$ (se utilizan tablas financieras)

$$a_{nr} = 2'42$$

$r = 40\%$

El 40% es la rentabilidad interna, que es muy superior al interés del mercado. Es la tasa de interés propio (40%) de este proyecto de arcilla y comparando con un interés del mercado del 7%, se cumple la condición de efectividad de una inversión. Además se dan diversas ayudas oficiales para la reactivación económica de comarcas mineras del carbón, mediante los fondos MINER (desarrollo alternativo de estas zonas mineras de carbón) se establece una serie de ayudas dirigidas a proyectos empresariales generadores de empleo, pudiéndose obtener mediante el programa el 40% de la inversión realizada.

APENDICE 3. MUESTRAS DE LUTITAS

-MUESTRAS DE LUTITAS Nº 9 Y 10, A 900°C

-MUESTRA DE LA LUTITA Nº 1, A 1100°C Y A 1150°C

-MUESTRA DE LUTITA Nº 2, A 1120°C Y A 1220°C

-MUESTRA DE LUTITA Nº 4, A 900°C Y A 1000°C

-MUESTRA DE LUTITA Nº 5, A 900°C Y A 1000°C

-MUESTRA DE LUTITA Nº 5 A 1100°C Y A 1150°C

MUESTRA: LUTITA nº 9
900° C



MUESTRA: LUTITA nº 10
900° C



MUESTRA : LUTITA nº 1



1100

Temperatura (°C)



1150

MUESTRA : LUTITA nº 2



1120

Temperatura (°C)



1220

MUESTRA : LUTITA nº 4

900



Temperatura (°C)

1000



MUESTRA : LUTITA nº 5



900

Temperatura (°C)



1000

MUESTRA : LUTITA nº 5



1100

Temperatura (°C)



1150