



**Universitat Autònoma de Barcelona**

Facultat de Ciències

**Dpt. de Geologia**

**Unitat de Cristal·lografia i Mineralogia**

**LAS ARENISCAS MIOCÉNICAS DE LA FORMACIÓN FORTUNA  
UTILIZADAS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL ACUEDUCTO ROMANO DE  
ZAGHOUAN-CARTAGO**  
**Caracterización petrofísica, alterabilidad y ensayos de control de  
idoneidad de tratamientos de restauración**

Karima Zoghlami

Memoria presentada en la Unitat de Cristal·lografia i Mineralogia del Departament de Geologia de la Universitat Autònoma de Barcelona para optar al grado de Doctor en Geología. Este estudio se enmarca dentro del programa de doctorado en Geología realizado durante el bienio 1999-2001.

Bellaterra, julio de 2003.

Karima Zoghlami

Visto bueno:

David Gómez Gras  
Co-director

Aureli Álvarez i Pérez  
Co-director

Jose Luis Prada Pérez  
Co-director

Fadila Gueddari  
Co-director



## A LA MEMORIA DE MI PADRE

Papi, cuando ya quedaba poco para que te sintieras orgulloso de mi, nos has dejado de repente, a medio camino, sin tener la oportunidad de decirte adiós. Sé que no te gusta que te diga esto, sé que es la voluntad de dios y sé que estás contento allí donde estás, que estás muy orgulloso de mi y de mis hermanos, sé que nunca has dejado de pensar en mi ni de estar a mi lado como siempre lo has hecho. Papi, quería decirte que has sido una persona inolvidable y un padre maravilloso, te has sacrificado mucho por nosotros y has hecho todo lo que has podido para hacernos felices. Descansa, has cumplido con tu deber y no te preocupes por nosotros que gracias a ti ya somos mayores y fuertes. Solamente quería que estuvieras el día de la lectura de mi tesis para abrazarte y decirte que te quiero.

<b>ÍNDICE .....</b>	<b>i</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>vii</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
I.1. PRESENTACIÓN DEL TRABAJO.....	3
I.2. ASPECTO HISTÓRICO DEL MONUMENTO .....	4
I.2.1. Descripción del acueducto .....	5
I.2.2. Fuentes de aprovisionamiento .....	6
I.2.3. Las cisternas.....	7
I.3. ASPECTOS ARQUITECTÓNICOS DEL MONUMENTOS.....	7
I.3.1. Estructura general .....	7
I.4. LOS MATERIALES USADOS EN LA CONSTRUCCIÓN .....	12
<b>II. CONTEXTO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO DE LA ZONA DONDE SE UBICA EL MONUMENTO .....</b>	<b>13</b>
II.1 SITUACIÓN GEOGRÁFICA.....	15
II.2. LA SERIE OLIGO-MIOCENA .....	16
<b>III. OBJETIVOS .....</b>	<b>23</b>
III.1.OBJETIVO GENERAL.....	25
III.2.OBJETIVOS CONCRETOS .....	25
<b>IV. METODOLOGÍA .....</b>	<b>27</b>
IV.1.TRABAJO DE CAMPO.....	29
IV.2.TRABAJO DE LABORATORIO .....	31
IV.2.1. Microscopía.....	31
IV.2.1.1. Microscopía óptica de polarización.....	31
IV.2.1.2. Microscopía electrónica de barrido .....	31
IV.2.1.3. Microscopía de fluorescencia (MP).....	31
IV.2.1.4. Microscopía láser confocal (MLC).....	32
IV.2.1.5. Catodoluminiscencia: .....	32
IV.2.2. Ensayos físicos.....	32
IV.2.2.1. Propiedades hídricas.....	32
IV.2.2.1.1. Absorción al vacío .....	32
IV.2.2.1.2. Desorción libre.....	33
IV.2.2.1.3. Absorción capilar .....	37
IV.2.2.1.4. Absorción de agua a baja presión (columna de agua).....	40
IV.2.2.1.5. Permeabilidad al vapor .....	41
IV.2.2.1.6. Hinchamiento.....	43
IV.2.2.2. Propiedades mecánicas.....	45
IV.2.2.2.1. Resistencia a la compresión .....	45
IV.2.2.2.2. Ensayo de desgaste por rozamiento .....	45
IV.2.2.3. Porosimetría de mercurio. ....	47
IV.2.3. ENSAYOS DE ALTERABILIDAD .....	49
IV.2.3.1. Cristalización de sales solubles .....	50
<b>V. FORMAS Y MECANISMOS DE ALTERACIÓN.....</b>	<b>57</b>
V.1.FORMAS DE ALTERACIÓN .....	59
V.2.MECANISMOS DE ALTERACIÓN .....	68
<b>VI. SEDIMENTOLOGÍA DE LA UNIDAD SUPERIOR CONTINENTAL DE LA FORMACIÓN FORTUNA .....</b>	<b>75</b>
VI.1. ESTRATIGRAFÍA Y FACIES DE LA UNIDAD SUPERIOR DE LA FORMACIÓN FORTUNA .....	77
VI.1.1. Tramo inferior .....	78
VI.1.2. Unidad intermedia .....	83
VI.1.3. Unidad superior .....	85

VI.1.4. Mioceno marino (Langhiense).....	87
VI.2. AMBIENTE SEDIMENTARIO DE LA UNIDAD SUPERIOR DE LA FORMACIÓN FORTUNA .....	87
VI.3. PETROLOGÍA DEL MIOCENO CONTINENTAL.....	89
VI.3.1. Componentes detríticos .....	89
VI.3.2. La matriz .....	92
VI.3.3. La porosidad.....	93
VI.3.4. El cemento.....	94
VI.3.5. Diagénesis .....	96
VI.3.6. Procedencia .....	98
<b>VII. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL SIN TRATAR.....</b>	<b>99</b>
VII.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE LA CANTERA.....	101
VII.1.1. ESTUDIO PETROFÍSICO .....	101
VII.1.1.1. Petrografía .....	101
VII.1.1.1.1. Descripción de los componentes.....	101
VII.1.1.1.2. Descripción de la compactación de la arenisca.....	103
VII.1.1.2. Descripción del sistema poroso .....	109
VII.1.1.2.1. Resultados de la porosimetría de mercurio .....	109
VII.1.1.2.2. Descripción petrográfica del sistema poroso .....	112
VII.1.1.2.2.1. Areniscas sin arcillas.....	112
VII.1.1.2.2.2. Influencia de las características petrográficas sobre la distribución porométrica y la configuración de la red porosa .....	112
VII.1.1.2.3. Reconstrucción tridimensional del sistema poroso .....	115
VII.1.1.2.3.1. Metodología .....	115
VII.1.1.2.3.2. Descripción del sistema poroso .....	115
VII.1.1.3. Estudio del comportamiento físico del material .....	118
VII.1.1.3.1. Estudio del comportamiento hídrico .....	118
VII.1.1.3.1.1. Absorción al vacío.....	118
VII.1.1.3.1.2. Desorción .....	119
VII.1.1.3.1.3. Absorción de agua por capilaridad.....	122
VII.1.1.3.1.4. Absorción de agua a baja presión.....	126
VII.1.1.3.1.5. La permeabilidad al vapor de agua.....	127
VII.1.1.3.1.6. Hinchamiento .....	128
VII.1.1.3.2. Estudio del comportamiento mecánico .....	128
VII.1.1.3.2.1. Ensayo de la resistencia a la compresión .....	128
VII.1.1.3.2.2. Ensayo de desgaste por rozamiento.....	130
VII.1.2. Estudio de la alterabilidad.....	131
VII.1.3. Valoración del material y los factores intrínsecos de alterabilidad .....	137
VII.1.4. Conclusión .....	138
VII.2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DEL MONUMENTO .....	139
VII.2.1. Estudio petrográfico .....	139
VII.2.2. Estudio del sistema poroso .....	139
VII.2.3. Estudio del comportamiento hídrico .....	140
VII.2.3.1. Absorción al vacío.....	140
VII.2.3.2. Desorción .....	140
VII.2.3.3. Absorción capilar .....	142
VII.2.4. Conclusión .....	143
<b>VIII. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL TRATADO.....</b>	<b>145</b>
VIII.1. INTRODUCCIÓN .....	147
VIII.1.1. Métodos de aplicación del producto.....	150
VIII.1.2. Productos utilizados en consolidación y hidrofugación .....	151
VIII.1.2.1. Consolidantes inorgánicos .....	152
VIII.1.2.1.1. Consolidantes silícicos .....	152
VIII.1.2.1.1.1. Silicatos alcalinos, silicatos de sodio y potasio. ....	152
VIII.1.2.1.1.2. Los fluosilicatos.....	153
VIII.1.2.1.2. Hidróxidos alcalinos.....	154
VIII.1.2.1.2.1. Cal y bicarbonato de calcio.....	154
VIII.1.2.1.2.2. Hidróxido de bario.....	154

VIII.1.2.1.2.3. Aluminato de potasio .....	154
VIII.1.2.2. Alcoxisilanos (silico-orgánicos) .....	155
VIII.1.2.2.1. Silicato de etilo .....	155
VIII.1.2.2.2. Alquil-alcoxisilano y Alquil-aril-polisiloxano .....	156
VIII.1.2.2.3. Los siliconatos .....	158
VIII.1.2.3. Consolidantes orgánicos .....	159
VIII.1.2.3.1. Resinas acrílicas .....	159
VIII.1.2.3.2. Resinas epoxy .....	160
VIII.2. TRATAMIENTO DEL MATERIAL DE LA CANTERA .....	162
VIII.2.1. Tratamientos aplicados .....	162
VIII.2.1.1. Productos consolidantes escogidos .....	162
VIII.2.1.2. Productos hidrofugantes escogidos .....	162
VIII.2.1.3. Productos de mezclas escogido .....	162
VIII.2.2. Preparación de las muestras .....	163
VIII.2.3. grado de penetración de los productos .....	163
VIII.2.3.1. Grado de penetración de los consolidantes .....	166
VIII.2.3.2. Grado de penetración de los hidrofugantes .....	169
VIII.2.3.3. Grado de penetración de la mezcla .....	170
VIII.2.4. Estudio petrofísico del material tratado .....	174
VIII.2.4.1. Repartición de los polímeros en el sistema poroso .....	174
VIII.2.4.1.1. Consolidantes .....	175
VIII.2.4.1.1.1. Resultados de la porosimetría de mercurio .....	175
VIII.2.4.1.1.2. Estudio microscópico .....	178
VIII.2.4.1.1.3. Interpretación .....	178
VIII.2.4.1.2. Hidrofugante .....	181
VIII.2.4.1.2.1. Resultados de la porosimetría de mercurio .....	181
VIII.2.4.1.2.2. Estudio microscópico .....	183
VIII.2.4.1.2.3. Interpretación .....	184
VIII.2.4.1.3. Mezclas .....	186
VIII.2.4.1.3.1. Resultados de la porosimetría de mercurio .....	186
VIII.2.4.1.3.2. Estudio microscópico .....	187
VIII.2.4.1.3.3. Interpretación .....	188
VIII.2.4.2. Comportamiento hídrico del material tratado .....	188
VIII.2.4.2.1. Absorción al vacío .....	188
VIII.2.4.2.2. Desorción .....	190
VIII.2.4.2.2.1. Ensayos preliminares .....	190
VIII.2.4.2.2.2. Resultados obtenidos para los consolidantes .....	193
VIII.2.4.2.2.3. Resultados obtenidos para las mezclas .....	196
VIII.2.4.2.2.4. Resultados obtenidos por el hidrofugante Tegosivin HE328 .....	199
VIII.2.4.2.3. Capilaridad .....	200
VIII.2.4.2.3.1. Muestras tratadas con consolidantes .....	200
VIII.1.4.2.2.2. Muestras tratadas con mezclas .....	206
VIII.1.4.2.2.3. Muestras tratadas con hidrofugante .....	210
VIII.2.4.2.4. Absorción de agua a baja presión (columna de agua) .....	212
VIII.2.4.2.4.1. Muestras tratadas con consolidantes: .....	212
VIII.2.4.2.4.2. Muestras tratadas con mezclas: .....	214
VIII.2.4.2.4.3. Muestras tratadas con hidrofugante: .....	215
VIII.2.4.2.5. La permeabilidad al vapor de agua: .....	216
VIII.2.4.3. Estudio del comportamiento mecánico: .....	217
VIII.2.4.3.1. Ensayo de resistencia a la compresión: .....	217
VIII.2.4.3.2. Ensayo de desgaste por rozamiento: .....	218
VIII.2.5. Ensayo de alterabilidad: .....	221
VIII.2.6. Evaluación de la idoneidad de los tratamientos: .....	230
<b>IX. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES FINALES .....</b>	<b>231</b>
IX.1. SÍNTESIS .....	233
IX.2. CONCLUSIONES FINALES .....	237
<b>X. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>239</b>

## **AGRADECIMIENTOS:**

En el año 1999 había empezado mi tercer ciclo en la facultad de ciencias de Túnez cuando mi profesora Fadila Gueddari me propuso realizar una tesis doctoral en el marco de un proyecto de investigación, sobre la restauración del acueducto romano de Zaghouan-Cartago, junto con un equipo español de la universidad Autónoma de Barcelona dirigido por el profesor Aurelio Álvarez. El tema me apasionó muchísimo, pero tenía miedo porque no era geóloga de formación, no conocía el idioma y, sobretodo, no estaba preparada para separarme de mi familia que tanto quiero y que forma parte de mí. Finalmente mi familia y mis profesores me convencieron para aceptar la beca de la AECI y así comenzó la aventura...

Al principio todo era difícil y todo me parecía nuevo: nueva vida, nuevo mundo, nuevas personas, nuevo campo de estudios, nuevo idioma, no sabía por donde empezar. Tardé un año en entender que la base de mi trabajo es el conocimiento profundo de la piedra, es decir, la petrología. ¿qué voy a hacer? Necesitaba aprender y decidí aprender, quería ser petróloga. Busqué una persona que me ayudare a realizar mi sueño, tenía que ser muy excepcional y muy paciente para empezar de cero y enseñarme todo lo que necesitaba para llevar a cabo el trabajo. Finalmente la encontré. Así es, David Gómez Gras, Desde entonces todo cambió, todo pareció más fácil, más divertido y más interesante. David, quiero agradecerte tu dedicación, tu comprensión y sobre todo tu infinita paciencia y tu gran corazón, gracias por todo lo que has hecho por mí para poder sacar adelante este trabajo. Gracias por todo.

Quisiera agradecer a mi director, Aureli Álvarez Pérez, la oportunidad que me ha dado de trabajar en su laboratorio y las facilidades y atención que siempre me ha prestado durante todos estos años.

Quisiera agradecer José Luis Prada su ayuda, su dedicación y toda la información que me ha facilitado y que tan útil ha sido.

Quisiera agradecer a Fadila Guaddari haber creído en mí y haberme seleccionado entre muchos para realizar este trabajo. También quisiera agradecer su ayuda y las facilidades que nos ha dado cada vez que hemos estado en Túnez realizando trabajos de campo.

Desde luego este trabajo no hubiera sido lo mismo sin la ayuda de David Parcerisa (Carpe), Eduard Saura Juan Agustín Nuñez (Sting), y Juan Diego Martín<sup>2</sup> (Juandi). Gracias chicos por ser tan amables conmigo, nunca olvidaré la cantidad de horas que me habéis dedicado, la amistad que me habéis ofrecido y los buenos y malos momentos que hemos compartido juntos. Nunca os olvidaré.

Qué sería de mi vida en Barcelona sin mis amigos Moez, Ahmed, Ghizlan, Mónica, Khalil, Ikram, Ilhem y Aziz, Leila. Chicos gracias por estar siempre a mi lado y por hacerme la vida tan agradable.

Quisiera dedicar este párrafo a una persona muy especial para mí y a quién debo tanto que no sé como decirlo. Rachid, quiero que sepas que has sido como otra familia para mí y un gran apoyo moral en los malos momentos por los cuales he pasado en esta última época. Gracias por tu gran corazón y por estar siempre a mi lado.

También quiero agradecer la ayuda que me han proporcionado los técnicos de laboratorio Jaume Ques y Lluís Gordón. Especialmente a Jaume, que siempre ha estado predispuesto para ayudarme cuando lo he necesitado.

Agradezco mucho al personal del servicio de microscopía electrónica, Mercè, Francesc y Onofre, el buen trato que me han prestado. También su paciencia para aguantar el ruido que hacemos (David y yo) generado por las discusiones que siempre hemos tenido durante las sesiones. Quería agradecer a Juan Martínez de LGI por la ayuda que me ha prestado a la hora de realizar los ensayos mecánicos.

Quisiera agradecer también a las empresas Keim Farben (GMBH and COKG) y Goldschmidt por haberme subvencionado los productos necesarios para llevar a cabo este estudio.

Agradezco a todos los que me han ayudado, Mercè Corbella, Mónica Rivas, Helena y todos aquellos de los que no recuerdo el nombre ahora.

Finalmente, quisiera agradecer a mi familia el apoyo moral y sentimental que me han prestado durante toda mi trayectoria de estudiante. Quisiera agradecerles su fortaleza, o como mínimo, por aparentarla delante de mí para que pudiera seguir con mi camino sin estar distraída ni preocupada, gracias por ser tan sensibles. Mami, siempre has sido fuerte y nos has enseñado a serlo, sigue siéndolo porque te necesitamos sobretodo ahora.



# **MIOCENE SANDSTONES OF THE FORTUNA FORMATION USED IN THE CONSTRUCTION OF THE ROMAN AQUEDUCT OF ZAGHOUAN-CARTHAGE**

Petrophysical characterization, alterability and suitability of conservation treatments

## **Abstract**

### **A. INTRODUCTION**

This thesis aims to continue and to complete the studies and analyses carried out until the moment, in a matched way between the Universitat Autònoma de Barcelona and the University of Tunisia, on the Roman aqueduct of Zaghoun-Carthage. The objective of this work is to establish the most suitable methodology for its restoration and conservation with the idea that this may also be applicable to other monuments, given the effort and the special interest of the tunisian government in the last years, through the National Institute of Patrimony, in the evaluation and conservation of the Historical Patrimony of Tunisia.

### **B. GEOGRAFIC SETTING**

The Aqueduct of Zaghoun-Carthage is an impressive work of engineering of 132 Km length, built during the II century A.D, to supply water to the thermal complex of the roman city of Carthage. Although the buried part of the aqueduct is still presently being used, the exposed areas with their arcades (17 Km) present important conservation problems. The most spectacular section of the exposed part is in the valley of the Oued Miliane and, specially, where the aqueduct crosses the bed of the river,

reaching maximum height up to 38 m. The studied stretch of the aqueduct is located in this valley, at about 20 Km of the S of the capital (Tunisia) and specifically in the area where the main highway GP 3 of Tunisia to Kairouanthey meets the secondary MC 36 that leads to the small population of Khledia (Fig. II. 1). At this point, the aqueduct has an N-S orientation and the studied stretch, denominated stretch 3, runs parallel to the highway MC 36. It has 70 m of longitude and some pillars reach 3.2 m of height.

### **C. GEOLOGIC SETTING**

The oligo-miocene deposits of the central and northeastern zones of Tunisia are fundamentally detritic and they are constituted by the Fortuna (Burolet, 1956), Messiouta (Burolet, 1956), Grijima (Yaich, 1991) and Ain Grab (Burolet, 1956) formations, as well as by their lateral equivalent toward the E that are represented by the Ketatna and Salamambo formations (Fournié, 1978) (Fig. 2). They cover a period between the Oligocene and the Langhian when the sedimentation was controlled by a regional extensive regime. The tectonic displacements resulted in mosaic horsts and grabens orientated mainly N 40 and N 140. This extensive regime probably settled down in relation to the opening of the western mediterranean basins. The sedimentary characteristics and the fauna indicate that these two units occurred in environments that vary from deltaic to shallow marine or coastal and in general, towards the E, the quantity of detritics decreases progressively. The deltaic deposits were caught in a depression that extends from NE to SW along with the Nebhana-Cap Bon axis (Fig. 1). The upper unit of the Fortune formation is of Aquitanian age (Hooyberghs, 1992) and is constituted by quartz-rich sandstones deposited in a braided fluvial system (Yaich, 1994).

The Fortuna formation has been divided into three units (Yaich, 1994). The lower unit, of lower Rupelian - lower Chatian age (upper Oligocene), and the middle unit, of Aquitanian (lower Miocene) age. They are mostly of fine grain and are constituted by fine sands, slimes and clays with interstratified calcareous plasters, although the middle unit has a sandier character and it presents intercalaciones of glauconite-rich sandstone.

This upper unit in the outcrops of the northeastern part of Tunisia, where this work is centered, has a thickness of 130 m and is constituted by fine to coarse sandstones with dispersed boulders of quartz and fragments of fossil trunks. The strata

range between 0.5 and 4 m in thickness and frequently show crossed laminations at medium and large scales. The crossed lamination point out that the braided fluvial direction was courses towards the E and NE. The base of this upper unit rests on an unconformity that represents a surface of erosion correlated at a regional scale. According to Yaich (1994), this unconformity is related to a eustatic slope of the sea level of the sea that took place in the upper Aquitanian, that caused the emersion of the platform and the installation of very erosive fluvial channels that mark the entrance of these detritic rude deposits of the upper unit of the Fortuna formation. Roman quarries, located in this unit, gave most of the material for the construction of the Zaghouan-Carthage aqueduct.

The detailed study of the constructive materials used in the aqueduct of Zaghouan-Carthage in the section of the Oued Miliane (see chapter V, Fig. V.1) allows us to affirm that the different varieties (lithotypes) of ashlar of sands belong only and exclusively to the upper unit of the Fortuna formation. The attribution of the origin of the ashlar to this upper unit has been established because the sandstone of the two lower units are usually bioclastics and more cemented by sparry calcite, as they have been deposited in a deltaic marine environment. The sandstones of the upper unit have a fluvial continental character, do not contain fauna, and are little or not cemented. Therefore, the sedimentologic study developed in chapter VI of this study has been restricted to the upper unit of this Fortuna formation.

#### **D. PETROLOGY AND PROVENANCE**

The sandstones of this unit (Fortuna formation) show a great diversity in grain sizes, from slimes to gravels. The grains generally, have high spherical and roundness indexes and show a good selection. Regarding to composition, these sandstones are mature, with very low contents of rock and feldspar fragments and can be classified as quartz-arenites. The analyses carried out according to the method of Gazzi-Dickinson show that the skeleton is composed dominantly by monocrystalline quartz (69-84%), quartz with inherited overgrowth (0,4-3,4%), K-feldspar (0-1,1%, orthoclase and microcline); it has content of infiltrated clay matrix (0-7%, smectite and kaolinite) and high values of primary intergranular porosity (18-25%). The rock fragments of plutonic (granitoides), metamorphic (quartzites) and sedimentary (sands cemented by quartz) types appear as accessories, together with micas (muscovite and biotites) and heavy

minerals (tourmaline and zircon). The cement is scarce so that the lithification of the rock is produced by the mechanical and chemical compactation that the grains have suffered in form of pressure-dissolution contacts.

Taking into account the main structural directions of the basin, the detritic sediments were supplied to this region from source areas located towards the SW of Tunisia. The main provenance area for this upper unit of the Fortuna formation was the Saharian platform. This source area was characterized by different lithology: quartz-cemented arenites. These sandstones could come from the paleozoic sandstones of the Tassilis or of the cretaceous sandstones of the “continental intercalaire” or of the eocene sandstones. The plutonics and metamorphic rocks probably came from the Hoggar basement massive. The recycling of the sedimentary lithology, as indicated by the presence of inherited overgrowth, together with the fluvial transport partially explain the high quartz content of the sandstone, but not their extreme maturity. This indicates that the lithologies of the source area, or part of them, were affected by an alteration saprolite that fed the Miocene network, or indirectly arrived from recycling the pre-Miocene sedimentary formations.

## **E. RESULTS**

The state of conservation of the rock used in the construction of the Roman aqueduct of Zaghouan-Carthage is the core of this work. This rocks are Miocene sandstones of the upper unit of the Fortuna formation).

A petrologic study, with all the diagnostic techniques required, was the main methodology of this work.

Reconstruction of the stratigraphic series was performed in the zone where part of the Roman quarries, used in the construction of the monuments, is found. This study revealed that the different fronts of opened quarry in the series exploit the same stratigraphic level (level 3 of the lower section) due to the existence of diverse fault that repeat the series. It was also evidenced that this level is the only one of the whole section that can be exploited as construction material, since it is the only one that presents the appropriate degree of litification and thickness of strata. This allows the extraction of ashlar with easiness and wanted dimensions. The identification of this exploitable stratigraphic level guarantees a new source of substitution material in case

of necessity, since the original Roman quarries, exploded formerly for the construction of the monument, are also considered part of the patrimony that is necessary to preserve.

The detailed petrographic study of this rock showed that it is a quartz-arenite that has not been cemented, and is lithified by compaction. It is composed essentially of quartz (69-84%), porosity (14 - 28%), matrix (0-10%) and K-feldspar and tourmaline are the accessory components (0-1%). Texturally, sandstones are fine- to medium-coarse size with a selection that varies from extremely good to very good, in the case of the fine ones, and that it is moderated in the case of the coarse ones.

The almost total absence of cement phase generates unique porous net that is defined by the disposition of the quartz grains and the compaction degree of the rock. This confers to the rock a macroporous character and a highly connected porosity.

The quartzitic character of the rock makes it very resistant to chemical mechanisms since water is the main agent that intervenes in most of the physico-chemical alteration processes of the rock material and quartz is basically an unreactive mineral.

The almost total absence of cement determines the scarce lithification of the rock. Therefore the lithification only depends on the pressure-dissolution generated by compaction in the contact points among the different grains. Thus the degree of chemical compaction gives a diverse cohesion to the rock.

These petrographic characteristics are perfectly reflected in the physical behavior (hydraulic and mechanic) as well as in the alterability of the rock. The character macroporous and the high connectability of the porous system give the rock an excellent hydraulic behavior that is characterized by a quick absorption and desorption of water with an almost null retention of water. This high flow of reception and water circulation avoids the prolonged contact between rock and alteration solutions and, therefore, avoids the reaction of retained water with different components of the rock.

The absence of a cement phase together with the low lithification of the rock, makes it to be very weak mechanically. Therefore, it is very vulnerable to any type of alteration mechanism that implies physical or mechanical disruptive forces, like the case of soluble salts and ice-thaw. This was evident in the test of accelerated alterability by sodium sulfate, where the samples showed a very low resistance to these salts and completely collapsed in the fourth crystallization cycle.

Taking into account all the results obtained in the petrographics and physicals studies, it is clear that this rock type is stable under Mediterranean environmental conditions, since the rock is not vulnerable neither to the atmospheric pollutants neither to water in its liquid state and ice-thaw is not usual in this climate. Therefore, the optimal environmental conditions for the conservation of this rock are those where the water do not contain elements able to generate soluble salts.

If the monument rock has an acceptable state of conservation, this is because it has been in equilibrium with the environment where it is located. Therefore, the factors that have helped the monument rock to persists intact during so many centuries are:

- The indifference of the rock to the presence of water.
- The absence of salts.
- The absence of gelification of water.

The small surface grain desagregation observed in the rock is due to the differential thermal dilation of the quartz grains with different crystallographic orientations. These dilation differences originate shear forces in the pressure-dissolution surfaces that can cause the disunion of these contacts. This would lead to a grain desagregation that is the dominant form of alteration in this rock.

If the environmental conditions change and the rock enters in contact with more aggressive alteration agents (salts), then it will be necessary to protect it against the disruptive effects that threaten its textural integrity, improving its internal cohesion. Therefore, different conservation treatments has been tested in this rock.

The results for consolidants can be considered as satisfactory, since, they have reached an important degree of penetration in the rocky substrate without generating significant changes in the porous structure and consequently, in their hydric behavior. This is because the used products only obstruct the microporosity and the small narrowings of the porous system, leaving the macroporous open, thus allowing water evaporation with a kinetics comparable to that of the non treated rock.

The consolidants not only did not harmed the hydric behavior the rock, but also improved its mechanical characteristics (resistance to compression and abrasion) by 200%, indicating an increase in the cohesion among the components of the rock. This is due to the operatins way of the consolidant among the grains, joining the nearest ones

and increasing the number of contacts among grains and in consequently, the cohesion of the rock.

The suitability of these consolidants versus the disruptive action of the salts has also been tested. Although the obtained results showed an important improvement in the resistance of the rock treated, this improvement is insufficient to consider the consolidation as an effective and efficient solution in avoiding the damages that can take place by the crystallization of salts inside the porous system of the rock. In spite of this, it has been proven that the consolidant tested do not generate secondary effects in presence of salts, that is the treated rock is altered according to the same alteration forms as the untreated rock (superficial grain desagregation), but with a much lower speed.

In the case of the hydrophobing treatments, the results have been satisfactory, since the used products impeded the entrance of water by almost 100% without producing any changes in the porous system or in the permeability to the water vapor. Although the efficiency of these treatments has been proven, their application is not valuable in this case, since, water in its liquid state does not harm the rock because its mineralogical composition is practically unalterable.

When an application of the hydrophobings products are carried out with the purpose of protecting the rock against the entrance of the saline solutions it is necessary to be sure that in any case the saline solution could penetrate the rock, specially if it only has to evaporate through the treated faces. This situation would cause the concentration of the salts in the interface treated rock–untreated rock, which would generate tensions and would produce the contour scaling of the rock in the limit of penetration of the product, as it has been shown in the tests of accelerated alterability.

Therefore, for a correct use of conservation products and of restoration of this rock, it is recommended to:

- Apply a consolidant to limit the grain desagregation of the rock in the fronts exposed to higher variation of temperatures, as is the case of the south and west fronts of the aqueduct in the studied section.

- In the case of salt existence, extract them firstly and then, apply one of the tested consolidants.

- Not apply a hydrophobing agent to protect the rock against the humidity or liquid water.

- Treat the area where the salt solution penetrates with hydrophobies in the case of salt solution presence, and avoid they can enter through other sources. But in any case, it is better to eliminate the salts than risking contour scaling in the stone.

- Not use mortars or cements that contain elements able to generate salts, specially sulfates as in the case of the cement Portland in restoration processes.

## **F. FINAL CONCLUSIONS**

From the detailed study of the materials coming from the Roman quarries as well as from the monument, the following final conclusions related to the future conservation of the monuments built with this sandstone of the upper unit of the Fortuna formation can be pointed out.

1 - From the petrographic and physical studies of the material of the quarry and from the state of alteration of the stone in the monument, it comes off that the best way to conserve this sandstone is the local application suffer grain desagregation of any of the consolidants tested.

2 - It is necessary to avoid the exposure of this sandstone to soluble salts and especially sodium sulfate, since it is the most harmful alteration agent. For this reason, it is necessary to isolate the stone from any source that can supply salts, as is the case of cement Portland or any other type of cements or artificial mortars that produce salts.

3 - The use of the hydrophobing products is not recommended in the conservation of this rock due to two fundamental reasons: first, because the simple presence of water has not been demonstrated to be harmful in this rock; and secondly, because if there were salts, these would accumulate in the interface treated rock–untreated rock, causing contour scaling that accelerates its alteration process.

4 – It is was evident that an exhaustive petrographic study of the rock, specially of the porous system was necessary since this allows to understand and to interpret in depth the results of the tests and analyses, not only of the non treated rock, but also of the treated one.



# **I. INTRODUCCIÓN**

## **I.1. PRESENTACIÓN DEL TRABAJO:**

En 1997, durante los días 9 a 15 de junio, tuvo lugar en Cartago (Túnez) el workshop coordinado por el Dr. José Luis Briansó de la Universidad Autónoma de Barcelona, titulado: “Contribution of Science and Technology to the protection of Cultural Heritage in the mediterranean Basin”. Este workshop puso de manifiesto la voluntad de potenciar los contactos y la colaboración entre los distintos países de la cuenca mediterránea, haciéndose eco de la voluntad manifestada claramente por la Comunidad Europea en el IV Programa Marco, sobretodo en relación con la conservación y protección del Patrimonio Cultural existente a ambos lados del mediterraneo y, desarrollado, muchas veces, a partir de raíces comunes.

En esta sentido el año siguiente fue aprobado y financiado por la Comunidad Europea el proyecto: “Study, characterisation and análisis of degradation phenomena of ancient, traditional and improved materials of geologic origin used in construction of historical monuments in Mediterranean area” (ERB-IC18-CT98-0384). Este proyecto propició una estrecha colaboración entre varios grupos de investigadores de Europa y del norte de África, con la Universidad de Túnez y la Dirección General de Patrimonio de dicho país.

Dentro del anterior proyecto fueron desarrollados tres estudios prospectivos dirigidos al conocimiento y valoración del estado actual del Patrimonio Cultural en algunos países sud-mediterráneos, entre ellos Túnez, donde el interés principal se centró en el acueducto Zaghouan – Cartago, en el tramo correspondiente al valle del río Miliane.

Los primeros estudios, realizados tanto “in situ” como en el laboratorio, y que dieron lugar a diversas publicaciones, fueron, posteriormente continuados mediante la tesis doctoral que ahora se presenta, la cual ha sido realizada, en parte, gracias a la beca de colaboración concedida por la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI), a través de los acuerdos suscritos con la nación de Túnez.

Uno de los objetivos de este trabajo, a parte de completar los estudios iniciados, es contribuir a la posibilidad de formular una metodología global de restauración, que, además de integrar todas las partes implicadas en una obra de restauración, pueda ser aplicada con el máximo de garantías, hasta el punto de poder ser extrapolada a monumentos de características similares a las del acueducto.

En el aspecto educativo esperamos que este trabajo pueda servir para la formación en Túnez de técnicos en restauración con el fin de ir adquiriendo una preparación adecuada a la realidad y a las posibilidades tecnológicas que se dan actualmente en dicho país.

## **I.2. ASPECTO HISTÓRICO DEL MONUMENTO:**

No se conoce ningún documento antiguo ni ninguna inscripción que informe con certeza la fecha de construcción de este espectacular conjunto arquitectónico. En general se admite que la decisión de iniciar la edificación del acueducto de Cartago fue tomada por el emperador Adriano con ocasión de su viaje al África proconsular el año 128 d.C y después de un periodo de cinco años de sequía. Desconocemos, sin embargo, el tiempo que transcurrió entre la decisión de construir el acueducto y el comienzo de estos trabajos.

El acueducto estaba de hecho destinado principalmente a abastecer de agua las grandes termas de Cartago y a satisfacer las necesidades en agua de una gran aglomeración urbana (100.000 hab según Lezine, 1969) con un consumo de agua estimado de 260 l/hab/día. Esta construcción fue iniciada bajo el reinado de Antonino Pio, sucesor de Adriano y fue terminada bajo el siguiente reinado (Marco Aurelio) en el año 162 después de Jesucristo.

Las termas, por tanto, no pudieron funcionar hasta que la finalización de las obras del acueducto no aseguró el abastecimiento regular y continuado de agua. Por tanto, la construcción del acueducto tuvo que realizarse entre los años 128 y 162 después de Jesucristo, y muy pronto necesitó diferentes reconstrucciones y restauraciones.

La mayoría de los autores admiten que el acueducto fue mantenido en servicio hasta la llegada de los Vandalos. Cartago resistió ocho años contra los Vandalos, pero capituló en el año 439 A.C. Durante esta guerra, el acueducto fue destruido en varios puntos hasta quedar inutilizado.

Durante la reconquista bizantina en época de Justiniano, Belisario echó a los Vandalos de Cartago (534 d.C) y el acueducto de Adriano fue reparado. Con la llegada del Islam al Magreb en el año 698, Hassen Ibn Noâmen, gobernador de Egipto, expulsó a los Bizantinos y destruyó el acueducto y una gran parte de la ciudad, que nunca más volvió a tener la misma importancia que tuvo en la antigüedad. El acueducto fue de nuevo reparado en el siglo X en época de los Fatimidias.

Después de varios siglos de abandono, el acueducto fue puesto otra vez en servicio por el Califa afside El Mustansir, finalizando los trabajos en 1267. Fue en esta misma época cuando se construyó el acueducto del Bardo, destinado a abastecer de agua las suntuosas

residencias allí construidas. El acueducto fue habilitado igualmente, para abastecer de agua la ciudad de Túnez. Los trabajos de rehabilitación afectaron 116 Km de los 132 Km del antiguo acueducto. La parte de Jouggar ya no fue puesta en servicio y el sector cercano a la ciudad de Cartago fue totalmente abandonado.

Entre 1472 y 1476, el Califa Hafside Abou Amr-Othman, para mejorar el suministro y abastecimiento de agua, completó los trabajos de restauración que había empezado El Mustansir.

Hacia mediados del siglo XVII, Mohamed Pacha, muerto en 1666, puso de nuevo en funcionamiento el tramo del Bardo. Con posterioridad, Hussein Ben Alí (1705-1735) realizó una nueva restauración del acueducto entre Túnez y el Bardo. Finalmente, entre 1859-1862, Mohamed Bey encargó al ingeniero Francés P. Colin, poner nuevamente en funcionamiento el acueducto romano para la alimentación de la Capital Túnez. Las partes del conducto que pasaban a nivel del suelo fueron reparadas tal como estaban en la antigüedad, sin embargo, en las partes aéreas donde algunos arcos del acueducto habían sido destruidos, fue necesario construir nuevas conducciones forzadas, la mayoría también subterráneas. El agua suministrada procede de las mismas fuentes romanas de Zaghouan i Ain Jouggar las cuales siguen funcionando en la actualidad.

### **I.2.1. DESCRIPCIÓN DEL ACUEDUCTO:**

El acueducto de Cartago con unos 132 km de largo representa la obra romana más importante de toda África y el acueducto de mayores dimensiones de todo el Imperio Romano. Este monumento une la Montaña de Zaguán con “Cartago” a modo de “Cordón umbilical”(Ayachi T.,2000).

Entre estos 132 Km hay 17 Km de construcciones aéreas la mayor parte en el valle del Oued Miliane (Fernández, 1983; Rakob, 1983). El resto se halla en la depresión de Mannouba y en la zona comprendida entre Ariana y Cartago.

La canalización principal es la de Zaghouan-Cartago con un total de 90,43Km y una pendiente que varía entre 0.1‰ y 9,58‰ (Raïs, 1990). La longitud del acueducto se corresponde con una distancia, en línea recta, de 56 km. Esta diferencia no solamente es debida a los problemas topográficos generados por el relieve de las montañas y por la naturaleza accidentada del terreno sino también a causa de obstáculos naturales como son el gran lago situado al este de Túnez, y el lago salado “Sabkhet Essijoumi” cuyo nivel de agua cambia según la época del año y que deben ser sorteados por el acueducto.

A partir de Zaghouan, el acueducto transcurre de forma subterránea y a veces a nivel de suelo, forzado a rodear las colinas para poder mantener una inclinación constante de acuerdo con los principios que rigen la dinámica de un canal construido a cielo abierto. En el valle del Oued Miliane, más o menos a la altura de Uthina se hace aéreo. Aquí las arcadas llegan a tener más de 20 m de altura. La canalización atraviesa el Oued Miliane por una serie de arcadas, actualmente destruida en parte, que tenía dos niveles y que llegaba hasta un máximo de 33,65 metros de altura. Posteriormente rodea Sebkhet Essijoumi por el oeste y por el norte hasta llegar a Cartago atravesando el valle de Ariana y la Soukra sobre altas arcadas todavía visibles en el siglo 18, pero que actualmente se encuentran en estado ruinoso.

Existe un segundo tramo de acueducto, de 33,65 km de largo, que captaba el agua de la fuente de Aïn Juggar . y se unía la anterior en Mograne, ciudad situada a 6 Km de Zaghouan . Este tramo fue construido, según Calmagiraud, Rais et al 1990, con el propósito de aumentar el caudal de agua que circulaba por el acueducto.

### **I.2.2. FUENTES DE APROVISIONAMIENTO:**

1- El ninfeo romano denominado Templo de las aguas en Zaghouan:

Constituye la parte más espectacular del acueducto, junto con el tramo de conducto aéreo que atraviese el valle del Oued Miliane. El ninfeo recoge las aguas de un abundante manantial y representa el punto de partida del acueducto. Recibe también el aporte de algunos cursos de agua secundarios procedentes de los alrededores. Por otra parte, un descubrimiento muy reciente ha permitido detectar la existencia de una construcción situada un poco más abajo del ninfeo, el tipo y los materiales de construcción son diferentes de los que caracterizan el ninfeo principal y puede relacionarse con una primitiva captación de agua..

2- El ninfeo de Aïn Juggar:(región del Fahs)

Es el segundo ninfeo en importancia y estaba destinado a aumentar el caudal de agua que era transportada a Cartago (Calmagirand, Rais et al, 1990). Rodeado por una fortaleza Bizantina, está explotado actualmente por SONED, y tiene unas características absolutamente diferentes del anterior.

3- El ninfeo de Aïn Jour:

Se trata de un tercer tipo de captación y está situado a algunos kilómetros al norte de Zaghouan.

### I.2.3. LAS CISTERNAS:

Las termas de Antonino situadas al sur-oeste de Cartago eran abastecidas a partir de un depósito de agua alimentado por el acueducto de Cartago. Esta cisterna es una de las más grandes de la Antigüedad, esta excavada bajo la colina de Borj Djedid a 160 m al nor-oeste del eje transversal de las termas de Antonino. Tiene una superficie de (39 x 154,60 m) con un volumen de 25-30.000 m<sup>3</sup> de agua (Friedrich Racob, 1979), garantizando así el funcionamiento de las termas. Esta cisterna se encuentra a 24,4 m sobre el nivel del mar y a 20 m por encima de las termas. Actualmente esta cisterna se encuentra dentro de los terrenos del palacio presidencial.

No hay ninguna información cierta que puede asegurar la alimentación de las cisternas del Malga por el acueducto Romano (Fredrich, 1979, Lesine, 1969, Calamagirand, Rais et al, 1990).

## I.3. ASPECTOS ARQUITECTÓNICOS DEL MONUMENTOS:

### I.3.1. ESTRUCTURA GENERAL:

La parte elevada del acueducto en el vallé de Oued Miliane, tiene desde la salida del conducto subterráneo hasta la misma orilla del río, una longitud de 1115,2 m de los cuales 146 están derruidos o desaparecidos. Para su estudio ha sido dividido en 4 zonas según muestra el esquema (Fig. I.1) y de acuerdo con las características presentadas en la Tabla I.1.

Tabla I.1. Número de pilares y longitud correspondientes a cada sección.

Sección	Número de pilares	Longitud total (m)
1	1-28	187,45
2	29-51	152,14
3	52-62	70,34
4	63-134	705,27

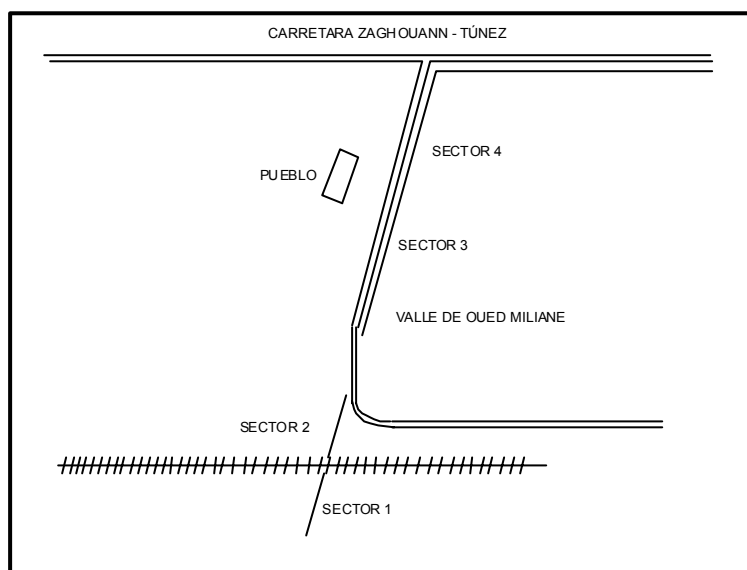
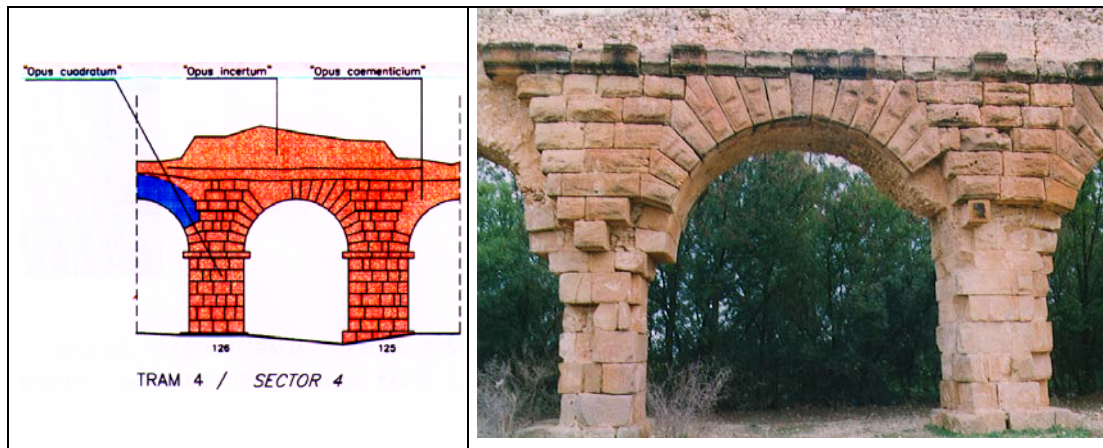


Fig. I.1: esquema de los sectores de estudio en la zona de Oued Miliane.

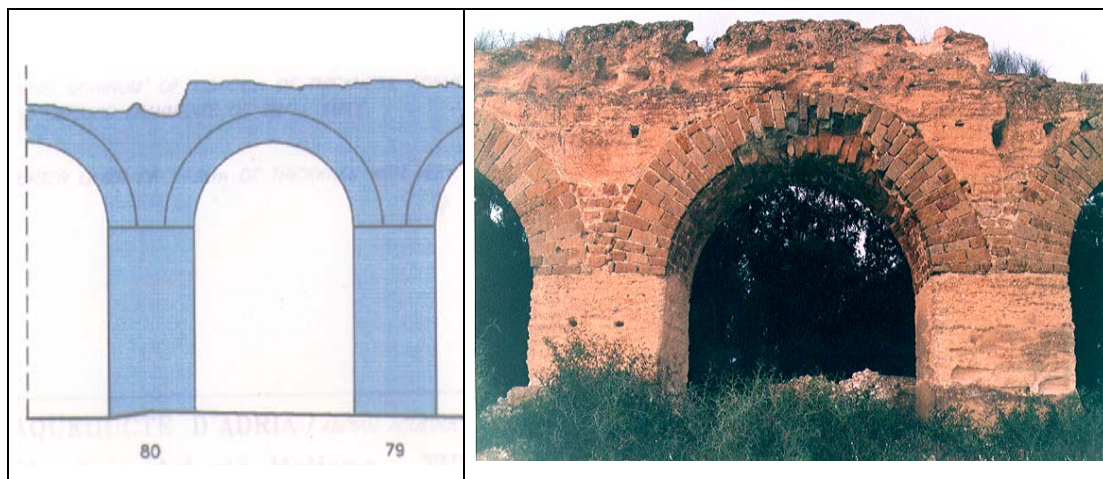
De acuerdo con su estado actual, fruto de la primera construcción romana y de las sucesivas restauraciones, hemos definido las siguientes tipologías (Fig.I.2):

Tipo A	Presente en la sección 1, 2, 3	De origen romano sin modificaciones posteriores, <i>Opus caementitium</i> , <i>Opus testaceum</i> , <i>Opus quadratum</i> .
Tipo B	Presente principalmente en la sección 4	Reparaciones o nuevas construcciones de época medieval. Interior de los arcos con <i>Opus incertum</i> .
Tipo C	Presente en la sección 4	Origen romano parcialmente con reparaciones medievales.

Tipo A:



Tipo B:



Tipo C:

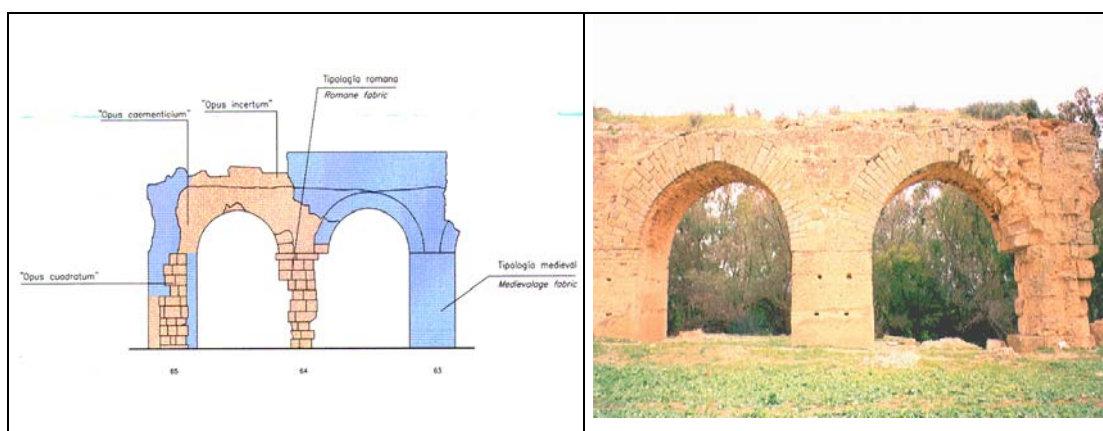


Fig.1.2: Tipología general de las arcadas en el Oued Miliane.



La parte más importante del acueducto es de época romana. En orden a posibles restauraciones, es de interés indicar las diversas técnicas constructivas empleadas en su construcción.

Las principales técnicas romanas detectadas en el acueducto son (Fig.I.3):

- Opus quadratum: bloques de piedra (sillares)
- Opus caementicium: hormigón
- Opus incertum: mampostería
- Opus signinum: mortero hidráulico en el recubrimiento interno del canal (specus)

Las técnicas constructivas usadas en las sucesivas restauraciones históricas consisten generalmente en la reconstrucción de las partes colapsadas, cabe decir que todas estas técnicas son muy diferentes de las originales romanas, de manera que las partes reconstruidas se identifican fácilmente. Así, podemos observar que se han utilizado básicamente dos sistemas constructivos. De una parte, se han utilizado sillares de dimensiones mucho más pequeños que las originales romanas, de otra parte, el hormigón de cal ha sido puesto en obra con encofrado de madera. Este método sirvió para construir los pilares, mientras que para la construcción de las arcadas y las bóvedas se usaron piezas de piedra.

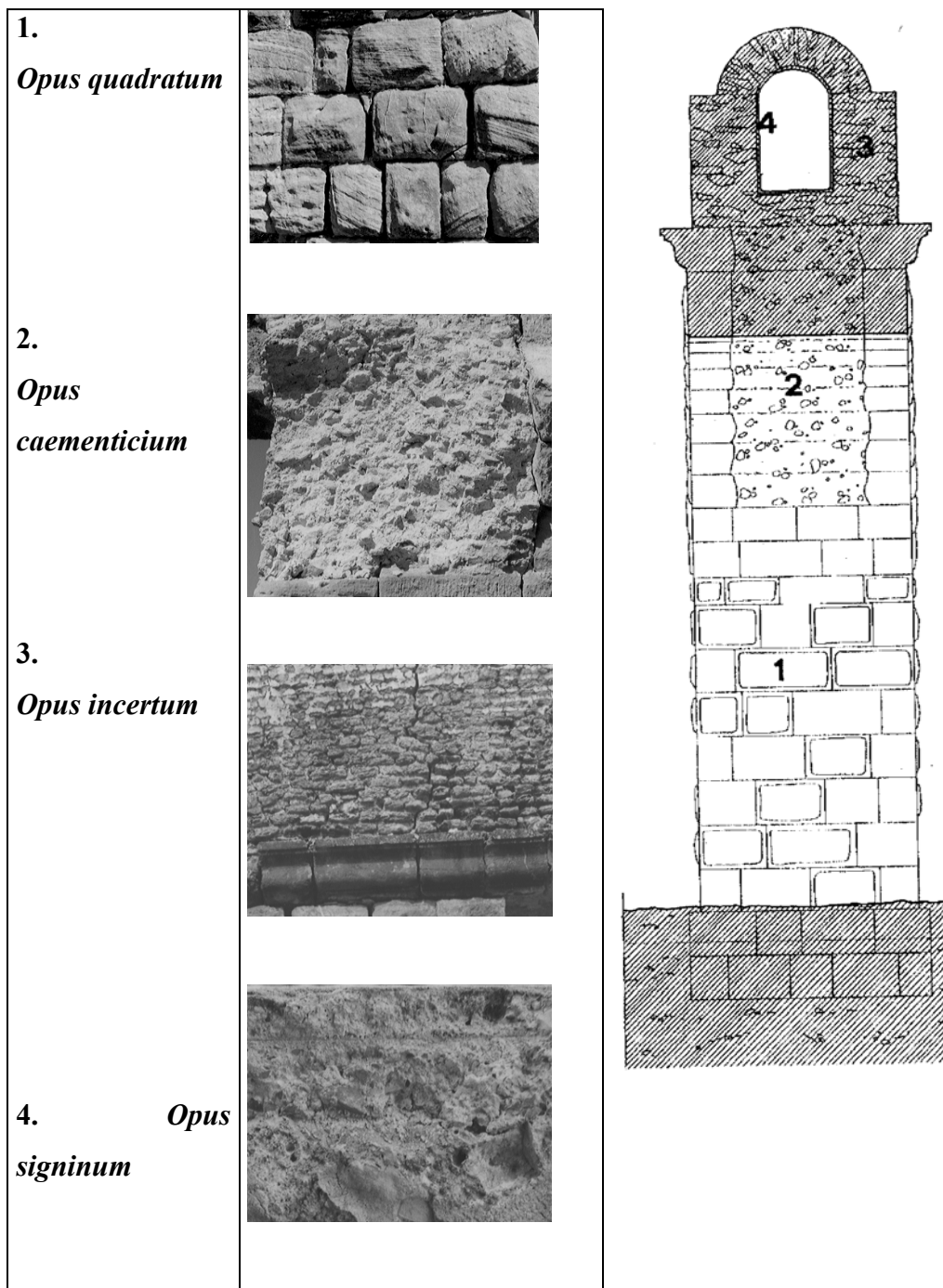


Fig. I.3: Las técnicas constructivas Romanas en la zona del Oued Miliane.

## I.4. LOS MATERIALES USADOS EN LA CONSTRUCCIÓN:

La construcción del acueducto implicó un importante transporte de materiales, esencialmente los sillares de arenisca, el mortero de cal y la carga del mortero (trozos de arenisca y de calizas). Estos materiales fueron extraídos en zonas cercanas al acueducto donde se han podido identificar las canteras romanas de las areniscas y de las calizas utilizadas en la construcción.

En la zona del Oued Miliane, los principales materiales empleados fueron:

### a- Rocas naturales:

a.1. Las areniscas miocénicas: Representan el material más ampliamente utilizado en la construcción del acueducto en la zona del Oued Miliane. Con este material fueron confeccionados los sillares que conforman los pilares y los arcos.

a.2. Calizas del Eoceno: Fueron usadas en la construcción de las paredes del conducto de agua (*Opus signinum*), además fueron usadas como carga para el hormigón. La utilización de este material empezó probablemente más tarde que la de los otros materiales, posiblemente en la fase final de la construcción del acueducto

### b- Morteros:

b.1. Mortero de junta de los sillares tipo *opus quadratum*: Es un mortero de cal aérea con árido muy fino formado por cuarzo, aparece en capas muy delgadas y compactas que presenta costras y numerales de reacción cal-árido.

b.2. Mortero de relleno tipo *opus caementicium*: de naturaleza muy similar al mortero anterior, es de cal aérea con árido silícico. Presenta una carga de fragmentos irregulares de arenisca y caliza.

b.3. Mortero de cal aérea tipo *opus incertum*: con árido silícico y con fragmentos irregulares de diversas rocas.

b.4. Mortero puzolánico tipo *opus signinum*: en el que el árido está formado por fragmentos de cerámica sigilata.