



UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE MURCIA

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO
Programa de Doctorado en Tecnologías de la
Computación e Ingeniería Ambiental

El empleo de la piedra Tabaire en la Arquitectura
Militar de Cartagena (España). Impacto ambiental,
caracterización y estado de conservación

Autora:

Ana Lasheras Estrella

Directores:

Dr. D. Jesús Herminio Alcañiz Martínez

Dra. Dña. María Isabel Pérez Millán

Dr. D. José Antonio Martínez López

Murcia, abril de 2021



UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE MURCIA

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO
Programa de Doctorado en Tecnologías de la
Computación e Ingeniería Ambiental

El empleo de la piedra Tabaire en la Arquitectura
Militar de Cartagena (España). Impacto ambiental,
caracterización y estado de conservación

Autora:

Ana Lasheras Estrella

Directores:

Dr. D. Jesús Herminio Alcañiz Martínez

Dra. Dña. María Isabel Pérez Millán

Dr. D. José Antonio Martínez López

Murcia, abril de 2021



AUTORIZACIÓN DEL DIRECTOR DE LA TESIS PARA SU PRESENTACIÓN

El Dr. D. Jesús H. Alcañiz Martínez, la Dra. Dña. María Isabel Pérez Millán y el Dr. D. José Antonio Martínez López como Directores de la Tesis Doctoral titulada “El empleo de la piedra Tabaire en la Arquitectura Militar de Cartagena (España). Impacto ambiental, caracterización y estado de conservación” realizada por Dña. Ana Lasheras Estrella en el Programa de Doctorado en Tecnologías de la Computación e Ingeniería Ambiental, **autorizan su presentación a trámite** dado que reúne las condiciones necesarias para su defensa.

Lo que firmamos, para dar cumplimiento al Real Decreto 99/2011 de 28 de enero, en Murcia a 12 de abril de 2021.

Dr. D. J.H. Alcañiz Martínez

Dra. Dña. M. I. Pérez Millán

Dr. D. J. A. Martínez López

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincera gratitud a todas aquellas personas que con su apoyo incondicional han ido guiándome a lo largo de este camino recorrido.

A todas las instituciones y empresas que han colaborado, aportando datos e información clave para el desarrollo de la presente Tesis Doctoral.

A la Universidad Católica San Antonio de Murcia, agradecer su gran apuesta por la investigación, y en especial la confianza depositada en mí.

A la Dirección General de Bienes Culturales de la Región de Murcia y a Cartagena Puerto de Culturas, por autorizar la inspección de cada una de las construcciones objeto de estudio.

A mis Directores de Tesis, Jesús Herminio Alcañiz Martínez, María Isabel Pérez Millán y José Antonio Martínez López, por su paciencia, esfuerzo y dedicación a este proyecto que un día emprendimos juntos.

A Rubén Megías Nicolás, por su trabajo y acompañamiento en las numerosas visitas a Cartagena. A María Josefa Yáñez Gascón, por su disponibilidad y dedicación. A José Enrique Segura Valera, por la ayuda brindada en el estudio fotogramétrico.

A Miguel Ángel Climent, Carlos Antón y Guillem de Vera, por la colaboración en la elaboración de los ensayos de rotura a compresión para los distintos grados de humedad de la piedra.

A mis compañeros de Departamento, por las charlas tan amenas y los cafés tan necesarios.

A Marcos Lanzón Torres, gran docente y mejor persona, sin él no habría habido un comienzo en mi carrera investigadora.

A mis padres, José Gaspar y María Jesús, y a mis hermanos, María, Marta, José y Make, por su apoyo incondicional.

A Adrián, por motivarme y ayudarme a conseguir mis sueños. A Gonzalo, mi vida.

A todos ellos, muchas gracias.

“Nuestra recompensa se encuentra en el esfuerzo y no en el resultado. Un esfuerzo total es una victoria completa”

Mahatma Gandhi (1869-1948)

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	17
ÍNDICE DE TABLAS	25
ÍNDICE DE ECUACIONES	29
RESUMEN.....	31
ABSTRACT	33
1.1. Antecedentes.....	37
1.2. Objetivos de la investigación	44
1.3. Plan de trabajo y metodología.....	45
1.4. Estructura y contenido de la investigación.....	46
II. CONTEXTUALIZACIÓN	49
2.1. Evolución topográfica de la ciudad	51
2.2. Contexto Geológico.....	56
2.3. Las canteras de Tabaire de Cartagena.....	57
2.3.1. Localización.....	57
2.3.2. Principales características y sistemas de extracción	59
2.4. El uso del Tabaire en la Arquitectura Militar de Cartagena. Extracción, transporte y puesta en obra	61
III. ESTADO DEL ARTE.....	81
3.1. Principales lesiones que afectan a la piedra	83
3.2. Propiedades físicas de las rocas	100
3.2.1. Sistema poroso de las rocas.....	100
3.2.2. Transporte de fluidos: comportamiento hídrico.....	102
3.2.3. Propiedades mecánicas.....	104
IV. METODOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO DE LAS MUESTRAS	107
4.1. SELECCIÓN DE MUESTRAS	109
4.1.1. Herramientas para la toma de muestras	111
4.2. Ensayos “in situ”	123
4.2.1. Velocidad de Ultrasonidos.....	123
4.2.2. Esclerómetro Schmidt	127

4.2.3. Impacto Ambiental mediante la estimación del vaciado de canteras	129
4.3. Ensayos de laboratorio	134
4.3.1. Preparación de la muestra de ensayo	135
4.3.2. Determinación de la densidad aparente	138
4.3.3. Técnicas No Destructivas (NDT).....	139
4.3.4. Estudio mineralógico y petrográfico	140
4.3.5. Caracterización petrofísica de la piedra.....	147
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DEL ESTUDIO “IN SITU”	159
5.1. Formas de alteración.....	161
5.1.1. Alteraciones cromáticas y depósitos.....	162
5.1.2. Pérdidas de sección y grietas.....	163
5.1.3. Presencia de organismos vivos y modificaciones antrópicas	165
5.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS “IN SITU”	166
5.2.1. Velocidad de ultrasonidos	166
5.2.3. Relación entre velocidad de ultrasonidos y esclerómetro Schmidt.....	169
5.2.4. Estimación del vaciado de canteras.....	172
5.2.5. Un caso concreto: el Arsenal.....	179
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DEL ESTUDIO MINERALÓGICO Y PETROGRÁFICO	185
6.1. Muestras analizadas.....	187
6.2. Difracción de Rayos X (DRX).....	187
6.3. Porosimetría de intrusión de mercurio (MIP)	194
6.4. Lámina Delgada	197
6.5. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	201
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DEL ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN PETROFÍSICA.....	205
7.1. Densidad aparente	207
7.2. Determinación de la porosidad abierta al vacío y la porosidad total ...	208
7.3. Determinación de la Absorción de Agua por Capilaridad y la porosidad capilar	210
7.4. Técnicas no destructivas.....	212

7.4.1. Velocidad de ultrasonidos	212
7.4.2. Esclerómetro Schmidt	214
7.5. Determinación de la resistencia a compresión.....	214
7.6. Determinación de la durabilidad por cristalización de sales	220
7.7. Relación entre las distintas variables estudiadas.....	222
7.8. Características de los litotipos de la cantera y su relación con las distintas construcciones objeto de estudio	224
VIII. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	227
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	235

SIGLAS Y ABREVIATURAS

Å: ángstrom

A: anortita

A.G.S: Archivo General de Simancas

A.G.M.A.B: Archivo General de la Marina Álvaro de Bazán

An: anhidrita

ASTM: American Society for Testing and Materials

B: bloedita

C: calcita

D: dolomita

Da: densidad aparente

DRX: Difracción de Rayos X

E: epsomita

ETRS89: Sistema de Referencia Terrestre Europeo 1989

eV: electronvoltio

F: fuerza a rotura

g: gramos

G: yeso

GCS: estación de tierra

GPS: Sistema de Posicionamiento Global

GS: grados de saturación

H: halita

I: illita

K: caolinita

L: distancia entre transductores

M: montmorillonita

m₀: masa inicial

M₀: masa seca

M_D: masa final

m_r: masa final saturada

MIP: Porosimetría de Intrusión de Mercurio

MLA: Muestras de laboratorio Muralla Púnica

MLB: Muestras de laboratorio Castillo de la Concepción

MLC: Muestras de laboratorio Casa de la Pólvara
MLCAN: Muestras de laboratorio Cantera original de extracción
MLD: Muestras de laboratorio Real Arsenal de Marina
MLE: Muestras de laboratorio Real Hospital de Marina y Anfiteatro de Autopsias
MLF: Muestras de laboratorio Muralla de Carlos III
MLG: Muestras de laboratorio Cuartel de Antigüones
mm: milímetros
MPa: megapascal
MPD: Mapas, Planos y Dibujos
NC: nícoles cruzados
NDT: Técnicas No Destructivas
NP: nícoles paralelos
O: oeste
Pav: porosidad abierta a vacío
Pc: porosidad capilar conectada
Q: cuarzo
R: índice de rebote
Rc: resistencia a compresión
SEM: Microscopía Electrónica de Barrido
T: thenardita
V: volumen de la probeta
VANT: vehículo aéreo no tripulado
Vp: velocidad de la onda primaria
Vs: velocidad de la onda secundaria
Y: módulo de Young
 ΔM_r : variación de masa de la roca
 μm : micrómetro
 σ : desviación estándar
 θ : ángulo de contacto entre el mercurio y la superficie del poro
 2θ : ángulo de difracción
 \bar{x} : media aritmética
 ρ : densidad
UNE: Una Norma Española
 v : velocidad de propagación de la onda ultrasónica

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Mapa físico de España. Incluidos los principales topónimos estratégicos para Cartagena.	40
Figura 1.2. Localización de la Diputación de Canteras respecto a la ciudad de Cartagena.	42
Figura 1.3. A: vista general de la plaza de toros y detalle de la piedra Tabaire. B: Teatro Romano y sillares de Tabaire localizados en su interior	43
Figura 2.1. Hipótesis de restitución de la topografía de Qart Hadasht	52
Figura 2.2. Carthago Nova en el s. I d. C. (Archivo Proyecto Arqueotopos).....	53
Figura 2.3. Puerto de Cartagena. 02/07/1670. Anónimo. A.G.S., MPD XXVI-65 (Guerra y Marina, Leg. 2338).....	55
Figura 2.4. Plano del Puerto y Bahía de Cartagena y su cercanía demostrando los Castillos y Baterías ejecutadas, las que no lo son y las proyectadas 13/12/1741. E. Panón. A.G.S., MPD IX-78 (Guerra Moderna, Leg. 3713).....	55
Figura 2.5. Esquema tectónico de la Región de Murcia	56
Figura 2.6. Localización Canteras de Tabaire, vista satélite	58
Figura 2.7. Localización de los sectores de la Cantera	60
Figura 2.8. Centro de Interpretación de la Muralla Púnica, detalle de los sillares de Tabaire.....	64
Figura 2.9. Sillería de Tabaire en el Teatro Romano de Cartagena.....	65
Figura 2.10. Exterior del Castillo de la Concepción.....	66
Figura 2.11. Arquería de piedra Tabaire en la Casa de la Pólvora.....	67
Figura 2.12. Vista y perfiles sobre la línea N.O. Plano de una parte de la Casa del Rey (Casa de la Pólvora), y del Proyecto de un Tinglado aprobado situado al este, que debe servir para poner a Cubierto los Pertrechos de Artillería de esta Plaza de Cartagena (1752).....	67

Figura 2. 13. Arcos compuestos por sillería de Tabaire en el Real Hospital de Marina	68
Figura 2.14. Detalle bloques de Tabaire en el Real Hospital de Marina y en el Real Arsenal de Marina.....	69
Figura 2.15. Plano de Parte del Proyecto del Arsenal de Cartagena. Feringán y Cortés, Sebastián, 1700-1762, Cartagena, 7 de septiembre de 1757	70
Figura 2.16. Plano del Arsenal de Cartagena con las obras realizadas en el último trimestre de 1763	70
Figura 2.17. Estado de materiales empleados en la construcción del Arsenal de Cartagena de siglo XVIII. Número de plano P01129	71
Figura 2.18. Perfil y Vista interior sobre la Línea del Plano General números 9. 10. de la Teneduría general acabada en el Arsenal de Cartagena. Realizado por D. Sebastián Feringán Cortés.....	72
Figura 2.19. Perfil sobre la línea R.Q. del plano del Muelle de la Dársena y demuestra su construcción, posición y fondo (1749). Feringán y Cortés, Sebastián, 1700-1762	73
Figura 2.20. Muralla De Carlos III, cuesta del Batel	74
Figura 2.21. Sillería de Tabaire en la Muralla De Carlos III, rambla de Benipila... 75	
Figura 2.22. Plano General del Cuartel en el qual se manifiesta de Color Amarillo el proyecto de la Capilla en el Parage. A. Seidel, Fernando. 7 de octubre de 1785.....	78
Figura 2.23. Localización de las construcciones con presencia de Tabaire	80
Figura 4.1. Ubicación de las construcciones objeto de estudio	110
Figura 4.2. Herramientas para la recogida de muestras	111
Figura 4.3. MLA1, MLA2, MLA3, MLA4 y MLA5	114
Figura 4.4. MLB1, MLB3 y MLB2.....	115
Figura 4.5. MLC1, MLC2 y MLC3.....	116
Figura 4.6. MLD1, MLD2, MLD3, MLD4 y MLD5	118

Figura 4.7. MLE1 y MLE2.....	119
Figura 4.8. MLF1, MLF2 y MLF3.....	120
Figura 4.9. MLG1, MLG2 y MLG3.....	121
Figura 4.10. MLCAN2, MLCAN3, MLCAN4 y MLCAN5.....	122
Figura 4.11. Formas de colocación de los palpadores, siendo T: emisor y R: receptor. a) Transmisión directa b) Transmisión semidirecta c) Transmisión indirecta o de superficie.....	124
Figura 4.12. Método empleado para la medición mediante transmisión indirecta. Gráfica relación distancia de los transductores (eje abscisas) y tiempo de transmisión (eje ordenadas).....	125
Figura 4.13. Equipo de ultrasonidos. Medida “in situ” de la velocidad de ultrasonidos.....	127
Figura 4. 14. Esclerómetro Schmidt. Toma de medidas “in situ”.....	128
Figura 4. 15. Curvas índice de rebote-resistencia característica.....	128
Fig. 4.16. GPS Leica GS08 Plus. DJI Phantom 3.....	130
Fig. 4.17. Softwares empleados para el tratamiento de datos.....	130
Fig. 4.18. Puesta a punto del vehículo aéreo no tripulado previo a la realización del trabajo fotogramétrico en altura y de la estación de tierra (GCS).....	132
Fig. 4.19. Planificación de vuelo automatizado para fotogrametría aérea.....	133
Figura 4.20. Frente norte de la cantera original de extracción.....	135
Figura 4.21. Corte de uno de los bloques de Tabaire. Proceso de extracción de las probetas testigo.....	136
Figura 4.22. Detalle del proceso de extracción de probetas testigo. Matriz de la roca visible tras el corte, donde pueden apreciarse restos fósiles.....	136
Figura 4.23. Probetas testigo extraídas de MLCAN1.....	137
Figura 4.24. Pie de rey y balanza para la determinación de la densidad aparente de la piedra.....	138
Figura 4.25. Equipo de medición de ultrasonidos y osciloscopio.....	139

Figura 4.26. Transductores para Vp con EKO gel. Transductores para Vs con gel SWC Couplant – Panametrics	140
Figura 4.27. Equipo empleado para la técnica DRX del Centro de Investigación de la Universidad de Alicante	141
Figura 4.28. Preparación de la muestra con un mortero de ágata. Molino Planetario de bolas modelo Pulverisette 6.....	142
Figura 4.29. Preparación de las muestras para ser analizadas a través de MIP... ..	144
Figura 4.30. Proceso de preparación de muestras. Láminas Delgadas.....	145
Figura 4.31. Equipo de SEM empleado, de la Universidad Católica San Antonio de Murcia.....	146
Figura 4.32. Recipientes herméticos para el equilibrado	150
Figura 4.33. Proceso de secado de las probetas.....	152
Figura 4.34. Muestra preparada para el ensayo de capilaridad. Gráfica relación raíz cuadrada del tiempo (\sqrt{t}) (eje abscisas) y coeficiente de absorción capilar (C) (eje ordenadas).....	153
Figura 4.35. Capilaridad manual. Detalle frente capilar.....	154
Figura 4.36. Báscula y muestra en el ensayo de capilaridad en continuo. Detalle de la parte inferior de la báscula	154
Figura 4.37. Campana y bomba de vacío para el ensayo de porosidad abierta a vacío	156
Figura 4.38. Probetas seleccionadas. Muestras sumergidas en disolución de sulfato sódico	158
Figura 5.1. Ejemplo para la designación de las lesiones documentadas.....	163
Figura 5.2. A: Detalle de pátina en D I O 0,70 160. B: Presencia de costra negra en F E N 2,20 102. C: Eflorescencias (D I S 0,10 160). D: Presencia de eflorescencias en la superficie del sillar (G E S 1,10 426). E: Distintas tonalidades en un sillar en A I O 0,10 663. F: Presencia de sales en D I O 0,60 160	162

Figura 5.3. A: Delaminado en E S 1,50 253. B: Rounding en A I O 0,50 663. C: Desintegración granular en arena en A I O 0,30 663. D: Sillares donde se aprecian procesos de alveolización en B I S 0,50 326. E: Pérdidas de mortero de rejuntado en F E O 2,15 102.....	163
Figura 5.4. A: Pérdidas de mortero de rejuntado en B I S 0,40 326. B: Deplacado y pérdida de sección en D I O 0,60 160. C: Desprendimiento en arista de pilar en D I S 0,30 160. D: Deplacado alveolar y pérdida de sección en G E S 0,10 160. E: Presencia de grietas y fisuras en un sillar en A I S 0 663	164
Figura 5.5. A: Colonización por plantas superiores en F E N/O 5,20 102. B: Presencia de organismos en F E O 3,20 102. C: Presencia de biodeterioro en F E N/O 0,30 102. D: Vista general presencia de biodeterioro en G E N 0 426. E: Detalle G E N 0 426.F: F E N 1,50 102. F: Perforación y grafiti en F E N 150 102. G: Inserción de elementos de arriostramiento en C I S 2,10 183	165
Figura 5.6. Baluarte N°7 Rambla Benipila, Muralla de Carlos III. Gráficas de velocidad de propagación de onda ultrasónica e índice de rebote en función de la cota	169
Figura 5.7. Castillo de la Concepción. Gráficas de velocidad de propagación de onda ultrasónica e índice de rebote en función de la cota.....	170
Figura 5.8. Relación entre la velocidad de propagación de onda ultrasónica (V_p) y el índice de rebote (R) en: la Muralla de Carlos III y el Castillo de la Concepción	170
Figura 5.9. Jefatura Industrial, Arsenal. Gráfica de velocidad de propagación de onda ultrasónica en función de la cota.....	171
Figura 5.10. Cantera. Gráfica índice de rebote en función de la cota	171
Figura 5.11. Ventana emergente para la clasificación de puntos del terreno y selección de la nube densa en función de las medidas de exclusión	173
Figura 5.12. Malla tridimensional generada por métodos automáticos y que sirve de base de cálculo para la determinación de volúmenes de tierras desplazados.	174
Figura 5.13. Desviación entre zonas de mayor repercusión en altura y su localización en la comparación entre el modelo hipotético y el actual. Escalas de color RGB.....	177

Figura 5.14. Desviación entre zonas de mayor repercusión en altura	178
Figura 5.15. Modelo tridimensional del estado actual de la cantera.....	178
Figura 5.16. Volumen de Tabaire empleado en la construcción del Arsenal (1749-1779)	180
Figura 5.17. Mano de obra media diaria en la cantera (1749-1779).....	182
Figura 5.18. Cantidad media de carros y carretas empleados a diario (1749-1779)	182
Figura 6.1. Difractogramas, de arriba abajo: MLA4 MLA5 MLB3 y MLC3	190
Figura 6.2. Difractogramas, de arriba abajo: MLD1, MLD2, MLD3 y MLD5	191
Figura 6.3. Difractogramas, de arriba abajo: MLE2, MLF3, MLG3 y MLCAN1... 192	
Figura 6.4. Difractogramas, de arriba abajo: MLCAN2, MLCAN3, MLCAN4 y MLCAN5	193
Figura 6.5. A: MLA4, B: MLA5, C: MLB3, D: MLC1, E: MLD1, F: MLD4, G: MLE2, H: MLF3.....	195
Figura 6.6. I: MLG3, J: MLCAN1, K: MLCAN2, L: MLCAN3, M: MLCAN4, N: MLCAN5	196
Figura 6.7. NC y NP. A: MLA5, B: MLB3, C: MLC1.....	198
Figura 6.8. NP y NC. D: MLD4, E: MLE2, F: MLF3.....	199
Figura 6.9. NP y NC. G: MLG3, H: MLCAN1	200
Figura 6.10. Microfotografías de barrido electrónico. A: MLA1 (X2000), se aprecia la matriz calcarenítica de la roca. B: MLA2 (X2000), presencia de halita, calcita y filosilicatos. C: MLA3 (X1000). D: MLB1 (X1320). E: MLB2 (X2000). F: MLC1 (X1000), se aprecia la interfase entre la matriz calcarenítica y la recristalización de calcita.....	201
Figura 6.11. Microfotografías de barrido electrónico. G: MLC2 (X500). H: MLD4 (X100). I: MLE1. J: MLF1 (X2000). K: MLF2 (X200). L: MLG1 (X1000).....	202
Figura 6.12. Microfotografías de barrido electrónico. M: MLG2 (X500). N: MLCAN1 (X500). O: MLCAN2. P: MLCAN3. Q: MLCAN4. R: MLCAN5	203

Figura 7.1. Diagrama de cajas y bigotes de densidad aparente.....	208
Figura 7.2. Diagrama de cajas y bigotes de porosidad abierta	209
Figura 7.3. Diagrama de cajas y bigotes de porosidad total.....	209
Figura 7.4. Diagrama de cajas y bigotes de absorción capilar.....	210
Figura 7.5. Gráfico comparativo de capilaridad	211
Figura 7.6. Diagrama de cajas y bigotes de porosidad capilar.....	211
Figura 7.7. Diagrama de cajas y bigotes de velocidad primaria.....	212
Figura 7.8. Diagrama de cajas y bigotes de velocidad secundaria	213
Figura 7. 9. Curvas de secado de las probetas.....	215
Figura 7.10. Diagrama de cajas y bigotes de resistencia a compresión obtenida al 0% de contenido de humedad	216
Figura 7.11. Diagrama de cajas y bigotes de resistencia a compresión obtenida al 50% de contenido de humedad.....	217
Figura 7.12. Diagrama de cajas y bigotes de resistencia a compresión obtenida al 100% de contenido de humedad.....	217
Figura 7.13. Gráfica comparativa de los valores de resistencia a compresión	217
Figura 7.14. Ajuste exponencial entre las variables resistencia a compresión y contenido de humedad.....	218
Figura 7.15. Estudio fotográfico del ensayo de durabilidad	221
Figura 7.16. Relación entre la porosidad total y la velocidad de onda ultrasónica. Relación entre la porosidad total y la resistencia a compresión.....	222
Figura 7.17. Relación entre la porosidad total y la pérdida de masa. Relación entre la velocidad de onda ultrasónica (V_P) y la pérdida de masa (ΔM)	222
Figura 7.18. Relación entre propiedades mecánicas estáticas (V_P) y las dinámicas (R_c)	223
Figura 7.19. Estudio visual comparativo “in situ” entre las distintas construcciones y los litotipos de cantera.....	225

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Datos catastrales de las canteras de Tabaire.....	58
Tabla 2.2. Tipología, cronología y periodo histórico de los inmuebles que componen el patrimonio militar de Cartagena	62
Tabla 2.3. Construcciones con presencia de Tabaire	79
Tabla 3.1. Características principales de las grietas.....	84
Tabla 3.2. Características principales de las deformaciones	84
Tabla 3.3. Características principales de las ampollas, estadillo y delaminación ..	85
Tabla 3.4. Características principales de la desintegración y fragmentación	86
Tabla 3.5. Características principales de la disyunción de películas y descamación.....	87
Tabla 3.6. Características principales de la alveolización y erosión.....	88
Tabla 3.7. Características principales de los daños de origen mecánico	89
Tabla 3.8. Características principales del <i>microkarst</i> y perforación.....	90
Tabla 3.9. Características principales del <i>pitting</i>	91
Tabla 3.10. Características principales de los depósitos	91
Tabla 3.11. Características principales de la costra.....	92
Tabla 3.12. Características principales de la cromatización	93
Tabla 3.13. Características principales de las eflorescencias y el brillo superficial	94
Tabla 3.14. Características principales de la incrustación	95
Tabla 3.15. Características principales de la película, <i>graffiti</i> y pátina.....	96
Tabla 3.16. Características principales de las algas	97
Tabla 3.17. Características principales de los líquenes y plantas	98
Tabla 3.18. Características principales del musgo y los hongos	99
Tabla 3.19. Clasificación de la porosidad en función de su tamaño	101

Tabla 4.1. Relación de muestras tomadas y su cota respecto al suelo	112
Tabla 4.2. Descripción de las muestras tomadas en la Muralla Púnica, ubicación y estado de conservación.....	113
Tabla 4.3. Descripción de las muestras recogidas en el Castillo de la Concepción, ubicación y estado de conservación	115
Tabla 4.4. Descripción de las muestras recogidas en la Casa de la Pólvora, ubicación y estado de conservación	116
Tabla 4.5. Descripción de las muestras recogidas en el Arsenal, ubicación y estado de conservación.....	117
Tabla 4.6. Descripción de las muestras recogidas en el Hospital de Marina, ubicación y estado de conservación	119
Tabla 4.7. Descripción de las muestras recogidas en la Muralla de Carlos III, ubicación y estado de conservación	120
Tabla 4.8. Descripción de las muestras recogidas en el Cuartel de Antigüones, ubicación y estado de conservación.	121
Tabla 4.9. Descripción de las muestras recogidas en la cantera	122
Tabla 4.10. Datos de la toma fotográfica aérea.....	133
Tabla 4.11. Relación de testigos extraídos de los bloques de cantera	137
Tabla 4.12. Relación de las probetas testigo en función de los distintos grados de humedad.....	148
Tabla 4.13. Probetas seleccionadas para determinar las curvas de secado	151
Tabla 4.14. Probetas seleccionadas para la realización del ensayo de durabilidad.....	157
Tabla 5.1. Principales patologías detectadas en las construcciones objeto de estudio.....	166
Tabla 5.2. Velocidades de propagación de onda ultrasónica obtenidas “in situ”.	167
Tabla 5.3. Velocidades de propagación de onda ultrasónica en función de la cota.....	167

Tabla 5.4. Valores de índice de rebote obtenidos en campo.	168
Tabla 5.5. Valores de índice de rebote obtenidos en la cantera.....	168
Tabla 5.6. Estacionamientos GPS y sus coordenadas X, Y y Z.....	175
Tabla 5.7 Volumen de tierras calculado empleando trigonometría sobre prismas irregulares	176
Tabla 5.8. Volumen de Tabaire empleado en la construcción del Real Arsenal de Marina (1749-1779).....	179
Tabla 5.9. Número de canteros y carretas empleadas para el transporte del Tabaire al Real Arsenal de Marina (1749-1779).....	181
Tabla 6.1. Relación de muestras tomadas y ensayos realizados.....	188
Tabla 6.2. Minerales y sales detectadas en las muestras de las construcciones estudiadas por DRX.....	189
Tabla 6.3. Resumen resultados obtenidos por Porosimetría de Mercurio	194
Tabla 6.4. Descripción petrográfica de las muestras estudiadas con Lámina Delgada.....	197
Tabla 7.1. Valores medios de densidad aparente	207
Tabla 7.2. Valores medios de porosidad abierta al vacío y porosidad total	208
Tabla 7.3. Valores medios de capilaridad y porosidad capilar.....	210
Tabla 7.4. Valores medios de velocidad de ultrasonidos.....	212
Tabla 7.5. Resumen resultados de R en laboratorio.....	214
Tabla 7.6. Parámetros obtenidos del ajuste del modelo a las curvas de secado...	215
Tabla 7.7. Parámetros obtenidos del ajuste del modelo a las curvas de secado...	216
Tabla 7.8. Valores medios de resistencia a compresión	216
Tabla 7.9. Resumen resultados obtenidos del ensayo de cristalización de sales..	220
Tabla 7.10. Principales características de los litotipos estudiados.....	224

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 4.1. Velocidad del pulso.....	124
Ecuación 4.2. Módulo de Young.....	125
Ecuación 4.3. Densidad aparente.....	138
Ecuación 4.4. Presión ejercida sobre el mercurio.....	142
Ecuación 4.5. Resistencia a compresión.....	147
Ecuación 4.6. Grado de saturación de agua.....	148
Ecuación 4.7. Masa en equilibrio.....	151
Ecuación 4.8. Capacidad de absorción de agua	151
Ecuación 4.9. Masa seca.....	151
Ecuación 4.10. Coeficiente de absorción capilar	153
Ecuación 4.11. Porosidad capilar conectada.....	153
Ecuación 4.12. Porosidad abierta a vacío.....	155
Ecuación 4.13. Pérdida de masa de la roca.....	157

RESUMEN

La privilegiada posición geográfica de Cartagena, situada en el sureste peninsular, frente a las costas del norte de África y en las cercanías del Estrecho de Gibraltar, junto a las condiciones topográficas excepcionales de su puerto, han determinado que a lo largo de los dos últimos milenios diversas culturas mediterráneas hayan ocupado su territorio.

Desde la prehistoria, se han empleado los recursos materiales en el entorno de las poblaciones, para satisfacer diferentes necesidades: construcción, supervivencia y protección. En cuanto a los materiales de construcción, la explotación de canteras constituye una importante fuente de abastecimiento de las ciudades. Cada región tiene su propia roca sedimentaria, la de Cartagena es el Tabaire. Se trata de una calcarenita extraída de la Diputación de Canteras, situada en las proximidades de Cartagena, Murcia (España). Una parte importante del patrimonio arqueológico y arquitectónico de la ciudad se construyó total o parcialmente con este material. Su explotación suministró bloques para la construcción de los principales elementos arquitectónicos de la ciudad, de diversas tipologías. Dado el carácter defensivo de la ciudad, la presencia de la piedra Tabaire en las construcciones militares será relevante.

Se hace, por tanto, imprescindible, contribuir al conocimiento de tan significativo material de construcción, mediante la realización de un estudio exhaustivo, para llegar a entender la evolución constructiva de la ciudad a través de la piedra Tabaire, conociendo su pasado, determinando el impacto ambiental que dicho material supuso para la construcción de una parte importante del patrimonio monumental de Cartagena, así como el estado actual de conservación que presenta, mediante su caracterización, el análisis de su durabilidad y las distintas lesiones que le afectan.

En cuanto al impacto ambiental, se analizan las canteras originales de extracción, su localización, así como principales características y sistemas de extracción empleados. Además, mediante un levantamiento fotogramétrico, realizado a través de un vehículo aéreo no tripulado se realiza una estimación del volumen total de piedra extraída. A su vez, a través de las fuentes documentales existentes se determina el volumen de Tabaire que fue empleado en la construcción del Real Arsenal de Marina, el número de canteros que trabajaron en su extracción

y la cantidad de carros y carretas que fueron necesarios para transportar la piedra a pie de obra.

Una vez se presentan las construcciones que forman parte de la Arquitectura Militar, se analiza el uso del Tabaire, su transporte hasta las obras de construcción, así como las diferentes técnicas empleadas para su aplicación y puesta en obra.

Para conocer su estado de conservación actual, se realiza un estudio "in situ", tanto de la cantera original de extracción, como de las diferentes construcciones militares en las que se advierte su presencia, a través de un estudio profundo de las lesiones que presenta la piedra y la realización de los ensayos no destructivos de ultrasonidos y esclerómetro Schmidt.

Asimismo, se realiza el estudio mineralógico y petrográfico de las muestras extraídas en cada uno de los inmuebles objeto de estudio, mediante los ensayos de Difracción de Rayos X (DRX), Porosimetría de Mercurio (MIP), Lámina Delgada y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

Por último, se procede a la caracterización petrofísica de las probetas testigo, extraídas de unos bloques tomados de la cantera original, determinando los parámetros de densidad aparente, capilaridad, porosidad abierta al vacío, velocidad de ultrasonidos, resistencia a compresión y durabilidad mediante la cristalización de sales. Los resultados de este análisis a lo largo del tiempo contribuyen a la futura conservación y puesta en valor del Tabaire.

Palabras clave: Canteras, Tabaire, Arquitectura Militar, impacto ambiental, caracterización, estado de conservación.

ABSTRACT

The privileged geographic position of Cartagena, located in the Southeast peninsular facing the coasts of North Africa and near the Strait of Gibraltar and the exceptional topographical conditions of its port, have facilitated different Mediterranean cultures to have occupied their territory over the last several millennia.

Since Prehistory, material resources have been used in the environment of populations, to meet different needs: survival, protection and construction. As for construction materials, quarrying is an important source of supply for cities. Each region has its own sedimentary rock, Cartagena's one is Tabaire, which is extracted from Canteras, located in the vicinity of Cartagena (Spain). An important part of the archaeological and architectural heritage of the city was built totally or partially with this material. Its exploitation supplies blocks for the construction of the main architectural elements of the city, of different types, including military constructions. Due to the defensive character of the city, the presence of tabaire stone in these constructions is going to be valuable.

It is, therefore, essential to contribute to the knowledge of such significant construction material, carrying out an exhaustive study, to understand the construction evolution of the city through the Tabaire stone, knowing its past, determining its environmental impact of an important part of the monumental heritage construction, as the current state of conservation that it presents, through its characterization, the analysis of its durability and the different building pathologies which have been found.

As far as environmental impact is concerned, the original extraction quarries, their location, as well as the main characteristics and extraction systems used are analyzed. Likewise, by means of a photogrammetric survey, carried out through an unmanned aerial vehicle, an estimate of the total volume of stone extracted is made. In turn, the existing documentary sources determine the volume of Tabaire that was used in the construction of the Real Arsenal de Marina, the number of stonemasons who worked on its extraction and the number of carts and wagons which were necessary to transport the stone on site.

Once the constructions which are part of the military architecture are presented, the use of the Tabaire, its transport to the construction sites, and the different techniques used for its application and implementation are analyzed.

In order to know its current state of conservation, an on-site study is carried out, not only the original quarry of extraction, but also, the different military constructions in which its presence is noticed, through an in-depth study of the injuries that the stone presents and conducting non-destructive ultrasonic and Schmidt sclerometer tests.

Likewise, the mineralogical and petrographic study of the samples extracted in each of the properties under study is realized, by means of the X-ray Diffraction (XRD), Mercury Intrusion Porosimetry (MIP), Thin Section and Scanning Electron Microscopy (SEM).

Finally, we proceed to the petrophysical characterization of the control specimens, extracted from some blocks taken from the original quarry, determining the parameters of bulk density, capillarity, open porosity, ultrasound waves, resistance to compression and durability with respect to salt crystallization. The results of this analysis over time contribute to its future conservation and enhancement.

Keywords: Quarries, Tabaire, Military Architecture, environmental impact, characterization, state of conservation.

I. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS

I. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS

En este capítulo se introduce y justifica la presente Tesis Doctoral. Para ello, se exponen los antecedentes que dan lugar a la misma, se plantean los objetivos de la investigación, el plan de trabajo y la metodología a seguir. Por último, se muestra la estructura general y los distintos capítulos que componen el trabajo.

1.1. ANTECEDENTES

El tema que se desarrolla en esta Tesis Doctoral se define a lo largo de un extenso proceso de investigación, que da comienzo con la incorporación de la doctoranda al Departamento de Ciencias Politécnicas de la Universidad Católica San Antonio de Murcia en febrero de 2014, habiendo obtenido un contrato predoctoral para la formación del personal investigador dentro del plan propio de investigación de la UCAM 2013-2014. La presente investigación comienza su desarrollo en la línea de Doctorado en Urbanismo, según el RD 1393/2007 y posteriormente es adaptada al programa de doctorado en Tecnologías de la Computación e Ingeniería Ambiental, regulado por el RD 99/2011.

El trabajo de doctorado continúa con la línea de investigación que ya se inició durante el curso 2010-2011, donde desde un entorno privilegiado y movida por la fascinación hacia el patrimonio construido, la doctoranda finaliza sus estudios de Arquitectura Técnica en la Universidad Politécnica de Cartagena, con el trabajo final de carrera titulado: *“Estudio de las lesiones que afectan al mortero de revestimiento del antiguo Hospital de Marina de Cartagena”* (Lasheras, 2011), bajo la dirección del Dr. D. Marcos Lanzón Torres. Un trabajo de investigación interdisciplinar en el que se analizó un edificio de gran interés social e histórico para la ciudad de Cartagena, el antiguo Hospital de Marina, conocido anteriormente como Real Hospital de Marina.

El antiguo Hospital de Marina de Cartagena de estilo neoclásico forma parte del conjunto militar edificado en Cartagena en el siglo XVIII bajo el patrocinio de Fernando VI (1762).

Este edificio fue rehabilitado como sede de la Universidad Politécnica de Cartagena en 1999 (Soler, 1999). Construido en sillería de piedra Tabaire, una roca

sedimentaria fósil de enorme interés arqueológico y arquitectónico en la ciudad de Cartagena.

Tras la intervención realizada, el soporte de Tabaire había sido regularizado a través de un enfoscado de cemento y, posteriormente, aplicado un mortero de revestimiento en todo el paramento para su protección.

A los pocos años de su reparación, el mortero de revestimiento mostraba un deficiente estado, procediéndose a su sustitución en 2010.

En este proyecto se analizaron individualmente cada uno de los materiales que componen el paramento de la edificación objeto de estudio (soporte de Tabaire, enfoscado de cemento y mortero) y se evaluó su estado de conservación.

En dicha investigación se realizó una iniciación al diagnóstico de los materiales de construcción mediante técnicas instrumentales. Las técnicas utilizadas fueron: Análisis Termogravimétrico (ATG), Fluorescencia de Rayos X (FRX), Difracción de Rayos X (DRX) y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). Además, se estudió el mortero colocado en 2010, determinando su resistencia a flexión y compresión (según norma UNE EN 1015-11. *Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido*), capilaridad, absorción de agua y vulnerabilidad frente a eflorescencias de sulfato sódico (Burke, 1991).

Para llevar a cabo la documentación gráfica de la edificación se realizó un estudio fotográfico detallado del revestimiento, determinando las lesiones que presentaba y tomando muestras tanto del mismo, como del enfoscado de cemento y el soporte de Tabaire.

Asimismo, la metodología diseñada para la designación de las distintas fotografías realizadas resultó de gran utilidad, ya que una vez determinadas las muestras a tomar, las referencias de las fotografías simplificaron en gran medida el trabajo de campo.

A través del estudio fotográfico realizado se mostró el deficiente estado en que se encontraba el mortero colocado en 1999, tras once años desde su puesta en obra, dando una visión general de las más zonas conflictivas.

Dependiendo de la orientación y posición en el edificio, se advirtieron numerosas zonas con eflorescencias y algunas con pátinas biológicas, como

consecuencia del grado de humedad general que presentaba la construcción y que fue confirmada a través de Microscopía Electrónica de Barrido.

Tras el estudio realizado se concluyó que la reparación con mortero de cal llevada a cabo en 1999 no resultó adecuada para la conservación de la fachada.

A la vista de los resultados obtenidos se advirtió el problema añadido que supone la piedra Tabaire en cualquier intervención de consolidación de la fachada, al tratarse de un material calcarenítico con propiedades heterogéneas y elevada porosidad, que, a su vez, supone una dificultad añadida en la colocación eficaz de morteros de revestimiento.

Los principales resultados obtenidos durante la realización de dicho trabajo final de carrera fueron presentados en el *XVIII Congreso Internacional de Restauración y Conservación de Bienes Culturales*, celebrado en Granada del 9 al 11 de noviembre de 2011 (Lasheras y Lanzón, 2011).

Dada la monumentalidad del Tabaire, su enorme interés arqueológico y arquitectónico, y su extendido uso, desde la misma fundación de la ciudad hasta principios del siglo XX, se decide, una vez valorado el estado de la cuestión con los directores de Tesis, continuar con la línea de investigación iniciada y centrar la Tesis Doctoral en el estudio de la aplicación de la piedra Tabaire en una arquitectura concreta, la Militar.

La piedra Tabaire ha sido empleada en la construcción de una parte muy importante del patrimonio arquitectónico de la Cartagena, representando la Arquitectura Militar un porcentaje muy significativo, dada la envergadura de sus construcciones, su función defensiva y logística y su importancia patrimonial, al ser considerados Bienes de Interés Cultural por su propia definición. En primer lugar, el 22 de abril de 1949 se promulgó el Decreto de protección de los castillos españoles (BOE 5-5-1949). Más tarde, en 1985, se aplica la Ley 16/1985 del Patrimonio Histórico Español, que define la categoría de Bien de Interés Cultural (B.I.C.) como figura de máxima protección legal, a todos los castillos de España: Disposición adicional 2ª de la Ley 16/85.

La privilegiada posición geográfica de la ciudad de Cartagena, situada al sureste peninsular, junto con las condiciones geográficas de su puerto, han favorecido que, a lo largo de los últimos milenios, numerosas civilizaciones mediterráneas hayan ocupado su territorio (Marín, 1997).



Figura 1.1. Mapa físico de España. Incluidos los principales topónimos estratégicos para Cartagena. Fuente: elaboración propia

De todas las evidencias materiales que cada una de estas culturas ha dejado, destacan el gran número de fortificaciones conservadas en la actualidad en la ciudad y en su entorno (Iniesta y Martínez, 2002).

Cartagena cuenta con un importante número de construcciones militares, fruto de un complejo sistema defensivo, desarrollado a lo largo de los siglos. Representa una parte muy importante de su patrimonio construido y hace de ella un referente para el conocimiento del origen y evolución de la Arquitectura Militar y sus tipologías en la costa mediterránea.

La actividad portuaria de la ciudad y la defensa ante posibles ataques o invasiones del enemigo, llevaron a la construcción de un gran número de construcciones militares, siendo necesario aplicar los conocimientos científicos y tecnológicos más avanzados de cada época, para resolver los desafíos que se plantean en la construcción de estas edificaciones.

Hasta fechas bastantes recientes los estudios de la Arquitectura Militar de Cartagena, habían sido abordados principalmente desde un punto de vista histórico. Este hecho es lógico, si pensamos que hasta su abandono estas

edificaciones habían desempeñado un papel estratégico en la defensa nacional y, por tanto, su accesibilidad, el uso de planos, descripciones, etc., eran restringidas (Martínez, 2008).

Uno de los campos de investigación, que hoy día despierta mayor interés, se centra en el ámbito de la historia de la construcción, en el estudio de los materiales empleados (Peñalver, 2011) y, más concretamente, en el análisis del impacto ambiental que se deriva del proceso constructivo (Spairani, 2016).

Para determinar dicho impacto se hace necesario evaluar la dimensión medioambiental de los materiales de construcción, tratando de cuantificar el peso de sus impactos durante todo su ciclo de vida. Por tanto, resulta imprescindible definir las principales etapas del ciclo de vida de los materiales de construcción, comenzando por la extracción de materias primas o transformación en productos, posteriormente el transporte y la puesta en obra, acotando el periodo de uso, la posible demolición o deconstrucción, y, por último, la valorización o el depósito de residuos (Mercader et al., 2016).

Los ingenieros militares, responsables del diseño y la construcción de las distintas fortificaciones en cada período histórico han sido conscientes de que el empleo de los materiales en las obras responde a diversos factores, entre los que destacan: los avances tecnológicos de cada momento, los medios económicos, la resistencia y durabilidad de los materiales de construcción seleccionados, así como la rapidez precisada para concluir la ejecución de las obras.

Desde la Prehistoria, el ser humano ha aprovechado los recursos materiales de los que disponía en su entorno, para satisfacer distintas necesidades: supervivencia, protección y construcción. En cuanto a los materiales de construcción, la explotación de las canteras supone una importante fuente de abastecimiento de las ciudades.

La piedra era empleada por los micénicos para la construcción de fuertes murallas que protegieran sus ciudades. A su vez, los romanos comienzan a trabajar el sillar para construcciones megalíticas, fortalezas y muros toscos, consiguiendo un efecto de fuerza y firmeza para el agresor (Belda y Ferrándiz, 2012).

De entre todas las rocas sedimentarias, las areniscas han sido las más utilizadas en la construcción tradicional, principalmente debido a la disponibilidad

en las proximidades de la obra y la facilidad para el labrado (García de Miguel, 2008).

Cada región tiene su propia roca sedimentaria. La de Cartagena es el Tabaire, una calcarenita. Se trata de una roca intermedia entre las calizas y las areniscas, aunque texturalmente y en su aspecto guardan una mayor similitud con las areniscas.

Se denomina Tabaire a la piedra sedimentaria extraída de las canteras situadas en la Diputación de Canteras. Esta población, situada a unos 4 Km al oeste de Cartagena (España), debe su nombre a la existencia de un importante afloramiento rocoso formado durante el Mioceno, compuesto fundamentalmente por depósitos sedimentarios de color amarillento (Lanzón y Piñero, 2012).

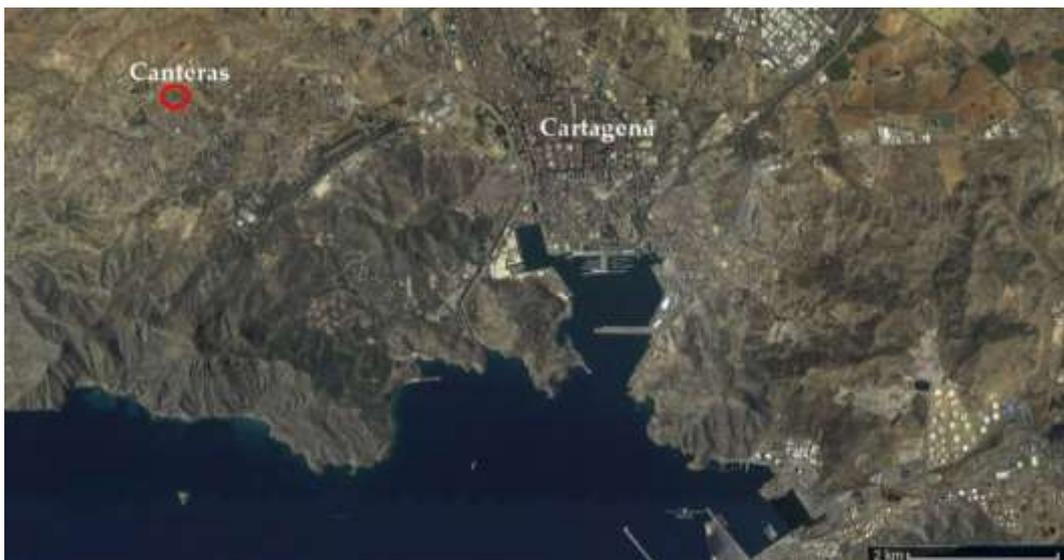


Figura 1.2. Localización de la Diputación de Canteras respecto a la ciudad de Cartagena. Fuente: elaboración propia

Las canteras de Tabaire fueron declaradas Bien de Interés Cultural, con categoría de sitio histórico en 1993, mediante el Decreto 24/2001, de 9 de marzo de 2001, publicado en el BORM n° 65, el 20 de marzo de 2001.

El frente de cantera, en los tajos de la zona central, de más de 400 metros de longitud, 100 de ancho y hasta 25 de alto, nos da una idea de los millones de toneladas de piedra que salieron de ahí (Ortega, 2016).

Gran parte del patrimonio arqueológico y arquitectónico de la ciudad se construyó total o parcialmente con este material. Su explotación suministró bloques para la edificación de las construcciones más notables de Cartagena. Podemos encontrarlo en construcciones de enorme valor histórico y cultural, como son el Teatro Romano (s. I a.C) y la plaza de toros (s. XIX), la más antigua de la Región de Murcia, asentada sobre el Anfiteatro romano, que se encuentra actualmente en proceso de restauración (Figura 1.3).



Figura 1.3. A: vista general de la plaza de toros (izquierda) y detalle de la piedra Tabaire (derecha). B: Teatro Romano (izquierda) y sillares de Tabaire localizados en su interior (derecha). Fuente: elaboración propia

El empleo de este material de construcción, a lo largo de más de 2000 años, se evidencia tanto en las canteras originales de extracción, donde se encuentran visibles las marcas realizadas por los canteros durante su extracción, como en los propios inmuebles que se conservan en la ciudad de Cartagena y su entorno,

perteneciendo todos ellos a una variada tipología constructiva, incluyendo la Arquitectura Militar.

Dado el alcance de la piedra Tabaire en la ciudad de Cartagena y su extendido uso, se hace, por tanto, necesario, contribuir al conocimiento de tan significativo material de construcción, mediante la realización de un estudio exhaustivo, para llegar a entender la evolución constructiva de la ciudad a través del Tabaire. Conociendo su pasado, estudiando el impacto ambiental que la extracción de dicho material supuso para la construcción de una parte importante del patrimonio monumental de Cartagena, valorando el estado actual de conservación en el que se encuentra, analizando su durabilidad y las distintas lesiones que le afectan. Los resultados de dicho análisis a lo largo del tiempo nos van a ayudar a contribuir a su futura conservación.

1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo general de la presente Tesis consiste en analizar el empleo de la piedra Tabaire en la Arquitectura Militar de Cartagena.

Para conseguirlo se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Sobre Cartagena y su entorno:
 - Analizar la evolución topográfica de la ciudad y su contexto geológico.
 - Estudiar las canteras originales de extracción.
- Sobre la Arquitectura Militar de Cartagena:
 - Concretar las diferentes construcciones que componen el patrimonio militar de Cartagena.
 - Identificar la presencia de la piedra Tabaire en su construcción.
 - Examinar los procesos constructivos y los métodos empleados por los ingenieros militares para su construcción.
 - Potenciar su valor patrimonial y cultural.
- Sobre la piedra Tabaire:
 - Considerar su dimensión medioambiental, desde la extracción, hasta el transporte y posterior puesta en obra.
 - Detallar las características geométricas actuales de la excavación de Canteras.
 - Desarrollar la caracterización mineralógica, petrográfica y petrofísica.

- Determinar su durabilidad por cristalización de sales.
- Analizar la influencia de distintos grados de saturación en la piedra sobre su resistencia mecánica.
- Estudiar el estado de conservación, mediante la identificación de los procesos de deterioro que le afectan.
- Contribuir a su divulgación y futura puesta en valor, evidenciando su valor social, histórico, científico, técnico y cultural.

1.3. PLAN DE TRABAJO Y METODOLOGÍA

Para lograr los objetivos indicados en el apartado anterior, se ha establecido un plan de trabajo, que se divide en tres etapas, cada una de ellas se desarrolla con una metodología concreta.

La primera etapa supone analizar el contexto histórico, geológico y la evolución topográfica de Cartagena. Asimismo, se procede al estudio del origen y evolución de la piedra Tabaire y las distintas técnicas constructivas desarrolladas para su empleo en la Arquitectura Militar. Por último, se analizan las canteras originales de extracción y se realiza la estimación volumétrica del vaciado.

La segunda etapa se fundamenta en el estudio del estado actual de conservación de la piedra Tabaire. Para ello se procede a la caracterización de la piedra, cuyo estudio resulta clave en el proceso investigador. Supone la visita a cada uno de los inmuebles objeto de estudio y a la cantera original de extracción, la realización de los ensayos no destructivos seleccionados y la recogida de las muestras para su posterior análisis en laboratorio mediante distintas técnicas instrumentales. Una vez realizado el proceso de toma de datos, se procede a la discusión de los resultados obtenidos. Además, se realiza el tratamiento estadístico de los datos con la finalidad de determinar aquellos parámetros que resultan de relevante importancia. Mediante el estudio exploratorio, se establecen posibles relaciones que pudieran producirse entre diferentes variables objeto de estudio.

En la tercera y última etapa, se establecen las conclusiones que se derivan del presente estudio, así como las futuras líneas de investigación que se plantean.

1.4. ESTRUCTURA Y CONTENIDO DE LA INVESTIGACIÓN

Valorado el estado de la cuestión, planteados los objetivos de la presente Tesis Doctoral y una vez establecidos el plan de trabajo y la metodología a llevar a cabo, se ha establecido que la investigación esté formada por ocho capítulos.

En el primero de ellos, *Introducción y Justificación de la Tesis*, se desarrollan los principales antecedentes de esta investigación, mediante la aproximación a las distintas fuentes documentales. Se realiza la valoración propia del estado de la cuestión, se definen los objetivos que se pretenden alcanzar con la presente Tesis Doctoral y se establece la metodología y plan de trabajo para conseguir tal fin.

En el segundo capítulo, *Contextualización*, se analizan en primer lugar, la evolución topográfica que con el paso del tiempo ha sufrido la ciudad y el contexto geológico de Cartagena. A continuación, se estudian las canteras originales de extracción, localización, principales características y sistemas de extracción empleados. Por último, una vez se concreta el patrimonio militar de Cartagena, se analiza el uso del Tabaire para su construcción, su transporte a pie de obra, así como las diferentes técnicas empleadas para su aplicación.

En el tercero, *Estado del Arte*, se realiza una revisión del conocimiento actual sobre algunos aspectos abordados en el presente estudio, tomando como referencia diferentes trabajos y artículos, incluidos todos ellos en la bibliografía.

En el cuarto, *Metodología para el tratamiento de las muestras*, se expone, en primer lugar, la metodología seguida en cuanto a la toma de las muestras y su posterior análisis en laboratorio. A continuación, se determina el proceso empleado para la realización de los ensayos no destructivos efectuados “in situ”, así como para la estimación del vaciado de la cantera original de extracción, donde se persigue valorar el impacto ambiental que supuso dicho proceso de explotación.

En el capítulo quinto, *Resultados y Discusión del Estudio “in situ”*, se muestran las principales lesiones que afectan al Tabaire, mediante la exposición de las fotografías más significativas realizadas en el trabajo de campo. Asimismo, se exponen y discuten los resultados obtenidos en los ensayos no destructivos realizados “in situ” y se presentan los resultados obtenidos para la estimación del vaciado de canteras.

En el sexto, *Resultados y Discusión del Estudio Mineralógico y Petrográfico*, se presentan y discuten los resultados obtenidos a través de las técnicas instrumentales de: Difracción de Rayos X (DRX), Porosimetría de Intrusión de Mercurio (MIP), Lámina Delgada y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

En el capítulo séptimo, *Resultados y Discusión del Estudio de Caracterización Petrofísica*, se exponen y discuten los resultados que se derivan del estudio de la piedra Tabaire, en cuanto a las propiedades físicas y mecánicas se refiere.

Por último, en el octavo capítulo, *Conclusiones y futuras líneas de investigación*, se exponen las conclusiones que se derivan de este estudio y se plantean las futuras líneas de investigación propuestas.

II. CONTEXTUALIZACIÓN

II. CONTEXTUALIZACIÓN

En este capítulo se plantean cuatro apartados con el fin de contextualizar la piedra de Tabaire desde diversos puntos de vista, todos ellos necesarios a la hora de obtener un conocimiento general de este material de construcción histórico.

En el primer apartado se estudia la evolución topográfica de la antigua ciudad, desde su fundación hasta nuestros días, todo ello con el objeto de aportar una visión general de la significativa transformación del ámbito territorial que abarca la presente tesis doctoral.

Además, se aborda el contexto geológico en el entorno de la actual ciudad de Cartagena, con especial atención a las zonas donde se localizan las canteras de Tabaire.

A continuación, se desarrolla un apartado dedicado al uso en general de la piedra Tabaire en la ciudad, a través del análisis de las antiguas canteras de extracción, aplicando los siguientes parámetros de estudio: localización, métodos y sistemas de extracción, transporte y puesta en obra.

Por último, el cuarto apartado se centra en el estudio de la aplicación del Tabaire en la Arquitectura Militar de Cartagena.

2.1. EVOLUCIÓN TOPOGRÁFICA DE LA CIUDAD

Cartagena ha sufrido cambios topográficos importantes con el paso del tiempo (Mas, 1986). En la Antigüedad el casco histórico de la ciudad se encontraba custodiado por cinco colinas: Monte Sacro, Despeñaperros, Monte de San José, Monte de la Concepción y Molinete. Estas colinas, en origen, formaban parte de una península sobre la que se localizaba la ciudad (Figura 2.1). Al norte de esta península, se encontraba un mar interior, conocido como el estero, que conectaba directamente con el mar Mediterráneo (Corbalán y León, 2011).

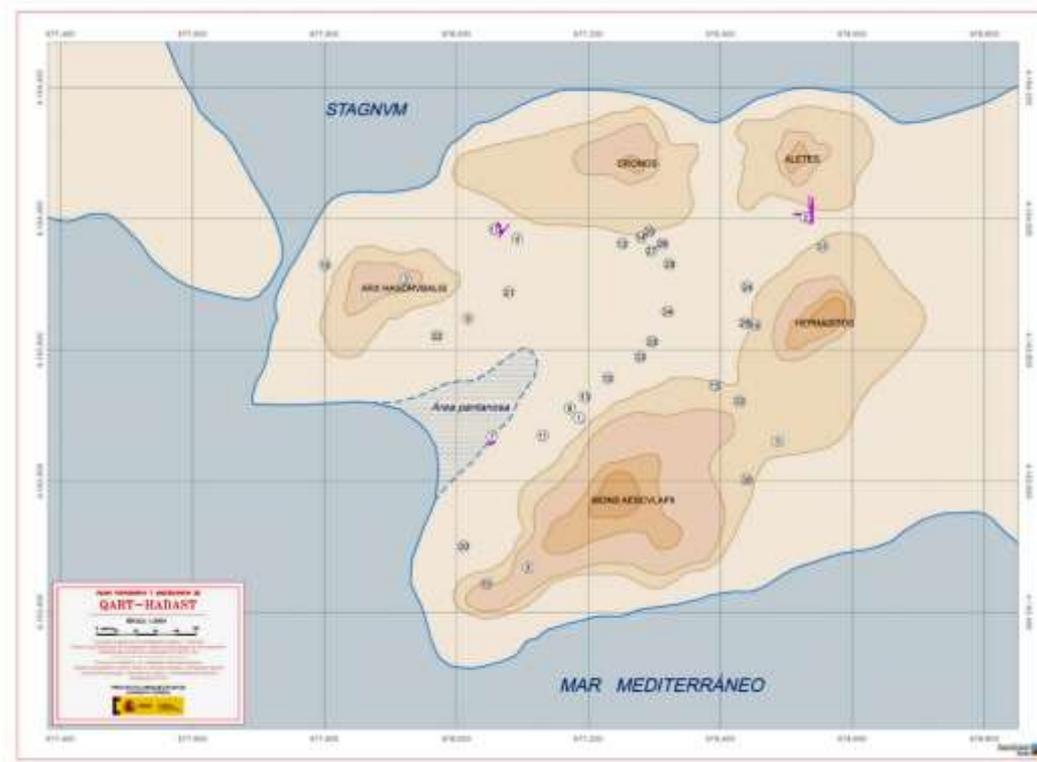


Figura 2.1. Hipótesis de restitución de la topografía de Qart Hadasht. Fuente: Ramallo, 2017

Polibio de Meganópolis ya hablaba de las cinco colinas (Figura 2.1) y el estero, en un texto que escribió cuando visitó la ciudad de Cartagena, en el siglo III a. C. *“Yace Cartagena en el promedio de la costa de España opuesta al viento de África, en un golfo que introduciéndose tierra adentro por espacio de 20 estadios sólo tiene 10 de anchura en la entrada, por esta causa todo él tiene la forma de un puerto. A la misma bocadura está situada una isla que por uno y otro lado deja libre sólo un pasaje estrecho para la entrada. En esta isla vienen a estrellarse las olas del mar, de lo cual resulta que todo el golfo está siempre tranquilo, a menos que soplen por una y otra bocas los vientos de África y alteren las olas. Con todos los demás vientos el puerto está siempre tranquilo por estar rodeado del continente. Desde el fondo del golfo se va elevando una montaña a manera de península sobre la cual está fundada la ciudad, limitada al Oriente y al Mediodía por el mar y al Occidente por un estero que aún toca algún tanto con el septentrión: de manera que el restante espacio que hay desde el estero al mar y une la ciudad con el continente no tiene más de dos estadios. El centro de la ciudad está en hondo. Por el lado de Mediodía tiene una entrada llana viniendo del mar, pero por las partes restantes está rodeada de colinas, dos altas y escabrosas y otras tres mucho más bajas, aunque están llenas de cavernas y malos*

pasos. De éstas la mayor está al Oriente, se extiende hasta el mar y sobre ella se ve el templo de Esculapio. Hacia el Occidente le corresponde otra de igual situación sobre la cual está fundado un magnífico palacio; obra, según Asdrúbal, cuando afectaba la monarquía. Las otras colinas menos altas circundan a la ciudad por el Septentrión. De las tres, la que mira hacia el Oriente se denomina colina de Vulcano; la inmediata a ésta lleva por nombre el de Aletes, quien, por haber hallado las minas de plata, según dicen, logró honores divinos; y la tercera tiene el nombre de Saturno. El estero inmediato al mar se comunica con éste por medio de una obra (canal) que se ha hecho para la comodidad de las gentes de la playa, y sobre la faja de tierra que separa el uno del otro se ha fabricado un puente para transportar por él, en bestias y carros lo necesario para la campaña”.

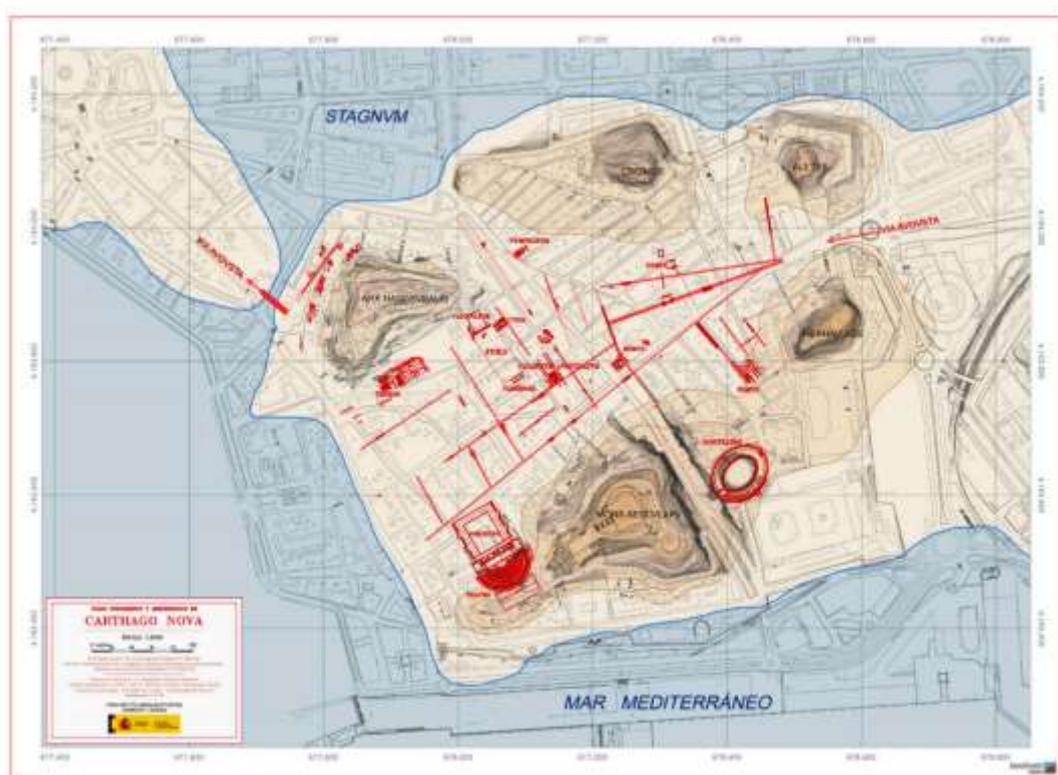


Figura 2.2. Carthago Nova en el s. I d. C. (Archivo Proyecto Arqueotopos). Fuente: Ramallo, 2017

El estero se fue transformando con el paso del tiempo en una laguna interior, conocida como la del Almarjal. La aportación de agua que recibía esta laguna procedía principalmente de la rambla de Benipila y, en menor medida, de la del Hondón, lo que posibilitaba la renovación del agua contenida en la laguna. Con el paso del tiempo se fue cerrando ese canal y la laguna se convirtió en una acumulación de agua estancada, debido al aporte de sedimentos de la rambla de Benipila (Corbalán y León, 2011).

En el siglo XVI, se decidió desecar el Almarjal, debido al gran número de enfermedades causadas por el agua estancada. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos realizados, la rambla se desbordaba y el Almarjal volvía a llenarse cuando se producían intensas lluvias.

Posteriormente, en el siglo XVIII, se construye el canal del Anguililla, encargado de llevar toda el agua del Almarjal hasta el cauce de la rambla de Benipila. No obstante, la zona del Almarjal continuaba siendo una zona pantanosa, puesto que la laguna seguía sin desecarse completamente (Conesa y García, 2003).

La rambla de la Benipila desaguaba en la zona del Mandarache y con el inicio de las obras del Real Arsenal de Marina se decide desviar sus aguas hacia la Algameca, mediante la construcción de un malecón (Matínez Andreu, 2004).

Más tarde, en el siglo XIX, se desarrolla el "Proyecto de Ensanche, Reforma y Saneamiento" de Cartagena. Para realizar la apertura de la calle Gisbert, fue necesario excavar una parte del cerro de la Concepción. Esta tierra excavada fue utilizada, en parte, para rellenar el Almarjal, y lograr así que la laguna se fuera secando.



Figura 2.3. Plano del Puerto de Cartagena. 02/07/1670. Anónimo. A.G.S., MPD XXVI-65 (Guerra y Marina, Leg. 2338). Fuente: Ministerio de Educación, Cultura y Deportes. Archivo General de Simancas

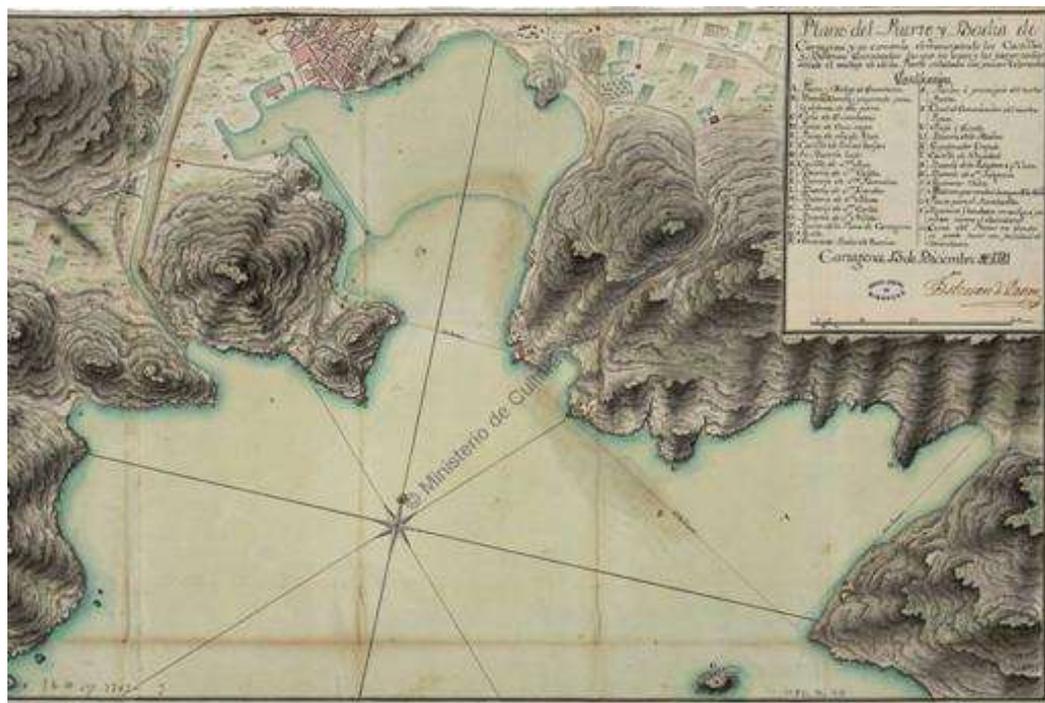


Figura 2.4. Plano del Puerto y Bahía de Cartagena y su cercanía demostrando los Castillos y Baterías ejecutadas, las que no lo son y las proyectadas 13/12/1741. E. Panón. A.G.S., MPD IX-78 (Guerra Moderna, Leg. 3713). Fuente: Ministerio de Educación, Cultura y Deportes. Archivo General de Simancas

2.2. CONTEXTO GEOLÓGICO

Dentro del ámbito de las Cordilleras Béticas se localiza la Región de Murcia, donde se encuentran materiales pertenecientes a las zonas externas, Zona Prebética y Subbética, y las zonas internas, Zona Bética. La Zona Prebética, tiene un carácter paraautóctono y las otras dos, alóctono. De acuerdo con sus peculiaridades estratigráficas y tectónicas, cada una de estas pueden subdividirse, a su vez, en dominios paleogeográficos; así, la Zona Prebética se subdivide, en Prebético Externo, Interno y Meridional; en la Zona Subbética se pueden diferenciar los dominios de Subbético Externo, Medio e Interno; y en la Zona Bética, se distinguen tres complejos tectónicos que son, Nevado-Filábride, Alpujárride y Maláguide (Rodríguez, 2006). En la Región de Murcia están representados todos estos dominios y complejos tectónicos (Figura 2.5).

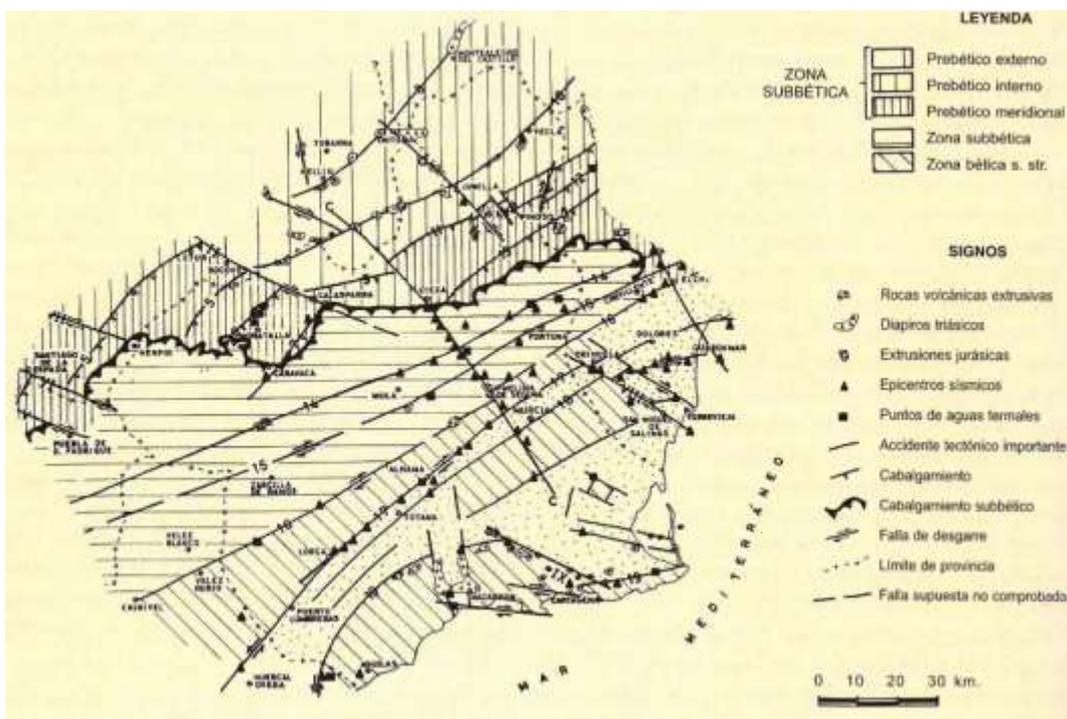


Figura 2.5. Esquema tectónico de la Región de Murcia. Fuente: Rodríguez, 1979

Uno de los distritos mineros más importantes de España y el más representativo de la Región de Murcia por sus yacimientos de hierro, plomo y zinc, lo constituye la Sierra de Cartagena-La Unión. La sierra, que cubre una extensión de unos 50 km² entre esos términos municipales, y representa, además, un excelente museo natural para numerosas disciplinas geológicas, debido a la variada mineralogía de los yacimientos y a la complejidad de la tectónica de la zona. Durante los siglos XIX y XX se desarrolla el periodo de máxima explotación, produciéndose el cierre, prácticamente definitivo, hace escasos años. La intensa actividad minera desarrollada, llegando a extraer anualmente hasta 2,5 millones de toneladas de materiales, ha producido importantes cambios en la topografía. En la actualidad, se conservan numerosas labores y restos de explotaciones antiguas, especialmente romanas. (Arana, 2007).

2.3. LAS CANTERAS DE TABAIRE DE CARTAGENA

Una vez analizado el uso del Tabaire en la ciudad de Cartagena y su aplicación en la Arquitectura Militar, se procede, en los siguientes apartados, a estudiar las canteras en profundidad, analizando sus principales características y el impacto ambiental que supuso su extracción, transporte y puesta en obra.

2.3.1. Localización

Los afloramientos más importantes de Tabaire se localizan a 4,2 km al noroeste del núcleo urbano de Cartagena, en la actual población de Canteras, topónimo relacionado con los enormes frentes de explotación que alcanzan los 30 metros de profundidad en algunos tramos (Soler et al., 2014).

A continuación, se especifican los principales datos catastrales de las canteras de Tabaire (Tabla 2.1) y su localización (Figura 2.6).

Datos del Bien Inmueble	
Referencia catastral	51016A059000330000AW
Localización	Polígono 59, parcela 3. Canteras, Cartagena (Murcia)
Uso principal	Agrario
Superficie	31429 m ²
Coeficiente de participación	100.000%

Tabla 2.1. Datos catastrales de las canteras de Tabaire. Fuente: elaboración propia a través de los datos obtenidos en la Sede Electrónica del Catastro, <https://www1.sedecatastro.gob.es/>



Figura 2.6. Localización Canteras de Tabaire, vista satélite. Fuente: *Google Maps*

2.3.2. Principales características y sistemas de extracción

La formación geológica, que se extiende en las vertientes litorales del Roldán y la Muela, corresponde a una roca sedimentaria fundamentalmente detrítica de origen marino y color amarillento. Se trata de una piedra blanda, de fácil labrado y muy porosa, debido al elevado contenido en dolomías que presenta. Es un material muy permeable y poco compacto lo que favorece su degradación y erosión debido a los efectos climáticos (Ramallo y Arana, 1987).

Los trabajos de prospección realizados y el desarrollo de diferentes excavaciones arqueológicas han permitido diferenciar dos grandes focos de cantería (Antolinos y García, 2003).

El primer sector localizado en el paraje, Loma de Canteras, comprendía hasta hace pocos años ocho frentes de cantera, explotados a cielo abierto, con una extensión de 650 m de longitud y 230 m de anchura, seis de los cuales se encuentran actualmente desaparecidos como consecuencia de la expansión urbana. La explotación se realizó tanto en extensión como en profundidad, siguiendo una estratigrafía de rocas a través de zanjas longitudinales.

La extracción de bloques se realizó en hiladas más o menos horizontales desde la zona más alta del afloramiento, fue creando una serie de escalones o gradas variables entre 0,50 y 1,50 metros de altura, que una vez excavados en profundidad determinaron la formación de grandes frentes de cantera verticales, cuya altura oscilaba entre los 15 y 25 metros (Soler et al, 2014).

El segundo foco, mucho más monumental que el anterior, se subdivide a su vez en tres sectores denominados 1, 2 y 3 (Figura 2.7), que comprenden una longitud de 1,1 km y una anchura de 170 m.

El sector A alcanza los 400 m de longitud, 140 m de anchura y una profundidad máxima de 30 m. En la zona central se ha documentado la presencia de pequeños orificios pareados labrados artificialmente sobre la roca, interpretados como peldaños para el descenso/ascenso de los canteros hasta las áreas extractivas. Este sistema fue uno de los principales sistemas de acceso empleados desde la Antigüedad (Forbes, 1966).

El sector B de las canteras presenta una longitud de poco más de 500 m y una anchura de máxima de 250 m, siendo la altura media de 4 a 5 m. Los frentes

presentan un alto grado de erosión, que podrían ser indicador de su antigüedad. Se aprecia la existencia de bloques abandonados, además de hiladas de bloques a medio extraer.

El sector C alcanza los 130 m de longitud y los 100 de anchura, llegando los frentes verticales a una altura de 14 a 16 m. En algunas zonas pueden apreciarse las huellas de herramientas empleadas en la extracción, principalmente el pico y el martillo de talla.



Figura 2.7. Localización de los sectores de la Cantera. Fuente: Soler Huertas et al., 2014

2.4. EL USO DEL TABAIRE EN LA ARQUITECTURA MILITAR DE CARTAGENA. EXTRACCIÓN, TRANSPORTE Y PUESTA EN OBRA

El tema de investigación que aborda esta Tesis Doctoral sobre el uso del Tabaire en la Arquitectura Militar de Cartagena, aglutina un amplio abanico de temas tangenciales cuyo conjunto es necesario conocer para tener una visión global.

Tras un análisis exhaustivo de la bibliografía, resulta evidente que Cartagena cuenta con un gran número de construcciones militares que han sido objeto de multitud de publicaciones con marcado carácter historicista. Hasta el momento no se ha desarrollado un proyecto que aborde en su totalidad las diversas tipologías constructivas que forman la Arquitectura Militar de Cartagena.

Por tanto, se procede, en primer lugar, al desarrollo de un listado del patrimonio militar de la ciudad, clasificado las construcciones que lo componen de acuerdo con el periodo histórico al que pertenecen.

Las clasificaciones tradicionales pueden estructurarse en tres periodos que guardan coherencia histórica y conceptual entre sí, e incluyen numerosas y variadas tipologías constructivas. El primero corresponde a la Prehistoria e Historia Antigua; el segundo a la Edad Media; y el tercero a la Edad Moderna y Edad Contemporánea, en la que se desarrolla un repertorio de nuevas formas constructivas, como consecuencia del uso generalizado de las armas de pólvora y la evolución de las tácticas militares y sus derivadas logísticas (Rodríguez Nuere, 2014).

En la Tabla 2.2 se recogen las principales fases y construcciones que integran el patrimonio militar de Cartagena, ordenadas cronológicamente, donde se incluye: la tipología, la cronología y el periodo histórico de cada una de ellas.

Una vez presentadas las principales construcciones militares, se procede a analizar una selección de documentos relacionados con los proyectos de construcción de los diferentes inmuebles objeto de estudio, con el objetivo de identificar aquellas edificaciones en las que se emplea el Tabaire para su construcción (Tabla 2.3).

Construcción	Tipología	Cronología	Periodo Histórico
Muralla Púnica	Fortificación	s. III a.C.	Antigüedad
Muralla Romana Republicana	Fortificación	s. II a.C.	
Castillo de la Concepción	Fortificación	s. XIII	Edad Media
Torres costeras	Fortificación	s. XVI	Edad Moderna y Contemporánea
Casa de la Pólvara	Edificio	s. XVI	
Casa del Rey	Edificio	s. XVI	
Muralla de Carlos I	Fortificación	s. XVI	
Muralla de Felipe II	Fortificación	S. XVI	
Baterías de costa (1ª Fase)	Fortificación	s. XVII	
Muralla de Carlos II	Fortificación	s. XVII	
Real Arsenal de Marina	Edificio	s. XVIII	
Baterías de costa (2ª Fase)	Fortificación	s. XVIII	
Real Hospital de Marina y Anfiteatro de Autopsias	Edificio	s. XVIII	
Fuerte de Galeras	Fortificación	s. XVIII	
Fuerte de Moros	Fortificación	s. XVIII	
Fuerte de Atalaya	Fortificación	s. XVIII	
Muralla de Carlos III	Fortificación	s. XVIII	
Real Parque y Maestranza de Artillería	Edificio	s. XVIII	
Cuartel de Presidarios y Esclavos	Edificio	s. XVIII	
Cuartel de Antiguones	Edificio	s. XVIII	
Cuartel de Guardiamarinas	Edificio	s. XVIII-XIX	
Baterías de costa (3ª Fase) (Plan O'Donnell)	Fortificación	s. XIX	
Cuartel Defensivo de Fajardo	Edificio	s. XIX	
Fuerte de San José/ Despeñaperros	Fortificación	s. XIX	
Gobierno Militar	Edificio	s. XIX	
Castillo de San Julián	Fortificación	s. XIX	
Baterías de costa (4ª Fase) (Plan Krupp)	Fortificación	s. XIX	
Baterías de costa (5ª Fase) (Plan Vickers)	Fortificación	s. XX	

Tabla 2.2. Tipología, cronología y periodo histórico del patrimonio militar de Cartagena.
Fuente: elaboración propia

Más adelante, en el capítulo IV, *Metodología para el tratamiento de las muestras*, apartado 4.2.1. *Identificación de las muestras*, se exponen las construcciones en las que el Tabaire se encuentra, en la actualidad, accesible, procediendo a la toma de muestras para su posterior análisis en laboratorio.

Las primeras evidencias del empleo de la piedra Tabaire en la ciudad desde la Qart-Hadast púnica a la Carthago-Nova romana, pasando por las distintas épocas de la Cartagena histórica, ha acompañado la transformación de la ciudad, dejando pruebas materiales de su uso tanto en la arquitectura civil, militar y religiosa más monumental hasta la construcción doméstica urbana y rural más modesta, alternándose momentos de intensa explotación de las canteras con otros de paralización o de escasa actividad, dependiendo siempre del momento económico de la ciudad (Hernández y Antolinos, 2002).

En época prerromana se encuentran los primeros vestigios del empleo del Tabaire, donde tanto las bondades del material, como su facilidad para el labrado y la cercanía de las canteras de extracción determinaron su uso en la construcción de la Muralla Púnica.

En 1987 se hallaron los restos arqueológicos de esta muralla, cuando se realizaban las obras de construcción de un aparcamiento en el patio del antiguo hogar de *La Milagrosa*. La muralla cartaginesa se localizó entre las colinas de San José y Despeñaperros, donde se situaba la puerta de entrada a la ciudad por el istmo. Se trata de un sistema de fortificación de tipo helenístico, compuesto por dos muros paralelos de *opus quadratum* unidos transversalmente por muros de *opus africanum*, que formaban estancias interiores usadas como almacenes, establos y alojamiento para soldados. Su alzado se organizaba en tres alturas, y para su construcción se emplearon bloques de Tabaire en el paramento exterior, y de Tabaire y adobe en el interior. (Calderón, 2015).

Los restos hallados de la muralla tienen una longitud de 30 metros, y en algunos tramos la altura supera los 3 metros. En la actualidad los restos se encuentran conservados y musealizados en el interior del Centro de Interpretación de la Muralla Púnica, donde pueden visitarse (Figura 2.8).

La magnitud constructiva de la fortificación existente permite hacernos una idea de la importancia alcanzada en esta primera fase de explotación, no sólo en

cuanto al módulo de las piezas extraídas, sino también, respecto al volumen de piedra total empleada en su construcción (Soler et al., 2014).



Figura 2.8. Centro de Interpretación de la Muralla Púnica, detalle de los sillares de Tabaire. Fuente: elaboración propia

En época romana el Tabaire se elabora como sillar rectangular y, en algunas ocasiones, ligeramente almohadillado. A pesar de tratarse de un módulo variable, se aprecia una medida estándar de 2x2x4 pies romanos, directamente relacionada con las dos técnicas constructivas mayormente utilizadas en la ciudad, el *opus quadratum* y el *opus vittatum*; estos aparejos se encuentran en la mayoría de los casos asociados a estructura de *opus caementicium*, como en los *aditus* del teatro (Figura 2.9) o en el muro de contención de la plataforma superior del foro (Ramallo y Ruiz, 1998). Asimismo, se utilizó este material en la pavimentación de plazas y en la elaboración de elementos arquitectónicos como: capiteles, fustes, basas y piezas de arquitrabe.



Figura 2.9. Sillería de Tabaire en el Teatro Romano de Cartagena. Fuente: elaboración propia

Dependiendo de la disposición final del sillar, en el trasdós o el intradós del muro, varía su aspecto de terminación. Normalmente la cara más ruda se encuentra en el interior del muro, mientras que la más trabajada es la que se coloca en el trasdós (exterior). El aparejo poligonal no se localiza exclusivamente en edificaciones militares, obras de defensa o muros de contención; sino que también ubica en podios de santuarios (Belda y Ferrándiz, 2012).

Una característica común fue su terminación estucada y pintada, como sugieren los restos de estuco blanco que se encontraron durante los trabajos de excavación, que además de alisar la superficie y enmascarar la baja calidad de la roca, permitió aportar un mayor detalle en su acabado decorativo (Fernández, 2004).

En época romana, los restos existentes en la actualidad ratifican el predominio del Tabaire junto con la caliza gris, como los materiales constructivos más empleados, debido principalmente a la rentabilidad de su explotación, fácil extracción y labrado. Además, su transporte hasta la ciudad no supone un elevado coste (Arana et al., 2003).

Con el paso del tiempo y la llegada de la Edad Media se reduce la explotación de las canteras de Tabaire. La ciudad se concentra en el Catillo de la Concepción, situado en el cerro del mismo nombre, donde únicamente se detecta la presencia del Tabaire en los Aljibes de la Torre del Homenaje (Figura 2.10). Este hecho tiene sentido, ya que, en época Bizantina, el Tapial era el principal sistema constructivo empleado (Eslava, 1984).



Figura 2.10. Exterior del Castillo de la Concepción. Fuente: elaboración propia

Posteriormente, durante el siglo XVI, se continúa con el empleo variable de este material de construcción. Así, lo encontramos en la Casa del Rey y en la Casa de la Pólvara, siendo en ésta última toda la arquería de piedra Tabaire (Figura 2.11).



Figura 2.11. Arquería de piedra Tabaire en la Casa de la Pólvara. Fuente: elaboración propia

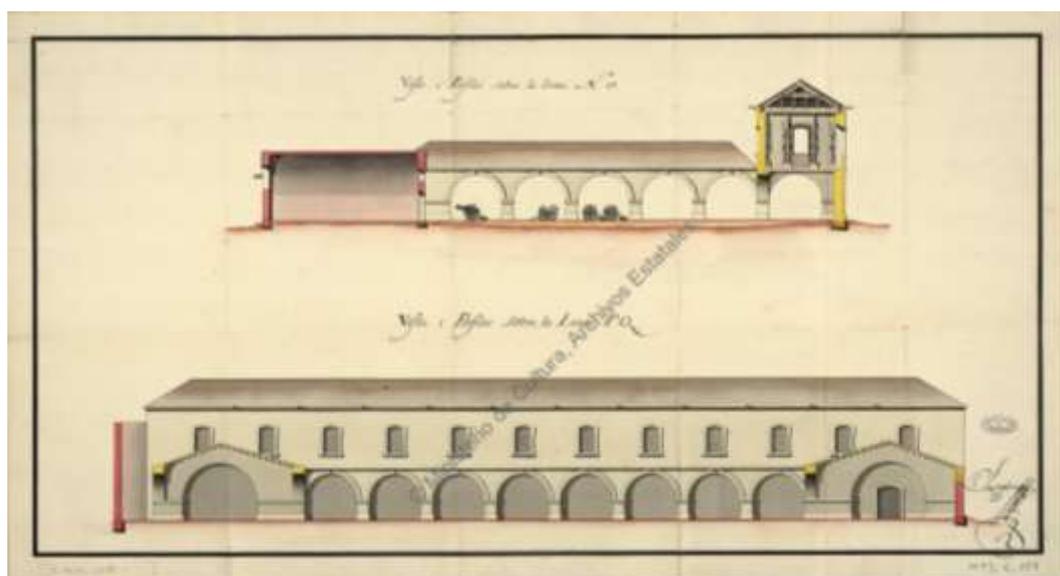


Figura 2.12. Vista y perfiles sobre la línea N.O. Plano de una parte de la Casa del Rey (Casa de la Pólvara), y del Proyecto de un Tinglado aprobado situado al este, que debe servir para poner a Cubierto los Pertrechos de Artillería de esta Plaza de Cartagena (1752). Feringán y Cortés, Sebastián. A.G.S, MPD VI-159. Fuente: Ministerio de Educación, Cultura y Deportes. Archivo General de Simancas

Sin embargo, unos años después, ya durante el siglo XVII, no se emplea de forma generalizada el Tabaire en la construcción de las murallas de Felipe II. Este periodo coincide con las enormes carencias que presentaba la artillería en Cartagena, tal y como lo atestiguan los diversos informes que se redactan por orden de la Corona (Martínez, 2016).

Durante el último tercio del siglo XVII, se reforzó la importancia de Cartagena como base naval, tras ser designada como fondeadero permanente de las Galeras de España.

Pero el impulso definitivo de Cartagena llegó durante el siglo XVIII, periodo en el que los Borbones se instalan definitivamente en el trono de España tras la Guerra de Sucesión, encargando importantes reformas. Es durante este periodo, con motivo de importantes construcciones militares proyectadas en la ciudad (Soler y Antolinos, 2007), cuando se realiza un uso masivo del Tabaire. Cabe destacar ejemplos tan significativos como el Real Hospital de Marina y el Real Arsenal de Marina, donde se puede apreciar la piedra, tanto en muros como en arquería (Figuras 2.13 y 2.14).



Figura 2.13. Arcos compuestos por sillería de Tabaire en el Real Hospital de Marina. Fuente: Lasheras, 2011

Cuando la Armada tuvo que construir un hospital que aunase todos los conocimientos y adelantos médicos de la época los reflejó en el Hospital de Marina de Cartagena. Según escritos de D. Julián Arriaga, debía construirse con vistas a la inmortalidad, pues decía: *“se está a la mira de que se haga con solidez las obras que corresponden”*. Por ello, se tardó diez años en su construcción (de 1752 a 1762). Se emplearon distintos tipos de piedra, además del Tabaire empleado en muros y arquería. Así, destaca la escalera central, construida con sillares extraídos de las canteras del Cabezo Gordo.



Figura 2.14. Detalle bloques de Tabaire en el Real Hospital de Marina (izquierda) y en el Real Arsenal de Marina (derecha). Fuente: elaboración propia

El Mandarache es el lugar elegido para instalar el arsenal. En 1731 se aprueba el primer proyecto y a partir de ese momento comienzan las obras para adecuar el lugar mediante el dragado y desvío de ramblas de Benipila y Saladillo. El proyecto original sufre varias modificaciones hasta que en 1749 se establece el diseño definitivo. Las obras fueron dirigidas por el ingeniero militar Sebastián Feringán. Tras su muerte Mateo Vodopich asume la dirección del proyecto, acabando en 1782 (Martínez López, 2016).

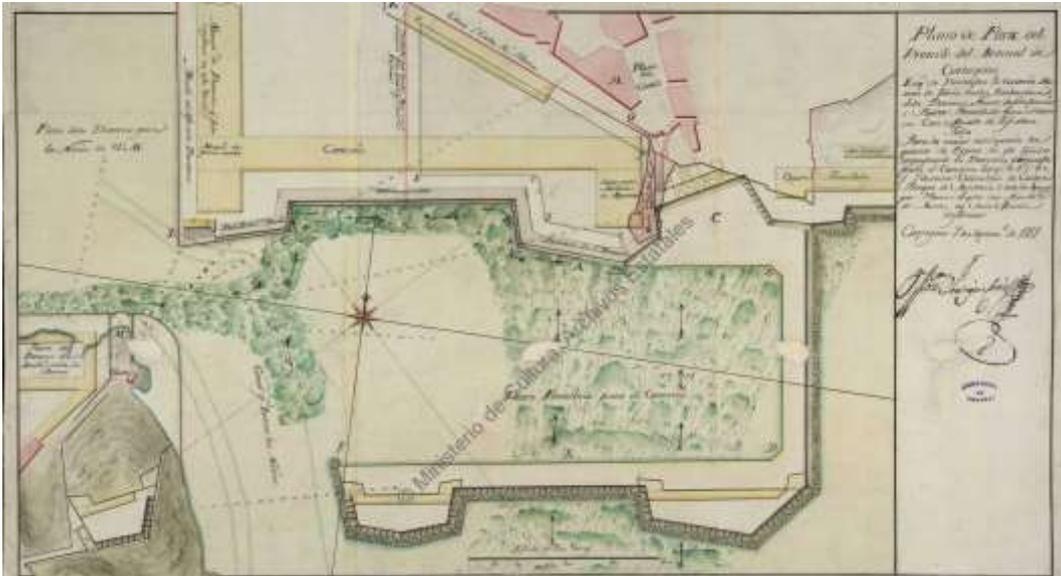


Figura 2.15. Plano de Parte del Proyecto del Arsenal de Cartagena. Feringán y Cortés, Sebastián, 1700-1762, Cartagena, 7 de septiembre de 1757. A.G.S., MPD XIII-072. Fuente: Ministerio de Educación, Cultura y Deportes. Archivo General de Simancas

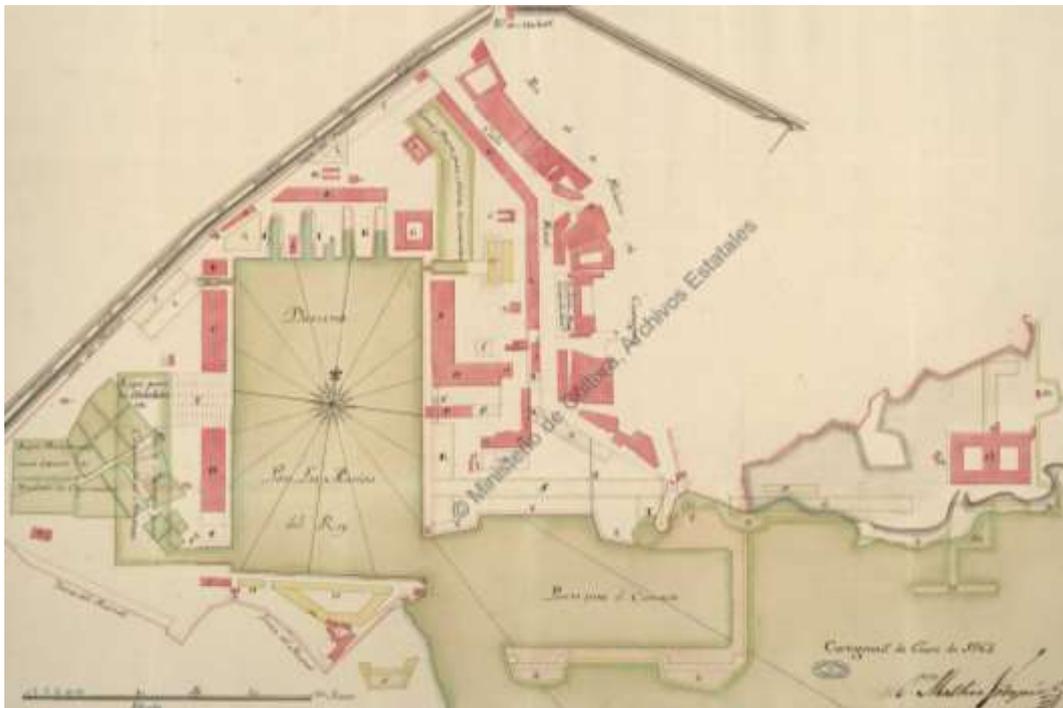


Figura 2.16. Plano del Arsenal de Cartagena con las obras realizadas en el último trimestre de 1763. Vodopich, Mateo. A.G.S., MPD X-138. Fuente: Ministerio de Educación, Cultura y Deportes. Archivo General de Simancas

En cuanto a la construcción del Real Arsenal de Marina, los documentos manuscritos originales consultados, pertenecientes al periodo comprendido entre 1749 y 1779, ponen de manifiesto el empleo de cuatro especies mineralógicas: Tabaire, piedra de Pinto, piedra Fuerte y piedra Blanca de Alicante (Figura 2.17).

Material	Unidad	Cantidad	Valor	Material	Unidad	Cantidad	Valor	Material	Unidad	Cantidad	Valor	Material	Unidad	Cantidad	Valor	Total
Tabaire	ca	1000	1000	Piedra de Pinto	ca	500	500	Piedra Fuerte	ca	200	200	Piedra Blanca	ca	100	100	1800

Figura 2.17. Estado de materiales empleados en la construcción del Arsenal de Cartagena de siglo XVIII. P01129. Fuente: Archivo Naval de Cartagena

Analizando dichos documentos, se consigue estimar el volumen de Tabaire extraído y empleado en obra, así como el número medio diario de canteros y de carros y carretas para su transporte a pie de obra. Los resultados obtenidos, se exponen en el apartado 5.2.5. *Un caso concreto: El Arsenal*.

En cuanto a la colocación de cada una de las piedras empleadas en la construcción del Arsenal, se realiza teniendo en cuenta el elemento constructivo al que dan lugar. A este respecto, el tratadista Brizguz y Bru (1738), explica: “*Quando se fabrica algún edificio, en que es preciso valerse de piedras diferentes calidades, se debe cuidar de colocar la mas dura, y que mejor resiste á la humedad, en los puestos mas expuestos al ayre, reservando la que se sospecháre que no es tan buena para meterla en los fundamentos, y otros parages cubiertos*”.

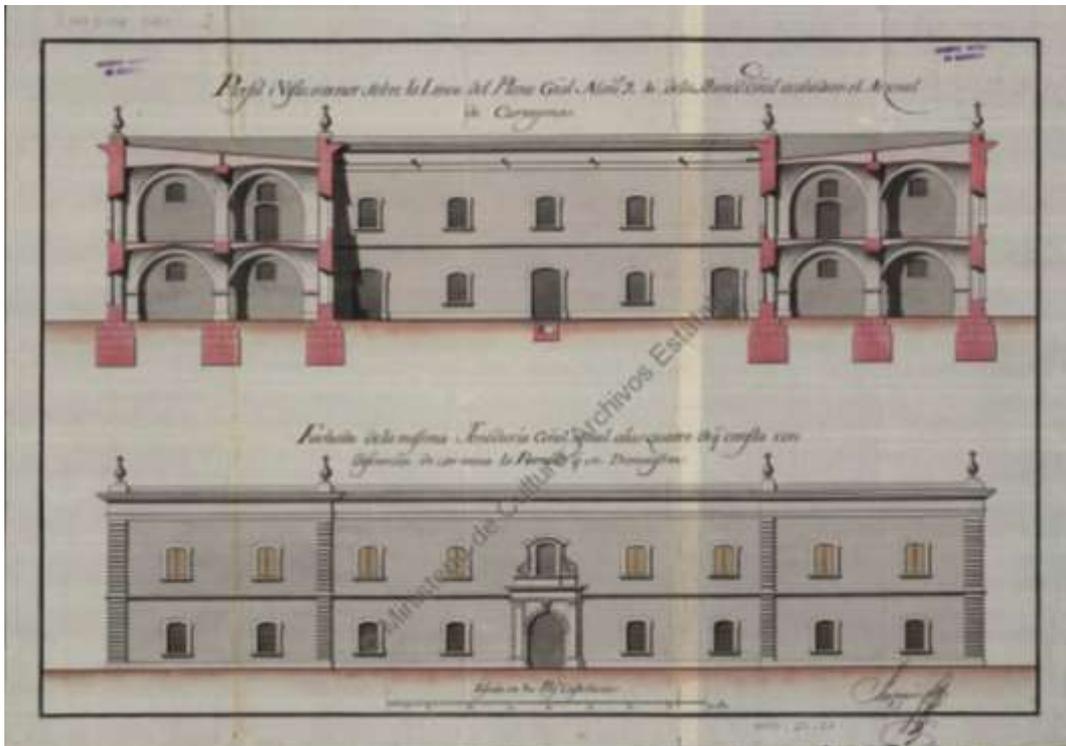


Figura 2.18. Perfil y Vista interior sobre la Línea del Plano General números 9. 10. de la Teneduría general acabada en el Arsenal de Cartagena. Feringán y Cortés, Sebastián. A.G.S., MPD XXV-21. Fuente: Ministerio de Educación, Cultura y Deportes. Archivo General de Simancas

Feringán sigue estas recomendaciones para la ubicación de los distintos materiales pétreos empleados en la construcción del muelle. En la última hilada de coronación, expuesta a las inclemencias meteorológicas y las agresiones del tráfico portuario dispone la piedra fuerte. Para las hiladas del muro que emergen sobre el nivel de las aguas selecciona la piedra de Alicante. Por último, para el cimientado y la zona del alzado del muro que quedará sumergido y protegido bajo las aguas destina la piedra Tabaire (Figura 2.19). La piedra fuerte y la de Alicante, aunque de distinta composición mineralógica, proceden de la cantera alicantina de San Julián (Peñalver et al., 2015).

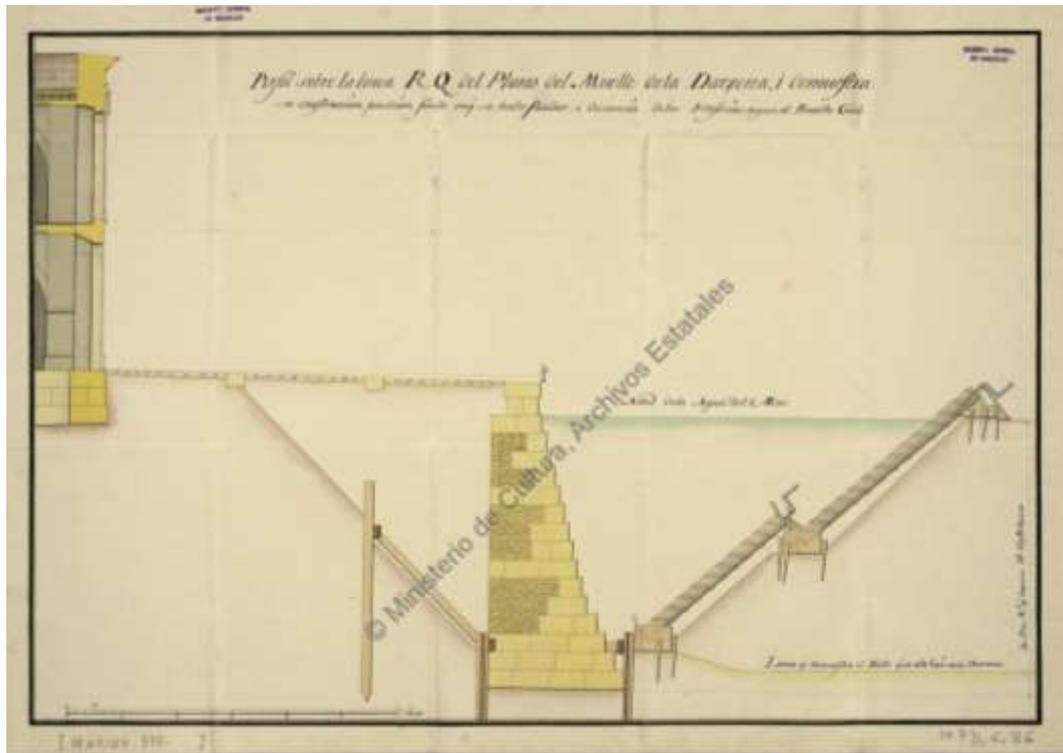


Figura 2.19. Perfil sobre la línea R.Q. del plano del Muelle de la Dársena y demuestra su construcción, posición y fondo (1749). Feringán y Cortés, Sebastián. A.G.S., MPD VI-86. Fuente: Ministerio de Educación, Cultura y Deportes. Archivo General de Simancas

En la Muralla de Carlos III, encontramos el Tabaire en los baluartes y en la cimentación durante las primeras fases de construcción y exclusivamente en la cimentación en las últimas fases.

González Simancas se centró en el estudio del recinto defensivo de la ciudad púnica, llegando a sospechar que vestigios de este recinto habían quedado sepultados en lugares apropiados de la ciudad, en las vertientes de las colinas o formando parte de la cimentación de las murallas modernas algunos restos de las primitivas fortificaciones construidas por Asdrúbal (González, 1929). Con esta convicción, González Simancas practicó en mayo de ese año una serie de excavaciones en diversos puntos al pie de la muralla de Carlos III, concediendo especial interés al baluarte 21, ubicado en la zona baja de la cuesta del Batel (Martín, 2010).



Figura 2.20. Muralla De Carlos III, cuesta del Batel. Fuente: elaboración propia

Las obras de construcción de la muralla que Carlos III mandó construir en Cartagena el 18 de septiembre de 1770, fueron desarrolladas en dos periodos: el primero desde el 3 de junio de 1771 hasta el 31 de marzo de 1773 (22 meses) y el segundo desde abril de 1778 hasta 1789 (11 años). Un total de 13 años aproximadamente y con un costo imposible de calcular, sin haber localizado hasta la fecha un resumen como el que se hizo para la obra de construcción del Arsenal (Rubio, 1991).

A continuación, se exponen algunos de los informes de obra extractados de la obra de Rubio Paredes, donde se detallan aspectos en cuanto al transporte y la disposición en obra del Tabaire.

En la memoria de González Simancas (B-4):

“En los ángulos de la muralla abaluartada, que se labró con sillarejos regulares, mirando al puerto, obra de Carlos III, levantada en la falda del cerro del castillo de la Concepción, terreno hasta el cual llegaban las aguas, y donde estuvo situado el muro antiguo, vimos que se habían empleado enormes bloques de fuerte caliza, no todos de igual tamaño, y en los que, a pesar de la labor hecha por los canteros del siglo XVIII para acomodarlos como sillares en la moderna construcción, quedaba en ellos el mismo rudo y desigual almohadillado que caracteriza la tosca labra de estereotomía que tiene muchas de

las grandes piedras empleadas en ciertos muros de Sagunto, que por su situación e igualdad de caracteres con las fortificaciones púnicas de Eryx habíamos supuesto pudieran ser obra de los conquistadores cartagineses¹ (...) procedimos a excavar al pie de esos mismos lugares y en otros muchos sitios hasta descubrir la cimentación de las murallas, viendo entonces cómo se repetía en toda la fábrica, incluso en el muro del frente que mira a la llanura del Almajar”.

Las obras de construcción de la muralla de Carlos III comenzaron por el frente del malecón o Benipila, tal y como Llobet justifica en un informe:

“Conociendo que en toda la línea del Malecón pueden ofrecerse dificultades en la práctica de los cimientos, y el ver que esta parte de obra es mucho más corpulenta que la demás del recinto; y que también que la avenidas de la rambla de Benipila pueden ocasionar algún accidente, me ha parecido mejor entrar en esta muralla antes que lo demás del recinto, y continuar en ella a menos que ocurra motivo para diferirla”².



Figura 2.21. Sillería de Tabaire en la Muralla De Carlos III, rambla de Benipila. Fuente: elaboración propia

Desde el inicio de la obra el ingeniero director envió al ministro de Guerra un informe durante varios periodos con carácter mensual, en otros trimestral o

¹ Rubio Paredes, 1991. Página 97

² Rubio Paredes, 1991. Página 145

semestral. En el primer informe regular se recoge (D-89) que, en cuanto a plantilla, hubo *“todo el tiempo 2 canteros”*.

En el informe de obras y gastos correspondiente al mes de agosto de 1771 (D-94) se comunica:

“Mitigada ya la epidemia de tercianas, se va recibiendo quanta gente se presenta y que en el día excede a mil individuos, sin comprehender la gente empleada en las canteras, ni en las caleras. En todo el expresado tiempo, supsistieron el mismo número de brigadas, esto es 7 de peones, 1 de mozos, 2 de muchachos, y a más se crehó otra de mezcladores. Y, sin embargo, que se caminava sobre el concepto de que la fuerza de cada brigada fuese de 100 yndividuos, la epidemia de las tercianas disminuyó mucho la fuerza, si bien en el día quedan 4 completas. A más se emplearon 8 carpinteros, 30 canteros, 14 albañiles y 6 carro. A causa de la época de cosecha de material faltaron carros, por lo que el retraso del acopio de cal, que ya se ha normalizado”³.

En cuanto a la obra realizada, el informe especifica:

“1029 baras³ (601 m³) de cimientó con cantería de atabayre, y sus ángulos salientes de cantería marmoleña”⁴.

Como notas y comentarios añade:

“Se han acopiado en el mencionado tiempo al pié de obra 1500 carretadas de piedra mampostería, 40 sillares de piedra fuerte, 632 de atabaire, 319.5 cahizes (213 m³) de cal, 265 carretadas de arena, 189 cargas de yeso”.

El tercer informe mensual de Llobet, corresponde al mes de septiembre de 1771 (D-96), donde comunica:

“Las cuadrillas existentes en agosto fueron aumentadas el 18.9 en 3 peones, y el 24.9 con otra; cada una de 100 individuos, aunque el día del informe (4.10) la mayoría tiene número inferior. El número de especialistas fue de 8 carpinteros, 25 canteros, 15 albañiles y 2 carros”⁵.

Con este personal se realizó la siguiente obra:

³ Rubio Paredes, 1991. Página 152

⁴ Rubio Paredes, 1991. Página 153

⁵ Rubio Paredes, 1991. Página 154

“2210 baras³ (1291 m³) de cimientos de sillares de atabaire; labra de cantería fuerte para los ángulos de los baluartes, hacer mezclas, agotar y limpiar los cimientos que la avenida de la rambña ynundó, y en otras extraordinarias maniobras, en componer los caminos para facilitar el transporte de materiales y en la construcción y composición de útiles. Se continuaron los cimientos con cantería de atabayre en la cortina entre los dos primeros baluartes más inmediatos al monte de Galeras en 253 baras de longitud (211.5 m), y con los estribos correspondientes a aquella distancia; faltando solas 42 baras (35 m) para dejarla del todo concluida, y también los mismos baluartes por lo que respecta a los cimientos. Se ha comenzado a erigir la muralla de revestimiento sobre los cimientos referidos”.

El cuarto informe mensual de Llobet, que corresponde al mes de octubre de 1771 (D-98) registra:

“En cuanto a la plantilla: 10 brigadas de peones de 80 hombres cada una, 1 de amasadores de 50 individuos, 4 de mosos (mozos) de 100, 29 canteros, 30 albañiles, 543 carpinteros, toneleros, herradores, y 20 caleros”⁶. Quienes realizaron la siguiente obra:

“737 baras³ (430 m³) de construcción de cimientos con sillares de atabayre; 1563 baras³ (913 m³) de mampostería de cal y canto sobre dichos cimientos y fábrica de muralla de revestimiento de la 1^a cortina y baluartes, de sus extremos cuyos ángulos se sugetaron con cantería fuerte en la altura de 4.5 pies (1.25 m), y se continuaron con cantería de Pinto. Las notas y comentarios del informe son: se concluyeron enteramente los cimientos de la 1^a cortina y baluartes de sus extremos, como de parte de la 2^a cortina, cuyo macisso ejecutado en el referido tiempo con sillares de atabayre asciende a 737 baras³ (430.6 m³). También queda levantada de unas 3 baras (2.50 m) la muralla, como sus estrivos, sobre los mismos cimientos de los dos referidos baluartes y de la mayor parte de la 1^a cortina, cuyo maciso supone 1563 baras³ (913 m³) de mampostería”⁷.

El comisario de Guerra envió a la corte un nuevo informe (D-132) y lo finaliza con un resumen del estado de las obras, donde informa:

“En el día se están empleando 16 carretas de Rey en la construcción de sillares de atabayre para cimentar la entrada de la Puerta de Madrid, haciendo dos viages al día”⁸.

⁶ Rubio Paredes, 1991. Página 155

⁷ Rubio Paredes, 1991. Página 156

⁸ Rubio Paredes, 1991. Página 201

En el Cuartel de Presidarios y Esclavos, el ingeniero Mateo Vodopich sigue las determinaciones recogidas en diversos tratados de edificación y que eran la práctica común en la construcción del siglo XVIII. Posteriormente, en 1796, Bails las describe de la siguiente forma (Chacón, 2012): “En cuanto a la forma del cimiento... los cimientos han de tener un grueso proporcionado al hondo de la zanja, á la altura de las paredes que sobre ellos se han de levantar, á la naturaleza del suelo y á la calidad de los materiales, porque de esto penden en gran parte las dimensiones de cualesquiera especies de paredes. Manda Vitruvio que quando el edificio tuviese sótanos ó subterráneos, se hagan forzosamente los fundamentos mas anchos; Palladio propone que sea el cimiento el doble mas grueso que las paredes que se levantan encima”.

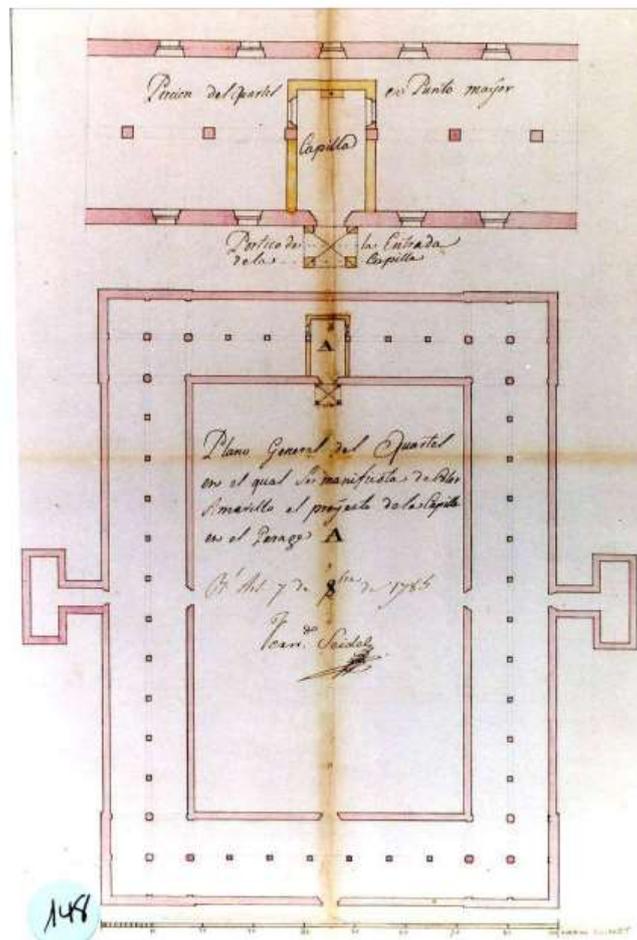


Figura 2.22. Plano General del Cuartel en el qual se manifiesta de Color Amarillo el proyecto de la Capilla en el Parage. A. Seidel, Fernando. 7 de octubre de 1785. A.G.M.A.B, sg.148. Fuente: Ministerio de Educación, Cultura y Deportes. Archivo General de la Marina Álvaro de Bazán

Acabado el s. XVIII y durante la Guerra de independencia el Estado se encuentra en la quiebra económica, lo que supuso la paralización de las inversiones pendientes.

Encontramos, en ese periodo, un uso residual del Tabaire, empleando en construcción otras piedras procedentes del exterior de la ciudad, como la piedra de Alicante.

En la Edad Contemporánea, analizado el plan de defensa de 1926, no se ha detectado el empleo de este material. En esta época se desarrolla un repertorio de nuevas formas constructivas, como consecuencia del uso generalizado de las armas de pólvora, lo que condiciona un cambio en las tácticas militares y sus derivadas logísticas.

Se determina que el Tabaire se empleó en nueve de las veintiocho fases y construcciones que componen el patrimonio militar de Cartagena, expuestas en la Tabla 2.3, determinando la localización del Tabaire dentro del propio inmueble, su accesibilidad y la distancia existente entre cada construcción y la cantera original de extracción. Por último, en la Figura 2.23, se localizan en la ciudad de Cartagena las construcciones objeto de estudio.

Construcción	Localización del Tabaire	Accesible	Distancia a la cantera (km)
Muralla Púnica	Muros	Sí	6,7
Castillo de la Concepción	Aljibes	Sí	7,3
Casa de la Pólvora	Muros	Sí	5,7
Real Hospital de Marina	Muros	No	6,6
Muralla de Carlos III	Muros y cimentación	Sí	6,2
Real Parque y Maestranza de Artillería	Cimentación	No	5,8
Cuartel de Presidarios y Esclavos	Cimentación	No	5,5
Cuartel de Antigüones	Cimentación	Sí	6,8
Cuartel de Guardiamarinas	Cimentación	No	6,2

Tabla 2.3. Construcciones con presencia de Tabaire. Fuente: elaboración propia

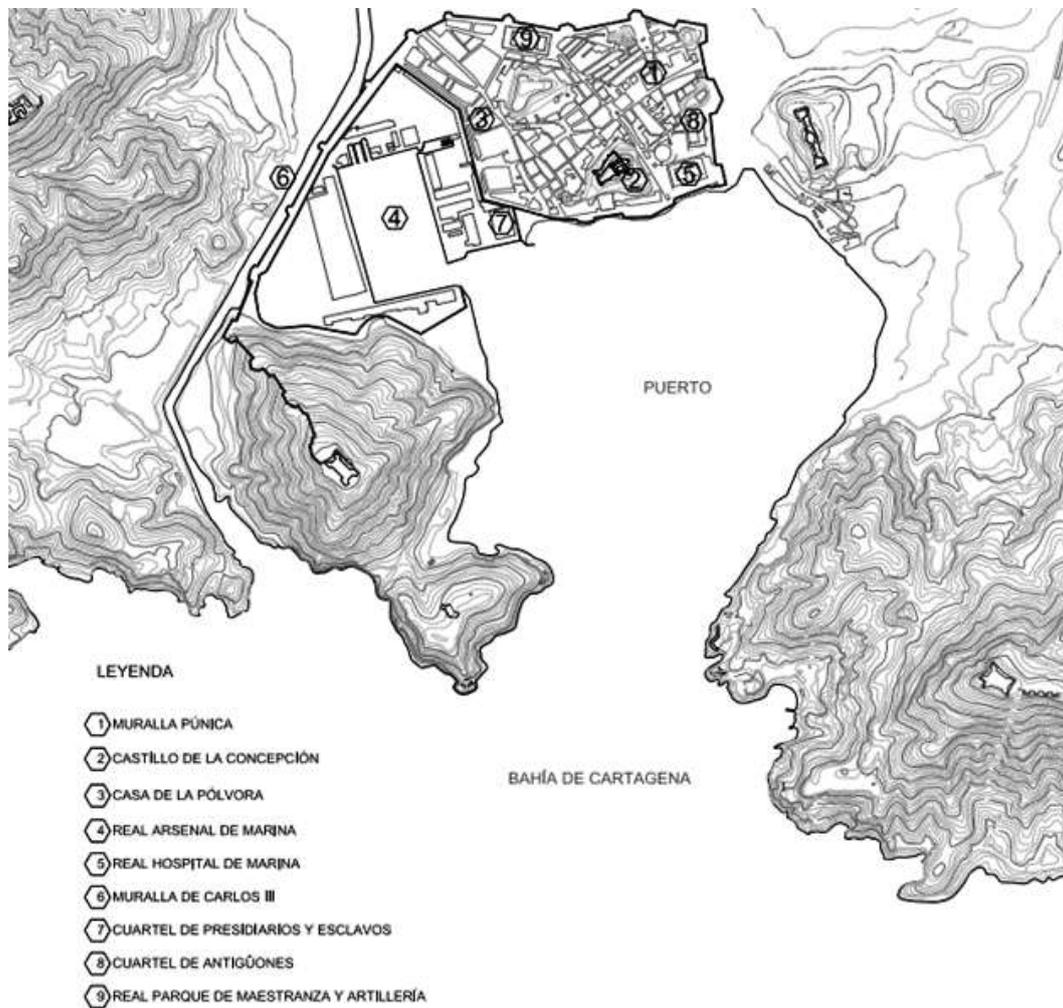


Figura 2.23. Localización de las construcciones con presencia de Tabaire. Fuente: elaboración propia a partir del plano publicado en (Martínez, 2015)

III. ESTADO DEL ARTE

III. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se realiza una revisión del conocimiento actual sobre algunos aspectos abordados en el presente estudio, tomando como referencia diferentes trabajos y artículos, incluidos todos ellos en la bibliografía. En primer lugar, se presentan las principales lesiones que afectan a la piedra. A continuación, se analizan las principales propiedades petrofísicas que favorecen la utilización de las rocas: sistema poroso, comportamiento hídrico y propiedades mecánicas.

3.1. PRINCIPALES LESIONES QUE AFECTAN A LA PIEDRA

Los distintos factores presentes o las variables que pueden participar en la alteración de la piedra, que se encuentra en los edificios, pueden incluirse en distintas categorías; un primer grupo es debido a los factores internos al material, es decir, a sus propiedades. Otra categoría de lesiones se conoce como agentes de alteración. Se produce debido a las características ambientales, que determinan la agresividad del medio donde se localiza la piedra. Finalmente, e igual de importante que los anteriores, existe un tercer grupo, que se deriva de la construcción y puesta en obra del material, su emplazamiento, y la relación que guarda con otros materiales (Alonso et al., 2006). Como consecuencia de todos los factores expuestos, se produce la degradación de las propiedades físicas del material pétreo y, el resultado de los distintos procesos de alteración son las patologías o lesiones que se manifiestan sobre las superficies alteradas.

En este apartado se expone el glosario ilustrado, elaborado por ICOMOS⁹, respecto a las principales formas de deterioro de la piedra, clasificando las lesiones en: grietas (Tabla 3.1), deformaciones (Tabla 3.2), desprendimientos (Tablas 3.3, 3.4 y 3.5), rasgos inducidos por la pérdida de material (Tablas 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9), alteración cromática, depósitos (Tablas 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14 y 3.15) y, por último, biocolonización (Tablas 3.16, 3.17 y 3.18).

⁹ ICOMOS (International Council on Monuments and site) está asociada con la UNESCO, es una organización internacional no gubernamental, dedicada a la promoción de la teoría, la metodología y la tecnología aplicada a la conservación, protección y puesta en valor del patrimonio cultural.

GRIETAS				
Definición	<i>Abertura claramente visible a simple vista, que supone la separación entre dos partes.</i>			
Subtipos				
Fractura	Fisuración radial	Fisura	Craquelado	Disyunción en lajas
Posibles Confusiones	<i>Deslaminación que consiste en el desprendimiento a lo largo de planos de estratificación o esquistosidad con orientación no necesariamente vertical, sin hacerse patente la presencia de una sobrecarga.</i>			
Notas adicionales	<i>Las grietas pueden deberse al intemperismo, defectos en la piedra, problemas estáticos, anclajes de hierro oxidados, o rejuntados con morteros demasiado duros. También pueden ser causadas por vibraciones debidas a temblores sísmicos, el fuego y las heladas.</i>			

Tabla 3.1. Características principales de las grietas. Fuente: ICOMOS, 2008

DEFORMACIONES	
Definición	<i>Cambio en la forma sin pérdida de la integridad, que se manifiesta por torsiones, alabeos o pandeos.</i>
Términos equivalentes	<i>Deformación plástica y arqueamientos.</i>
Notas adicionales	<i>Esta forma de degradación afecta principalmente a placas de mármol (lápidas, placas de revestimiento, etc.).</i>

Tabla 3.2. Características principales de las deformaciones. Fuente: ICOMOS, 2008

DESPRENDIMIENTOS	
Ampollas	
Definición	<i>Elevaciones semiesféricas rellenas de aire en la superficie de la piedra como resultado del desprendimiento de la lámina exterior de la misma.</i>
Términos equivalentes	<i>Vesículas, vesiculación.</i>
Notas adicionales	<i>En algunas circunstancias la formación de ampollas tiene su origen en la acción de las sales solubles.</i>
Estallido	
Definición	<i>Pérdida local de la superficie de la piedra debida a tensiones internas que se manifiestan normalmente por desprendimientos en forma de un cráter con bordes irregulares.</i>
Posibles Confusiones	<i>Daño por impacto: pérdida de materia debida a impacto mecánico que puede tener también forma de cráter si el objeto que impacta es duro y pequeño (por ejemplo, un proyectil).</i>
Notas adicionales	<i>A veces, tiene su origen en una fracturación radial. Esta forma de deterioro se debe al incremento en el volumen de inclusiones minerales (arcillas, minerales de hierro, etc.) que forman parte del contenido original de la piedra.</i>
Delaminación	
Definición	<i>Proceso de desprendimiento que afecta a piedras que presentan laminación (fundamentalmente rocas sedimentarias, algunas rocas metamórficas, etc.). Se trata de la separación física en una o varias capas siguiendo la laminación.</i>
Posibles Confusiones	<i>Descamación: tipo de desprendimiento completamente independiente de la estructura de la piedra.</i>
Notas adicionales	<i>Puede conjugarse con eflorescencias y biocolonización entre las láminas.</i>

Tabla 3.3. Características principales de las ampollas, estadillo y delaminación. Fuente: ICOMOS, 2008

DESPRENDIMIENTOS	
Desintegración	
Definición	<i>Desprendimiento de granos individuales o agregados de éstos.</i>
Términos equivalentes	<i>Pérdida de cohesión, incoherencia, descohesión, friabilidad, desagregación, incoherencia intergranular, pulverización, desgranamiento.</i>
Subtipos	<i>Desmenuzamiento: desprendimiento de agregados de granos del sustrato.</i>
	<i>Disgregación granular: produce detritos relacionados con el cuerpo general de la piedra que, frecuentemente, se pueden apreciar al pie de los muros que sufren el proceso.</i>
Notas adicionales	<i>La piedra puede presentar formas intermedias entre la disgregación granular y el desmenuzamiento, descamación o deslaminación. Frecuentemente la disgregación granular parcial o selectiva produce rasgos superficiales, como alveolización.</i>
Fragmentación	
Definición	<i>Rotura parcial o total de la piedra en trozos o partes de dimensiones variables, con formas, volúmenes y tamaños, irregulares.</i>
Subtipos	<i>Fragmentación en esquirlas: astillado. Desprendimiento de piezas finas, esbeltas y agudas de piedra desgajadas del cuerpo principal.</i>
	<i>Desconchadura: Rotura de pequeños pedazos de las aristas de un bloque.</i>
Notas adicionales	<i>Puede aparecer cuando bloques de piedra están sujetos a sobrecargas. Las partes superiores e inferiores de columnas monolíticas son particularmente propensas a las desconchaduras y fragmentación en esquirlas (peso elevado soportado por un área pequeña).</i>

Tabla 3.4. Características principales de la desintegración y fragmentación. Fuente: ICOMOS, 2008

DESPRENDIMIENTOS	
Disyunción de películas	
Definición	<i>Despellejamiento de una fina capa superficial (submilimétrica a milimétrica) con aspecto de película o recubrimiento que ha sido aplicado en la superficie de la piedra.</i>
Términos equivalentes	<i>Peeling, despellejamiento, descascarillado, descascarado, separación de películas, pelado, peladura.</i>
Posibles confusiones	<i>Ampollas, cuya morfología es como en pequeños domos. Descamación, que consiste en el desprendimiento de laminillas de piedras (espesor: milimétrico o centimétrico).</i>
Descamación	
Definición	<i>Desprendimiento de escamas o pilas de escamas, que no sigue la estructura de la piedra y se desprenden como las escamas de un pez o paralelamente a la superficie de la piedra. El espesor de las escamas es milimétrico o centimétrico generalmente y es despreciable en comparación con las dimensiones de su superficie.</i>
Subtipos	<i>Microdescamación: descamación en escamas curvas o planas de espesor milimétrico a submilimétrico, dispuestas como las escamas de un pez.</i> <i>Descamación perimetral: descamación en la que la interfase con el sustrato sano es paralela a la superficie de la piedra. En el caso de que dicha superficie sea plana, la descamación se puede denominar desplazación o deplacación.</i>
Posibles confusiones	<i>Delaminación: corresponde a desprendimientos siguiendo la laminación sedimentaria o los planos de esquistosidad de la piedra.</i>

Tabla 3.5. Características principales de la disyunción de películas y descamación. Fuente: ICOMOS, 2008

RASGOS INDUCIDOS POR LA PÉRDIDA DE MATERIAL	
Alveolización	
Definición	<i>Formación de cavidades (alveolos) en la superficie de la piedra que pueden encontrarse interconectadas y pueden tener tamaño y aspecto variable (generalmente centimétrico, aunque a veces métrico).</i>
Subtipo	<i>Craterización: erosión consistente en un solo alveolo desarrollándose desde la arista de un bloque de piedra.</i>
Notas adicionales	<i>La alveolización es un tipo de meteorización diferencial, debida, posiblemente, a heterogeneidades en las propiedades físicas y químicas de la piedra. La alveolización puede acompañarse de otras formas tales como disgregación granular y/o descamación perimetral</i>
Erosión	
Definición	<i>Pérdida de la superficie original, con suavizado de las formas.</i>
Subtipos	<i>Erosión diferencial: debería utilizarse preferentemente a alteración diferencial; ocurre cuando la erosión no avanza con la misma velocidad en distintas áreas de la piedra. Como resultado, la piedra no se degrada regularmente.</i>
	<i>Redondeamiento: erosión preferente de las aristas de la piedra, generando un perfil redondeado. El redondeamiento tiene lugar especialmente en aquellas piedras que se deterioran mediante disgregación granular o cuando las condiciones ambientales favorecen la disgregación granular</i>
	<i>Incremento de rugosidad: pérdida selectiva de pequeñas partículas de piedra con una superficie original suave. El sustrato, sin embargo, permanece compacto.</i>

Tabla 3.6. Características principales de la alveolización y erosión. Fuente: ICOMOS, 2008

RASGOS INDUCIDOS POR LA PÉRDIDA DE MATERIAL	
Daños de origen mecánico	
Definición	<i>Pérdida de material de la piedra claramente debida a acciones mecánicas.</i>
Subtipo	<i>Daños por impacto: daños mecánicos debidos al impacto de un proyectil (bala, metralla) o de una herramienta dura.</i>
	<i>Incisiones: pérdida de material debida a la acción de una herramienta cortante. Puede tener la apariencia de una cavidad excavada, una cortadura, un borde dañado, etc. Las marcas de herramientas de labrado o cantería se pueden considerar como un tipo especial de incisiones, pero no debieran ser consideradas como daños.</i>
	<i>Excoriaciones: rayas o rayaduras que implican pérdidas de materia con aspecto de líneas inducidas manualmente por un objeto punzante. Pueden ser accidentales o producidas intencionalmente.</i>
	<i>Abrasión: erosión debida al rozamiento, frotamiento o impacto de partículas.</i>
Notas adicionales	<i>Repicado: daños por impacto resultantes de golpes con una herramienta punzante a la superficie a fin de prepararla para la adhesión de un revestimiento, por ejemplo, de mortero.</i>
	<i>En la mayor parte de los casos por daños mecánicos tienen un origen antrópico. Se ha preferido repicado a simplemente picado, también utilizado en albañilería, ya que este último término también designa un tipo de terminación del enlucido y además podría confundirse con pitting.</i>

Tabla 3.7. Características principales de los daños de origen mecánico. Fuente: ICOMOS, 2008

RASGOS INDUCIDOS POR LA PÉRDIDA DE MATERIAL	
<i>Microkarst</i>	
Definición	<i>Retícula de pequeñas depresiones interconectadas de tamaño milimétrico o centimétrico, que, algunas veces asemejan una red hidrográfica. Las formas de microkarst se deben a la disolución parcial y/o selectiva de la superficie de la piedra calcárea.</i>
Posibles confusiones	<i>Alveolización, donde las depresiones pueden ser similares en su aspecto, pero de mayor tamaño (centimétricas) y no se encuentran sistemáticamente conectadas. Pitting: pequeñas cavidades como un punteado, generalmente no interconectado, de tamaño milimétricos o submilimétricos.</i>
Notas adicionales	<i>No aparecen trazas en la superficie de disgregación granular o descamación.</i>
Perforación	
Definición	<i>Una o una serie de punciones u orificios, producidas por una herramienta punzante o creadas por un animal. Su tamaño es generalmente milimétrico a centimétrico. Las perforaciones son más profundas que anchas y penetran dentro del cuerpo de la piedra.</i>
Posibles confusiones	<i>Pitting: formación de picaduras milimétricas a submilimétricas, generalmente mucho más pequeñas que las perforaciones. Hueco: orificio que no fue creado por un proceso de perforación.</i>
Notas adicionales	<i>Una perforación se produce normalmente, por la acción de un instrumento penetrante. En determinadas circunstancias, ciertos animales también pueden crear perforaciones.</i>

Tabla 3.8. Características principales del *microkarst* y perforación. Fuente: ICOMOS, 2008

RASGOS INDUCIDOS POR LA PÉRDIDA DE MATERIAL

Pitting

Definición	<i>Punteado milimétrico o submilimétrico de cavidades superficiales. Dicho punteado mantiene, generalmente, una morfología cilíndrica o cónica, sin interconexión.</i>
Posibles confusiones	<i>Microkarst, donde se crea una red de pequeñas depresiones interconectadas de tamaño milimétrico a centimétrico. Perforación, inducida, generalmente, por un instrumento penetrante o un animal.</i>
Notas adicionales	<i>El pitting tiene su origen en degradación parcial o selectiva. El pitting puede ser inducido por agentes químicos o biológicos especialmente en rocas carbonatadas. El pitting puede ser, también, el resultado de métodos de limpieza abrasivos muy severos o inadecuados.</i>

 Tabla 3.9. Características principales del *pitting*. Fuente: ICOMOS, 2008

ALTERACIÓN CROMÁTICA Y DEPÓSITOS

Depósitos

Definición	<i>Acumulación de material de espesor variable. Algunos ejemplos de depósitos son: salpicaduras de pintura o mortero, aerosoles salinos marinos, partículas atmosféricas tales como hollín o polvo, restos de productos o materiales utilizados en restauración, etc.</i>
Posibles confusiones	<i>Los excrementos de pájaros y murciélagos se consideran depósitos, mientras que telarañas y nidos son considerados colonizaciones biológicas.</i>
Notas adicionales	<i>Se puede caracterizar a partir de su color, morfología, tamaño y, si es posible, por su naturaleza y/u origen. En general, un depósito no se encuentra adherido a la superficie de la piedra.</i>

Tabla 3.10. Características principales de los depósitos. Fuente: ICOMOS, 2008

ALTERACIÓN CROMÁTICA Y DEPÓSITOS	
Costra	
Definición	<i>En general, acumulación coherente de material en la superficie. Una costra puede incluir depósitos exógenos en combinación con materia derivada de la propia piedra. Las costras mantienen, frecuentemente, un color oscuro (costra negra) aunque también se encuentran costras de colores claros. Las costras pueden tener un espesor homogéneo, siguiendo la superficie de la piedra, o un espesor irregular dificultando la lectura de los detalles superficiales.</i>
Subtipos	<i>Costra negra: se desarrolla generalmente en zonas abrigadas de la escorrentía directa en ambientes urbanos. Suele estar firmemente adherida al sustrato y se compone, en gran medida, de partículas atmosféricas atrapadas en una matriz de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Costra salina: compuesta de sales solubles, que se desarrollan en presencia de altos contenidos salinos y por sucesivos ciclos de humedad-sequedad.</i>
Posibles confusiones	<i>Incrustación, que también está formada por una capa coherente siempre adherida al sustrato. Algas: frecuentemente adquieren un color oscuro durante la estación seca y pueden confundirse con costras negras. Sin embargo, al contrario de las costras negras, las algas no se adhieren al sustrato y aparecen en zonas exteriores, expuestas al impacto directo de las precipitaciones o escorrentías. Pátinas negras ferruginosas: desarrolladas generalmente como una fina capa enriquecida en hierro y minerales arcillosos en areniscas ferruginosas y que se localizan sobre todas las partes expuestas de los edificios o esculturas, y no solamente en las zonas abrigadas del impacto directo de la lluvia.</i>

Tabla 3.11. Características principales de la costra. Fuente: ICOMOS, 2008

ALTERACIÓN CROMÁTICA Y DEPÓSITOS	
Cromatización	
Definición	<i>Modificación del color de la piedra en uno de los tres parámetros de color: tono, luminosidad y saturación. El tono corresponde a la característica más señalada del color (azul, rojo, amarillo, naranja, etc.). La luminosidad corresponde a la oscuridad (tonos bajos) o brillo (tonos altos) de un color. La saturación o cromatismo corresponde a la pureza de un color, desde vivo a apagado.</i>
Subtipos	<i>Coloración cambios en tono, saturación y/o luminosidad. Decoloración (o blanqueamiento): incremento de la saturación como consecuencia de la meteorización química de los minerales (por ejemplo, reducción de compuestos de hierro y manganeso) o desaparición de elementos cromáticos (por lixiviación, lavado), pérdida del pulimento, generalmente de forma superficial.</i>
	<i>Manchas de humedad: o simplemente humedades, corresponden a un oscurecimiento de la superficie (descenso del tono) como consecuencia de la deposición de polvo, mugre o biocolonias a favor de la presencia de humedad.</i>
	<i>Tinción: (también teñido o manchado) se trata de un tipo de alteración cromática de extensión limitada, que, generalmente, produce una apariencia poco atractiva.</i>
Posibles confusiones	<i>Pátina: modificación de la superficie de un material que se percibe como una alteración cromática, a menudo con una connotación positiva. Depósito: referente a la acumulación de material de espesor variable, aunque pueda mantener un color diferente del de la piedra.</i>

Tabla 3.12. Características principales de la cromatización. Fuente: ICOMOS, 2008

ALTERACIÓN CROMÁTICA Y DEPÓSITOS	
Eflorescencias	
Definición	<i>Acumulación cristalina, pulverulenta y generalmente blanca sobre la superficie. Las eflorescencias suelen ser poco cohesivas y normalmente se componen de sales solubles.</i>
Posibles confusiones	<i>Subflorescencia o criptoeflorescencia: término utilizado donde la cristalización tiene lugar dentro del material. Depósito: a simple vista, las eflorescencias pueden asemejarse a los depósitos. Sin embargo, en las eflorescencias los constituyentes proceden de la propia piedra, mientras que en los depósitos vienen del exterior.</i>
Notas adicionales	<i>Una eflorescencia es, normalmente, el resultado de la evaporación del agua cargada de sales, alojada en los poros de la piedra. Las eflorescencias están constituidas frecuentemente, por sales solubles tales como cloruros (halita: NaCl) nitratos o sulfatos (thenardita: Na₂SO₄, o epsomita, MgSO₄.7H₂O), pero también pueden contener otras sales menos solubles tales como calcita (CaCO₃), sulfato de bario (BaSO₄) y sílice coloidal (SiO₂.nH₂O).</i>
Brillo superficial	
Definición	<i>La superficie refleja total o parcialmente la luz, generando un aspecto como de espejo.</i>
Notas adicionales	<i>El aspecto brillante se puede deber a haber sufrido pulimento (intencional o no), o a la presencia de películas transparentes que reflejan la luz.</i>

Tabla 3.13. Características principales de las eflorescencias y el brillo superficial. Fuente: ICOMOS, 2008

ALTERACIÓN CROMÁTICA Y DEPÓSITOS	
Incrustación	
Definición	<i>Capa superficial endurecida, compacta y firmemente adherida al sustrato. La morfología de la superficie y su color, normalmente, son diferentes de los de la piedra.</i>
Subtipo	<i>Concreción: es un tipo de encostramiento que mantiene una forma específica, bien sea nodular, botroidal (como un racimo de uvas) o framboidal (como las moras o frambuesas). Las concreciones pueden tener también formas cónicas o semejar cortinajes colgados. Las estalactitas y estalagmitas son también tipos de concreciones. En general, las concreciones no siguen los contornos de la piedra y mantienen una extensión limitada.</i>
Posibles confusiones	<i>El término incrustación se usa cuando su origen se debe claramente a un proceso de precipitación, seguida de lixiviación de cualquier tipo. Si no existe evidencia de lixiviación y precipitación, se utilizará el término costra. Algunos líquenes (denominados líquenes incrustantes) pueden parecer incrustaciones. Los líquenes, sin embargo, no forman costras duras. Cuando se rayan se aprecian trazas negruzcas o verdosas, como consecuencia de las algas o cianobacterias presentes en el líquen.</i>
otras adicionales	<i>Las incrustaciones en los monumentos se deben frecuentemente a material movilizado por percolación del agua y procedente, por lo tanto, del propio edificio: son frecuentes los carbonatos, sulfatos, óxidos metálicos y sílice.</i>

Tabla 3.14. Características principales de la incrustación. Fuente: ICOMOS, 2008

ALTERACIÓN CROMÁTICA Y DEPÓSITOS	
Película	
Definición	<i>Recubrimiento o capa muy fina, generalmente de naturaleza orgánica, y homogénea, siguiendo la superficie de la piedra. Una película puede ser opaca o translúcida.</i>
Posibles confusiones	<i>Pátina que a simple vista no mantiene un espesor apreciable. Incrustación, que se refiere a capas minerales fuertemente adherentes y que pueden no seguir la superficie de la piedra como lo haría una película.</i>
Notas adicionales	<i>Las capas pictóricas, ciertos tratamientos hidrorrepelentes o protectores, tales como impermeabilizantes, se consideran como películas.</i>
Graffiti	
Definición	<i>Grabados, excoiaciones, incisiones o pintadas de tinta u otros productos similares practicados en la superficie de la piedra.</i>
Notas adicionales	<i>Los graffitis son, generalmente, el resultado de un acto de vandalismo. Sin embargo, algunos pueden tener valor histórico, artístico o cultural y deberían ser conservados.</i>
Pátina	
Definición	<i>Modificación cromática del material, generalmente, como resultado de agentes naturales o artificiales que, en la mayor parte de los casos, no se acompañan de un deterioro superficial visible.</i>
Subtipos	<i>Pátina ferruginosa: fina capa natural ocre oscura, enriquecida en minerales arcillosos con contenidos de hierro que suele aparecer en areniscas ferruginosas. Pátina de oxalato: fina capa de tonos naranjas a marrones enriquecida en oxalatos cálcicos. Este tipo de pátina se puede encontrar en ambientes exteriores, a menudo sobre mármoles o calizas.</i>

Tabla 3.15. Características principales de la película, graffiti y pátina. Fuente: ICOMOS, 2008

BIOCOLONIZACIÓN

Algas

Definición	<p><i>son organismos vegetales microscópicos sin tallos ni hojas, que pueden desarrollarse en exteriores e interiores, como depósitos viscosos o pulverulentos (de espesor variable: desde décimas de milímetros a varios milímetros). Las formaciones de algas pueden ser verdosas, pardas o veladuras negruzcas y se pueden encontrar principalmente en situaciones donde el sustrato permanece húmedo durante períodos prolongados. Dependiendo de las condiciones ambientales y el tipo de sustrato, las algas pueden formar capas sólidas o películas lisas. En monumentos, las algas aparecen constituidas por agrupaciones unicelulares o pluricelulares y nunca forman macroorganismos.</i></p>
Posibles confusiones	<p><i>Las algas se pueden confundir con líquenes, con hongos y algunas veces con hollín o depósitos minerales que ensucian la superficie de la piedra. Cuando las algas se encuentran presentes, al mojar o cepillar la superficie aparece un color verdoso debido a la presencia de clorofila.</i></p>
Notas adicionales	<p><i>Varios son los grupos de algas que pueden crecer sobre o dentro de la piedra, dependiendo del clima y el tipo de piedra. Pueden aparecer algas verdes, diatomeas (normalmente amarillentas o pardas) y en pocos casos, algas rojas.</i></p> <p><i>Las cianobacterias (antes denominadas algas verdes) frecuentemente colonizan la piedra y pueden dar lugar a tintes negruzcos, azulados o aún violetas. En algunos casos, la piedra constituye una fuente de nutrientes. Sin embargo, la superficie solamente suele constituir el soporte sólido para el crecimiento.</i></p>

Tabla 3.16. Características principales de las algas. Fuente: ICOMOS, 2008

BIOCOLONIZACIÓN	
Líquenes	
Definición	<i>Organismos vegetales de formas redondeadas, con tamaños milimétricos o centimétricos, que pueden ser incrustantes o arborescentes con apariencia corchosa, creciendo, generalmente, en el exterior de los edificios. En general, los líquenes, son de color amarillo, gris, naranja, verde o negro, y no muestran diferenciación entre el tallo, raíces y hojas.</i>
Relaciones con el sustrato	<i>Un líquen se compone de un talo, eventualmente con cuerpos fructuosos, desarrollados en la superficie de la piedra, y rizomas que pueden penetrar dentro de la piedra (de diez a varios milímetros).</i>
Subtipos	<i>Los líquenes pueden ser incrustantes, foliosos, y/o epilíticos. Cuando el talo se encuentra principalmente, dentro de la piedra el líquen se denomina endolítico.</i>
Notas adicionales	<i>Todos los líquenes representan un crecimiento simbiótico de hongos y algas verdes o cianobacterias. La presencia del líquen es común en la piedra en exteriores y generalmente, se desarrolla mejor al aire puro, aunque su crecimiento puede ser facilitado por ciertos contaminantes tales como los óxidos de nitrógeno, derivados, primariamente, de la polución del tráfico o la agricultura.</i>
Plantas	
Definición	<i>Seres vivos de naturaleza vegetal, con raíces, troncos y hojas, aunque a veces se encuentran constituidas únicamente por una simple expansión foliar (por ejemplo, árboles, helechos, hierbas).</i>
Notas adicionales	<i>Cuando los edificios no son mantenidos, las plantas colonizarán, eventualmente, los lugares accesibles al agua, extendiendo sus raíces en las juntas y grietas, que serán ampliadas con el crecimiento de las raíces, llegando a romper la piedra.</i>

Tabla 3.17. Características principales de los líquenes y plantas. Fuente: ICOMOS, 2008

BIOCOLONIZACIÓN	
Musgo	
Definición	<i>Organismos vegetales que forman masas acolchonadas de tonos verdosos y tamaño centimétrico. El musgo, generalmente, asemeja un conjunto de hojitas submilimétricas, muy juntas y apretadas. El musgo suele crecer en la superficie de pequeñas cavidades en la piedra, en grietas y en cualquier lugar que permanente o frecuentemente se encuentra húmedo y normalmente en umbría.</i>
Notas adicionales	<i>El musgo cambia de morfología y color frecuentemente como consecuencia de la ausencia o exceso de agua. Durante la estación seca del año, la masa acolchonada se contrae, llegando a endurecerse haciéndose quebradiza y su color cambia a pardo.</i>
Hongos	
Definición	<i>Organismos microscópicos cuyas colonias pueden hacerse visibles a simple vista, presentándose como masas de aspecto plumoso o filamentosos o filiforme radial con distintos colores (blancas, grises o negras).</i>
Posibles confusiones	<i>Algas, que forman capas pulverulentas o viscosas y aparecen únicamente, en áreas permanentemente húmedas. Liquen, generalmente con formas redondeadas incrustantes a arborescentes. Un recubrimiento de liquen suele ser más espeso que una formación de hongos. Eflorescencias salinas, y los estadios iniciales de las concreciones calcáreas; ambos de naturaleza mineral.</i>
Notas adicionales	<i>Los hongos, a menudo, originan serios daños por acción química y mecánica e importantes cambios de color. Como el metabolismo de los hongos necesita un sustrato orgánico, estos se desarrollan generalmente sobre los productos resultantes del metabolismo de algas que se encuentran sobre la piedra.</i>

Tabla 3.18. Características principales del musgo y los hongos. Fuente: ICOMOS, 2008

3.2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS ROCAS

Las propiedades físicas de las rocas contribuyen fuertemente a su durabilidad, son la base de su utilización y supone un indicador importante para cuantificar la calidad de estas. La durabilidad de una roca consiste en su capacidad a resistir y mantener su tamaño y forma original, propiedades mecánicas y aspecto estético con el paso del tiempo (Bell, 1993).

El sistema poroso, el comportamiento hídrico y las propiedades mecánicas conforman las propiedades físicas más relevantes que van a definir la utilización de una roca (Benavente, 2006).

3.2.1. Sistema poroso de las rocas

La relación existente entre el volumen total de poros y el volumen total de la probeta o roca se define como la porosidad de un material pétreo. Además, dependiendo del grado de interconexión con el exterior se puede clasificar la porosidad de la roca. El volumen de poros que presentan un cierto grado de interconexión con el exterior, de forma que un fluido puede ser transportado a su través, se define como porosidad abierta, conectada o efectiva de la roca. Por el contrario, el volumen de poros de una roca que no presenta ningún tipo de comunicación con el exterior se define como porosidad cerrada, aislada o no comunicada (Dullien, 1992).

Resulta necesario transformar la estructura heterogénea y compleja del sistema poroso en modelos simples, para caracterizar el sistema poroso y modelizar las propiedades que dependen de él. Se pueden destacar dos modelos: empaquetamiento de esferas y tubos capilares (Dullien, 1992).

Si se supone que una roca está compuesta de granos o partículas esféricas, se puede describir la porosidad, la morfología y el tamaño de los poros en función del tipo de empaquetamiento y del tamaño de las esferas. Sin embargo, el modelo más extendido para estudiar la estructura del sistema poroso se basa en suponer que este está constituido por un conjunto de tubos capilares. Así, diferentes técnicas de caracterización del sistema poroso, como la porosimetría de mercurio o adsorción de gases, etc., están basadas en este modelo.

El tamaño del poro, el cual se puede cuantificar por su radio o diámetro, constituye otro parámetro imprescindible para la caracterización del sistema poroso de las rocas. Supone un factor determinante en la permeabilidad, capilaridad y durabilidad de la roca, ya que el tamaño del poro que va a influir en la entrada y la movilidad de los agentes contaminantes en su interior. A su vez, el tamaño del poro determina fuertemente la aparición de distintos mecanismos relacionados con el deterioro de las rocas porosas, como la evaporación-condensación o presión de cristalización de las sales y el hielo. Son menos durables las rocas porosas que presenten una fracción de porosidad menor de $1\mu\text{m}$ que las que tienen un tamaño mayor (Benavente, 2006).

Con el objetivo de agrupar los tipos de poros según su tamaño, distintos autores han realizado clasificaciones al respecto. Principalmente, teniendo en cuenta los márgenes específicos de una técnica o campo de estudio, o bien los fluidos que se mueven en su interior, o las propiedades físicas y químicas de la roca. En la Tabla 3.19 se presentan las distintas clasificaciones realizadas en función de su radio (r) o diámetro (d) (Tabla 3.19).

Clasificación	Choquette y Pray	IUPAC	Movilidad del agua	Microscopía óptica
Megaporos	-	-	$d > 100 \mu\text{m}$	-
Macroporos	$r > 4\text{mm}$	$d > 50 \text{ mm } (0,5 \mu\text{m})$	1-100	$r > 2,5 \mu\text{m}$
Mesoporos	4 mm- $60\mu\text{m}$	50 nm y 2 nm	0,01-1	-
Microporos	$r < 60 \mu\text{m}$	$d < 2 \text{ nm } (0,002 \mu\text{m})$	$d < 0,01 \mu\text{m}$	$r < 2,5 \mu\text{m}$

Tabla 3.19. Clasificación de la porosidad en función de su tamaño. Fuente: Choquette y Pray, 1970; IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) Gregg y Sing, 1982; Rouquerol et al., 1994; movilidad del agua (Fort, 1996) y el límite de la microscopía óptica (Ordaz y Esbert, 1985)

Dentro de los procesos que ocurren en las rocas porosas, la superficie específica tiene gran importancia en los procesos de transporte de fluidos en la roca. Además, puede ver reducida su resistencia debido a la presencia de una película de agua sobre la superficie de los poros (Bell, 2000).

Para obtener el valor del área superficial se realizan la adsorción de nitrógeno y la porosimetría de mercurio. Dependiendo del tamaño del poro se empleará una técnica u otra. Para un tamaño de poros mayores de $0,00015 \mu\text{m}$, se realiza el cálculo del área superficial con adsorción de nitrógeno, mientras que, si el tamaño del poro va desde $0,002$ a $100 \mu\text{m}$, se determina mediante la porosimetría de mercurio. Además, los valores obtenidos con adsorción de nitrógeno son superiores a los obtenidos con porosimetría de mercurio, ya que los poros de menor tamaño contribuyen en mayor medida al área superficial (Gregg y Sing, 1982).

Un parámetro físico básico para la realización de la caracterización de las rocas es la densidad. A su vez, se pueden definir diferentes tipos de densidad, como la densidad real, aparente y de conjunto.

El ensayo de inmersión para obtener la porosidad (abierta accesible) y/o coeficiente de absorción, se utiliza ampliamente en el campo de las rocas ornamentales o naturales. Los resultados obtenidos varían en función del sistema poroso de cada roca, como consecuencia de las diferencias en el movimiento del agua. Este ensayo puede llevarse a cabo de distintas formas, destacando la inmersión en agua, a presión atmosférica (durante 48 horas) según norma UNE EN 22-182; al vacío con posterior llenado de agua a presión atmosférica siguiendo las especificaciones de la norma UNE EN 1936); y combinando la capilaridad con la inmersión según la norma UNE EN 13755.

3.2.2. Transporte de fluidos: comportamiento hídrico

Se denominan propiedades hídricas de las rocas, a las propiedades físicas que describen el movimiento del agua, tanto en fase líquida, como en vapor.

Durante los ciclos humedad-sequedad, el agua supone un factor determinante para la durabilidad de las rocas ornamentales. Una roca puede sufrir fatiga durante su vida útil, debido a los procesos de expansión-contracción. Cuando las rocas están saturadas se pueden expandir, lo que disminuye su cohesión (Gauri y Bandyopadhyay, 1999). Además, se genera una presión capilar debido a la tensión interfacial entre la superficie de los poros, el agua líquida y el aire, cuando la roca está parcialmente saturada. Esta presión puede superar valores de 50 MPa en función del tamaño de los poros y humedad relativa ambiental (Hall

y Hoff, 2002). A su vez, la cristalización del hielo y las sales, y la presencia de arcillas, influyen en el deterioro producido en las rocas porosas (Winkler, 1997).

Considerando su estado de saturación resulta posible describir el movimiento del agua en el interior de las rocas. El movimiento de dicho fluido en la roca se define mediante la permeabilidad, cuando la roca se encuentra total o parcialmente saturada de un fluido. Por el contrario, se describe mediante la capilaridad (movimiento del agua líquida debido a las fuerzas capilares), la evaporación (trasporte del vapor de agua asociado a la transformación de estado líquido a estado vapor) y la condensación (trasporte vapor de agua durante la transformación de estado vapor a líquido), si la roca no se encuentra saturada (Benavente, 2006).

Cuando la velocidad de evaporación supera la velocidad de absorción se produce el secado de un material (Hall y Hoff, 2002). Resulta relevante el movimiento que realiza el agua, desde el interior al exterior, durante el secado de la roca. Pudiéndose distinguir dos etapas durante el proceso de secado. En primer lugar, se produce el secado en la parte superficial de la roca, mediante una pérdida de agua constante de forma lineal en el tiempo. Debido al movimiento capilar de la disolución se produce el aporte de agua desde el interior de la roca a la superficie de esta (Hammecker, 1995). Finalmente, se alcanza el contenido de humedad crítica en el interior del medio poroso, lo que reduce el aporte de agua. Como consecuencia, se reduce la velocidad menor durante la segunda etapa del proceso de secado, ya que se produce la difusión del vapor del agua, exclusivamente, desde el interior de la roca hacia el exterior (Scherer, 1990).

Puesto que existe un contenido permanente crítico de humedad en equilibrio con las condiciones ambientales, la pérdida de agua no es completa. Las curvas de secado se representan como el contenido de agua, o pérdida de agua, por unidad de superficie frente al tiempo. En este tipo de representación se pueden distinguir claramente ambas etapas, diferenciadas por el denominado tiempo de inflexión o crítico (Künzel, 1995; Hoffmann et al., 1996). La porosidad conectada establece la cantidad máxima de agua en el interior de la roca, cuando no se tenga en cuenta el agua que puedan albergar fases hidratadas o algunas arcillas presentes en la roca (Fort, 1996). Además, el secado depende en gran medida de la cantidad de agua

que presente la roca, de la distribución de tamaño de poros, y de las condiciones ambientales, velocidad del viento, temperatura y humedad relativa.

3.2.3. Propiedades mecánicas

El ensayo más utilizado para estimar la resistencia mecánica de las rocas ornamentales es el ensayo de compresión uniaxial y se encuentra recogido en varias especificaciones, como la ASTM. Este ensayo determina la resistencia uniaxial no confinada de la roca, o resistencia a compresión simple, y las constantes elásticas estáticas: módulo de Young y Módulo de Poisson. Permite, por tanto, clasificar la roca en función de su resistencia y deformabilidad.

Tiene que existir una elevada densidad de fisuras para que se produzca una rotura bajo compresión. Debido a la fragmentación y a la fractura una roca se rompe por compresión. Por un lado, cuando la nucleación de la fisura es homogénea y no hay interacción entre las fisuras se produce la fragmentación. Este fenómeno sucede en rocas altamente porosas. Por otro lado, debido a la anisotropía de las rocas, se produce la fractura, como consecuencia de la concentración de fisuras microscópicas que se unen, durante la aplicación de la carga uniaxial, formando una fisura macroscópica. Aunque se asume que la rotura de la roca por compresión se produce cuando se alcanza la resistencia del pico, experimentalmente se ha comprobado la generación de microfisuras comienza para esfuerzos previos al pico, entre el 50% y el 95% de la resistencia a compresión simple (Guéguen y Palciauskas, 1994). Dado el carácter no reversible de este ensayo, conviene acotar su uso en la roca ornamental.

Debido a su carácter no destructivo del ensayo de velocidad de ultrasonidos, resulta extremadamente útil para la evaluación "in situ" de los materiales empleados en el patrimonio arquitectónico. Además, la técnica de propagación de ondas ultrasónicas ha sido ampliamente usada tanto en ensayos de laboratorio como en medidas de campo para la caracterización de rocas ornamentales procedentes de la cantera, colocados en obra y en monumentos (Montoto, 1996).

Las velocidades sónicas obtenidas en las rocas ornamentales metamórficas o ígneas resultan elevadas y más definidas que en rocas sedimentarias (Schön, 1996). Este factor se debe principalmente a la alta porosidad de estas últimas.

Por tanto, la determinación de la propagación de las ondas resulta imprescindible para llevar a cabo la caracterización petrográfica de las rocas, ya que esta variable se encuentra determinada por múltiples factores, como son las propiedades elásticas de los minerales que la constituyen, el grado de cementación, las distintas orientaciones, su anisotropía, su porosidad y el contenido de los poros o discontinuidades que presenta. Por ejemplo, el cuarzo presenta una V_P relativamente baja (6050 m/s), en comparación con otros minerales como la calcita (6650 m/s) o la dolomita (7370 m/s). Por lo tanto, una roca con un elevado contenido en cuarzo (ejemplo: cuarzo-arenita) tiene una V_P inferior que una roca con menor contenido (ejemplo: arcosa), lo que proporciona, en ocasiones, una estimación errónea de la resistencia mecánica de estas rocas ya que, en general, una cuarzo-arenita presenta una resistencia mecánica superior que una arcosa (Goodman, 1989).

La presencia de poros y fisuras es otro parámetro petrológico que influye firmemente en la propagación de las ondas (Schön, 1996). Además, entre la porosidad y la velocidad existe una relación inversa, puesto que, al pasar de una fase sólida a aire o líquido, dependiendo del grado de saturación de agua del material, la onda sufre una elevada atenuación, siendo esta influencia menos relevante sobre las ondas S que sobre las P.

Los valores de velocidad de propagación de las ondas pueden modificarse fuertemente, debido al contenido en humedad de la roca. A su vez, esta influencia resulta más evidente para las ondas P, como consecuencia de la diferencia que existe entre la compresibilidad del aire y del agua. En general, cuando los poros presentan disoluciones, la velocidad de las ondas P aumenta, ya que la compresibilidad del agua es superior que la del aire. Por el contrario, independientemente del grado de saturación que presente la roca, la velocidad de las ondas S permanece casi constante, pues estas ondas sólo se propagan a través de la fracción sólida (Schön, 1996). Por el contrario, las velocidades sónicas pueden ser menores cuando están saturadas, en algunas rocas altamente porosas. Este hecho puede ser explicado con la teoría de Biot de propagación de ondas elásticas en medios saturados (Valdeón et al., 1996).

IV. METODOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO DE LAS MUESTRAS

IV. METODOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO DE LAS MUESTRAS

El estudio que se hace del Tabaire en la presente Tesis Doctoral se puede dividir en tres bloques: “in situ”, mineralógico y petrográfico y por último de caracterización petrofísica. En el presente capítulo, se establece la metodología empleada para realizar dicho estudio, para ello se establecen los ensayos previstos, tanto “in situ”, como la recogida de muestras y su posterior análisis en laboratorio, con el objetivo de determinar la composición mineralógica y petrográfica, la caracterización petrofísica y la durabilidad mediante cristalización de sales de la piedra. Tal y como se ha indicado en el capítulo *Introducción y Justificación de la Tesis*, entre los objetivos del presente capítulo se encuentran, a su vez, el de estimar el vaciado de tierras producido en la cantera original de extracción en los periodos de explotación, así como el de evaluar las propiedades y el estado de conservación actual en el que se encuentra la piedra en cada uno de los emplazamientos estudiados. Una vez solicitada y aprobada la preceptiva autorización por parte de la Dirección General de Bienes Culturales de la Región de Murcia, se procede a la toma de muestras atendiendo a los siguientes criterios: distintos estados de degradación que presenta la piedra, diferentes cotas respecto al suelo, así como los análisis que posteriormente se pretenden realizar.

4.1. SELECCIÓN DE MUESTRAS

La recogida de las muestras para realizar los estudios mineralógico y petrográfico y de caracterización petrofísica se llevaron a cabo en las construcciones objeto de estudio y en la cantera original de extracción. De las nueve construcciones en las que se detectó el Tabaire (Figura 2.23), fue posible realizar los ensayos no destructivos y muestrear siete de ellas (Figura 4.1), donde la piedra se encuentra accesible. Dichos ensayos fueron, igualmente, efectuados en la cantera donde se tomaron muestras de los distintos litotipos encontrados.

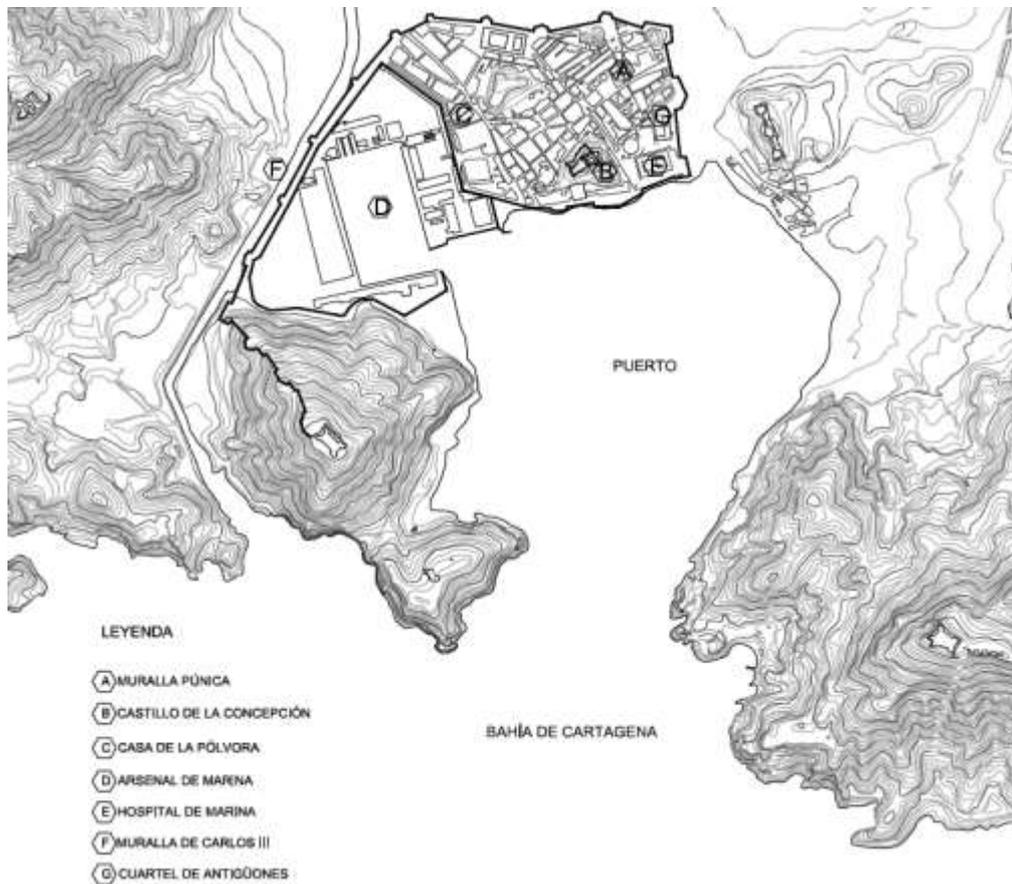


Figura 4.1. Ubicación de las construcciones objeto de estudio. Fuente: elaboración propia a partir del plano publicado en (Martínez, 2015)

Inicialmente se realizó un estudio fotográfico de la piedra con el objetivo de valorar cualitativamente los daños que pudieran afectar a la misma. Se realizaron aproximadamente 1200 fotografías, y posteriormente se seleccionaron algunas de las más representativas, expuestas en el capítulo 5 de la presente Tesis Doctoral.

Se tomaron diferentes muestras "in situ", para determinar, mediante distintas técnicas instrumentales, el análisis mineralógico y petrográfico de la piedra Tabaire, que serán tratadas más adelante en detalle.

La selección de las muestras estuvo más condicionada de lo previsto, debido principalmente a dos factores. Por un lado, los inmuebles objeto de estudio se encuentran protegidos por la Dirección General de Bienes Culturales de la Región de Murcia y, por otro lado, existe la dificultad añadida de la imposibilidad de

acceder a determinadas zonas. Por esta razón, una vez obtenida la preceptiva autorización se muestrearon aquellos elementos fácilmente practicables.

Las técnicas empleadas para realizar el análisis mineralógico y petrográfico de la piedra fueron: Difracción de Rayos X (DRX), Porosimetría de Intrusión de Mercurio (MIP), Lámina Delgada y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

4.1.1. Herramientas para la toma de muestras

Durante el periodo de recogida de muestras se utilizaron como instrumentos para la toma de muestras: un pequeño cincel metálico y un martillo con el que golpear la zona si fuera necesario, una brocha para desprender las zonas más deterioradas y bolsas de plástico herméticas para conservar adecuadamente las muestras (Figura 4.2). Una vez seleccionadas las muestras se fueron recogiendo las mismas, a fin de ser analizadas en laboratorio. Los fragmentos recogidos, de dimensiones $2 \times 2 \text{ cm}^2$ aproximadamente, se introdujeron en bolsas de plástico herméticamente cerradas y etiquetadas según la designación desarrollada en el siguiente apartado.



Figura 4.2. Herramientas para la recogida de muestras. Fuente: elaboración propia

4.1.2. Identificación de las muestras

Para identificar las muestras se usó una nomenclatura sencilla. En primer lugar, utilizando las siglas ML (muestra de laboratorio) y, a continuación, asignándoles una letra en orden alfabético, resultado de ordenar, en función de la antigüedad, las construcciones objeto de estudio. En la Tabla 4.1 se presentan la totalidad de las muestras seleccionadas y su cota respecto al suelo.

Construcción	Designación	Muestras	Cota (m)
Muralla Púnica	MLA	MLA1	0,65
		MLA2	0,70
		MLA3	0,00
		MLA4	0,40
		ML5	0,00
Castillo de la Concepción	MLB	MLB1	0,75
		MLB2	0,90
		MLB3	1,20
Casa de la Pólvora	MLC	MLC1	0,70
		MLC2	0,75
		MLC3	0,80
Real Arsenal de Marina	MLD	MLD1	0,55
		MLD2	1,20
		MLD3	0,30
		MLD4	0,10
		MLD5	0,50
Real Hospital de Marina y Anfiteatro de Autopsias	MLE	MLE1	1,20
		MLE2	1,50
Muralla de Carlos III	MLF	MLF1	1,70
		MLF2	0,30
		MLF3	2,20
Cuartel de Antigüones	MLG	MLG1	0,20
		MLG2	0,20
		MLG3	0,20
Cantera	MLCAN	MLCAN1	0,00
		MLCAN2	0,00
		MLCAN3	0,00
		MLCAN4	0,00
		MLCAN5	0,00

Tabla 4.1. Relación de muestras tomadas y su cota respecto al suelo. Fuente: elaboración propia

Antes de profundizar en el análisis realizado conviene explicar en detalle cada una de las muestras recogidas. Así, se realiza una breve descripción de las muestras seleccionadas en cada uno de los inmuebles objeto de estudio, especificando su estado de conservación y cota respecto al suelo.

En la Figura 4.3 se exponen las fotografías de las muestras seleccionadas en la Muralla Púnica. Se recogieron un total de cinco muestras, descritas en la Tabla 4.2.

Designación	Descripción
MLA1	Muestra extraída a 20 cm del suelo, de un bloque aislado, cercano a la fachada del museo, de dimensiones 98x50x32 cm ³ y estado de conservación medio.
MLA2	Se trata de una muestra extraída a 30 cm del suelo, de un bloque situado frente a MLA1, de dimensiones 52x45x60 cm ³ y estado de conservación aparentemente bueno.
MLA3	Se trata de una muestra del material desprendido, recogida por tanto del suelo, situado bajo un bloque bastante deteriorado.
MLA4	Muestra de piedra que incluye parte del recubrimiento, recogida a una cota de 40 cm respecto del suelo, en una zona donde la piedra se encuentra en aparente buen estado de conservación.
MLA5	Se trata de un fragmento de material desprendido y recogido del suelo. La piedra se encuentra deteriorada.

Tabla 4.2. Descripción de las muestras tomadas en la Muralla Púnica, ubicación y estado de conservación. Fuente: elaboración propia



Figura 4.3. De izquierda a derecha y de arriba abajo: MLA1, MLA2, MLA3, MLA4 y MLA5.
Fuente: elaboración propia

Las tres muestras seleccionadas en el Castillo de la Concepción se describen en la Tabla 4.3. Todas ellas se tomaron en la sala de los aljibes de la torre (Figura 4.4).

Designación	Descripción
MLB1	Se trata de una muestra del material recogida a 60 cm, situada en una zona donde la piedra se encuentra bastante consolidada.
MLB2	Muestra del material recogida a 60 cm, se encuentra en una zona donde la piedra se encuentra en buen estado de conservación.
MLB3	Muestra tomada en la cara interior de un muro de carga, a una altura de 60 cm, en esta zona la piedra se encuentra aparentemente menos consolidada.

Tabla 4.3. Descripción de las muestras recogidas en el Castillo de la Concepción, ubicación y estado de conservación. Fuente: elaboración propia



Figura 4.4. MLB1 y MLB3 (izquierda). MLB2 (derecha). Fuente: elaboración propia

En la casa de la Pólvara, se tomaron tres muestras (descritas en la Tabla 4.4). Dichas muestras se corresponden con los tres pilares que quedan expuestos en la sala interior de la construcción (Figura 4.5).

Designación	Descripción
MLC1	Muestra de piedra recogida a una cota de 70 cm, en una zona que se encuentra en aparente buen estado de conservación.
MLC2	Se trata de una muestra del material recogida a 75 cm, se encuentra en peor estado que la MLC1.
MLC3	Se trata de una muestra del material recogida a 80 cm. Se encuentra en un estado similar al de MLC2.

Tabla 4.4. Descripción de las muestras recogidas en la Casa de la Pólvara, ubicación y estado de conservación. Fuente: elaboración propia



Figura 4.5. MLC1 (izquierda). MLC2 (centro). MLC3 (derecha). Fuente: elaboración propia

En el Arsenal, las muestras fueron tomadas en Jefatura industrial (Figura 4.6). En esta sala encontramos una gran cantidad de paramentos donde la piedra Tabaire se encuentra visible, facilitando el muestreo. Se recogieron un total de cinco muestras, descritas en la Tabla 4.5, el criterio de selección atiende a los distintos estados de degradación de la piedra. Asimismo, se recogieron eflorescencias a fin de ser analizadas.

Designación	Descripción
MLD1	Muestra recogida a 55 cm del suelo, correspondiente al mortero de rejuntado dispuesto entre sillares. En la toma de la muestra puede producirse arrastre de sales y piedra.
MLD2	Muestra de piedra recogida en una zona donde el paramento se encuentra húmedo, a una cota de 120 cm.
MLD3	Muestra de eflorescencias, recogida a una cota de 30 cm.
MLD4	Muestra de piedra tomada a una cota de 10 cm. Se encuentra en mal estado de conservación, muy disgregada, se desprende fácilmente, tonalidad más oscura, se aprecia la presencia de humedades.
MLD5	Muestra de piedra recogida a una altura de 50 cm, dicha zona se encuentra bastante degradada.

Tabla 4.5. Descripción de las muestras recogidas en el Arsenal, ubicación y estado de conservación. Fuente: elaboración propia



Figura 4.6. De izquierda a derecha y de arriba abajo: MLD1, MLD2, MLD3, MLD4 y MLD5.
Fuente: elaboración propia

En el Hospital de Marina, las muestras fueron recogidas en el muro perimetral que rodea el edificio (Figura 4.7), dada la imposibilidad de recoger muestras en el propio inmueble, puesto que la piedra Tabaire no se encuentra visible, al estar recubierta con mortero de revestimiento.

Designación	Descripción
MLE1	Muestra recogida a 1,20 m del suelo, en una zona donde se aprecia la presencia de biodeterioro.
MLE2	Se corresponde con una muestra recogida a una altura de 1,50 m. En la zona de toma de muestra la piedra se encuentra en mal estado de conservación, ya que se desprende fácilmente.

Tabla 4.6. Descripción de las muestras recogidas en el Hospital de Marina, ubicación y estado de conservación. Fuente: elaboración propia



Figura 4.7. MLE1 (inferior) y MLE2 (superior). Fuente: elaboración propia

En la Muralla de Carlos III se tomaron muestras en el tramo de la rambla de Benipila, concretamente en el baluarte nº7 (Figura 4.8), donde encontramos que en los ángulos de la muralla son visibles los sillares regulares de Tabaire. Las muestras recogidas se describen en la Tabla 4.7.

Designación	Descripción
MLF1	Muestra tomada a 1,70 m, se encuentra en una zona donde el estado de conservación de la piedra puede ser considerado medio.
MLF2	Se corresponde con un fragmento recogido a 0,30 m del suelo, donde la muralla se encuentra en peor estado de conservación.
MLF3	Muestra de piedra recogida a 2,20 m del suelo. Se encuentra en un estado de conservación medio.

Tabla 4.7. Descripción de las muestras recogidas en la Muralla de Carlos III, ubicación y estado de conservación. Fuente: elaboración propia



Figura 4.8. MLF1 (izquierda), MLF2 (derecha inferior) y MLF3 (derecha superior). Fuente: elaboración propia

En el Cuartel de Antigüones se tomaron muestras en una zona de la fachada norte (Figura 4.9), descritas en la Tabla 4.8, donde, como se aprecia en la fotografía la piedra se encuentra visible.

Designación	Descripción
MLG1	Muestra tomada a 20 cm respecto del suelo, recogida de una zona donde la piedra se encuentra en buen estado. Se advierte la presencia de biodeterioro.
MLG2	Se corresponde con un fragmento tomado a 20 cm, se encuentra en peor estado de conservación que MLG1.
MLG3	Muestra recogida a 0,20 m, en una zona donde el Tabaire presenta una coloración más amarillenta.

Tabla 4.8. Descripción de las muestras recogidas en el Cuartel de Antigüones, ubicación y estado de conservación. Fuente: elaboración propia



Figura 4.9. MLG1 (izquierda), MLG2 (centro) y MLG3 (derecha). Fuente: elaboración propia

Por último, en la cantera original de extracción se recogieron cinco bloques (Figura 4.10), que se corresponden con los cinco litotipos encontrados, de donde se tomaron las muestras que se describen en la Tabla 4.9.

Designación	Descripción de las muestras
MLCAN1	Biocalcarenita menos compacta, se advierte la presencia de arcillas
MLCAN2	Biocalcarenita de fósil pequeño y grano fino
MLCAN3	Biocalcarenita de fósil grande y grano grueso
MLCAN4	Biocalcarenita menos compacta
MLCAN5	Biocalcarenita más compacta

Tabla 4.9. Descripción de las muestras recogidas en la cantera. Fuente: elaboración propia



Figura 4.10. MLCAN2, MLCAN3, MLCAN4 y MLCAN5. Fuente: elaboración propia

4.2. ENSAYOS “IN SITU”

Los ensayos no destructivos efectuados “in situ” en los inmuebles objeto de estudio, consistieron en la determinación de la velocidad de ultrasonidos y el esclerómetro Schmidt. En los apartados 4.2.1 y 4.2.2 se expone la metodología empleada para la determinación de ambos parámetros.

Una vez detectada la presencia de la piedra Tabaire en cada inmueble, se procedió a la realización de dichos ensayos, donde, se fueron anotando los resultados obtenidos para cada uno de los elementos analizados. El criterio seleccionado consistió en medir ambos parámetros a distintas cotas, las tablas desarrolladas para la realización de dichos ensayos se exponen en los Anexos.

Los ensayos no destructivos, de ultrasonidos y esclerómetro Schmidt, se llevaron a cabo en todos los inmuebles objeto de estudio, donde fue posible acceder al material, así como en la cantera original de extracción. Ambos métodos ofrecen la posibilidad de obtener parámetros como la porosidad y la dureza superficial de la piedra.

Por otro lado, en el apartado 4.2.3 se expone la metodología empleada para la estimación del vaciado de la cantera, con el objetivo de determinar el impacto ambiental que supuso dicha extracción.

4.2.1. Velocidad de Ultrasonidos

Entre los métodos no destructivos empleados en rocas, la determinación de la velocidad de ultrasonidos es uno de los más frecuentes, ya que permite determinar la presencia de posibles anisotropías, deducir la porosidad interna y detectar el grado de deterioro causado por el paso del tiempo (Martínez, 2008).

El ensayo se realiza según norma UNE EN 14579. El equipo consiste esencialmente en un generador de impulsos eléctricos, un par de transductores: emisor (T) y receptor (R), un amplificador y un dispositivo temporizador electrónico. La técnica de este ensayo se basa en la generación de ondas elásticas por impulsos ultrasónicos en un punto específico de la muestra. El instrumento proporciona la medida del tiempo que tarda la onda en recorrer una distancia conocida entre emisor y receptor.

Los transductores pueden colocarse de tres formas distintas de modo que la transmisión de onda puede ser directa, semidirecta o indirecta, como se muestra en la Figura 4.11.

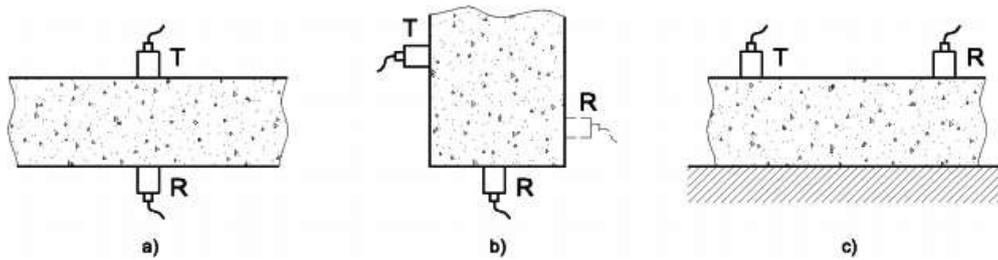


Figura 4.11. Formas de colocación de los palpadores, siendo T: emisor y R: receptor. a) Transmisión directa b) Transmisión semidirecta c) Transmisión indirecta o de superficie. Fuente: norma UNE EN 14579

La transmisión directa y semidirecta la velocidad de pulso se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$V = \frac{L}{T} \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

Siendo:

V: velocidad de pulso, en m/s.

L: distancia entre transductores, en m.

T: tiempo que emplea el impulso para atravesar la longitud del recorrido, en $(\mu\text{s}) \cdot 10^{-6}$

La forma idónea de colocación de los palpadores será la directa, ya que proporciona la máxima sensibilidad y se obtiene una longitud de trayectoria de onda bien definida. Sin embargo, algunas veces no resulta posible acceder a las distintas caras de un bloque, por lo que se opta por las otras opciones.

Puesto que existe cierta incertidumbre respecto de la longitud exacta del recorrido de transmisión, la colocación indirecta es la menos satisfactoria. Para eliminar esta incertidumbre será necesario realizar una secuencia de medidas manteniendo los transductores separados, colocando el emisor en un punto fijo de la superficie de la piedra y el receptor a unas distancias previstas previamente a lo largo de una misma línea. En la Figura 4.12 se muestra una gráfica que establece la relación entre los tiempos de transmisión detectados respecto de la distancia que separa los transductores.

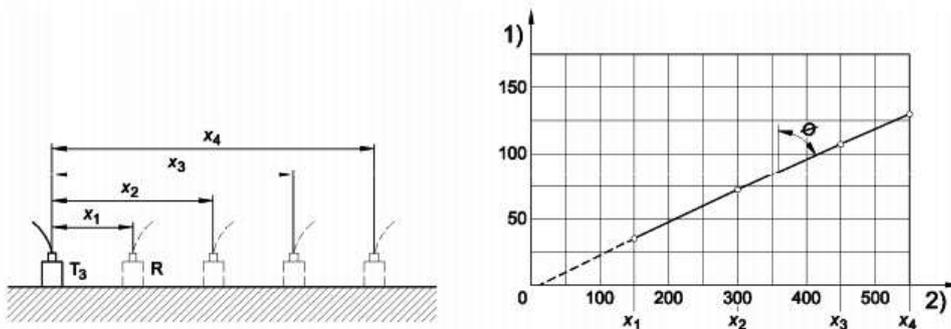


Figura 4.12. Método empleado para la medición mediante transmisión indirecta (izquierda). Gráfica relación distancia de los transductores (eje abscisas) y tiempo de transmisión (eje ordenadas) (derecha). Fuente: norma UNE EN 14579

La propagación de ultrasonidos en un medio rocoso depende directamente de una serie de factores (Lama y Vutukuri, 1978): unos son intrínsecos, es decir, debidos a las características propias del medio rocoso (mineralogía, textura, densidad, porosidad y anisotropías); y otros extrínsecos, son ajenos a la naturaleza del material y están producidos o por las condiciones de ensayo ambientales (grado de humedad, temperatura y presión) o por la instrumentación utilizada. Por tanto, las mediciones obtenidas estarán influenciadas por dichos factores. Entre los factores extrínsecos se encuentran los siguientes:

- Módulo de Young: existe una relación directa entre el módulo de Young y la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas.

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

Siendo:

v : velocidad de propagación de la onda ultrasónica, en m/s.

Y : módulo de Young, en Pa.

ρ : densidad, en kg/m³.

Por lo que respecta a los factores extrínsecos, el principal es el contenido de humedad en el seno de la piedra. En el agua las ondas longitudinales se propagan con una velocidad mayor que en el aire. Por lo tanto, una muestra total o parcialmente saturada tendrá una velocidad de propagación mayor que una muestra seca (siempre y cuando la porosidad sea la misma) (Montoto San Miguel, 2001).

La rugosidad de la superficie, la temperatura del medio, la separación de los transductores o el contenido de humedad, son algunas de las variables que pueden influir en la determinación de la velocidad ultrasónica (Alcañiz, 2011).

En cuanto a la metodología "in situ", se seleccionó un aparato portátil para la medición de la velocidad de ultrasonidos (Figura 4.13), que cuenta con dos sondas de 150 kHz. Se tomaron medidas en todas las construcciones en las que el Tabaire se encontraba visible y accesible, así como en la cantera original de extracción. Se procedió a la toma de un gran número de medidas en todos los bloques mediante transmisión directa, cuando no fue posible realizando transmisión semidirecta y evitando la transmisión indirecta.

Para facilitar el trabajo de campo se elaboró una ficha, en la que se indica la fecha del ensayo, la construcción a la que pertenece el bloque muestreado y la cota respecto al suelo. Se fueron anotando los valores obtenidos conjuntamente para ambos ensayos no destructivos de velocidad de ultrasonidos y esclerómetro Schmidt.



Figura 4.13. Equipo de ultrasonidos (izquierda). Medida “in situ” de la velocidad de ultrasonidos (derecha). Fuente: elaboración propia

4.2.2. Esclerómetro Schmidt

El Esclerómetro Schmidt es un ensayo no destructivo fácilmente aplicable “in situ”, que se utiliza principalmente para determinar la dureza superficial de los materiales. En el mercado existen modelos analógicos y digitales, para este ensayo se ha empleado el segundo y se ha procedido a la realización del ensayo según norma ASTM D5873-14.

El modelo de martillo empleado se corresponde con el modelo L/LR, cuenta con una energía de impacto de 0,735 Nm, menor que la de otros modelos disponibles en el mercado, lo que convierte a este martillo en una opción ideal para ensayar elementos que se encuentran en edificios patrimoniales. Los martillos del modelo L/LR se utilizan por lo general para ensayos de clasificación de núcleos de rocas y rocas frágiles, en la mecánica de rocas.



Figura 4.14. Esclerómetro Schmidt (izquierda). Toma de medidas “in situ” (derecha). Fuente: elaboración propia

El esclerómetro da como resultado el índice de rebote (R), a partir del cual, mediante una gráfica (Figura 4.15), se obtiene la resistencia aproximada del material en N/mm². Dicha gráfica muestra los valores en función de la posición del esclerómetro a la hora de medir, siempre perpendicular a la superficie de medida, ya que influye notablemente en el resultado.

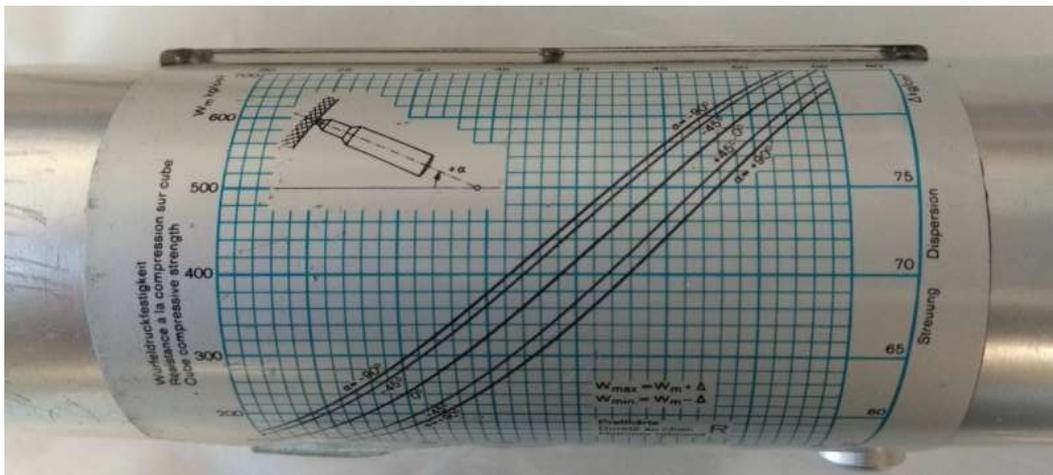


Figura 4.15. Curvas índice de rebote-resistencia característica. Fuente: elaboración propia

Este ensayo se llevó a cabo en los mismos emplazamientos y se realizó posteriormente a la medición de la velocidad de ultrasonidos, ya que, aunque se trata de una técnica no destructiva, al ser el Tabaire una roca frágil la fuerza empleada mediante el golpeo con el martillo puede provocar roturas internas, asimismo, se consideró pertinente no realizar este ensayo en algunas de las construcciones, debido a su uso y estado de conservación.

4.2.3. Impacto Ambiental mediante la estimación del vaciado de canteras

Para determinar el impacto ambiental de un material de construcción se hace necesario calificar y cuantificar el peso de sus impactos durante todo su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas o la transformación en productos, hasta el transporte, la puesta en obra, el uso, la posible demolición o deconstrucción, y, por último, la valorización o el depósito de residuos (Mercader et al., 2016).

La presente Tesis Doctoral se centra en el análisis de las etapas de: extracción, transporte y puesta en obra. En el apartado 2.4. *El uso del Tabaire en la Arquitectura Militar de Cartagena. Extracción, transporte y puesta en obra*, se estudian estos parámetros en los distintos inmuebles objeto de estudio.

Respecto a la extracción, se analizan también las características geométricas actuales de la excavación de Canteras, mediante levantamiento fotogramétrico realizado a través de un vehículo aéreo no tripulado, estimando el volumen total de piedra extraída con respecto a la estimación objetiva del terreno en su estado natural.

El levantamiento fotogramétrico posee grandes ventajas tanto en levantamiento de zonas en detalle, como de amplia extensión, reduciendo en ambos casos: procesos, medios auxiliares y estadía en campo. Además, ofrece la posibilidad de su empleo en zonas de difícil o imposible acceso, así como la de relacionar el trabajo de fotogrametría terrestre con el de altura realizado a través de vehículo aéreo no tripulado (VANT).

Los equipos y programas empleados en el estudio fueron los siguientes:

- GPS Leica GS08 Plus con controladora de campo CS15 y software Spider del mismo fabricante.
- DJI Phantom 3 con sensor Exmor R CMOS y óptica Carl Zeiss de 20 Mpx
- Software fotogramétrico Agisoft PhotoScan Professional Edition v. 1.4.1 en su versión 5.9.2.5 Mission Planner
- Software de apoyo al trabajo con nubes de puntos CloudCompare Omnia v. 2.9.1.



Fig. 4.16. GPS Leica GS08 Plus (izquierda). DJI Phantom 3 (derecha). Fuente: https://www.instop.es/leica_viva/gso8plus.php

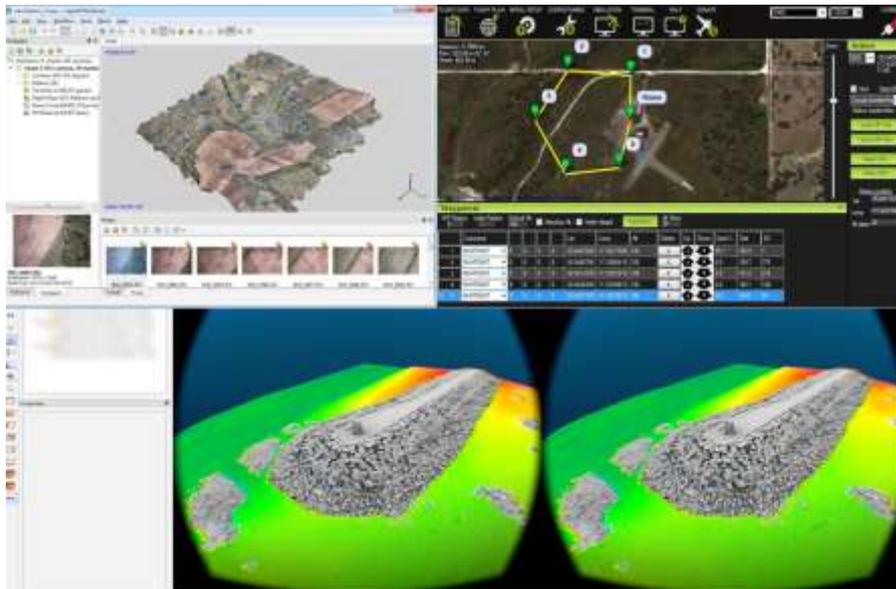


Fig. 4.17. Softwares empleados para el tratamiento de datos. Fuente: elaboración propia. Fuente: <https://www.agisoft.es/products/agisoft-photoscan/>

En cuanto a la metodología empleada, se dividió el estudio en tres fases: planificación del levantamiento aéreo, toma de datos en campo y trabajo de gabinete.

En la primera etapa de planificación del levantamiento aéreo resultan claves los siguientes aspectos:

- Estudio del lugar, realizando una inspección visual inicial del medio y de las zonas de excavación donde se va a trabajar.
- Documentación de apoyo mediante el diseño de un croquis general donde quede representada la orientación y las cotas principales que, posteriormente y dentro del trabajo de gabinete, servirán para comprobar la validez del modelo y su correcto escalado comparando estos datos de medición directa con los obtenidos por métodos indirectos de coordenadas absolutas dados por el GPS de referencia.
- Toma fotográfica, sin intención fotogramétrica, que facilita la percepción del entorno con respecto a las zonas de interés.

Una vez concluida la fase inicial, se procede al despliegue de medios a la zona de trabajo donde, en primer lugar, se procede al ejecutado del proyecto de estacionamiento y captura fotográfica. Posteriormente, se posicionan la estación de tierra (GCS) y el VANT (Figura 4.16) y se obtienen las imágenes aéreas de acuerdo con la planificación previa. Aquí se realiza la captura para, posteriormente, procesar en gabinete el material gráfico y obtener los diferentes productos fotogramétricos.

Dada la extensión, ubicación de la zona a levantar, orografía y la adecuada resolución del píxel del fotograma a escala del terreno (Ground Sample Distance) se establecen unos recubrimientos longitudinales y transversales de las tomas fotográficas que garantizan unos modelos estereoscópicos entre pares de tomas válidos para las necesidades del estudio. La extensión del territorio cubierta por el vuelo se desarrolla en función de los requerimientos documentales de la investigación y, es por ello, por lo que se decide trabajar con el objetivo desviado con respecto a la inclinación del eje vertical y efectuando ligeras variaciones en altura de vuelo que permitan conseguir un relieve del terreno de alta resolución.

La planificación del vuelo comienza dibujando el polígono de la zona que se quiere cartografiar, se elige el tipo de cámara FC300S, la altura de vuelo sobre el

nivel del suelo y, posteriormente, se programa el solape de imágenes requerido tanto frontal como lateral para que el dron realice la cantidad de fotos necesarias.

Se carga la planificación de vuelo en el dispositivo móvil (iPad Pro 9,7") que hace las veces de monitor en tiempo real del VANT sobre el software Mission Planner.

Las señales de puntería empleadas georreferencian el terreno a través de la toma de coordenadas del sistema de referencia geodésico ETRS89. Éstas son perfectamente visibles y están equidistribuidas por toda la zona de intervención. En total se georreferencian 35 puntos.

La georreferenciación del modelo se consigue empleando un GPS de la marca Leica modelo GS08 Plus y una controladora de campo CS15. Los puntos se sustentan en zonas de fácil localización y estables en el tiempo sirviendo, por un lado, de dianas al software de restitución fotogramétrica y, por otro, para dotar al modelo final de escala y de datos de situación absoluta.

Las señales de puntería empleadas georreferencian el levantamiento a través de la toma en campo de coordenadas en el sistema de referencia geodésico ETRS89. Estas son perfectamente visibles y están equidistribuidas en cada una de las fotografías capturadas y por toda la zona de intervención.



Fig. 4.18. Puesta a punto del vehículo aéreo no tripulado previo a la realización del trabajo fotogramétrico en altura (izquierda) y de la estación de tierra (GCS) (derecha). Fuente: elaboración propia

El vuelo se realiza de forma automatizada, bajo previa georreferenciación a través de puntos estables en terreno determinados por un equipo topográfico GPS, con una calibración inicial del dron para la captación de una adecuada señal GPS y con una altura de vuelo fija de 40 metros con respecto al terreno.

Las condiciones meteorológicas se estudiaban con anterioridad a cada una de las visitas, evitando así aquellos días en los que la velocidad del viento fuera superior a 6 m/s.

Para asegurarnos de conseguir una buena definición de los paños verticales de la cantera se planifica un vuelo circular de radio 25 metros, 35° de inclinación y altura variable a 1,5 m/s de velocidad para cada una de las porciones o tramos de excavación en pie.



Fig. 4.19. Planificación de vuelo automatizado para fotogrametría aérea. Fuente: elaboración propia

Nº fotografías realizadas	720
Altura de vuelo	Variable en círculos concéntricos
Tiempo de vuelo	217 minutos
Velocidad media de desplazamiento	1,5 m/s

Tabla 4.10. Datos de la toma fotográfica aérea. Fuente: elaboración propia

En la etapa de trabajo de gabinete, empleando la documentación gráfica, documental y fotográfica recopilada en campo, y a través del software escogido para emplear la fotogrametría, Agisoft PhotoScan y, posteriormente, CloudCompare de Hogfather y AutoCAD de Autodesk se alcanza toda la documentación gráfica planimétrica y volumétrica de las canteras y su entorno más cercano.

Secuencialmente y a través de los útiles de cálculo de PhotoScan, se logra la construcción de modelos 3D basado en técnicas de fotogrametría digital.

Mediante el alineado de imágenes se calcula la posición relativa desde donde fueron tomadas cada una de las fotografías. El cálculo de mapas de profundidad permite conocer a qué distancia está cada píxel de la imagen de la cámara y, con ello, se genera una nube de puntos con coordenadas conocidas X, Y, Z, excepcionalmente densa (163.355.939 puntos). Por último, se obtiene una malla TIN (Triangular Irregular Network) de superficie, en base a la nube de puntos densa, que genera el Modelo Digital de Superficies (MDS) y desde la cual se sustenta la textura que permite generar ortofotografías de alta definición.

4.3. ENSAYOS DE LABORATORIO

Para analizar las muestras extraídas tanto en los diferentes inmuebles objeto de estudio, como en la cantera original de extracción, en los siguientes apartados se expone la metodología empleada en los ensayos realizados en laboratorio, desde la preparación de la muestra de ensayo hasta la metodología empleada para la determinación de: la densidad aparente de la piedra, la realización de las Técnicas No Destructivas (NDT), el estudio mineralógico y petrográfico (mediante Difracción de Rayos X, Porosimetría de Intrusión de Mercurio, Lámina Delgada y Microscopía Electrónica de Barrido) y la caracterización petrofísica del Tabaire (mediante estudio de la rotura a compresión de la piedra con distintos grado de saturación, la determinación del coeficiente de agua por capilaridad, la porosidad abierta al vacío y la durabilidad mediante cristalización de sales).

4.3.1. Preparación de la muestra de ensayo

Con el objetivo de estudiar las propiedades de la piedra y estudiar las posibles correspondencias que pudieran existir entre la cantera original de extracción y los inmuebles objeto de estudio, se procede al muestreo de la cantera. En las visitas de campo realizadas se advierte discontinuidad en los distintos frentes de cantera, tanto lateral producida por las diferentes propiedades que presenta la piedra, como vertical debido a los distintos periodos de extracción.

Dada la heterogeneidad del material, se decide seleccionar un total de cinco bloques, correspondientes a los cinco litotipos diferentes detectados en la cantera original de extracción y se procede a su transporte hasta el laboratorio de petrología de la Universidad de Alicante para realizar el proceso de extracción de las probetas testigo y comenzar con el plan de ensayos previsto.



Figura 4.20. Frente norte de la cantera original de extracción. Fuente: elaboración propia

Una vez en laboratorio, se procedió a la extracción de las probetas testigo (Figura 4.21). Posteriormente, los testigos se conservaron en estufa durante 48 horas.



Figura 4.21. Corte de uno de los bloques de Tabaire (izquierda). Proceso de extracción de las probetas testigo (derecha). Fuente: elaboración propia

Se llevaron a cabo las extracciones en cada uno de los bloques seleccionados de la cantera y, tras cortarlos, se obtuvieron un total de sesenta y nueve probetas de seis centímetros de altura y tres centímetros de diámetro (1-69) y tres probetas cúbicas de 4 cm de arista (70-72).



Figura 4.22. Detalle del proceso de extracción de probetas testigo (izquierda). Matriz de la roca visible tras el corte, donde pueden apreciarse restos fósiles (derecha). Fuente: elaboración propia

Posteriormente, se marcaron las probetas para su identificación y se clasificaron en función de los ensayos previstos a realizar (Figura 4. 23).



Figura 4.23. Probetas testigo extraídas de MLCAN1. Fuente: elaboración propia. Fuente: elaboración propia

En la Tabla 4.11 se detalla el número de testigos extraídos de cada bloque de Tabaire. Las probetas testigo fueron referenciadas de manera correlativa con la designación MLCAN y la misma numeración que el bloque de extracción al que pertenecen.

LITOTIPO	Nº probetas	Referencia
MLCAN1	35	1-35
MLCAN2	9	36-44
MLCAN3	13	45-54, 70-72
MLCAN4	5	55-59
MLCAN5	10	60-69

Tabla 4.11. Relación de testigos extraídos de los bloques de cantera. Fuente: elaboración propia

4.3.2. Determinación de la densidad aparente

Para la determinación de la densidad aparente se seleccionaron todas las probetas (1-72) y se procedió según la norma UNE EN 1936. En primer lugar, se determinan las dimensiones de las probetas, midiendo con un pie de rey, para comprobar que cumplen con las condiciones geométricas previstas y se procede a calcular su volumen. A continuación, se determina la masa de cada una de las probetas testigo y puesto que el volumen es conocido se determina su densidad mediante la siguiente fórmula:

$$D_a = \frac{m}{v} \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

Siendo:

m: masa de la probeta, en g.

V: volumen de la probeta, en cm³.

Da: densidad aparente de la probeta, en g/cm³.



Figura 4.24. Pie de rey y balanza para la determinación de la densidad aparente de la piedra.
Fuente: elaboración propia

4.3.3. Técnicas No Destructivas (NDT)

Una vez explicado en el apartado 4.2.1. *Velocidad de ultrasonidos* el fundamento de la técnica y su estudio "in situ", en el presente apartado se explica en detalle cuál ha sido el procedimiento empleado en laboratorio para la realización de este ensayo en las probetas testigo extraídas de los bloques de cantera.

El equipo utilizado en laboratorio para la medida de la velocidad de ultrasonidos de las ondas P y S, que aparece en la Figura 4.25, es el Panametrics - 5058PR. Este, además, está conectado a un osciloscopio TDS 3012B (Tektronix), que permite la visualización de las señales en la pantalla del equipo.

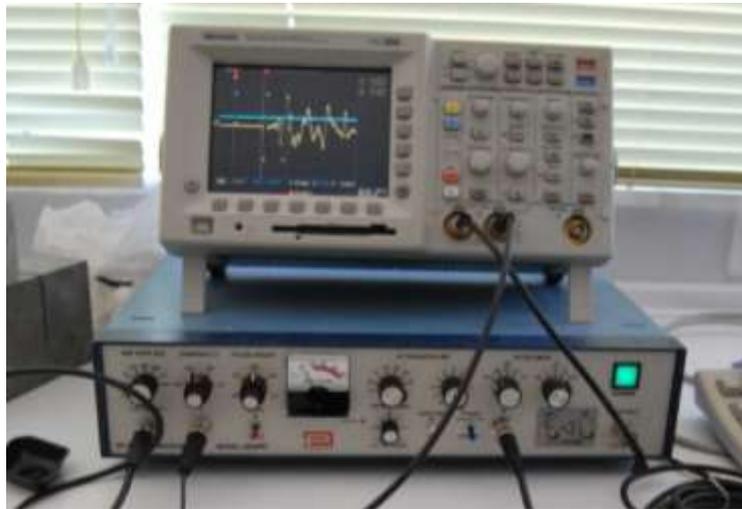


Figura 4.25. Equipo de medición de ultrasonidos y osciloscopio. Fuente: elaboración propia

En este ensayo se miden las muestras en seco y saturadas en agua. Las muestras en seco se preparan secando en estufa durante 48 horas y después manteniéndolas en un desecador por 24 horas más. Las muestras saturadas se preparan como se explica más adelante, en el apartado de Porosidad abierta a vacío (5.3.5. *Caracterización petrofísica de la piedra*, apartado C). Se emplea el mismo procedimiento para las muestras en seco y saturadas. Para medir la V_p se emplea un transductor polarizado y su frecuencia de vibración es de 1 MHz. Este transductor vibra únicamente en el plano perpendicular a la dirección de propagación. Para la obtención de las señales la metodología empleada es la denominada transmisión-recepción. Mediante una fina capa de gel especial para

ultrasonidos, los transductores se acoplan en la roca. Según se emplean los transductores polarizados en P (EKO gel), o los transductores polarizados en S (SWC Couplant – Panametrics), el gel empleado es diferente. Tanto para la medición de la onda P como para la onda S se realiza este procedimiento.



Figura 4.26. Transductores para Vp con EKO gel (izquierda). Transductores para Vs con gel SWC Couplant – Panametrics (derecha). Fuente: elaboración propia

En primer lugar, se ensayan las muestras en seco. Se mide el tiempo de propagación de la onda P y se calcula la velocidad de propagación, como el cociente de la distancia entre transductores (se corresponde con la altura de la probeta) y el tiempo de propagación. También se mide la amplitud máxima registrada en la onda. Después, se mide el tiempo de vuelo de las ondas S de igual manera, pero con el transductor y el gel correspondiente. Con esto podremos calcular posteriormente el módulo de Young. Una vez hechas las medidas se saturan las muestras de agua y se repite el proceso de igual modo.

4.3.4. Estudio mineralógico y petrográfico

A) Difracción de Rayos X (DRX)

En las interferencias ópticas, que se producen cuando una radiación monocromática atraviesa una rendija de espesor comparable a la longitud de onda de la radiación, se basa la Difracción de Rayos X. Los Rayos X tienen longitudes de onda de Angstroms, del mismo orden que las distancias interatómicas de los componentes de las redes cristalinas. Los Rayos X se difractan con ángulos que dependen de las distancias interatómicas, al ser irradiados sobre la muestra a analizar. Este ángulo de difracción se determina como 2θ (Navarro, 2015). Con esta técnica se analizan 30 g de muestra en polvo no calentada, y 30 g de muestra en

polvo calentada. A partir de ello se obtienen los difractogramas en los que quedan representados los picos de intensidad de los principales minerales que constituyen la roca analizada. Al comparar los difractogramas de un mismo material a diferentes temperaturas se puede observar si se producen cambios en la fase mineral, o variaciones en la red cristalina, que pueden deberse a dilatación térmica.

El equipo empleado en esta técnica se muestra en la Figura 4.27 y se trata de un Bruker D8 Advance con espejo Göebel, con cámara de alta temperatura (hasta 900°C), y con un generador de Rayos-X KRISTALLOFLEX K 760-80F (3000W de potencia, 20-60KV y 5-80mA), cuenta con un tubo de RX con ánodo de cobre.

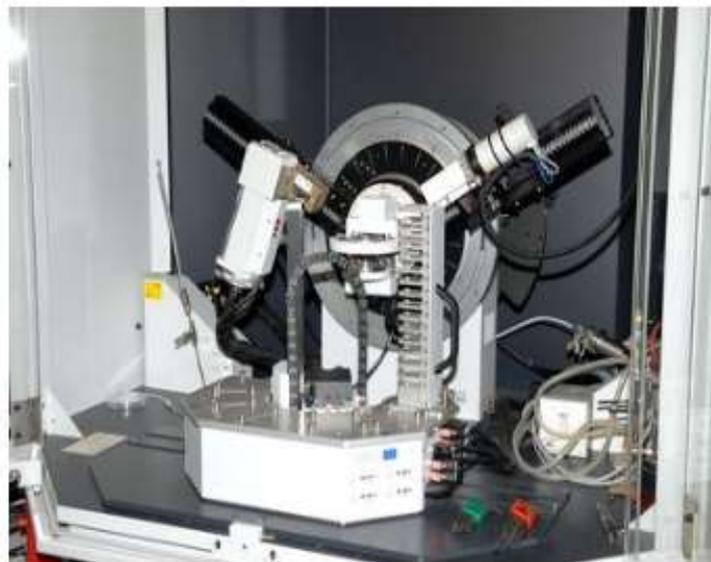


Figura 4.27. Equipo empleado para la técnica DRX del Centro de Investigación de la Universidad de Alicante. Fuente: SSTTI UA. Fuente: <https://sstti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/difraccion-de-rayos-x.html>

La DRX se realiza sobre muestra en polvo obtenida a partir de las muestras tomadas de los distintos inmuebles objeto de estudio y en la cantera original de extracción. Estas muestras en polvo se obtienen a partir de las losas descritas anteriormente, las cuales son sometidas a un golpeo manual con un mortero de ágata y, una vez alcanzado el tamaño de grano deseado, se procede a su pulverización con un Molino Planetario de bolas modelo Pulverisette 6 (Figura 4.28). En este caso, para la interpretación de los difractogramas y la cuantificación mineralógica, se utilizó el programa Xpowder (Martin-Ramos, 2004), versión

2010.01.15.PRO. Todos los análisis han sido realizados en el Centro de Servicio Técnico de Investigación de la Universidad de Alicante (SSTI UA).



Figura 4.28. Preparación de la muestra con un mortero de ágata (izquierda). Molino Planetario de bolas modelo Pulverisette 6 (derecha). Fuente: elaboración propia

B) Porosimetría de Intrusión Mercurio (MIP)

La Porosimetría de Intrusión de Mercurio es una técnica sencilla y rápida para la obtención de las características del sistema poroso. Se basa en el comportamiento del mercurio sobre los sólidos, ya que el mercurio es un metal líquido que no moja, y, por tanto, necesita una presión determinada para su introducción en el sistema poroso. El mercurio va introduciéndose en poros cada vez más pequeños, según aumenta la presión. Mediante la ecuación de Washburn se establece la relación entre la presión ejercida sobre el mercurio (p), y el tamaño de los poros (r) (Ecuación 4.4).

$$p = \frac{2\sigma\cos\theta}{r} \quad (\text{Ecuación 4.4})$$

Siendo:

σ : tensión superficial del mercurio (480 erg·cm⁻²).

θ : ángulo de contacto entre el mercurio y la superficie del poro (130°).

En este ensayo se obtiene la curva de intrusión, mediante el aumento de la presión de inyección y medición del volumen de mercurio resultante que entra en la roca. Una vez alcanzado el punto máximo de presión y volumen del mercurio intruido en la roca, se decrece gradualmente la presión para forzar la salida del mercurio, obteniendo así la curva de extrusión. Como consecuencia de la dificultad que tiene el mercurio en abandonar los poros tipo cuello de botella o throat, y la variación del ángulo de contacto del mercurio, se obtiene, para una misma presión, un volumen de poros diferente durante la curva de intrusión y de extrusión. Este fenómeno es muy importante ya que da una idea de la porosidad atrapada que es la más importante para la retención de fluidos en el interior de una roca (Benavente, 2003).

De esta técnica se puede obtener información de volumen de mercurio intruido y, por lo tanto, la porosidad conectada. Además, se puede calcular la distribución de tamaños de poros derivando la curva acumulada de intrusión con respecto al radio y el área superficial. La densidad de conjunto se puede estimar para presiones de mercurio bajas (0,3 bares).

En este trabajo, se ha empleado un porosímetro Autopore IV 9500 Micromeritics. Este cuenta con un rango de presión que varía entre 0,03-4140 bares. A partir de esta técnica, se puede determinar el intervalo de radios de poros (desde $2 \cdot 10^{-3}$ a 100 μm).

En la Figura 4.29 se expone el procedimiento empleado en la preparación de las muestras para ser analizadas a través de MIP.



Figura 4.29. Preparación de las muestras para ser analizadas a través de MIP. Fuente: elaboración propia

C) Lámina Delgada

Se utilizó el microscopio de luz polarizada, con nicols paralelos y nicols cruzados, para la observación de características tales como: textura y color de los minerales formadores. Las láminas cuentan con unas dimensiones aproximadas de 50 mm de largo por 30 mm de ancho, y un espesor de 0,003 mm. Las ocho láminas delgadas realizadas, fueron cubiertas con otra lámina de vidrio de menor espesor y pegadas sobre un vidrio.

La descripción a partir de láminas delgadas se lleva a cabo con un microscopio óptico Zeiss Axioscop. Con ello se determinan los minerales principales, secundarios y accesorios que presenta cada una de las muestras, así como las alteraciones físicas y químicas que pudieran diferenciarse.

También se realiza una descripción general del aspecto textural de cada muestra, y se cuantifica el porcentaje de cada uno de los minerales principales en cada caso. Para ello se selecciona cinco zonas de cada una de las láminas y se determina el número de cada uno de los minerales que se pueden diferenciar en dichas zonas con respecto del total. Después se realiza la media de las cinco cuantificaciones y, en el caso de los feldespatos, el cuarzo y las plagioclasas, sus

porcentajes son recalculados al 100% para poder clasificar cada granito según el diagrama de Streckeisen (1967). Las imágenes de las láminas delgadas se han tomado a través del propio objetivo del microscopio, presentando una de las láminas una línea de 2 mm a partir de la cual se establece la escala en cada una de las imágenes obtenidas. En la Figura 4.30 se expone el procedimiento de preparación de las muestras.

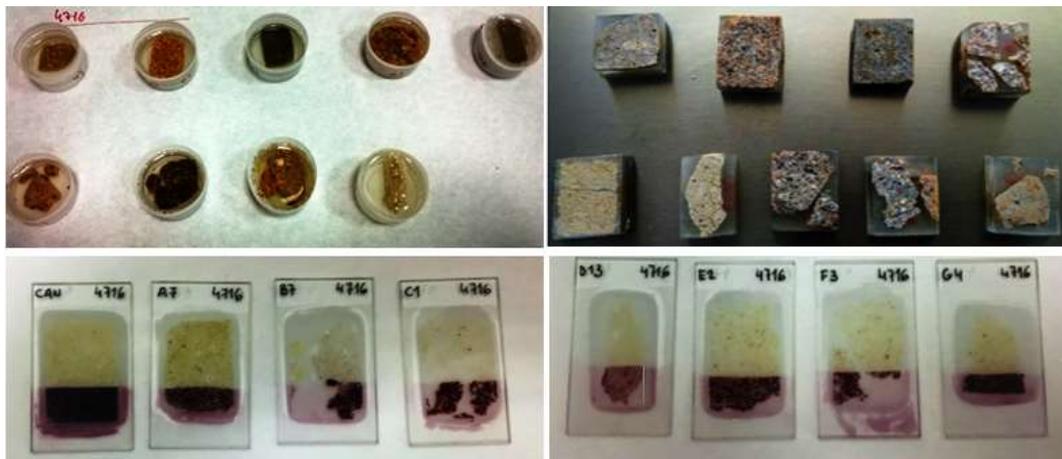


Figura 4.30. Proceso de preparación de muestras (superior). Láminas Delgadas (inferior). Fuente: elaboración propia

D) Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

La Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) consiste, principalmente, en registrar, mediante un detector apropiado, el resultado de la interacción que resulta de enviar un haz de electrones sobre la muestra y. En la posición que se encuentra el haz en cada momento coincide con la aparición de brillo, puesto que el haz se desplaza sobre la muestra realizando un barrido en las direcciones X e Y. Tras la interacción con la muestra de un haz incidente, de entre 5 y 30 KeV, se obtienen las imágenes, que se corresponden a electrones secundarios o electrones retrodispersados emitidos, en el SEM. Se puede establecer un buen contraste, debido al gran número de electrones emitido. Por otro lado, resulta posible obtener información de zonas que no están a la vista del detector, ya que los electrones pueden ser desviados fácilmente de su trayectoria emergente inicial.

El SEM permite determinar qué minerales son más vulnerables al proceso de calentamiento y de qué manera. Algunos de ellos sufren una elevada fisuración

interna debido a presiones ejercidas por minerales adyacentes. Otros presentan fisuras que evidencian que han sufrido una dilatación térmica importante con la temperatura. Sobre cada una de las zonas de las muestras estudiadas con el SEM se realiza mappings y análisis a fin de conocer qué minerales son los que se están observando y, posteriormente, se relacionan los cambios observados en los mismos. Estas observaciones se realizan comparando imágenes y mappings de las muestras a 25°C y a 1000°C. Es esencial que las muestras vayan a ser observadas en SEM sean conductoras y, además que no presenten líquidos.

En este caso, se utilizó el Equipo de SEM MERLIN™ VP COMPACT (FESEM) de la Universidad Católica San Antonio de Murcia.



Figura 4.31. Equipo de SEM empleado, de la Universidad Católica San Antonio de Murcia.
Fuente: elaboración propia

4.3.5. Caracterización petrofísica de la piedra

A) Determinación de la resistencia a compresión

La fórmula para la determinación de la resistencia a compresión (R_c) es:

$$R_c = \frac{F}{A} \quad (\text{Ecuación 4.5})$$

Siendo:

R_c : resistencia a compresión, en MPa (N/mm^2).

F: fuerza a rotura, en N.

A: área transversal de la probeta, en mm^2 .

En el presente estudio la determinación de la resistencia a compresión se realiza tanto en las probetas secas, como en distintos estados de saturación. En la norma UNE EN 1926 se establecen las condiciones del ensayo.

Con el objetivo de establecer las distintas resistencias a compresión en función de los diferentes grados de saturación de la piedra Tabaire, se aplicó la metodología desarrollada por Antón et al., 2013, en los distintos litotipos de la cantera estudiados. Las probetas se ensayaron con el siguiente procedimiento:

En primer lugar, se procede a la obtención de la curva de secado. La probeta se satura, se introduce en estufa a 50°C y se sigue su pérdida de masa hasta secado completo. Se representa el grado de saturación de la probeta frente al tiempo transcurrido.

Posteriormente, se realiza el cálculo de los tiempos de secado y equilibrado. La curva obtenida se utiliza para modelizar el transporte de agua, obteniendo los valores de los parámetros del modelo. El modelo se utiliza para calcular los tiempos de secado y de equilibrado.

A continuación, se procede con el secado de las probetas. La probeta se satura y se introduce en estufa a 50°C , dejándola secar hasta alcanzar el grado de saturación deseado. Este se detecta por pesada. Tras la fase de secado se ha alcanzado el grado de saturación deseado de la probeta, pero la distribución de humedad dentro de la probeta no es homogénea.

En la última fase, del equilibrado, se obtiene una distribución homogénea de la humedad dentro de la probeta. Para ello, se sellan todas las superficies de la

probeta para evitar variaciones de masa, se introduce la probeta en estufa a 50°C y se produce la homogeneización de la distribución de humedad en el interior de la probeta. El tiempo de equilibrado aplicado es el que se ha calculado previamente con el modelo.

En la Tabla 4.12 se presenta la relación de probetas testigo en función de los distintos grados de humedad estudiados.

	0%	25%	50%	100%
MLCAN 1	10	13	16	30
	11	14	17	31
	12	15	18	32
MLCAN 2	36	-	38	40
	37	-	39	41
MLCAN 3	45	-	48	51
	46	-	49	52
	47	-	50	53
MLCAN 4	55	-	-	-
	56	-	-	-
MLCAN 5	60	-	63	65
	61	-	64	66

Tabla 4.12. Relación de las probetas testigo en función de los distintos grados de humedad. Fuente: elaboración propia

A.1) Preacondicionamiento de probetas a los grados de saturación de agua seleccionados

Se define el grado de saturación de agua de la siguiente manera:

$$GS = \left(\frac{m_{EQUILIBRIO} - m_{SECA}}{m_{SATURADA} - m_{SECA}} \right) \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 4.6})$$

Siendo:

$m_{EQUILIBRIO}$: masa de la probeta, donde contenido de agua está en equilibrio con la atmósfera del ambiente que le rodea, es decir, que dicha probeta no muestra tendencia a perder ni a ganar agua.

m_{SECA} : masa de la probeta obtenida tras secarla a 105°C.

Es preciso tener en cuenta que, debido a las posibles modificaciones estructurales, el secado a 105°C es considerado como tratamiento destructivo en el marco del presente trabajo. Por ello, este secado a 105°C se realiza siempre al final y, una vez finalizado este las probetas secas ya no se utilizaban para ningún otro ensayo.

$m_{SATURADA}$: masa de la probeta saturada de agua a vacío, realizada según la norma ASTM C1202-91.

Los grados de saturación (GS) seleccionados para el presente estudio fueron: 0%, 25%, 50% y 100%.

Esta selección se realizó con el objetivo de abarcar un amplio rango de GS con el fin de poder estudiar de forma completa la dependencia de la resistencia a compresión con el contenido de humedad de la piedra Tabaire.

A.2) Descripción del protocolo de acondicionamiento de probetas

El objetivo del procedimiento de acondicionamiento de las probetas es conseguir grados de saturación de agua perfectamente controlados y una distribución homogénea de la humedad en las mismas probetas. También es preciso que dicho procedimiento no altere significativamente la microestructura de la piedra, por lo que deben evitarse, por ejemplo, exposiciones a temperaturas elevadas.

Las probetas estudiadas son cilíndricas, de diámetro 30mm y 60mm de altura. Se modifica el protocolo propuesto por el Comité RILEM TC 116-PCD para el diseño de la metodología de acondicionamiento. El procedimiento consta de las siguientes fases:

En primer lugar, según el procedimiento ASTM C1202-91 se saturan las probetas con agua destilada bajo vacío. A continuación, para conseguir el GS objetivo se secan a 50°C. Se selecciona esta temperatura para el secado, tratando de minimizar las modificaciones microestructurales por exposición a temperaturas elevadas. Además, para evitar la formación de gradientes de humedad en las probetas se protegen sus superficies laterales con cinta aislante (Parrott, 1994).

La siguiente etapa de homogeneización del contenido de agua en la probeta tras el secado, persigue anular los posibles gradientes de humedad generados

durante el secado, por redistribución. Para ello se mantuvieron las probetas en pequeños recipientes herméticos cuyo volumen era sólo ligeramente mayor que el de la probeta (Figura 4.32).



Figura 4.32. Recipientes herméticos para el equilibrado. Fuente: elaboración propia

Para acelerar el proceso de homogeneización del contenido de humedad, este se realiza a una temperatura de 50°C , es decir, durante el mismo se mantienen los recipientes herméticos en la estufa a esta temperatura.

Los tiempos de redistribución de la humedad fijados para cada tipo de hormigón y grado de saturación están basados en los trabajos de Parrott, 1994, realizando algunas modificaciones.

Se acuerda que para las probetas que necesitaran menos de 24 horas en estufa a 50°C para alcanzar sus grados de saturación se les daría un tiempo mínimo de redistribución de 3 días.

Una vez concluido el proceso de redistribución se procede al enfriamiento de las probetas hasta temperatura ambiente. Para ello, una vez extraídas las cajas de equilibrado de la estufa a 50°C se dejan en ambiente de laboratorio durante 48 horas sin abrir, para ser introducidas finalmente en las cámaras de humedad relativa controlada.

Tras al menos tres días (72 h) dentro de las cámaras de ambiente controlado y no acusando pérdidas significativas de masa, se considera que las probetas estaban listas para, en primer lugar, medir la resistividad y, a continuación, proceder con el ensayo de rotura a compresión.

A.3) Obtención de las curvas de secado de la piedra

Para realizar el preacondicionamiento de las probetas es preciso conocer para cada probeta la masa en equilibrio ($m_{EQUILIBRIO}$) que corresponde para el grado de saturación seleccionado. Este parámetro se obtiene a partir de la Ecuación 4.7.

$$m_{EQUILIBRIO} = \frac{GS}{100} \cdot (m_{SATURADA} - m_{SECA}) + m_{SECA} \quad (\text{Ecuación 4.7})$$

Resulta imposible secar las probetas a 105°C previamente a la realización de cada ensayo de difusión, para evitar alteraciones microestructurales, como se ha comentado anteriormente. No obstante, se puede superar esta dificultad si conocemos de forma precisa la capacidad de absorción de agua (A) de la piedra Tabaire, referida a la masa seca (m_{SECA}) de la misma.

$$A = \frac{m_{SATURADA} - m_{SECA}}{m_{SECA}} \quad (\text{Ecuación 4.8})$$

$$m_{SECA} = \frac{m_{SATURADA}}{A+1} \quad (\text{Ecuación 4.9})$$

Con el fin de obtener toda la información necesaria para el cálculo preciso de los grados de saturación (GS) de las probetas, así como obtener la información aproximada de los tiempos de secado para conseguir los GS objetivo se obtuvieron las curvas de secado de los cinco litotipos diferentes de la cantera original de extracción según el siguiente procedimiento:

	Probetas	
	25%	50%
MLCAN 1	15	18
MLCAN 2	-	39
MLCAN 3	-	50
MLCAN 5	-	64

Tabla 4.13. Probetas seleccionadas para determinar las curvas de secado. Fuente: elaboración propia

Se introducen las probetas en una estufa de temperatura controlada a 50°C con una estabilidad de 0,5°C, y se registra su variación de masa en función del tiempo de secado. Este proceso se prolongó durante 96 horas (cuatro días).



Figura 4.33. Proceso de secado de las probetas. Fuente: elaboración propia

B) Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad

Para la determinación del coeficiente de agua por capilaridad se realizan los métodos manual y continuo, explicando la metodología empleada en los siguientes apartados.

B.1) Método manual

El ensayo de capilaridad se realiza conforme a la norma UNE EN 1925, en primer lugar, se preparan las probetas, se secan durante 48 horas en estufa a 70°C y posteriormente se disponen durante 24 horas en un desecador. Una vez aptas para comenzar el ensayo se pesan y serán las masas iniciales m_0 . Posteriormente, se le coloca a cada una de las muestras cinta aislante a lo largo del contorno del cilindro, en la parte inferior de la muestra (Figura 4.34).

A continuación, se pesan las muestras secas con la cinta, que serán las masas iniciales m_0 . En un recipiente se vierte agua destilada hasta una altura de 1 cm aproximadamente y se coloca un pequeño soporte agujereado en la base, donde se apoyarán las muestras para así evitar el contacto directo recipiente-muestra y favorecer la entrada de agua a través de la base de la probeta.

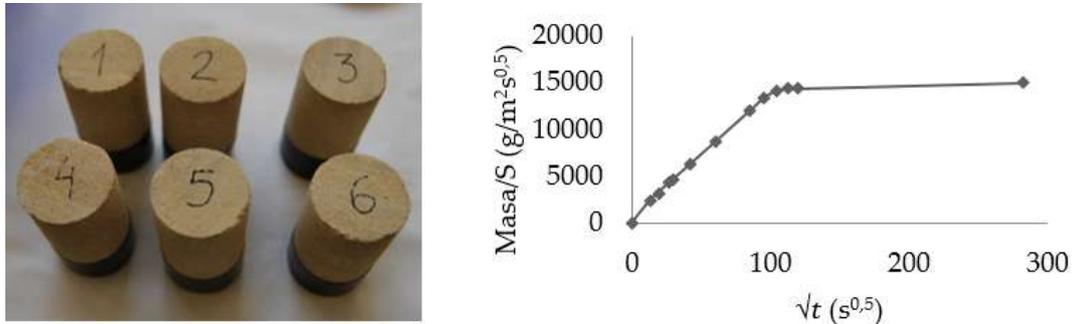


Figura 4.34. Muestra preparada para el ensayo de capilaridad (izquierda). Gráfica relación raíz cuadrada del tiempo (\sqrt{t}) (eje abscisas) y coeficiente de absorción capilar (C) (eje ordenadas) (derecha). Fuente: elaboración propia

Una vez colocadas las muestras en dicho recipiente, se van pesando sucesivamente para medir el agua absorbida (m_t) en intervalos de tiempo. En este caso los intervalos son: 0, 3, 6, 12, 15, 30, 60, 120, 150, 180, 210, 240 y 1333 minutos.

Con los resultados obtenidos se realiza una tabla en Excel para proceder a su representación gráfica (Figura 4.34). En primer lugar, se indica la absorción capilar del agua y a partir de su pendiente se calcula el coeficiente de absorción capilar (C), con las unidades de $\text{g/m}^2\text{s}^{0.5}$.

$$C = \frac{\frac{M(t)}{S}}{\sqrt{t}} \quad (\text{Ecuación 4.10})$$

Los resultados se pueden expresar como la relación de la masa absorbida de agua y el área de la base de la probeta en contacto con el agua, en función de la raíz cuadrada de tiempo.

Con este ensayo, también se estima la porosidad capilar conectada, P_c , y se obtiene como la relación entre la diferencia de la masa final saturada m_f y la inicial m_0 y el volumen de la probeta V_p por la densidad del agua, en tanto por ciento.

$$P_c = \frac{m_f - m_0}{V_p \cdot \rho_w} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 4.11})$$



Figura 4.35. Capilaridad manual (izquierda). Detalle frente capilar (derecha). Fuente: elaboración propia

B.2) Método continuo

El ensayo consiste en colocar la muestra a analizar enganchada a la báscula, situando debajo de la muestra un recipiente con agua (Figura 4.36). La muestra se pone en contacto con el agua cuando se activa el cronómetro y se van tomando valores del peso de la muestra y el agua que absorbe cada 10 segundos en un principio. Será suficiente tener datos de los primeros 4 o 5 minutos del ensayo. Después, se procesan los datos de la misma manera que en el método de capilaridad manual.

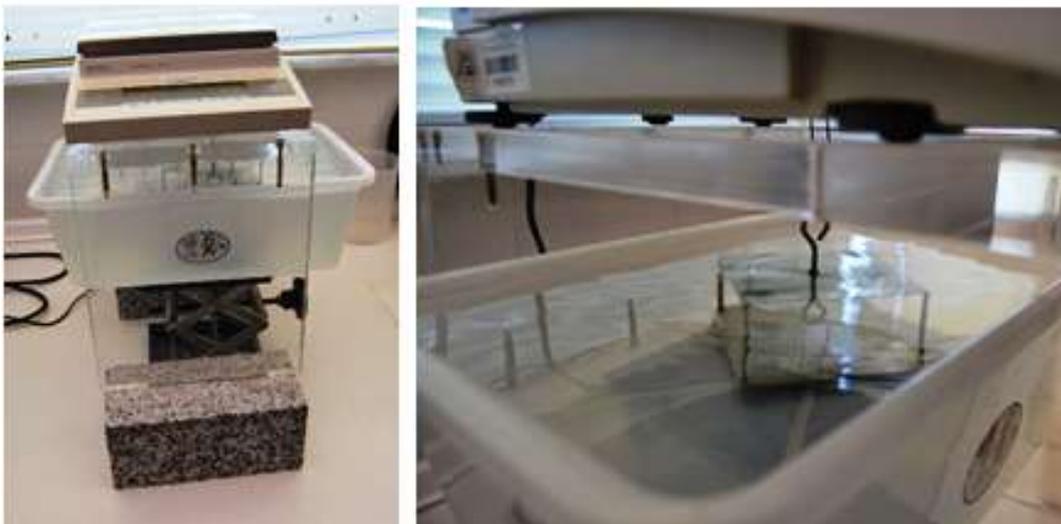


Figura 4.36. Báscula y muestra en el ensayo de capilaridad en continuo (izquierda). Detalle de la parte inferior de la báscula (derecha). Fuente: elaboración propia

C) Determinación de la porosidad abierta al vacío

Para medir la porosidad abierta a vacío, según norma UNE EN 1936, las muestras se saturan de agua. A continuación, se secan durante 48 horas en estufa a 70°C y posteriormente se colocan durante 24 h en desecador.

El ensayo consta de tres pasos que en este caso realizaremos de la forma rápida, por lo que cada uno de ellos durará 3 horas. Para empezar, las muestras se colocarán en una campana de vacío (Figura 4.37), de tal manera que estén lo menos juntas posible, para que el agua pueda penetrar por todas las caras.

El primer paso consiste en hacer vacío seco. Gracias a una bomba de vacío se disminuye la presión hasta los 20 mbar y se mantiene en este valor durante las 3 horas siguientes para eliminar el aire contenido en los poros abiertos de las muestras.

El siguiente paso consiste en el llenado de agua a vacío. Se trata de introducir en la campana agua destilada hasta cubrir las muestras manteniendo la presión de 20 mbar y mantenerlas sumergidas durante 3 horas.

En el último paso se restablece la presión atmosférica y se dejan las probetas sumergidas otras 3 horas. Una vez concluido el ensayo se pesan las probetas, de donde obtendremos el peso saturado y, si se pesan las muestras sumergidas, el peso sumergido. Por medio de la relación en porcentaje entre el volumen de poros abiertos y el volumen aparente de la muestra, se calcula la porosidad abierta a vacío, P_{av} (%).

$$P_{av} = \frac{P_s - P_0}{P_s - P_h} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 4.12})$$



Figura 4.37. Campana y bomba de vacío para el ensayo de porosidad abierta a vacío. Fuente: elaboración propia

D) Durabilidad mediante la cristalización de sales

Para evaluar la durabilidad de un material pétreo se realizan los ensayos acelerados que se simulan la alteración que sufre el mismo material en unas determinadas condiciones externas. En la Figura 4.38, se muestra un ejemplo claro de alteración de roca porosa, empleada como material de construcción, por la acción de cristalización de sales.

Fuertemente relacionada con sus propiedades petrofísicas y con las sales que crecen en su interior se encuentra la degradación de la roca porosa frente a la cristalización de sales (Benavente, 2002). Además, las propiedades petrofísicas más importantes que determinan la durabilidad de una roca son la porosidad y la distribución del tamaño de los poros, estudiados en la presente Tesis.

El ensayo normalizado UNE EN 12370 es el utilizado para el estudio de la durabilidad frente a las sales.

Para el ensayo seleccionamos veinticuatro muestras de 40 mm de arista (Tabla 4.14), que son representativas del total de la piedra a ensayar. Antes del ensayo se lavó el material suelto de la superficie de las probetas y se secaron en un horno hasta masa constante, a una temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$. Medimos las probetas con un pie de rey de precisión 0,01 mm y las pesamos en una balanza de precisión 0,1g, para conocer la masa inicial en seco, M_0 , en gramos. El ciclo comienza saturando las probetas en un recipiente con una solución de sulfato sódico decahidratado al 14% ($\text{NaSO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$). Una vez saturadas, se sacan y se secan en una estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ durante unas 16 horas y las dejamos enfriar en un desecador a 20°C durante 4 horas antes de comenzar el segundo ciclo, sumergiéndose de nuevo en una disolución durante 4 horas. Este ciclo se repite 15 veces. Una vez finalizado el ensayo, se lavan, secan y pesan las probetas obteniendo la masa final, (M_f), en gramos (Tabla 4.14).

Litotipo	Probetas	Nº probetas
MLCAN1	1,1-1,6	6
MLCAN2	2,1-2,3	3
MLCAN3	3,1-3,6	6
MLCAN4	4,1-4,3	3
MLCAN5	6,1-6,6	6

Tabla 4.14. Probetas seleccionadas para la realización del ensayo de durabilidad. Fuente: elaboración propia

La evaluación de la durabilidad de la roca frente a la acción de cristalización de las sales se cuantifica mediante la pérdida de masa (Ec.4.13). Las probetas se lavan sucesivas veces por inmersión en agua desionizada, al finalizar los ciclos. Posteriormente se seca a peso constante. Conocida la masa seca (M_0) y una vez finalizado el ensayo (M_D), se calcula el tanto por ciento de pérdida de masa de la roca, ΔM_R , como:

$$\Delta M_R = \frac{M_D - M_0}{M_0} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 4.13})$$

Además, dicha caracterización se completó con un examen visual y registro fotográfico de las muestras antes y después de realizar el ensayo (Figura 4.38).



Figura 4.38. Probetas seleccionadas (izquierda). Muestras sumergidas en disolución de sulfato sódico (derecha). Fuente: elaboración propia

**V. RESULTADOS Y
DISCUSIÓN DEL ESTUDIO
“IN SITU”**

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DEL ESTUDIO “IN SITU”

Durante el proceso de inspección se realizaron más de mil doscientas fotografías y la selección fotográfica realizada se expone en el presente capítulo (apartado 5.1), donde se aprecian las principales lesiones que afectan a la piedra Tabaire en cada una de las construcciones objeto de estudio. En las numerosas visitas realizadas se procedió a su vez a la medición de la velocidad de ultrasonidos y el índice de rebote, cuyos resultados se exponen en apartado 5.2.

5.1. FORMAS DE ALTERACIÓN

La clasificación de las lesiones se ha llevado a cabo siguiendo el glosario ilustrado sobre los patrones de deterioro de la piedra, elaborado por ICOMOS (International Council on Monuments and site) y el Photo Atlas of Weathering Forms on Stone Monuments, elaborado por el Instituto Geológico de la Universidad de Aachen.

Las fotografías han sido clasificadas en función de las patologías detectadas y se ha utilizado una nomenclatura sencilla (Figura 5.1), con el objetivo de identificarlas y referenciarlas. En primer lugar, se indica el inmueble (A: Muralla Púnica, B: Castillo de la Concepción, C: Casa de la Pólvora, D: Real Arsenal de Marina, E: Real Hospital de Marina, F: Muralla de Carlos III, G: Cuartel de Antigüones y H: Real Parque de Maestranza y Artillería), el segundo parámetro se corresponde con la ubicación (E: exterior, I: interior), en tercer lugar, se especifica la orientación (N: norte, S: sur, E: este, O: oeste), el cuarto parámetro se corresponde con la cota respecto al suelo y el quinto y último, la distancia al mar, ambas variables medidas en metros.

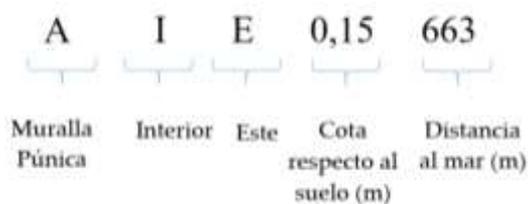


Figura 5.1. Ejemplo para la designación de las lesiones documentadas. Fuente: elaboración propia

5.1.1. Alteraciones cromáticas y depósitos



Figura 5.2. A: Detalle de pátina en D I O 0,70 160. B: Presencia de costra negra en F E N 2,20 102. C: Eflorescencias (D I S 0,10 160). D: Presencia de eflorescencias en la superficie del sillar (G E S 1,10 426). E: Distintas tonalidades en un sillar en A I O 0,10 663. F: Presencia de sales en D I O 0,60 160. Fuente: elaboración propia

5.1.2. Pérdidas de sección y grietas

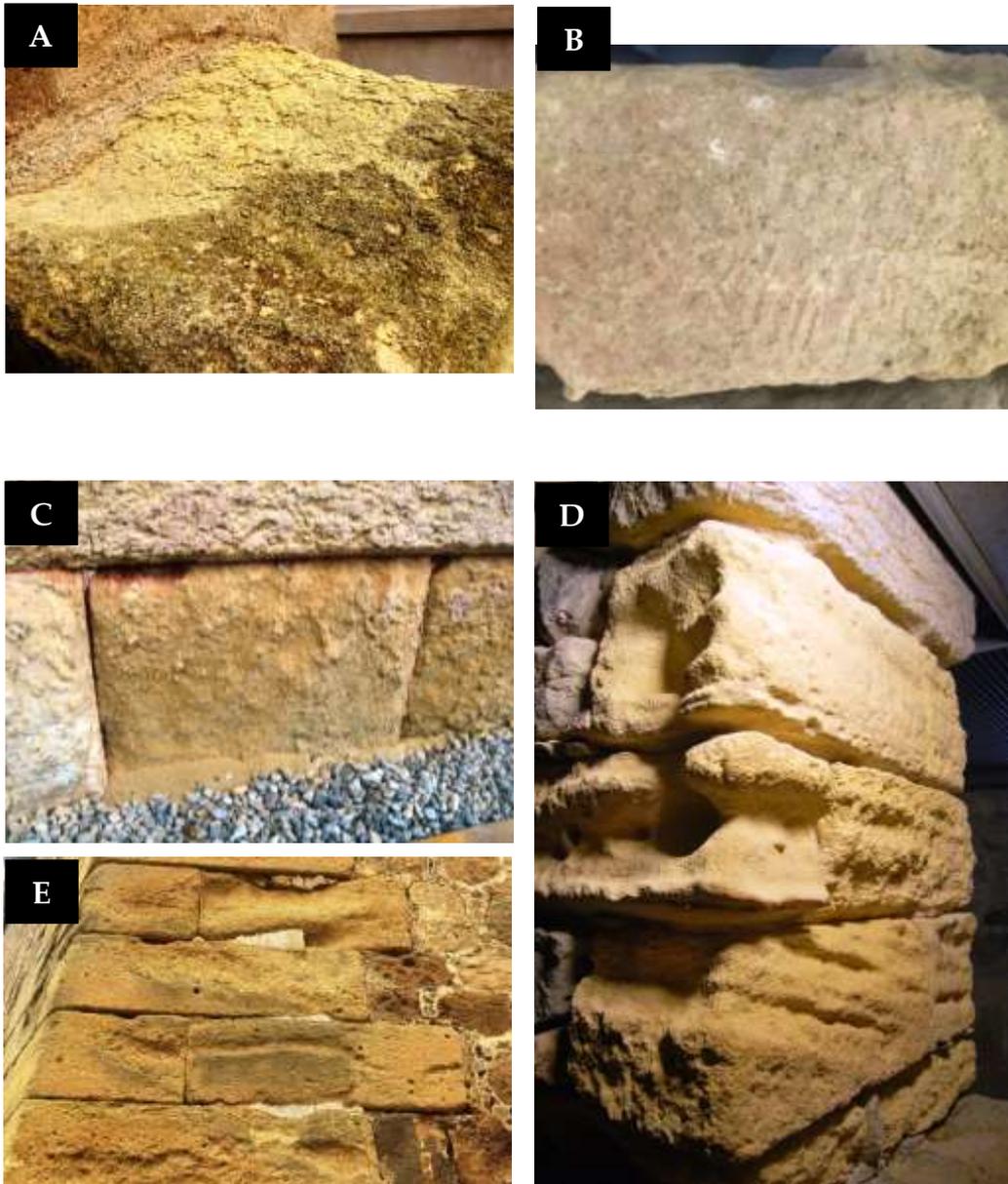


Figura 5.3. A: Delaminado en E S 1,50 253. B: Rounding en A I O 0,50 663. C: Desintegración granular en arena en A I O 0,30 663. D: Sillares donde se aprecian procesos de alveolización en B I S 0,50 326. E: Pérdidas de mortero de rejuntado en F E O 2,15 102. Fuente: elaboración propia

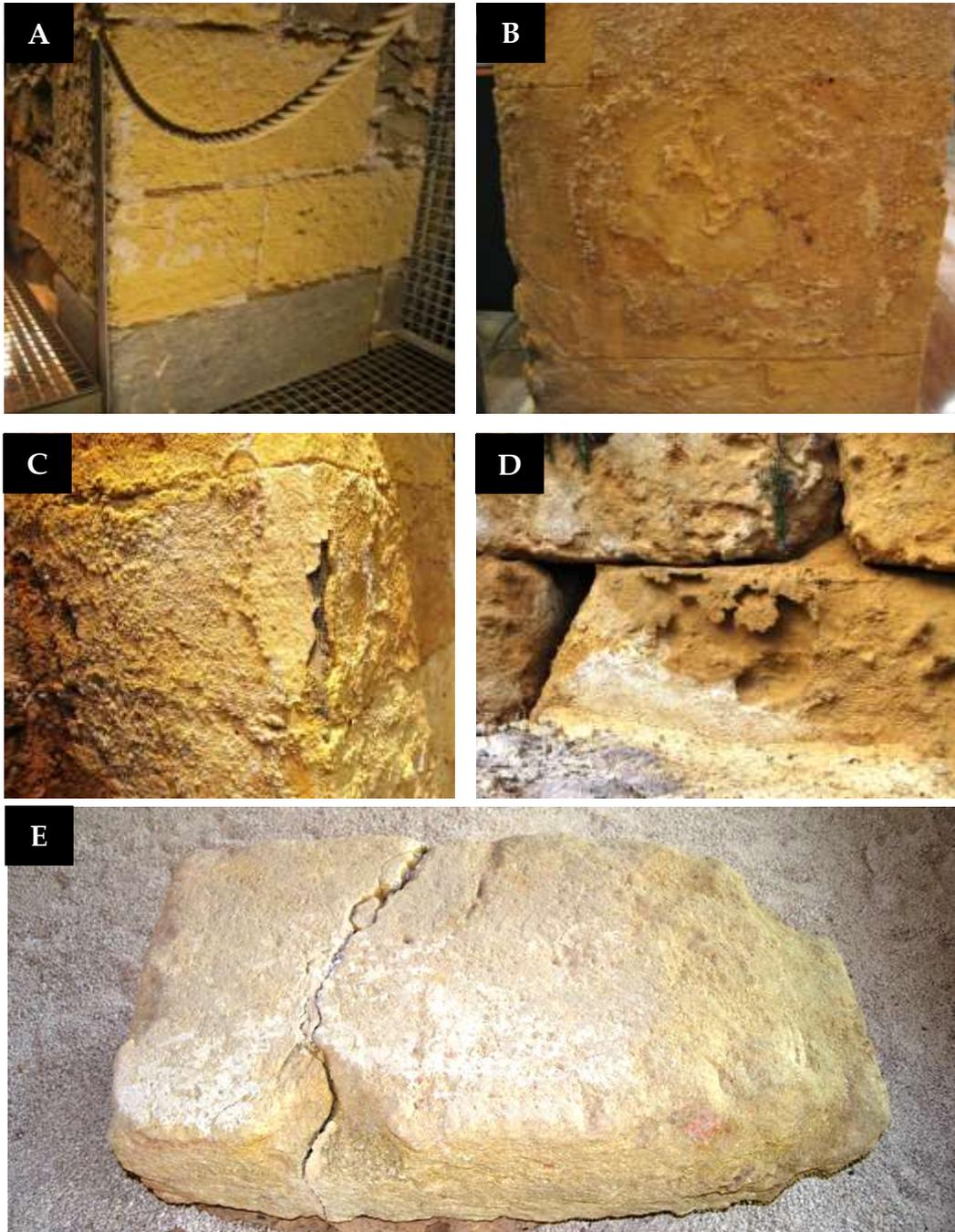


Figura 5.4. A: Pérdidas de mortero de rejuntado en B I S 0,40 326. B: Deplacado y pérdida de sección en D I O 0,60 160. C: Desprendimiento en arista de pilar en D I S 0,30 160. D: Deplacado alveolar y pérdida de sección en G E S 0,10 160. E: Presencia de grietas y fisuras en un sillar en A I S 0 663. Fuente: elaboración propia

5.1.3. Presencia de organismos vivos y modificaciones antrópicas

Figura 5.5. A: Colonización por plantas superiores en F E N/O 5,20 102. B: Presencia de organismos en F E O 3,20 102. C: Presencia de biodeterioro en F E N/O 0,30 102. D: Vista general presencia de biodeterioro en G E N 0 426. E: Detalle G E N 0 426. F: F E N 1,50 102. F: Perforación y grafiti en F E N 150 102. G: Inserción de elementos de arriostramiento en C I S 2,10 183. Fuente: elaboración propia

Una vez realizadas las visitas, se determinan las principales lesiones que afectan a cada una de las construcciones objeto de estudio, expuestas en la Tabla resumen 5.1.

Construcción	Patologías
A	Eflorescencias, rounding, desintegración granular, deplacado y fractura
B	Alveolización y pérdida de mortero en juntas
C	Desintegración granular
D	Eflorescencias, pátina, desintegración granular y deplacado
E	Delaminado, biodeterioro
F	Biodeterioro, costa negra, delaminado, <i>graffiti</i> , pérdida de mortero en juntas
G	Eflorescencias, deplacado, biodeterioro y desintegración granular

Tabla 5.1. Principales patologías detectadas en las construcciones objeto de estudio. Fuente: elaboración propia

5.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS “IN SITU”

En el presente apartado se exponen los resultados obtenidos, mediante los ensayos realizados “in situ” en las distintas construcciones estudiadas, así como de la cantera original de extracción, a través de las técnicas no destructivas de velocidad de ultrasonidos y esclerómetro Schmidt. A su vez, se presentan los resultados obtenidos en cuanto a la estimación volumétrica de la cantera y los que resultan de analizar los documentos originales manuscritos del Arsenal.

5.2.1. Velocidad de ultrasonidos

La realización del ensayo de ultrasonidos en campo resultó más complicada de lo previsto. Por un lado, había zonas de difícil acceso y en muchos casos la zona de aplicación no era adecuada.

En la Tabla 5.2 se presentan los valores de velocidad de propagación, todos ellos tomados por transmisión directa, para cada construcción estudiada. Con el

objetivo de estudiar los resultados obtenidos y comparar el valor característico de velocidad de propagación de la piedra Tabaire en cada construcción, se obtuvieron la media aritmética (\bar{x}) y la desviación estándar (σ).

Construcción	V_p (m/s)
	$\bar{x} \pm \sigma$
Muralla Púnica (A)	1821±30
Castillo de la Concepción (B)	1742±65
Casa de la pólvora (C)	1004±10
Real Arsenal de Marina (D)	1316±16
Real Hospital de Marina (E)	2204±10
Muralla de Carlos III (F)	1646±26

Tabla 5.2. Velocidades de propagación de onda ultrasónica obtenidas “in situ”. Fuente: elaboración propia

El rango de valores de velocidad de propagación de onda ultrasónica en el Tabaire oscila entre 1004 y 2204 m/s. Teniendo en cuenta que el rango de valores de velocidad de propagación de onda ultrasónica para una roca arenisca se encuentra entre 1400 y 4000 m/s (Farmer, 1968), se optó por tomar como válidos aquellos valores que se encontraban próximos a dicho rango. Los valores tomados en la Casa de la pólvora no se consideran representativos, por un lado, no fue posible la medida de bloques enteros, existiendo por tanto una discontinuidad en el interior del paramento. Por otro lado, los elementos metálicos de arriostamiento podrían haber producido un error en las medidas tomadas.

Con el objetivo de determinar la posible relación entre la velocidad de ultrasonidos y la cota respecto al suelo, se han determinan dos rangos de valores: de 0 a 1 metro y más de 1 m. En la Tabla 5.3 se exponen los resultados obtenidos.

Construcción	0-1m	>1 m
	$\bar{x} \pm \sigma$	$\bar{x} \pm \sigma$
Muralla Púnica (A)	1864±28	1676±58
Castillo de la Concepción (B)	1717±55	1774±80
Casa de la pólvora (C)	992±13	1016±63
Real Arsenal de Marina (D)	1307±16	1360±21
Real Hospital de Marina (E)	-	2203±10
Muralla de Carlos III (F)	1597±28	1689±26

Tabla 5.3. Velocidades de propagación de onda ultrasónica en función de la cota. Fuente: elaboración propia

5.2.2. Esclerómetro Schmidt

Debido al fácil manejo del instrumento fue posible tomar un gran número de medidas. En la Tabla 5.4 se presentan los valores obtenidos para cada construcción.

Construcción	Índice de rebote (R)
	$\bar{x} \pm \sigma$
Muralla Púnica (A)	15,23±4,78
Castillo de la Concepción (B)	16,51±1,42
Casa de la pólvora (C)	11,20±1,81
Muralla de Carlos III (F)	11,42±1,66
Cuartel de Antigones (G)	13,78±2,83

Tabla 5.4. Valores de índice de rebote obtenidos en campo. Fuente: elaboración propia

Igualmente, fue posible medir la dureza superficial en la cantera original de extracción, exponiendo los resultados en la Tabla 5.5.

Altura (m)	CAN1	CAN2	CAN3	CAN4	CAN5	CAN6	CAN7
0,2	22	22	22	22	20	20	22
0,4	18	18	16	18	22	18	18
0,6	20	18	20	18	18	22	20
0,8	22	22	18	18	18	20	24
1	18	24	22	22	18	18	18
1,2	24	30	26	24	22	24	24

Tabla 5.5. Valores de índice de rebote obtenidos en la cantera. Fuente: elaboración propia

Los valores de índice de rebote obtenidos en las construcciones objeto de estudio son inferiores a los medidos en los afloramientos rocosos, en estado natural, siendo estos bastante resistentes a la erosión, ya que se encuentran superficialmente encostrados.

5.2.3. Relación entre velocidad de ultrasonidos y esclerómetro Schmidt

A la vista de los resultados obtenidos en los ensayos no destructivos, con el objetivo de relacionar dichos parámetros entre sí y el propio inmueble, se procede a representar gráficamente en aquellas construcciones donde fue posible (Muralla de Carlos III y Castillo de la Concepción), por un lado, la relación existente entre la velocidad de ultrasonidos (eje abscisas) y cota respecto al suelo (eje ordenadas). Asimismo, se representa la relación entre el índice de rebote (eje abscisas) y cota respecto al suelo (eje ordenadas). Ambas gráficas se exponen junto a una fotografía de la construcción estudiada (escalada respecto a la cota representada en ambas gráficas). En el Arsenal sólo fue posible representar la velocidad de ultrasonidos (V_p) y en la cantera original de extracción el índice de rebote (R).

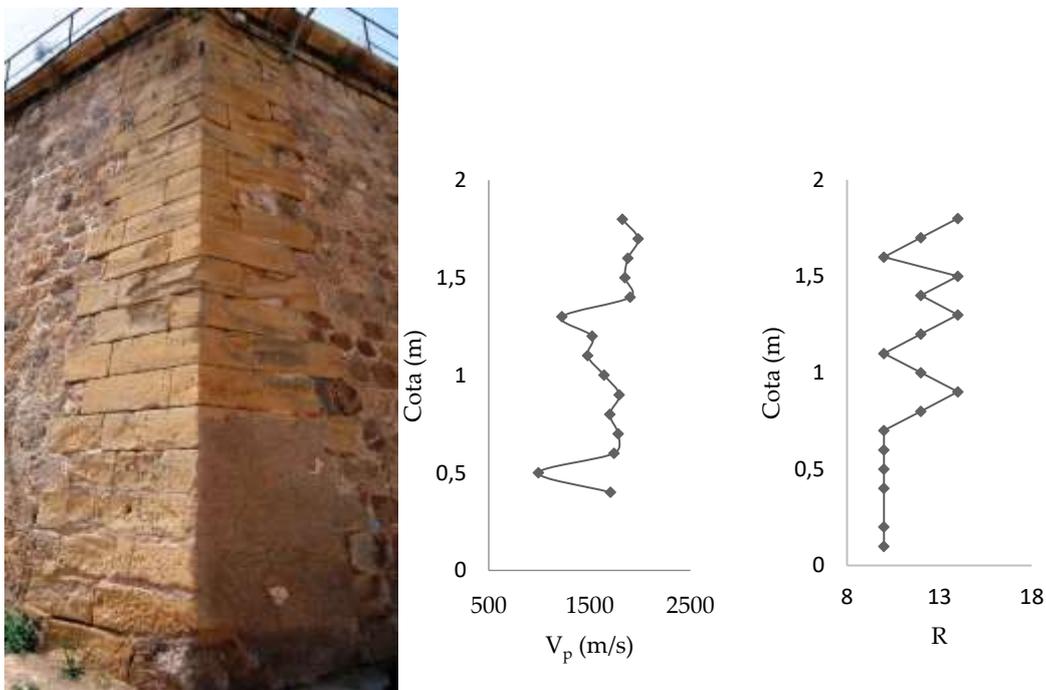


Figura 5.6. Baluarte N°7 Rambla Benipila, Muralla de Carlos III (izquierda). Gráficas de velocidad de propagación de onda ultrasónica e índice de rebote en función de la cota (derecha). Fuente: elaboración propia

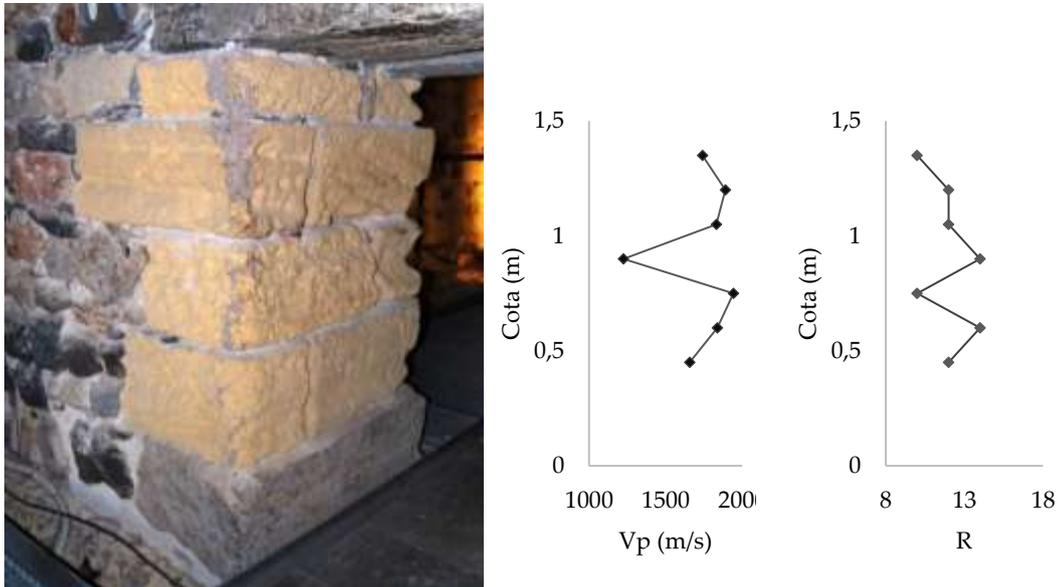


Figura 5.7. Castillo de la Concepción (izquierda). Gráficas de velocidad de propagación de onda ultrasónica e índice de rebote en función de la cota (derecha). Fuente: elaboración propia

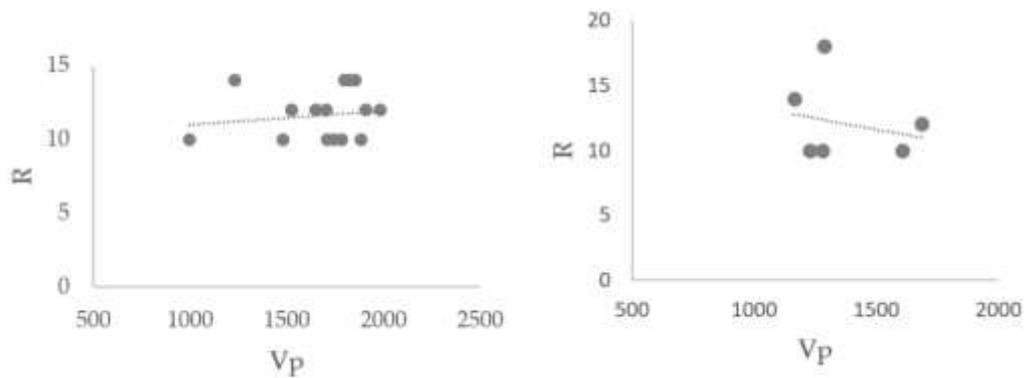


Figura 5.8. Relación entre la velocidad de propagación de onda ultrasónica (V_p) y el índice de rebote (IR) en: la Muralla de Carlos III (izquierda) y el Castillo de la Concepción (derecha). Fuente: elaboración propia

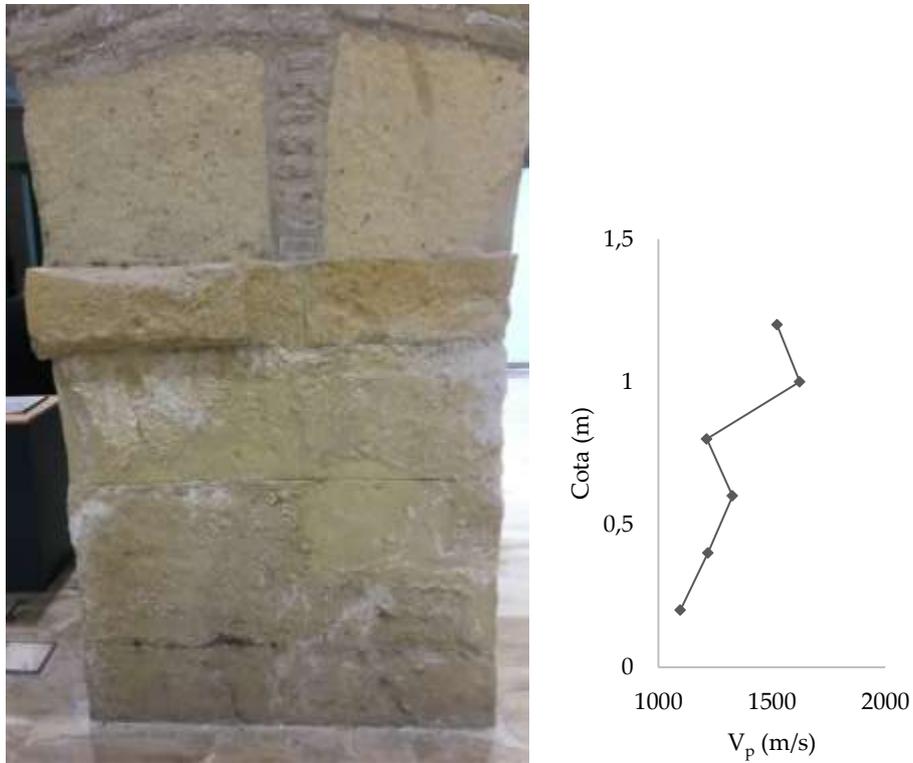


Figura 5.9. Jefatura Industrial, Arsenal (izquierda). Gráfica de velocidad de propagación de onda ultrasónica en función de la cota (derecha). Fuente: elaboración propia

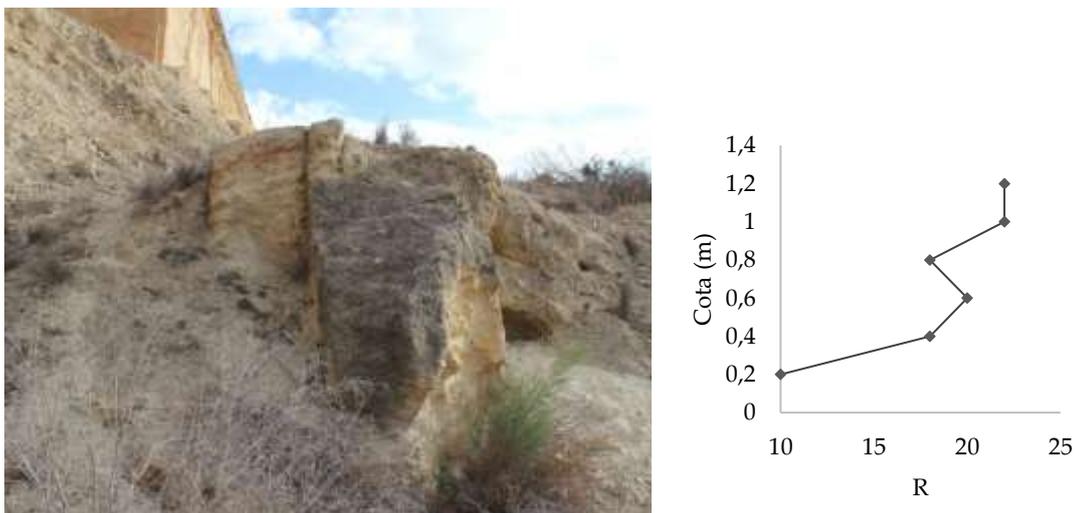


Figura 5.10. Cantera (izquierda). Gráfica índice de rebote en función de la cota (derecha). Fuente: elaboración propia

A la vista de los resultados obtenidos para los ensayos “in situ” realizados, se puede añadir que el rango de valores de velocidad de propagación de onda ultrasónica en el Tabaire obtenidos en campo oscila desde los 855 m/s hasta los 2309 m/s y el rango de valores obtenido para el índice de rebote desde 9,39 hasta 17,93.

En aquellos inmuebles donde ha sido posible realizar ambos ensayos no destructivos, vemos como en las construcciones donde se han obtenido mayores velocidades de propagación de onda ultrasónica los valores de índice de rebote son también superiores. Igualmente, los menores valores de R se corresponden con los de V_p inferiores, obtenidos en la Casa de la Pólvora.

En general, se han registrados valores inferiores de V_p y R en cotas inferiores (entre 0 y 1 m). Como se aprecia en las figuras anteriormente expuestas, dichas cotas suelen corresponderse, a su vez, con las zonas más degradadas.

Entre las variables de velocidad de propagación de onda ultrasónica (V_p) e índice de rebote (R) no se establece una relación directa. Este hecho podría deberse a la gran heterogeneidad que presenta el Tabaire.

Asimismo, los valores de R fluctúan ligeramente, al tratarse de un parámetro más superficial, y se encuentra dentro del error de las medidas, mientras que la velocidad de propagación de onda ultrasónica se mide en el interior de la piedra, por lo que varía poco superficialmente.

5.2.4. Estimación del vaciado de canteras

El número de capturas realizadas y el tiempo de trabajo de procesamiento empleados por el software (7 horas y 58 minutos), generan un total de 116989527 puntos. Las nubes de puntos densas obtenidas sirven para generar el modelo tridimensional.

Con la intención final, alcanzado el modelo tridimensional real, preciso y actual de la excavación de Tabaire de Canteras, de estimar y determinar el volumen de terreno desplazado, desde el origen de la excavación en época prerromana hasta nuestros días (con independencia de que la extracción de esta roca en esta excavación se detuviera años atrás). Así, se desarrolla un sistema que, apoyado en la volumetría fotogramétrica, permite, de forma objetiva y sin interacción por parte del operador, alcanzar dicha suposición geográfica.

El sistema se ha basado en la selección de puntos y clasificación en función de su origen empleando el software fotogramétrico de referencia y su herramienta nativa de clasificación de puntos del terreno.

Con este útil, se escoge la zona excavada de la cantera y se excluye su empleo a la hora de generar el volumen del modelo definitivo, de forma que, automáticamente, el programa nos estima cuál será la “caída” o alud del terreno desde la zona alta del collado hasta su encuentro con la franja de residencias actual.

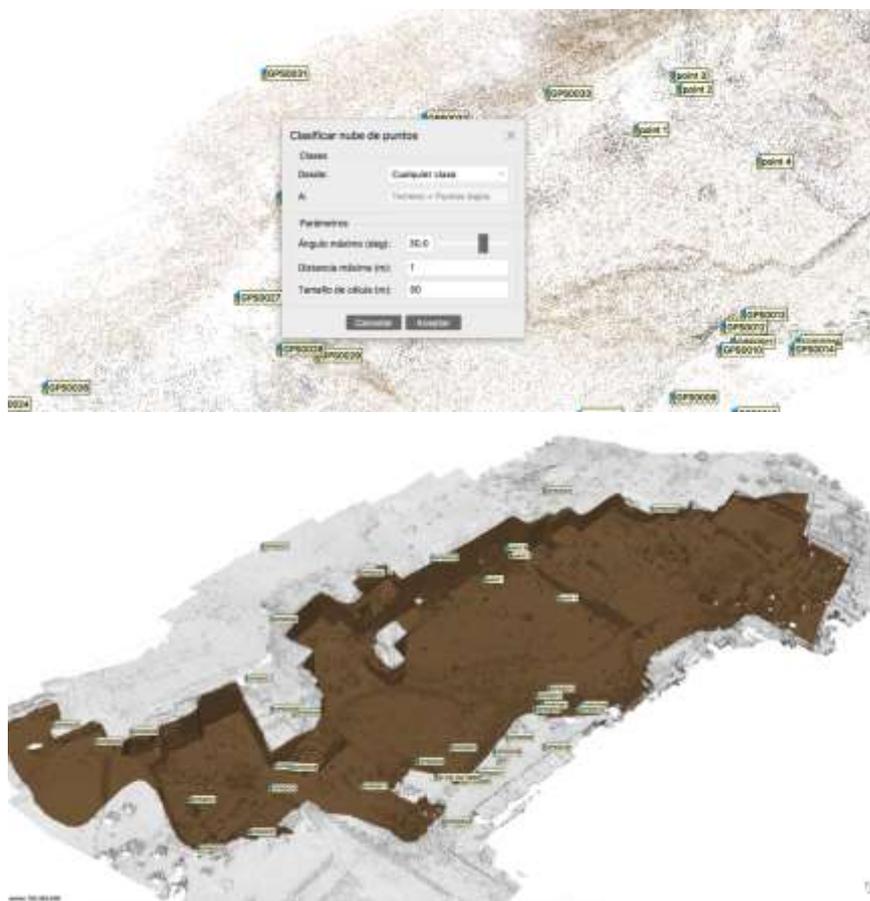


Figura 5.11. Ventana emergente para la clasificación de puntos del terreno (superior) y selección de la nube densa en función de las medidas de exclusión (inferior). Fuente: elaboración propia

Con esta clasificación y volviendo a adentrarnos en el flujo de trabajo anteriormente expuesto, pero con la clasificación ya asignada a la nube de puntos

se obtiene una sinuosa y suave ladera de desnivel prácticamente constante pero con ligeras terrazas en forma de elevación generadas (Figura 5.12), muy probablemente, por el cálculo espacial del programa informático y la estimación del mástil rocoso que, aún en la actualidad, se encuentra exento del paño general de la excavación a cielo abierto de Canteras.

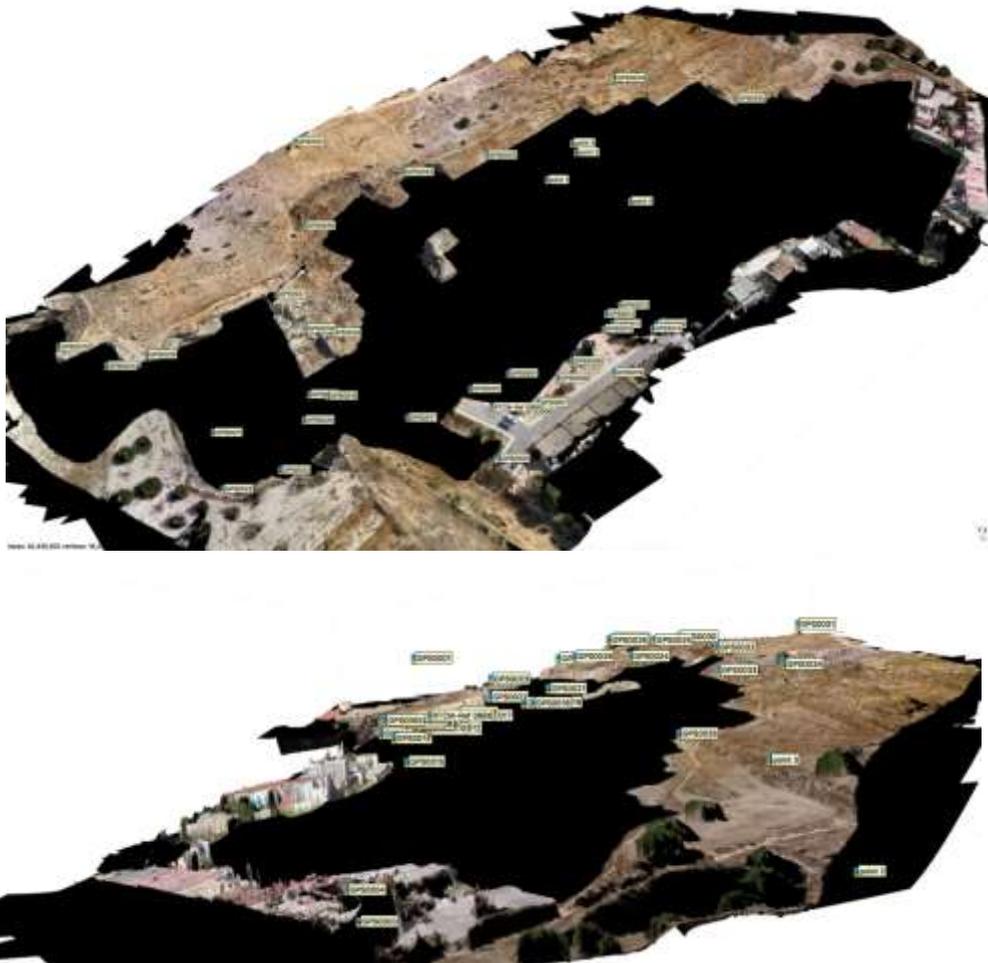


Figura 5.12. Malla tridimensional generada por métodos automáticos y que sirve de base de cálculo para la determinación de volúmenes de tierras desplazados. Fuente: elaboración propia

Para la medición de las canteras de Tabaire, se realizaron treinta y cinco estacionamientos GPS, expuestos en la Tabla 5.6, juntos con sus coordenadas X, Y y Z.

Referencia	X	Y	Z	Referencia	X	Y	Z
GPS0035	672803,680	4164973,736	83,573	GPS0017	672588,547	4164874,184	76,972
GPS0034	672748,482	4164997,914	90,776	GPS0016	672666,347	4164860,148	78,602
GPS0033	672670,718	4164975,834	88,013	GPS0015	672696,143	4164868,140	77,954
GPS0032	672630,849	4164973,703	94,016	GPS0014	672691,474	4164872,043	78,298
GPS0031	672595,320	4165002,628	98,688	GPS0013	672685,457	4164886,936	79,224
GPS0030	672582,387	4164956,623	98,724	GPS0012	672677,913	4164885,059	79,230
GPS0029	672573,035	4164907,259	95,100	GPS0011	672677,973	4164879,920	79,146
GPS0028	672565,638	4164912,656	95,053	GPS0010	672673,068	4164878,929	79,215
GPS0027	672560,703	4164927,537	100,326	GPS0009	672654,034	4164870,557	79,320
GPS0026	672512,310	4164920,076	99,943	GPS0008	672645,346	4164865,871	79,335
GPS0025	672486,883	4164936,987	97,452	GPS0007	672633,492	4164859,407	79,534
GPS0024	672499,197	4164927,228	91,202	GPS0006	672626,222	4164858,044	79,682
GPS0023	672520,210	4164866,771	88,661	GPS0005	672609,554	4164844,212	80,046
GPS0022	672540,057	4164869,748	81,786	GPS0004	672615,172	4164838,741	80,013
GPS0021	672524,510	4164892,868	81,791	GPS0003	672625,363	4164849,528	79,506
GPS0020	672554,782	4164887,329	78,154	GPS0002	672613,441	4164874,158	79,889
GPS0019	672560,079	4164896,564	77,567	GPS0001	672615,800	4164863,309	79,675
GPS0018	672566,003	4164893,411	78,354	-	-	-	-

Tabla 5.6. Estacionamientos GPS y sus coordenadas X, Y y Z. Fuente: elaboración propia

El valor de paso que define la resolución de la cuadrícula que se emplea para estimar el volumen es de 7,9 sobre 8 (siendo más preciso cuanto mayor sea el paso y está limitado a la densidad de la nube).

Fruto de este modelo se extrae una nueva malla tridimensional triangular (Tabla 5.7) que sirve de base comparativa con la obtenida del modelo real y que, por medio del software de superposición volumétrica obtenemos los datos, en metros cúbicos, del terreno desplazado.

Referencia prisma	Volumen (m ³)
01	1824,53
02	3850,24
03	3555,00
04	558,60
05	3222,23
06	25804,80
07	8147,30
08	15592,50
09	109620,00
10	7917,26
11	4384,80
12	5785,00
13	3185,45
14	25080,00
15	7644,56
16	3337,10
17	7032,80
18	21376,89
Total	257919,051

Tabla 5.7 Volumen de tierras calculado empleando trigonometría sobre prismas irregulares.
Fuente: elaboración propia

El volumen final de tierras, calculado por comparación de modelos y apoyado en los datos fotogramétricos, es de 255037,838 m³.

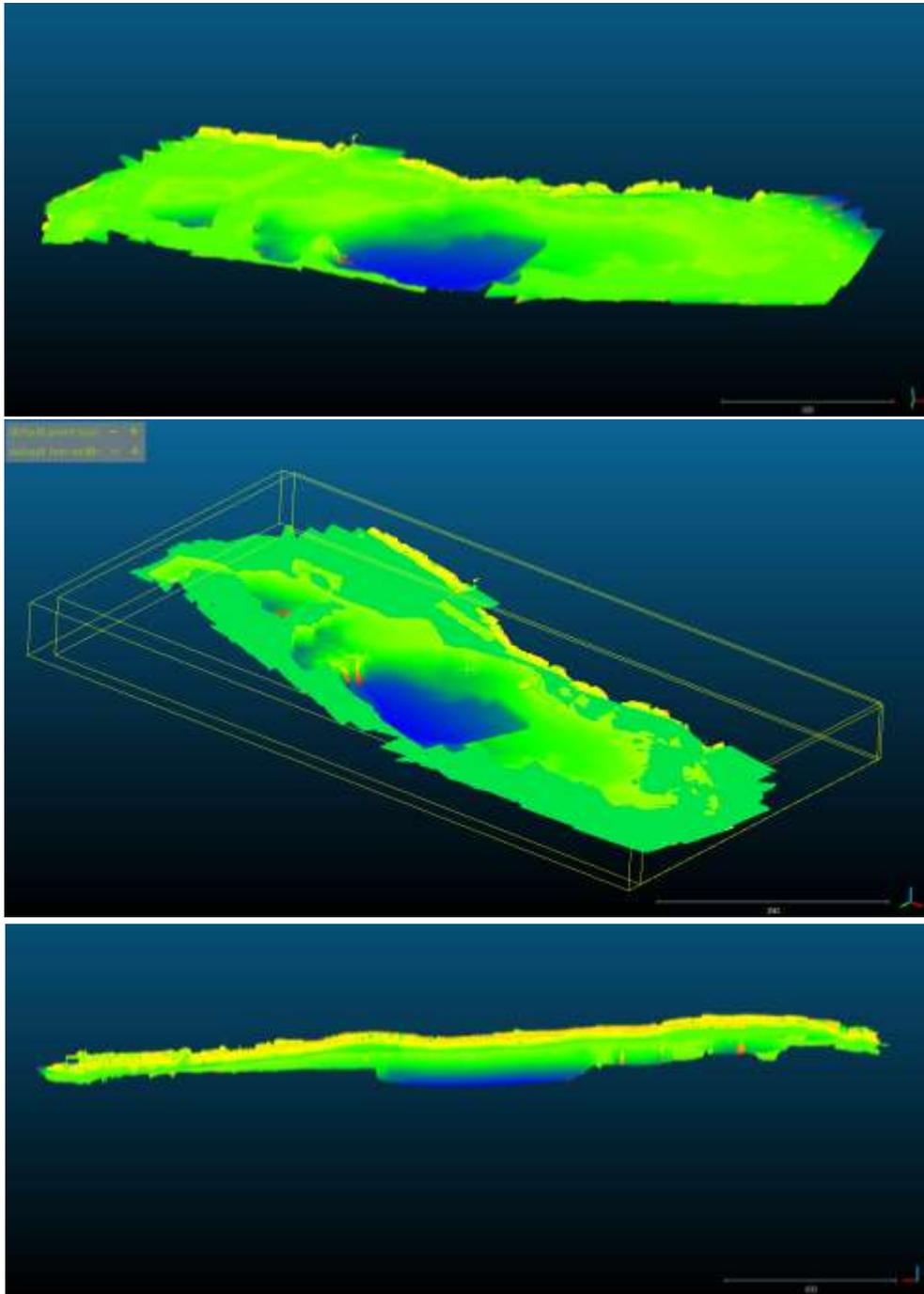


Figura 5.13. Desviación entre zonas de mayor repercusión en altura y su localización en la comparación entre el modelo hipotético y el actual. Escalas de color RGB. Fuente: elaboración propia

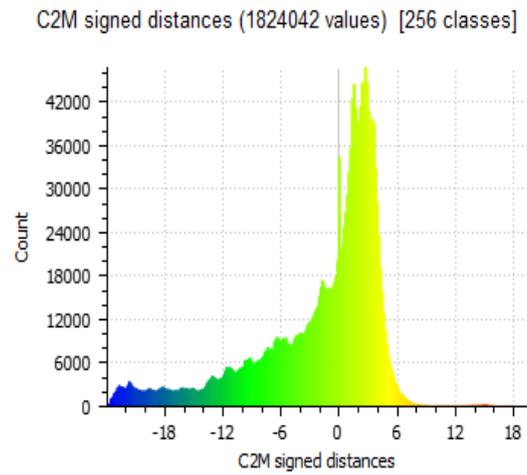


Figura 5.14. Desviación entre zonas de mayor repercusión en altura. Fuente: elaboración propia

Mediante la superposición de las curvas de nivel del terreno con equidistancia de 1 metro y el modelo digital del terreno en alta resolución obtenido del levantamiento fotogramétrico se obtiene el modelo tridimensional del estado actual de la cantera (Figura 5.15).

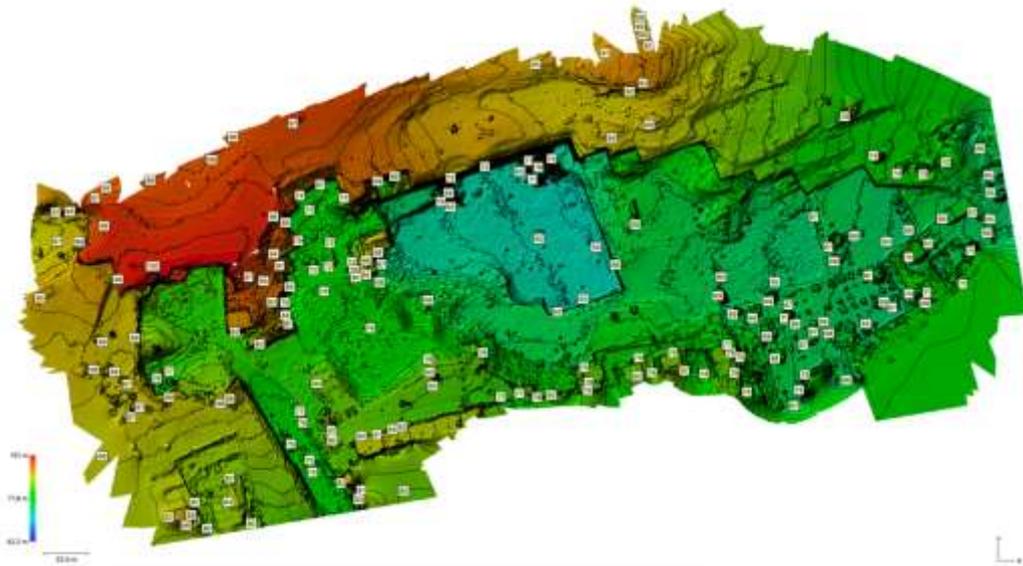


Figura 5.15. Modelo tridimensional del estado actual de la cantera. Fuente: elaboración propia

5.2.5. Un caso concreto: el Arsenal

En cuanto al Real Arsenal de Marina, basándonos en los documentos que detallan los materiales empleados en la construcción del Arsenal, durante el periodo comprendido entre 1749 y 1779, se consigue cuantificar el número de sillares, así como el volumen, en metros cúbicos, de Tabaire que fue empleado en la obra de construcción durante dicho periodo (Tabla 5.8).

Periodo	Año	Sillares de Tabaire	Pies cúbicos	Volumen en m ³
1	1749-1750	4381	68955	1952,59
2	1751	44267	702721	19898,84
3	1752	56970	887408	25128,60
4	1753	36240	559313	15837,98
5	1754	19111	302880	8576,61
6	1755	13490	213019	6032,03
7	1756	60863	969968	27466,44
8	1757	39081	553352	15669,18
9	1758	14057	225744	6392,36
10	1759	14131	217149	6148,97
11	1760	86	1226	34,72
12	1761	2392	36940	1046,28
13	1762	1023	19828	561,47
14	1763	4229	67571	1913,40
15	1764	2314	36374	1030
16	1765	21019	322026	9118,76
17	1766	11640	163184	4620,86
18	1773	1987	25896	733,29
19	1774	2140	30772	871,37
20	1776	10879	158631	4491,93
21	1777	2067	31180	882,92
22	1778	30	480	13,59
Total		362397	5594617	158422,19

Tabla 5.8. Volumen de Tabaire empleado en la construcción del Real Arsenal de Marina (1749-1779). Fuente: elaboración propia

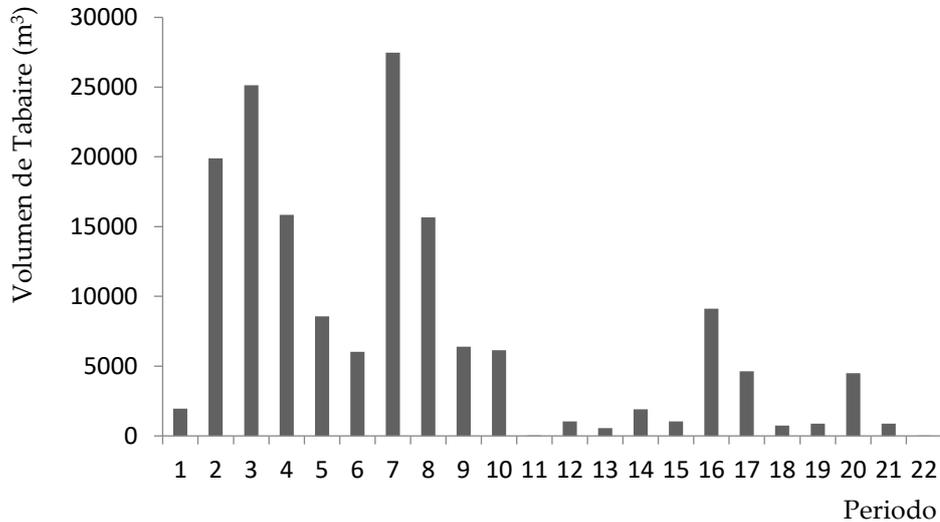


Figura 5.16. Volumen de Tabaire empleado en la construcción del Arsenal (1749-1779). Fuente: elaboración propia

Asimismo, analizando la documentación existente, se procede a determinar la mano de obra necesaria para la extracción del Tabaire, tratando de cuantificar el número diario de canteros que intervino para la construcción del Real Arsenal de Marina, y los medios empleados para el transporte del material pétreo, determinando el número de carros y carretas que se trasladaron diariamente para su disposición a pie de obra.

Tal y como se refleja en los documentos originales de obra, un cantero recibía un salario diario de entre 1,5 y 2 reales. Asimismo, el importe que suponía el traslado de carretas y carros oscilaba entre 1,5 y 7 reales.

Para poder cuantificar el número de canteros que participaron en la extracción del Tabaire, así como las carretas y carros necesarios para su transporte hasta la obra, se toma el salario/coste medio, siendo de 1,75 reales/día en el caso de los canteros y de 4,25 reales/día para los carros y carretas.

El número medio diario de canteros y carretas empleadas para el transporte del Tabaire al Real Arsenal de Marina, que se ha calculado, para cada periodo analizado, se expone en la Tabla 5.9.

Periodo	Año	Canteros (1,5 a 2 reales)		Carretas y carros (1,5 a 7 reales)	
		Salario (Reales/año)	\bar{x} canteros/día	Coste (Reales/año)	\bar{x} carros/día
1	1749-1751	37888	19,77	4032	2,6
2	1752	80434	125,92	5625	3,6
3	1753	81980	128,34	3266	2,1
4	1754	73192	114,59	1970	1,3
5	1755	48910	76,57	1818	1,2
6	1756	50756	79,46	1695	1,1
7	1757	35111	54,97	1848	1,2
8	1758	45897	71,85	1724	1,1
9	1759	49759	77,9	1771	1,1
10	1760	35618	55,76	1713	1,1
11	1761	16197	25,36	1976	1,3
12	1762	8129	12,73	1096	0,7
13	1763	4229	6,62	33	0,02
14	1764	2540	3,98	20	0,01
15	1765	8497	13,3	796	0,5
16	1766	25992	40,69	898	0,6
17	1767	23709	37,12	412	0,3
18	1768	10893	17,29	144	0,1
19	1769	6886	10,78	271	0,2
20	1770	730	1,14	-	-
21	1771	365	0,57	14	-
22	1772	577	0,9	-	-
23	1773	8204	12,84	-	-
24	1774	10126	15,85	10	-
25	1775	2148	3,36	-	-
26	1776	1865	2,92	-	-
27	1777	2102	3,29	-	-
28	1778	1076	1,68	-	-
29	1779	784	1,23	-	-

Tabla 5. 9. Número de canteros y carretas empleadas para el transporte del Tabaire al Real Arsenal de Marina (1749-1779). Fuente: elaboración propia

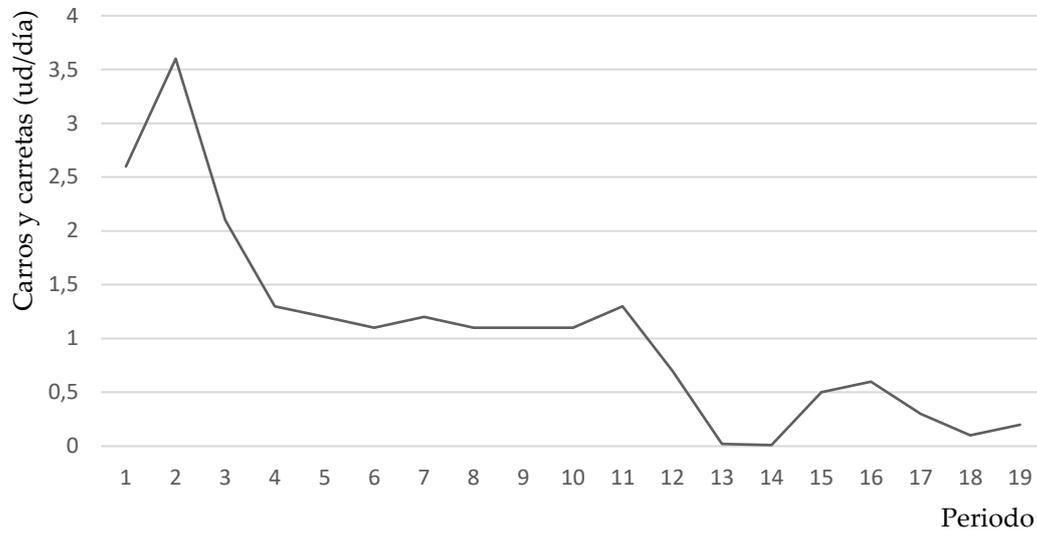


Figura 5.17. Mano de obra media diaria en la cantera (1749-1779). Fuente: elaboración propia

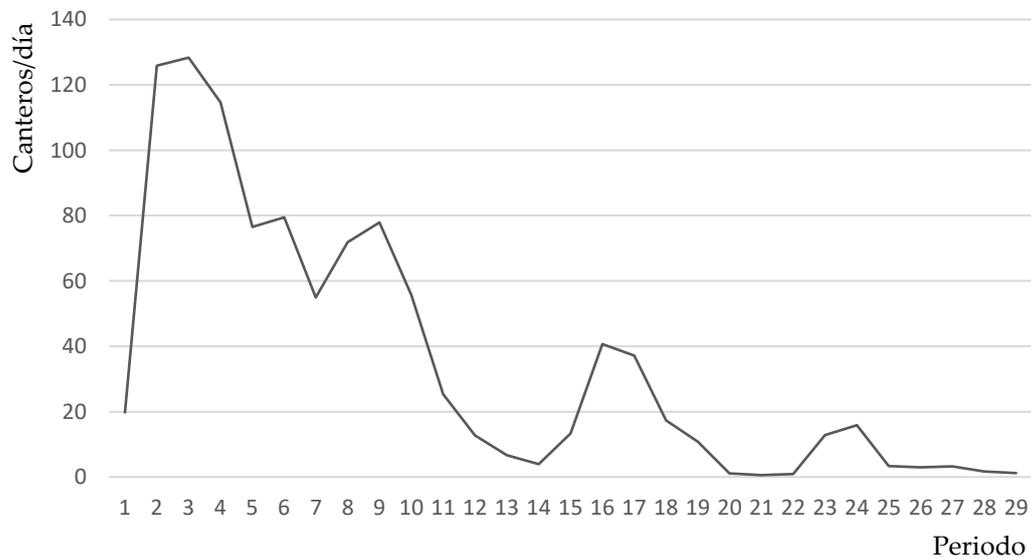


Figura 5.18. Cantidad media de carros y carretas empleados a diario (1749-1779). Fuente: elaboración propia

En cuanto al número de sillares de Tabaire empleados en la construcción del Real Arsenal de Marina, se cuantifica un total de 362397, lo que supone un volumen de 158422,19 m³.

Teniendo en cuenta que el volumen estimado de vaciado de la cantera es de 255037,838 m³, el volumen empleado en la construcción analizada supone un 62,12% del volumen total extraído.

El periodo de mayor demanda del material pétreo resulta el comprendido entre 1751 y 1759, alcanzando el máximo número de sillares empleados en 1756. A partir de 1760, se continúa disponiendo en obra de forma intermitente, hasta su empleo residual en 1778.

Respecto a la mano de obra, el número de canteros empleados en la extracción del Tabaire destinado exclusivamente a la construcción del Real Arsenal de Marina alcanza su máximo en el año 1752. A partir del año 1761, coincidiendo con el descenso del volumen extraído, disminuye también el personal destinado a tal fin.

En cuanto a los carros y carretas utilizados para el transporte del material a pie de obra, se produce un mayor tránsito durante los primeros años, hasta 1760 momento a partir del cual se reduce significativamente.

**VI. RESULTADOS Y
DISCUSIÓN DEL ESTUDIO
MINERALÓGICO Y
PETROGRÁFICO**

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DEL ESTUDIO MINERALÓGICO Y PETROGRÁFICO

Se representan en el presente capítulo los resultados obtenidos en el estudio mineralógico y petrográfico de la piedra Tabaire, para las muestras analizadas mediante las técnicas instrumentales de: Difracción de Rayos X, Porosimetría de Intrusión de Mercurio, Lámina Delgada y Microscopía Electrónica de Barrido.

6.1. MUESTRAS ANALIZADAS

En la Tabla 6.1 se indican la totalidad de las muestras analizadas mediante ensayos de Difracción de Rayos X (DRX), Porosimetría de Mercurio (MIP) y Lámina Delgada (LD), efectuados en el Servicio de Apoyo a la Investigación Tecnológica de la Universidad de Alicante y el ensayo de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), realizado en la Universidad Católica San Antonio de Murcia.

6.2. DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

En la Tabla 6.2, se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de DRX. Se presentan tanto minerales formadores como las sales detectadas en cada una de las muestras. Todos ellas representados mediante una inicial, calcita (C), dolomita (D), Cuarzo (Q), plagioclasa (anortita, A), filosilicatos (illita I, caolinita K y montmorillonita M), halita (H), yeso (G), anhidrita (An), epsomita (E), bloedita (B), thenardita (T).

Construcción	Designación	Muestras	DRX	MIP	LD	SEM
Muralla Púnica	MLA	MLA1				X
		MLA2				X
		MLA3				X
		MLA4	X	X		
		MLA5	X	X	X	
Castillo de la Concepción	MLB	MLB1				X
		MLB2				X
		MLB3	X	X	X	
Casa de la Pólvara	MLC	MLC1		X	X	X
		MLC2				X
		MLC3	X			
Real Arsenal de Marina	MLD	MLD1	X	X		
		MLD2	X			
		MLD3	X			
		MLD4		X	X	X
		MLD5	X			
Real Hospital de Marina	MLE	MLE1				X
		MLE2	X	X	X	
Muralla de Carlos III	MLF	MLF1				X
		MLF2				X
		MLF3	X	X	X	
Cuartel de Antiguones	MLG	MLG1				X
		MLG2				X
		MLG3	X	X	X	
Cantera	MLCAN	MLCAN1	X		X	X
		MLCAN2	X			X
		MLCAN3	X			X
		MLCAN4	X			X
		MLCAN5	X			X

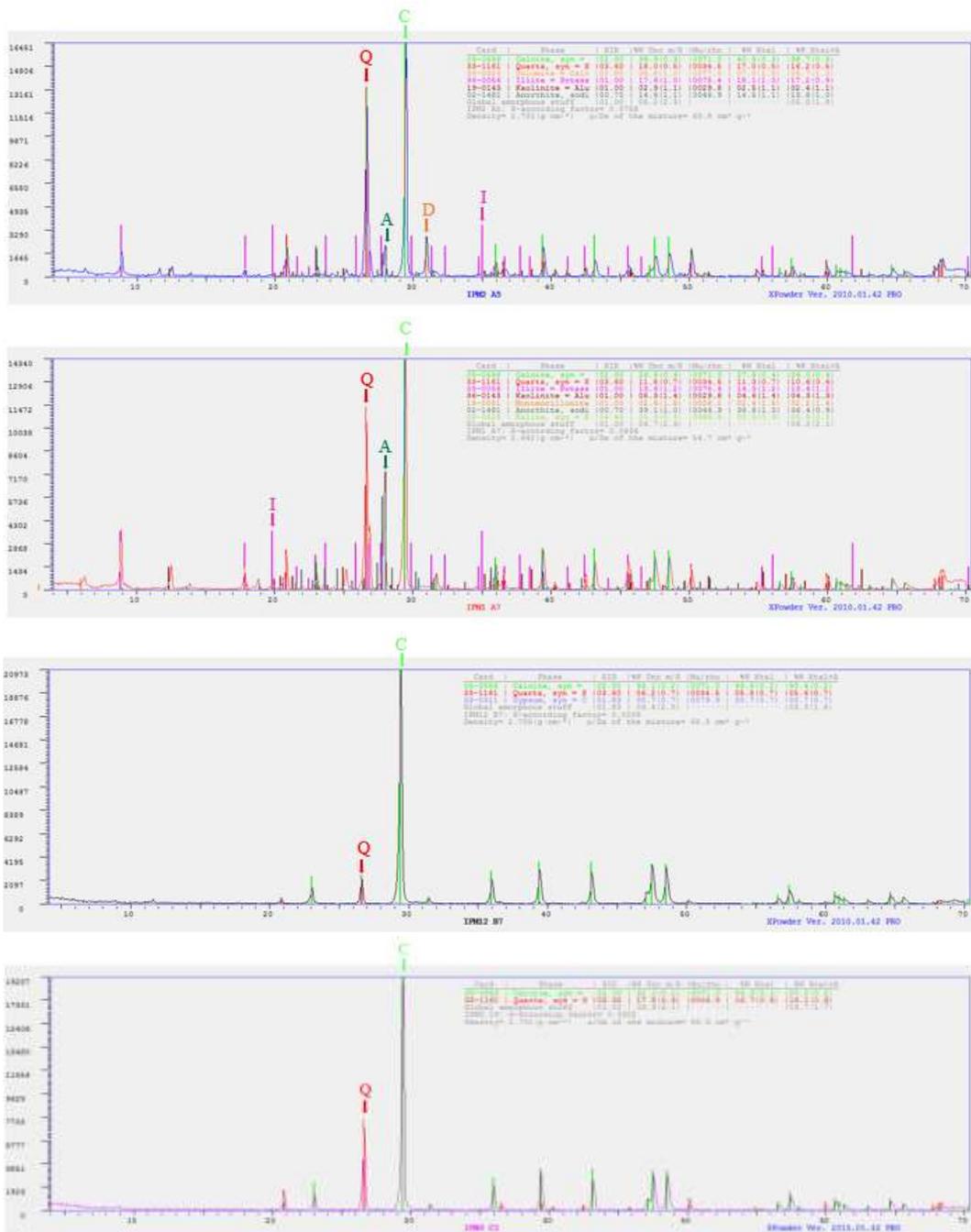
Tabla 6.1. Relación de muestras tomadas y ensayos realizados. Fuente: elaboración propia

Muestra	Minerales formadores de la roca							Sales					
	C	I	Q	A	D	K	M	H	G	An	E	B	T
MLA4	41	18	17	15	7	2	-	-	-	-	-	-	-
MLA5	28	14	11	39	-	5	2	1	-	-	-	-	-
MLB3	93	-	6	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
MLC3	83	-	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MLD1	30	-	1	-	-	-	-	-	65	4	-	-	-
MLD2	4	28	30	-	-	-	-	-	9	-	-	29	-
MLD3	-	-	4	-	-	-	-	-	46	-	42	8	-
MLD5	9	-	27	-	-	-	-	-	20	-	20	1	6
MLE2	85	5	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MLF3	72	11	15	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MLG3	52	-	16	9	12	-	-	8	3	-	-	-	-
MLCAN1	18	15	13	-	46	4	2	-	2	-	-	-	-
MLCAN2	58	11	9	-	14	4	4	-	-	-	-	-	-
MLCAN3	60	10	11	-	12	4	3	-	-	-	-	-	-
MLCAN4	78	9	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MLCAN5	87	4	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 6.2. Minerales y sales detectadas en las muestras de las construcciones estudiadas por DRX. Fuente: elaboración propia

A la vista de los resultados obtenidos, la mayoría de las muestras están formadas principalmente por calcita, cuarzo y dolomita. A su vez, se aprecia cómo las muestras de la cantera tienen más dolomita que la de los edificios, pudiendo deberse este hecho al cambio textural de techo a muro.

En las Figuras 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4 se muestran los espectros obtenidos para cada una de las muestras. En ellos se exponen las proporciones que se presentan en la Tabla 6.2. Además, los picos predominantes se encuentran representados con el nombre del compuesto al que pertenecen: calcita (C) CaCO_3 , dolomita (D) $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, cuarzo (Q) SiO_2 , yeso (G) $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, illita (I) $(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2, (\text{H}_2\text{O})]$, caolinita (k) $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, anortita (A) $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ y epsomita (E) $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.



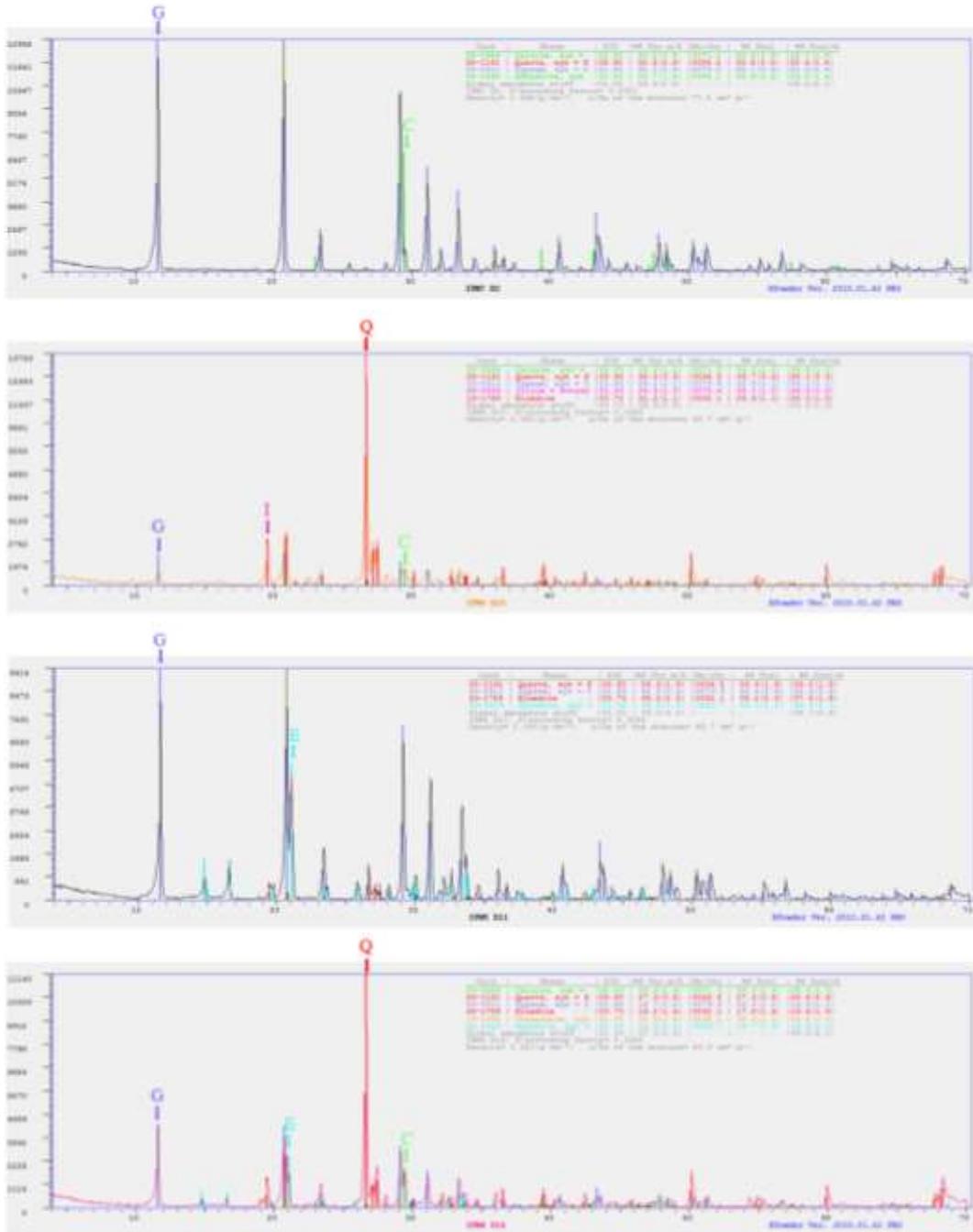


Figura 6.2. Difractogramas, de arriba abajo: MLD1, MLD2, MLD3 y MLD5. Fuente: elaboración propia

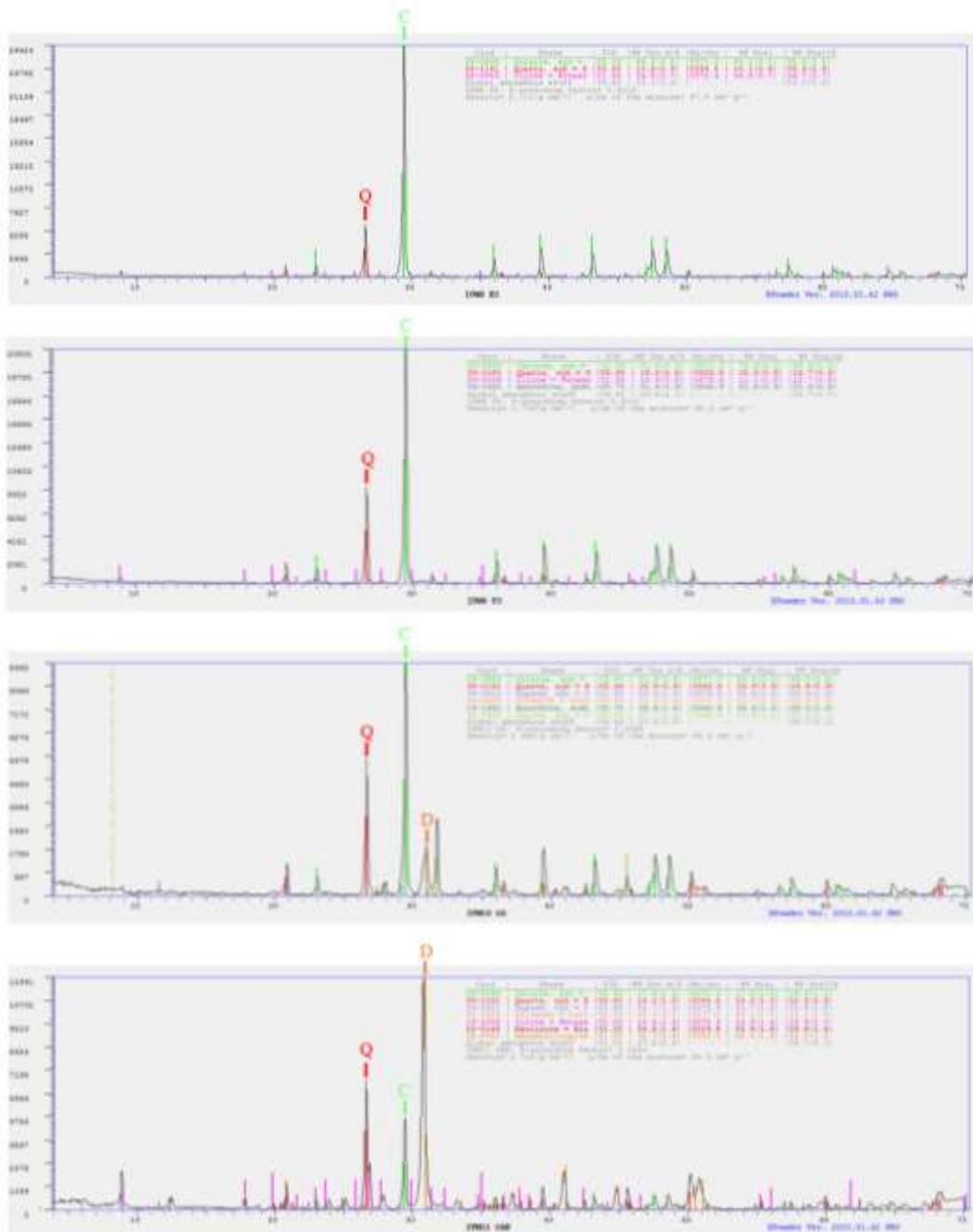


Figura 6.3. Difractogramas, de arriba abajo: MLE2, MLF3, MLG3 y MLCAN1. Fuente: elaboración propia

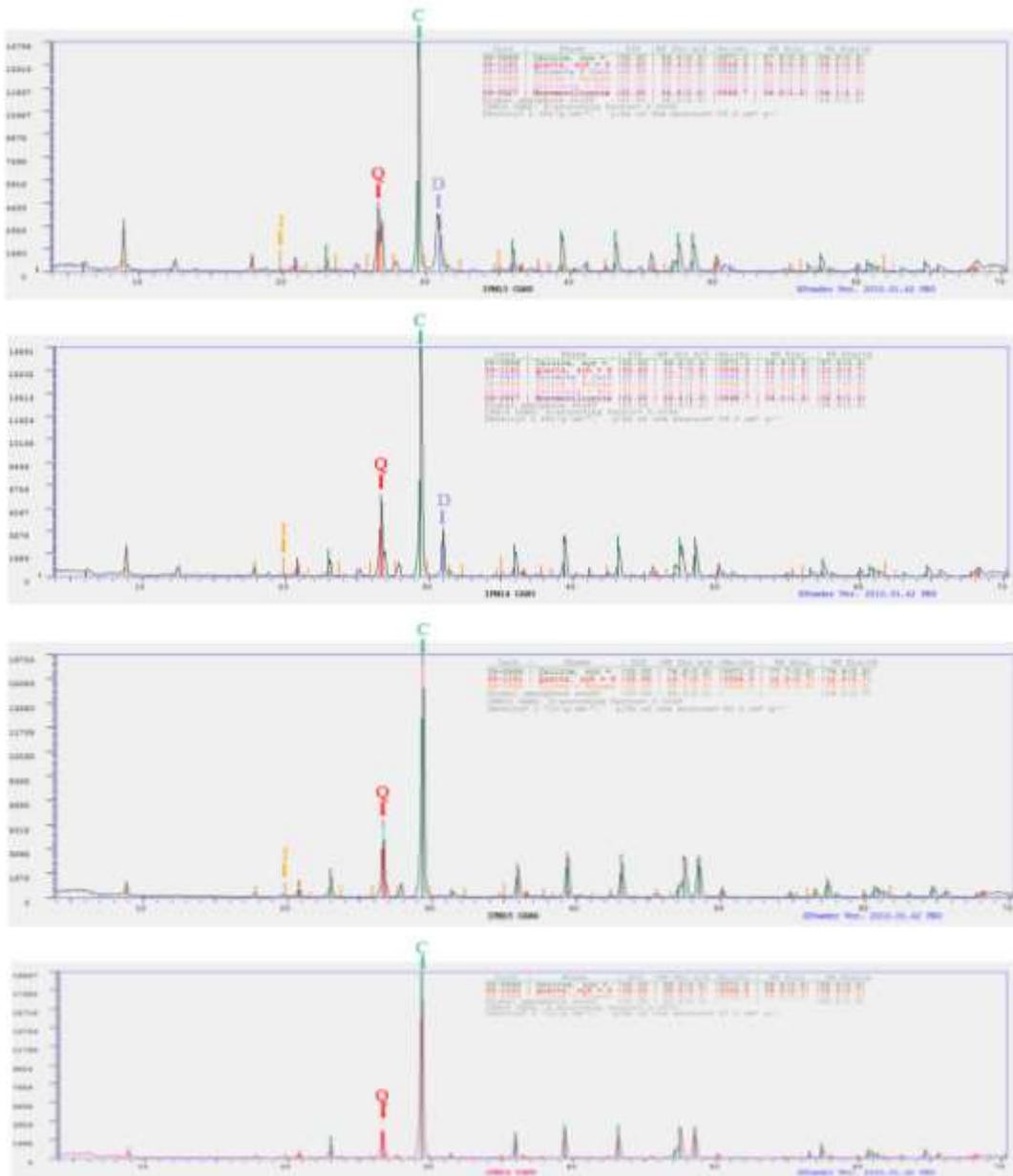


Figura 6.4. Difractogramas, de arriba abajo: MLCAN2, MLCAN3, MLCAN4 y MLCAN5.
Fuente: elaboración propia

6.3. POROSIMETRÍA DE INTRUSIÓN DE MERCURIO (MIP)

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de Porosimetría de Mercurio para cada una de las muestras estudiadas (Tabla 6.3).

Muestras	Porosimetría de mercurio (%)	Superficie específica (m ² /g)	Densidad helio (g/cm ³)	Radio medio (μm)
MLA4	30,35	4,60	2,70	0,14
MLA5	23,18	3,30	2,70	0,11
MLB3	21,45	3,59	2,70	0,09
MLC1	27,31	1,70	2,70	0,01
MLD1	29,33	7,28	2,70	0,16
MLD4	23,20	14,71	2,70	0,08
MLE2	31,53	5,72	2,70	0,16
MLF3	28,34	4,00	2,70	0,13
MLG3	30,00	5,15	2,70	0,14
MLCAN1	29,59	5,77	2,70	0,13
MLCAN2	31,59	4,50	2,70	0,15
MLCAN3	17,89	3,84	2,70	0,07
MLCAN4	30,59	2,92	2,70	0,15
MLCAN5	35,32	7,97	2,70	0,19

Tabla 6.3. Resumen resultados obtenidos por Porosimetría de Mercurio. Fuente: elaboración propia

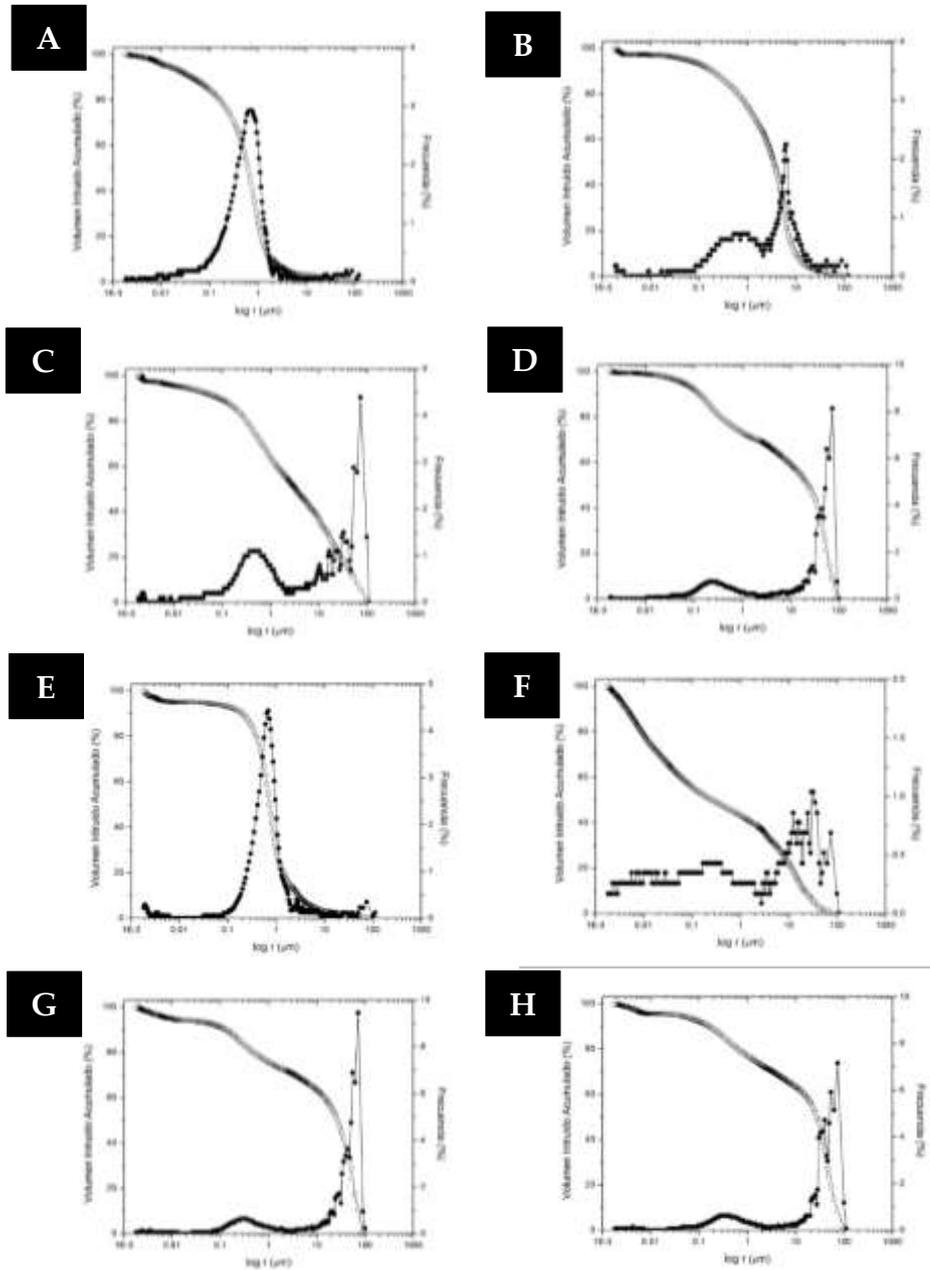


Figura 6.5. A: MLA4, B: MLA5, C: MLB3, D: MLC1, E: MLD1, F: MLD4, G: MLE2, H: MLF3.
Fuente: elaboración propia

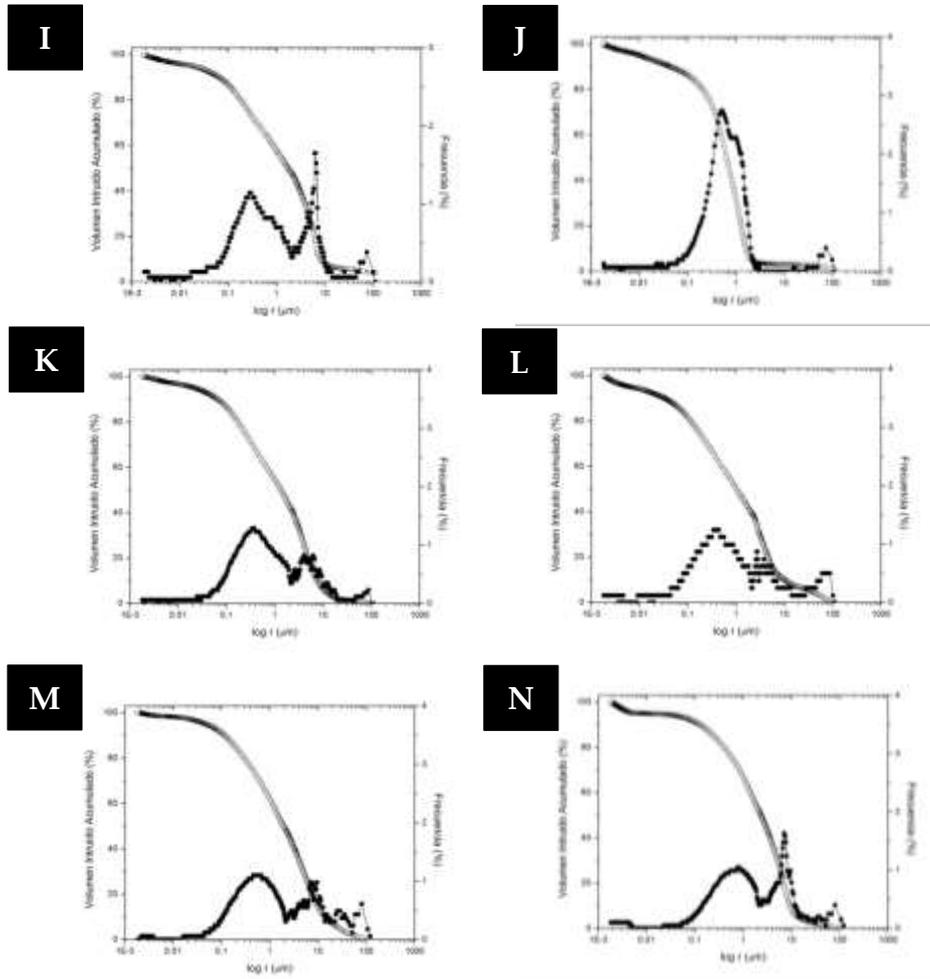


Figura 6.6. I: MLG3, J: MLCAN1, K: MLCAN2, L: MLCAN3, M: MLCAN4, N: MLCAN5.
Fuente: elaboración propia

Las curvas obtenidas muestran la gran variabilidad de porosidad existente en la cantera. A través de los resultados obtenidos mediante la distribución de tamaño de poros, se aprecian tres tipos: I de grano fino, monomodal, II de grano grueso, bimodal y III de grano intermedio. Se ha detectado una familia de poros (interpartícula) entre 0,1-1 μm , presentes en la mayoría de las rocas. Este tamaño de poro hace que la roca sea menos durable que las que tienen un tamaño mayor. Además, el tamaño del poro influye en gran medida en los diferentes mecanismos relacionados con el deterioro de las rocas porosas, como la evaporación-condensación y la presión por cristalización de las sales.

6.4. LÁMINA DELGADA

En este apartado, se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de Lámina Delgada para cada una de las muestras estudiadas (Tabla 6.4), así como las imágenes obtenidas a través del microscopio petrográfico con nícoles paralelos (NP) y cruzados (NC) (Figuras 6.7, 6.8 y 6.9).

Muestra	Referencia	Descripción petrográfica con Lámina Delgada
1	MLA5	Calcarenita polimictica. Accesorios: opacos (óxidos de hierro), sílex, moscovita, galuconita, polimictica, restos de rocas metamórficas (pizarras y/o esquistos), lutitas, fragmentos de fósiles (briozoos, coreales), chert. Poco porosa.
2	MLB3	Biocalcarenita.
3	MLC1	Calcarenita polimictica. Fragmentos de rocas metamórficas.
4	MLD4	Arenisca mayor: cuarzo (angulosos) menor: feldespatos, calizas (cantos de caliza) accesorio: opacos, sílex, polimictica. Pocos restos fósiles. Poco porosa.
5	MLE2	Biocalcarenita polimictica, con granos de Q, fto, fragmento de rocas (esquisto). Porosa (algunos fenestral).
6	MLF3	Biocalcarenita polimictica menos fragmentos de roca. Poros más pequeños que E2; de grano más fino.
7	MLG3	Calcarenita polimictica. Mayor: calcita, dolomita, feldespatos, accesorios: opacos (óxidos de hierro), sílex, moscovita, feldespato, galuconita polimictica, restos de rocas metamórficas (pizarras y/o esquistos), fragmentos de fósiles (foraminíferos), chert. Poco porosa.
8	MLCAN1	Dolomía (o doloarenita) margosa. Menor: moscovita, opacos (óxidos).

Tabla 6.4. Descripción petrográfica de las muestras estudiadas con Lámina Delgada. Fuente: elaboración propia

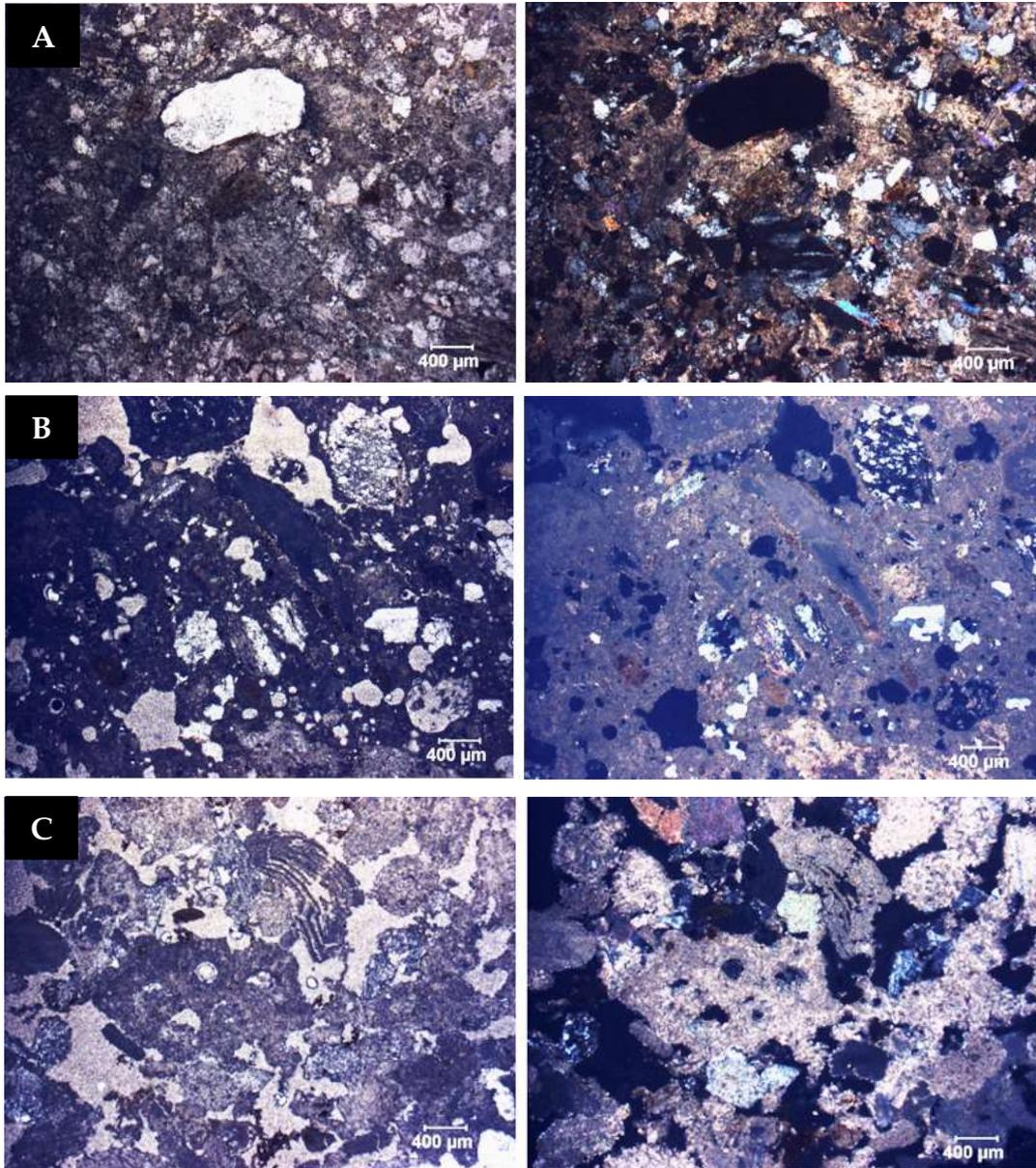


Figura 6.7. NC (izquierda) NP (derecha). A: MLA5, B: MLB3, C: MLC1. Fuente: elaboración propia

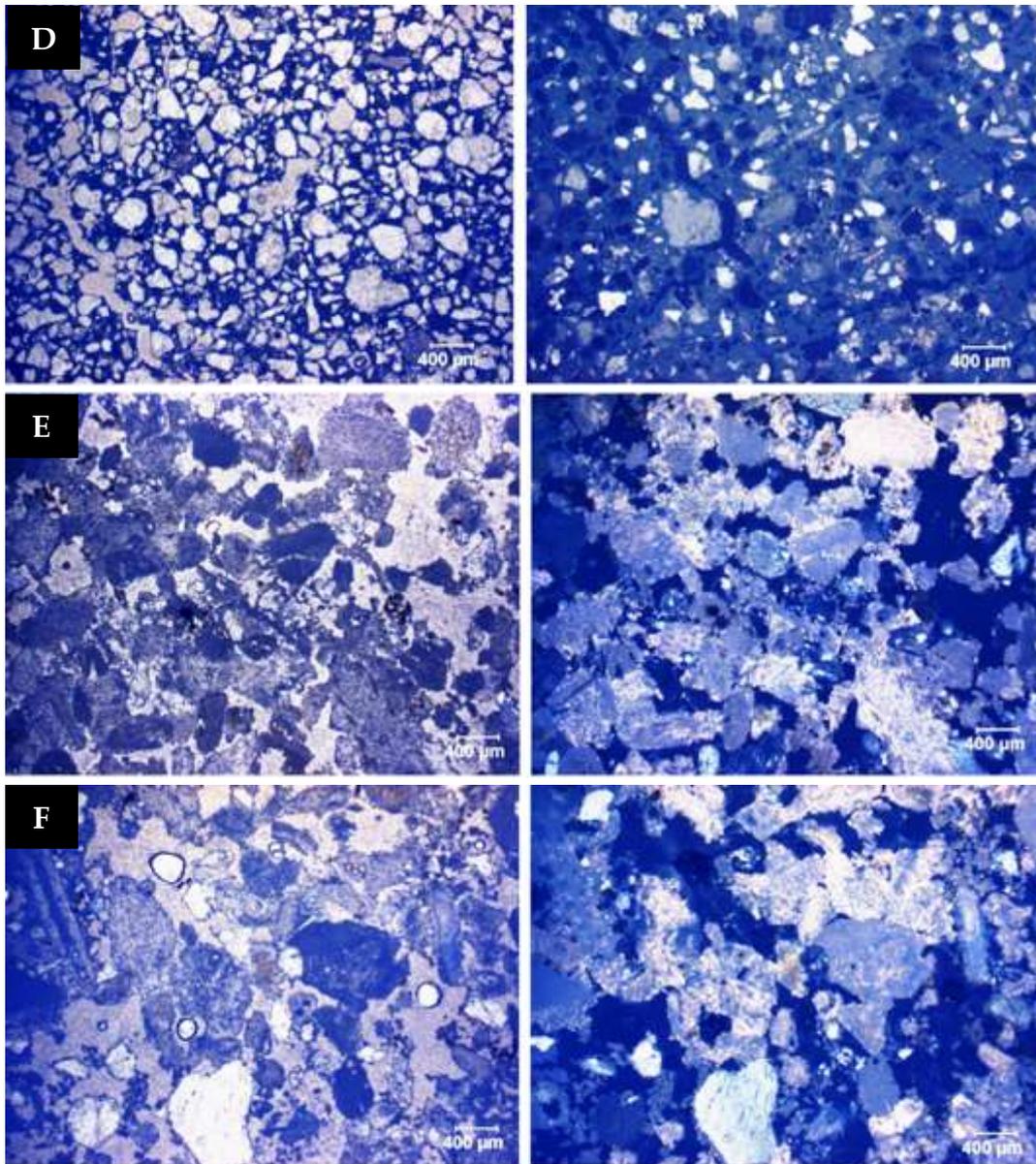


Figura 6.8. NP (izquierda) NC (derecha). D: MLD4, E: MLE2, F: MLF3. Fuente: elaboración propia

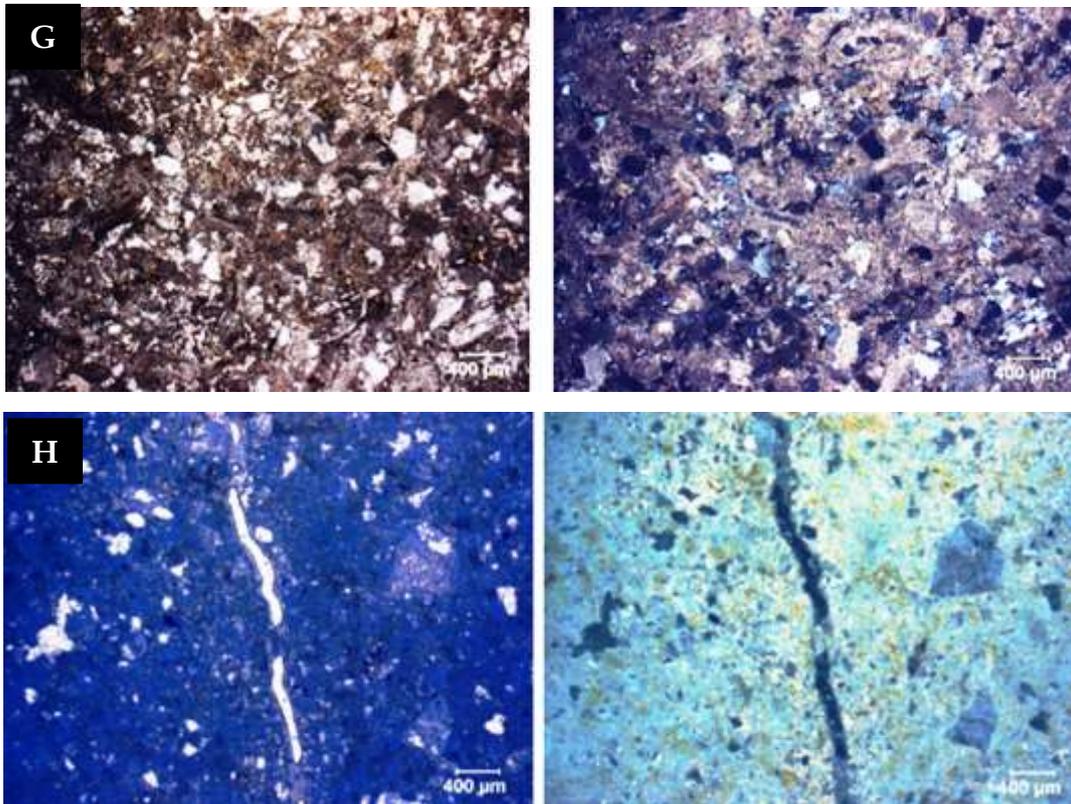


Figura 6.9. NP (izquierda) NC (derecha). G: MLG3, H: MLCAN1. Fuente: elaboración propia

6.5. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

En las Figuras 6.10, 6.11 y 6.12 se presentan las imágenes obtenidas a través del Microscopio Electrónico de Barrido para cada una de las muestras analizadas.

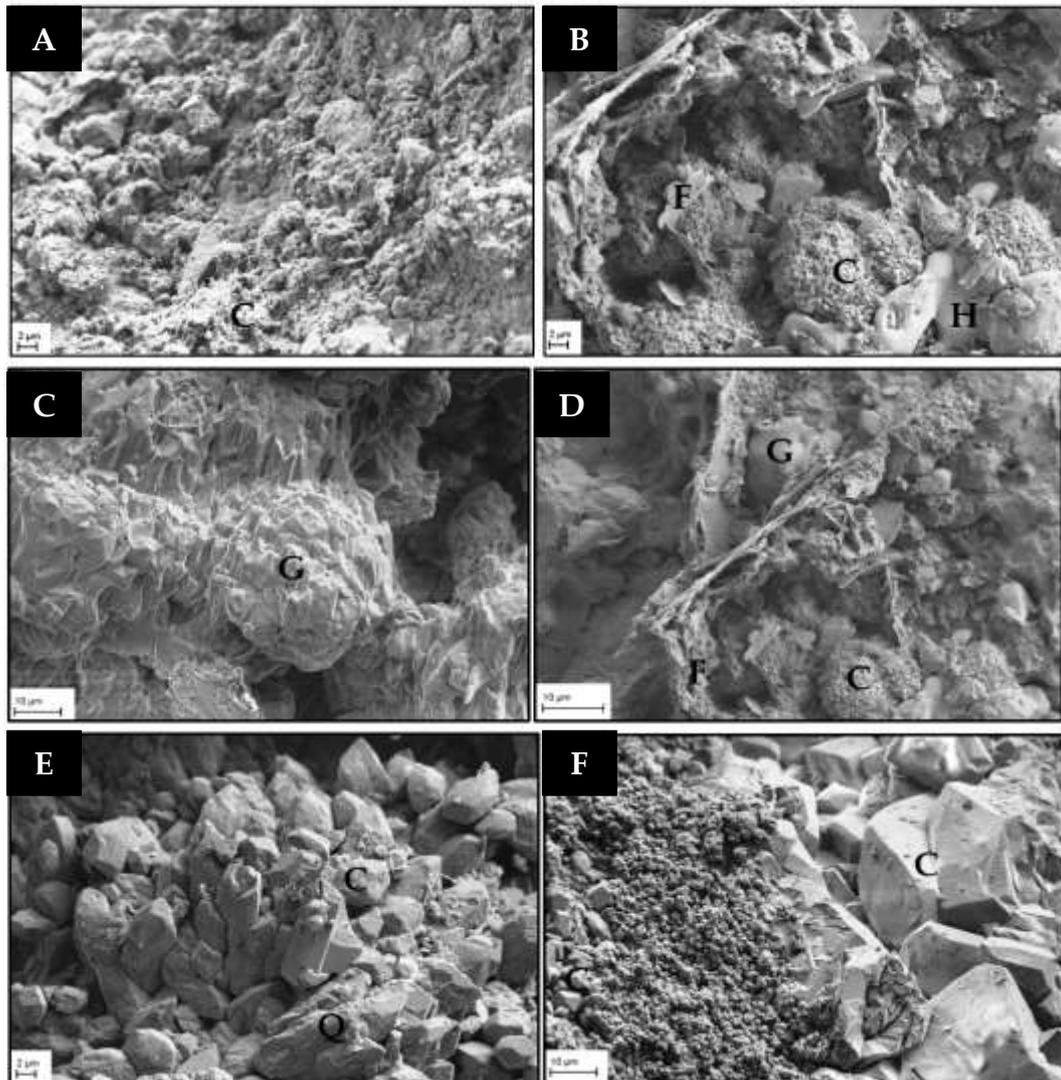


Figura 6.10. Microfotografías de barrido electrónico. A: MLA1 (X2000), se aprecia la matriz calcarenítica de la roca. B: MLA2 (X2000), presencia de halita, calcita y filosilicatos. C: MLA3 (X1000). D: MLB1 (X1320). E: MLB2 (X2000). F: MLC1 (X1000), se aprecia la interfase entre la matriz calcarenítica y la recrystalización de calcita. Fuente: elaboración propia

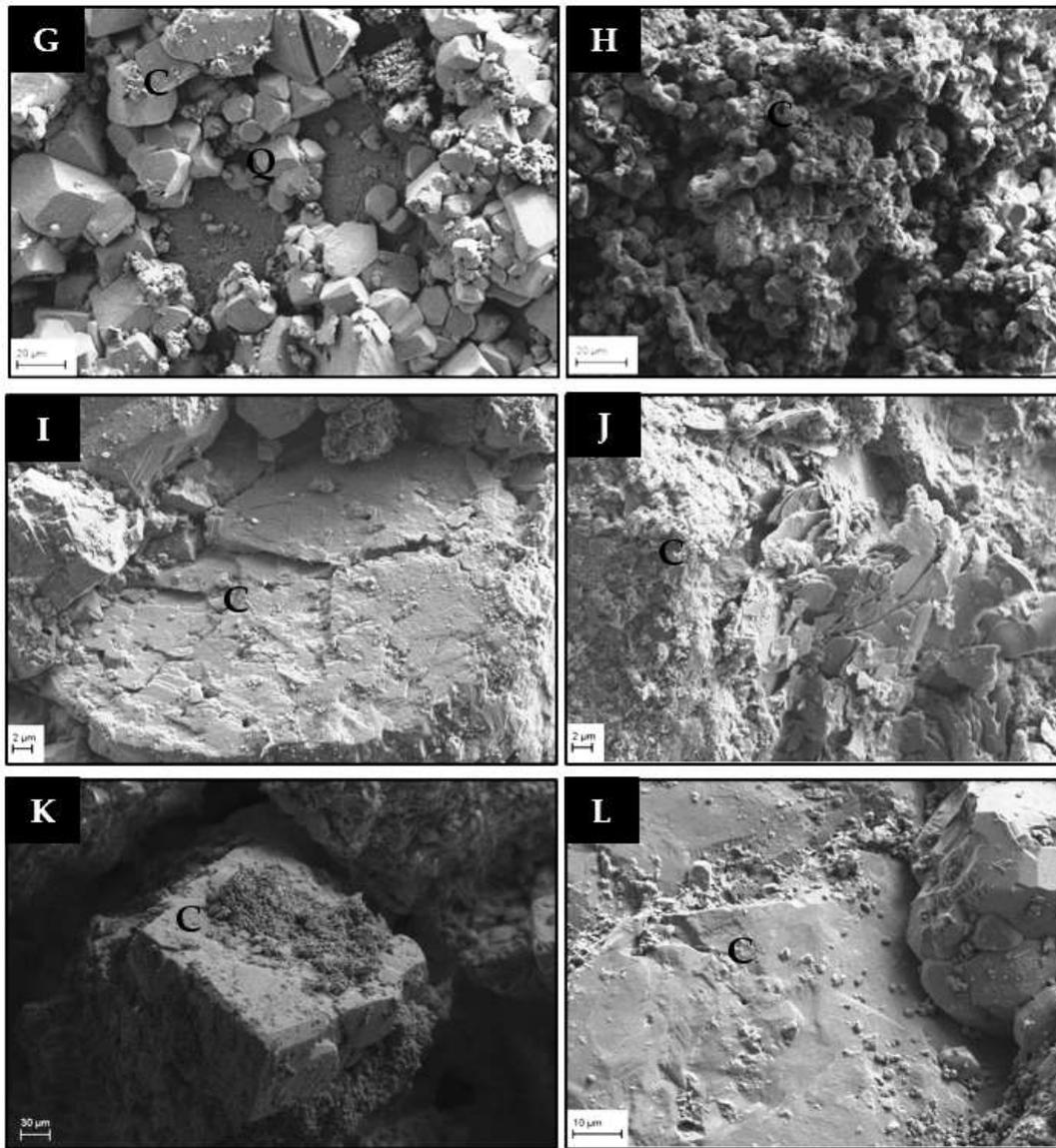


Figura 6.11. Microfotografías de barrido electrónico. G: MLC2 (X500). H: MLD4 (X100). I: MLE1. J: MLF1 (X2000). K: MLF2 (X200). L: MLG1 (X1000). Fuente: elaboración propia

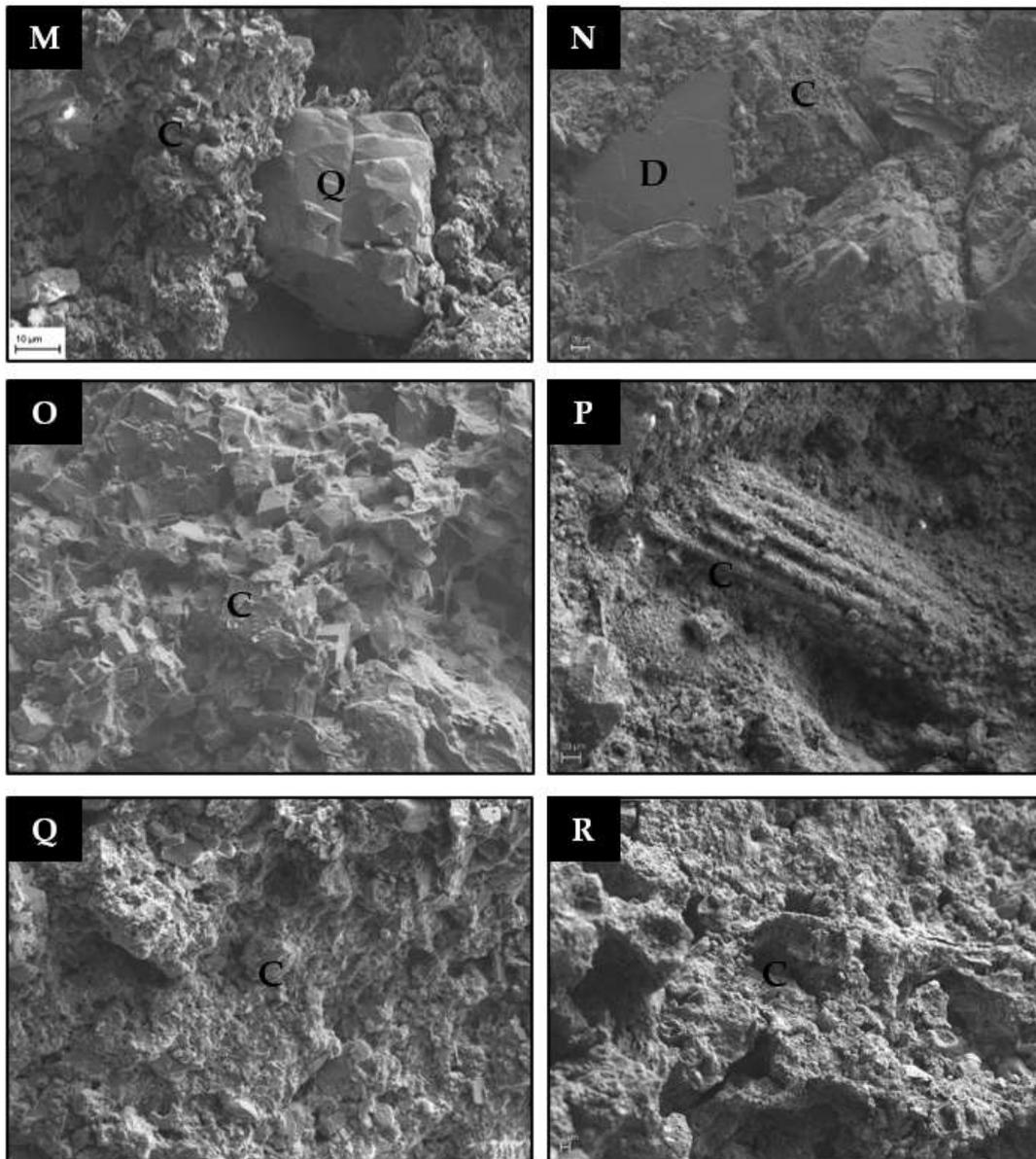


Figura 6.12. Microfotografías de barrido electrónico. M: MLG2 (X500). N: MLCAN1 (X500). O: MLCAN2. P: MLCAN3. Q: MLCAN4. R: MLCAN5. Fuente: elaboración propia

**VII. RESULTADOS Y
DISCUSIÓN DEL ESTUDIO
DE CARACTERIZACIÓN
PETROFÍSICA**

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DEL ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN PETROFÍSICA

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos en el estudio realizado en laboratorio para determinar la caracterización de la piedra Tabaire. Los ensayos realizados consistieron en la determinación de: la densidad aparente (apartado 7.1), la porosidad abierta al vacío y la porosidad total (apartado 7.2), absorción de agua por capilaridad y porosidad capilar (apartado 7.3), las técnicas no destructivas aplicadas, de velocidad de ultrasonidos e índice de rebote (apartado 7.4), la resistencia a compresión según los distintos grados de saturación (apartado 7.5) y la durabilidad de la piedra por cristalización de sales (apartado 7.6). Por último, se estudian las relaciones existentes entre las distintas variables estudiadas (apartado 7.7).

8.1. DENSIDAD APARENTE

En la Tabla 7.1 se exponen las medias aritméticas de las densidades aparentes (D_a) obtenidas para cada uno de los litotipos estudiados, así como la desviación típica de las mismas. Los resultados de dispersión se presentan en el diagrama de cajas y bigotes (Figura 7.1).

Litotipo	MLCAN1	MLCAN2	MLCAN3	MLCAN4	MLCAN5
D_a (g/cm ³) $\bar{X} \pm \sigma$	1,88 ± 0,03	1,79 ± 0,04	2,07 ± 0,09	1,68 ± 0,02	1,79 ± 0,07

Tabla 7.1. Valores medios de densidad aparente. Fuente: elaboración propia

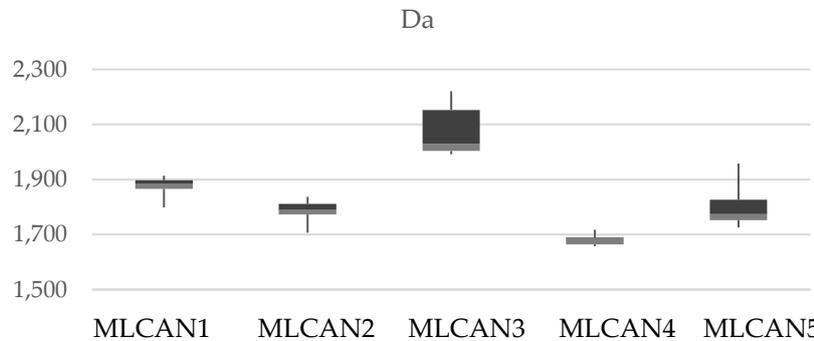


Figura 7.1. Diagrama de cajas y bigotes de densidad aparente. Fuente: elaboración propia

El rango de valores de densidad aparente oscila entre 1,68 y 2,07 g/cm^3 , siendo MLCAN3 el que mayor valor ofrece y a su vez mayor dispersión y MLCAN4 el que presenta menor valor de densidad y dispersión en los resultados.

8.2. DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD ABIERTA AL VACÍO Y LA POROSIDAD TOTAL

En el presente apartado se exponen los resultados obtenidos para la determinación de la porosidad abierta al vacío (P_{av}) y la porosidad total (P_T). En la Tabla 8.2 se presentan las medias aritméticas obtenidas de ambas variables, así como la desviación estándar de las mismas.

A continuación, en la Figuras 7.2 y 7.3 se representan visualmente los valores de dispersión para cada uno de los litotipos.

Litotipo	MLCAN1	MLCAN2	MLCAN3	MLCAN4	MLCAN5
P_{av} (%) $\bar{X} \pm \sigma$	31,60 \pm 0,64	33,08 \pm 0,62	22,85 \pm 3,13	36,19 \pm 4,27	30,85 \pm 2,53
P_T (%) $\bar{X} \pm \sigma$	32,66 \pm 0,96	35,95 \pm 1,35	25,65 \pm 3,24	39,67 \pm 0,85	35,68 \pm 2,49

Tabla 7.2. Valores medios de porosidad abierta al vacío y porosidad total. Fuente: elaboración propia

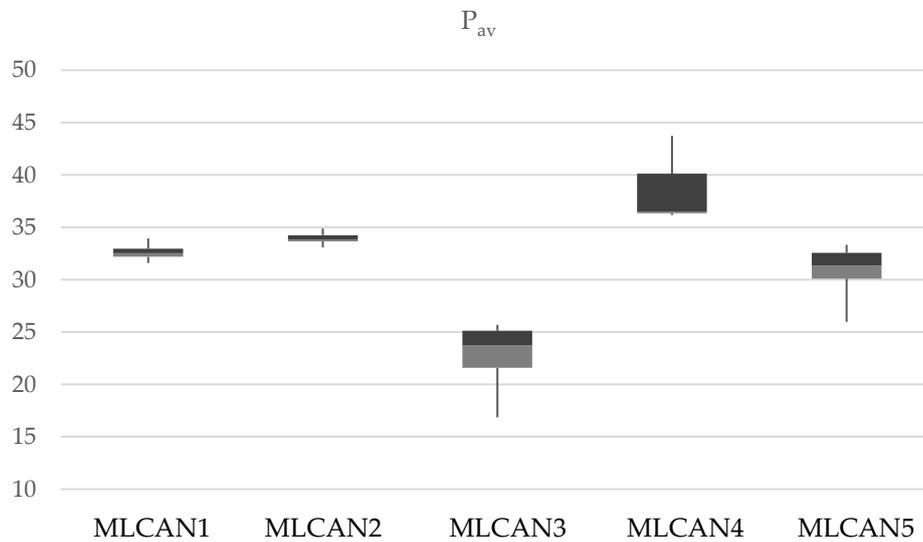


Figura 7.2. Diagrama de cajas y bigotes de porosidad abierta. Fuente: elaboración propia

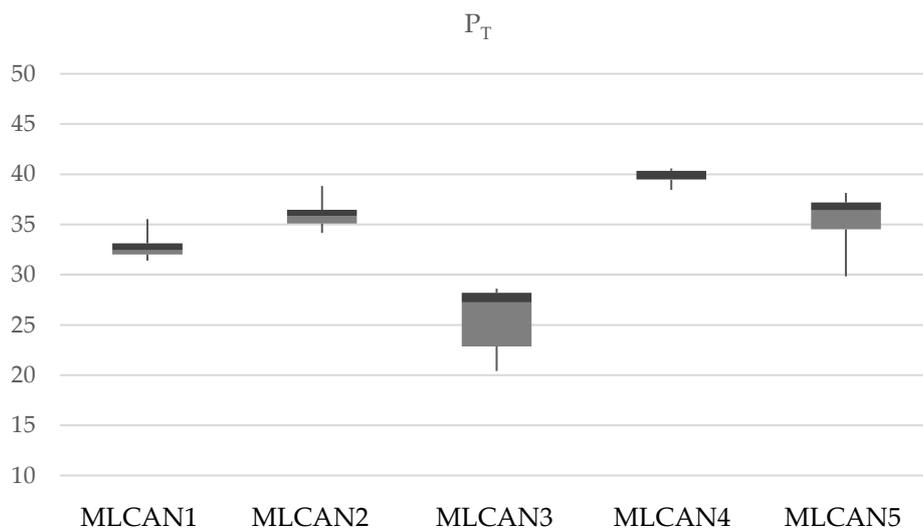


Figura 7.3. Diagrama de cajas y bigotes de porosidad total. Fuente: elaboración propia

El rango de valores medios de porosidad abierta oscila entre 22,85% (MLCAN3) y 36,19% (MLCAN4), y para la porosidad total entre 25,65% (MLCAN3) y 39,67% (MLCAN4). Los resultados demuestran la alta porosidad del Tabaire y la predominancia de la porosidad abierta.

8.3. DETERMINACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE AGUA POR CAPILARIDAD Y LA POROSIDAD CAPILAR

En este apartado se exponen los resultados obtenidos para la determinación de la absorción de agua por capilaridad (C) y la porosidad capilar (P_{cap}). En la Tabla 7.3 se presentan los valores medios obtenidos para ambas variables y para cada uno de los litotipos estudiados, así como la desviación estándar de las mismas. A continuación, se expone la representación gráfica de los valores de dispersión (Figuras 7.4 y 7.6). En la Figura 7.5 se muestra un gráfico comparativo de capilaridad obtenido para todos los litotipos estudiados.

Litotipo	MLCAN1	MLCAN2	MLCAN3	MLCAN4	MLCAN5
C ($g/m^2s^{0.5}$) $\bar{X} \pm \sigma$	142,35 \pm 7,17	164,00 \pm 17,82	129,38 \pm 58,86	131,33	124,62 \pm 12,44
P_{cap} (%) $\bar{X} \pm \sigma$	25,80 \pm 1,16	28,48 \pm 0,44	19,67 \pm 3,70	23,93	23,68 \pm 2,94

Tabla 7.3. Valores medios de capilaridad y porosidad capilar. Fuente: elaboración propia

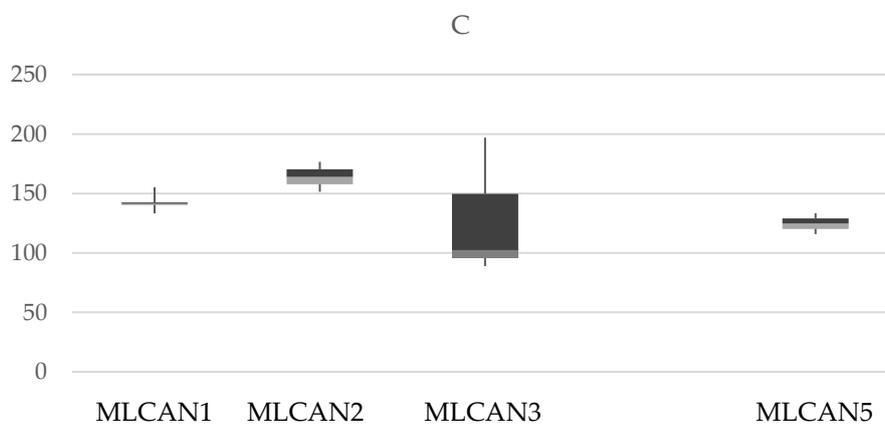


Figura 7.4. Diagrama de cajas y bigotes de absorción capilar. Fuente: elaboración propia

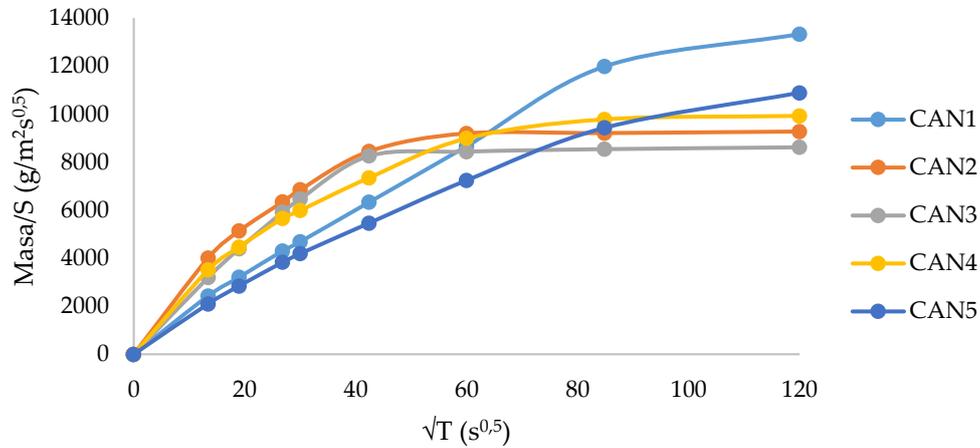


Figura 7.5. Gráfico comparativo de capilaridad. Fuente: elaboración propia

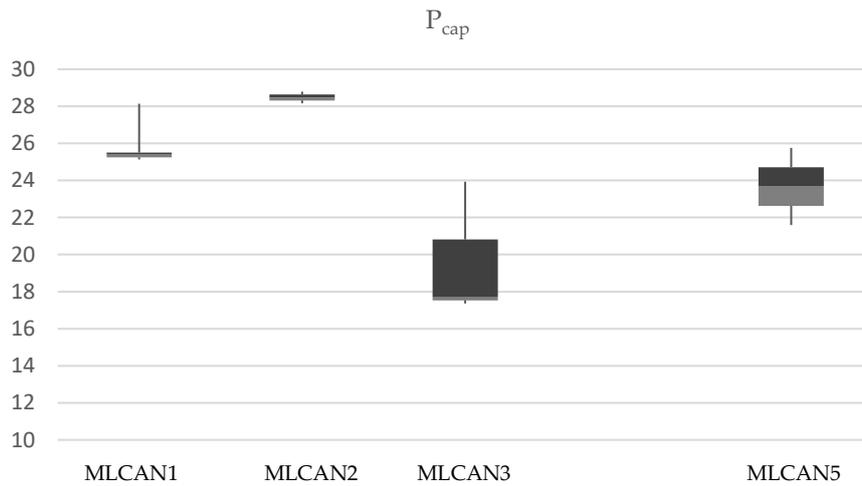


Figura 7.6. Diagrama de cajas y bigotes de porosidad capilar. Fuente: elaboración propia

El rango de valores medios de capilaridad oscila entre 124,62 g/m²s^{0,5} (MLCAN5) y 164,00 g/m²s^{0,5} (MLCAN2), y para la porosidad capilar entre 19,67% (MLCAN3) y 28,48% (MLCAN2). Los resultados de los ensayos han mostrado la alta absorción capilar y la predominancia de la porosidad abierta frente a la capilar.

La capilaridad depende de la porosidad abierta y del tamaño del poro. El tamaño de poro es similar en todos los litotipos, mientras que en MLCAN3 el tamaño del poro es inferior por lo que el movimiento de agua capilar es más lento. Además, se trata del litotipo que presenta una menor porosidad.

8.4. TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS

En los siguientes apartados se presentan los resultados obtenidos para los ensayos no destructivos de ultrasonidos y esclerómetro Schmidt.

8.4.1. Velocidad de ultrasonidos

En la Tabla 7.4 se presentan los valores medios obtenidos de V_p y V_s , para cada uno de los litotipos estudiados. A continuación, se representan gráficamente los valores de dispersión (Figuras 7.7 y 7.8).

Litotipo	MLCAN1	MLCAN2	MLCAN3	MLCAN4	MLCAN5
V_p (m/s) $\bar{x} \pm \sigma$	$2769 \pm 75,84$	$2220 \pm 188,16$	$3966 \pm 460,97$	$2107 \pm 43,35$	$3022 \pm 495,90$
V_s (m/s) $\bar{x} \pm \sigma$	$1737 \pm 71,53$	$1348 \pm 128,30$	$1986 \pm 197,77$	$1195 \pm 92,97$	$1557 \pm 73,89$

Tabla 7.4. Valores medios de velocidad de ultrasonidos. Fuente: elaboración propia

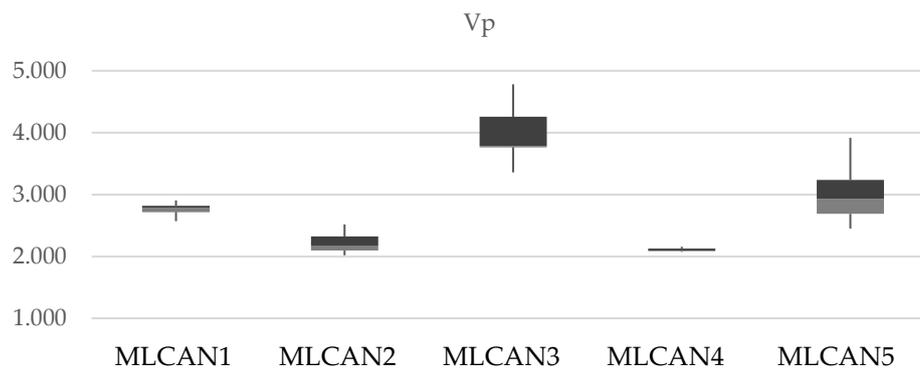


Figura 7.7. Diagrama de cajas y bigotes de velocidad primaria. Fuente: elaboración propia

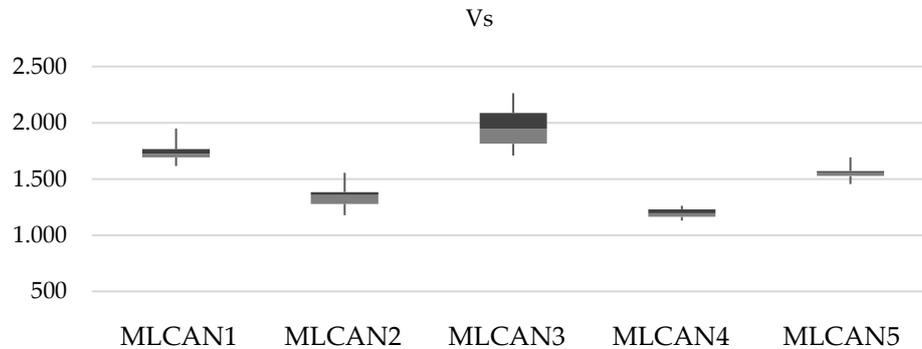


Figura 7.8. Diagrama de cajas y bigotes de velocidad secundaria. Fuente: elaboración propia

Los valores de velocidad de pulso aumentan, en general, cuando disminuye el tamaño de grano. Cuando existen anisotropías en la roca, la velocidad de propagación puede verse profundamente afectada, tanto si se trata de bandeados de tipo mineralógico como texturales. Los valores de velocidad son siempre mayores en la dirección paralela al bandeo que en la perpendicular a este.

La velocidad de propagación de ondas no es igual para los distintos minerales y, por tanto, variará en las rocas según sus porcentajes. Así, la velocidad de pulso media para el cuarzo es de 5225 m/s; en los feldespatos varía entre 5500 y 6500 m/s; y en la calcita es de 5500 m/s (Esbert, R.M., Ordaz, J. et al. 1997). El grado de alteración de los minerales y, en consecuencia, de la roca, influye asimismo en los valores de V_p , tendiendo a disminuir a medida que aumenta la alteración.

El rango de valores medios de velocidad primaria (V_p) oscila entre 2107 m/s (obtenido en MLCAN4) y 3966 m/s (en MLCAN3) y la velocidad secundaria (V_s) se encuentra entre 1195 m/s (obtenido en MLCAN4) y 1986 m/s (en MLCAN3). Los resultados de los ensayos han mostrado valores de velocidad de propagación de onda ultrasónica similares a los medidos en campo, donde el rango de valores obtenido, entre 855 m/s y 2309 m/s, presenta mayor dispersión.

MLCAN3 es el litotipo que presenta mayor velocidad de onda ultrasónica y se trata, a su vez, del litotipo con menor porosidad. Este hecho podría explicarse, ya que a menor porosidad se obtiene una mayor velocidad primaria, puesto que hay menos fracción de aire y la onda se mueve por la fracción sólida.

8.4.2. Esclerómetro Schmidt

En la Tabla 7.5 se exponen los resultados de índice de rebote (R) obtenidos para el ensayo esclerómetro Schmidt realizado sobre un bloque de piedra Tabaire con distintos estados de humedad.

Estado	R (índice de rebote)								
Seco	26	21,6	26	26,5	26	27,5	31,5	33,5	28,8
Mojado superficialmente	21,5	19	23,2	23,5	23,5	27,5	26,8	27	28,8
Saturado	12	12	12	12	14	12	18	16	14

Tabla 7.5. Resumen resultados de R en laboratorio. Fuente: elaboración propia

Los mayores resultados de R se obtienen para el bloque en estado seco, siendo el rango de valores obtenido entre 21,6 y 33,5. Cuando la piedra se encuentra mojada superficialmente el rango de valores obtenidos desciende a un rango entre 19 y 28,8. Siendo el caso más desfavorable cuando el bloque se encuentra saturado, donde se ha obtenido un rango entre 12 y 18.

En general se han obtenido resultados superiores de índice de rebote en el bloque extraído de la cantera original de extracción que en el ensayo realizado “in situ”, donde el rango de valores obtenido va desde 9,39 hasta 17,93, valores que se encontrarían dentro de los resultados obtenidos para el caso más desfavorable en laboratorio (saturado).

8.5. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN

En el presente apartado se exponen los resultados obtenidos para el ensayo de resistencia a compresión (R_c) para los distintos grados de saturación estudiados (0%, 50% y 100%). En primer lugar, se exponen las curvas obtenidas para la estimación de los tiempos de secado. Dada la baja resistencia a compresión obtenida en el litotipo CAN4, no fue posible obtener valores para los tres casos de contenido de humedad estudiados.

Los parámetros obtenidos al ajustar el modelo a las curvas de secado experimentales se muestran en la Tabla 7.6.

Probetas	D_0 (m ² /s)	m (admin.)	n (admin.)	s_0 (%)
MLCAN1	$1,3968 \cdot 10^{-7}$	0,33816	0,55617	9,8242
MLCAN2	$9,3364 \cdot 10^{-8}$	0,42890	0,57923	5,7583
MLCAN3	$2,5439 \cdot 10^{-7}$	0,23909	0,51834	15,2830
MLCAN5	$2,4252 \cdot 10^{-7}$	0,24087	0,52876	8,4787

Tabla 7.6. Parámetros obtenidos del ajuste del modelo a las curvas de secado. Fuente: elaboración propia

En las Figura 7.9 se comparan las curvas de secado experimentales con las calculadas con el modelo (línea continua). Los tiempos de secado necesarios para alcanzar grados de saturación objetivo de 25% y 50% se han interpolado en estas curvas y se muestran en la Tabla 7.7.

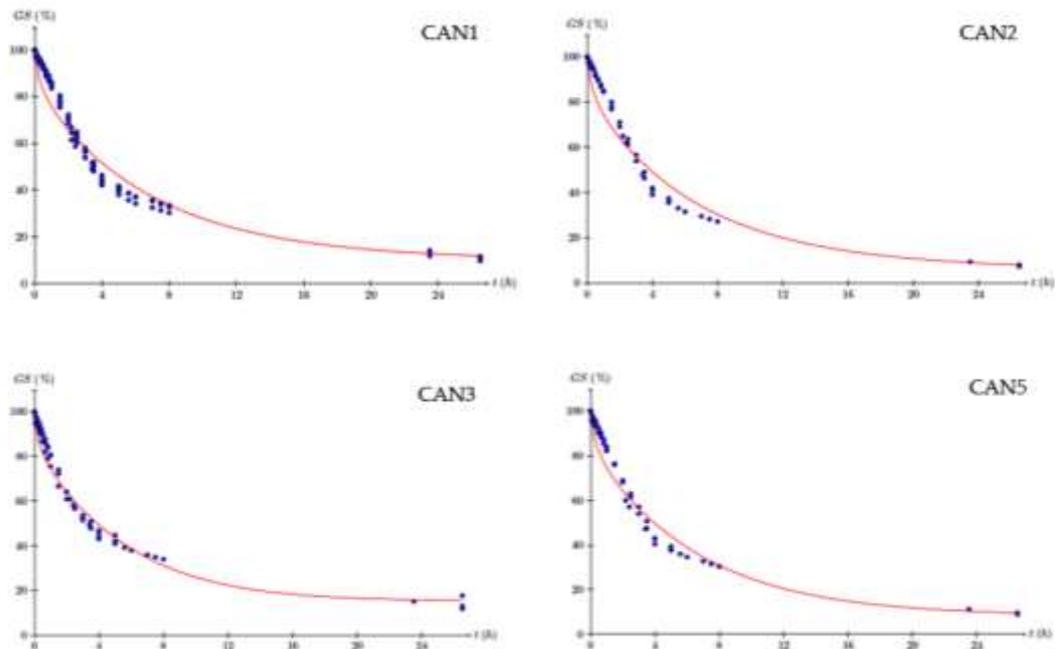


Figura 7. 9. Curvas de secado de las probetas. Fuente: elaboración propia

Probetas	Tiempo de secado (hh:mm:ss)		Tiempo de secado (hh:mm:ss)	
	GS=25%	GS=50%	GS=25%	GS=50%
MLCAN1	11:14:17	04:17:00	05:18:01	06:42:03
MLCAN2	09:45:40	03:51:52	05:32:21	06:34:15
MLCAN3	10:29:21	03:53:55	03:17:05	05:45:23
MLCAN5	09:59:02	03:57:17	05:04:42	06:53:04

Tabla 7.7. Parámetros obtenidos del ajuste del modelo a las curvas de secado. Fuente: elaboración propia

En la Tabla 7.8 se presentan los valores medios de resistencia a compresión, así como la desviación estándar, en los litotipos que ha sido posible su medición (MLCAN1, MLCAN2, MLCAN3 y MLCAN5) para cada supuesto (distintos grados de humedad). A continuación, se expone la representación gráfica de los valores obtenidos de dispersión (Figuras 7.10, 7.11 y 7.12). Posteriormente, se presenta una gráfica comparativa de los valores de resistencia a compresión (R_c), obtenidos para los distintos contenidos de humedad estudiados (Figura 7.13). Por último, en la Figura 7.14 se presentan los ajustes exponenciales de dichas variables.

Valores medios R_c (MPa) $\pm \sigma$				
Humedad (%)	MLCAN1	MLCAN2	MLCAN3	MLCAN5
0	12,21 \pm 2,63	12,95 \pm 0,34	12,89 \pm 0,28	6,79 \pm 0,53
50	4,46 \pm 0,90	3,64 \pm 0,36	7,88 \pm 4,65	2,26 \pm 0,28
100	2,57 \pm 1,07	2,25 \pm 0,98	6,19 \pm 1,31	1,78 \pm 0,7

Tabla 7.8. Valores medios de resistencia a compresión. Fuente: elaboración propia

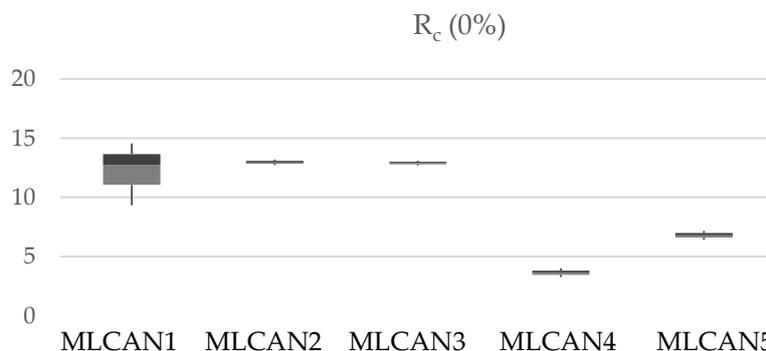


Figura 7.10. Diagrama de cajas y bigotes de resistencia a compresión obtenida al 0% de contenido de humedad. Fuente: elaboración propia

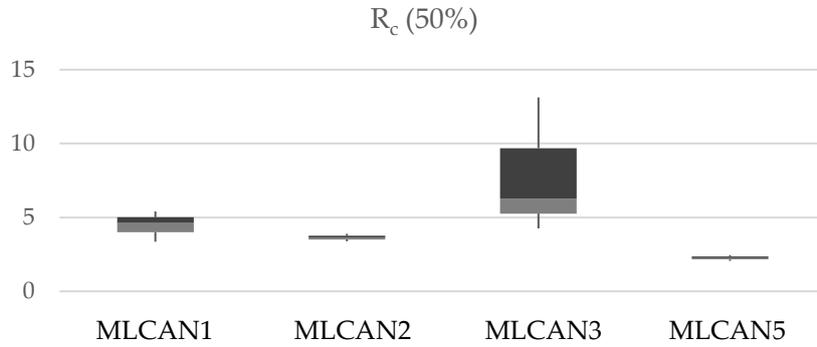


Figura 7.11. Diagrama de cajas y bigotes de resistencia a compresión obtenida al 50% de contenido de humedad. Fuente: elaboración propia

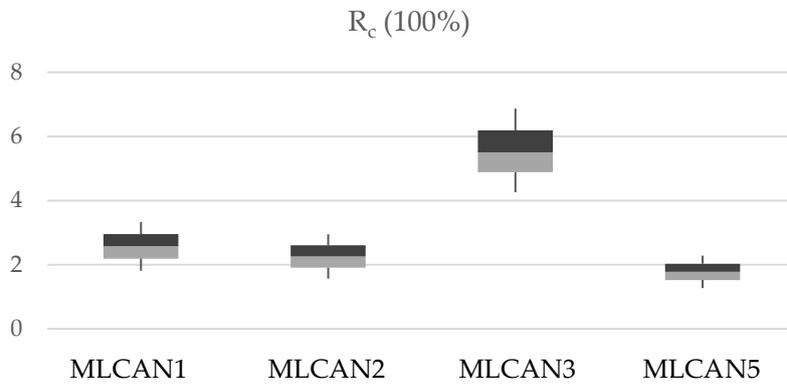


Figura 7.12. Diagrama de cajas y bigotes de resistencia a compresión obtenida al 100% de contenido de humedad. Fuente: elaboración propia

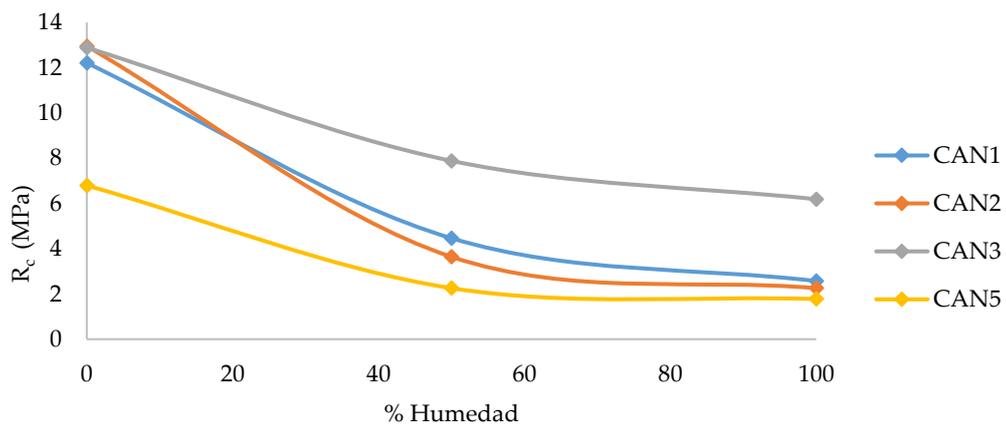


Figura 7.13. Gráfica comparativa de los valores de resistencia a compresión. Fuente: elaboración propia

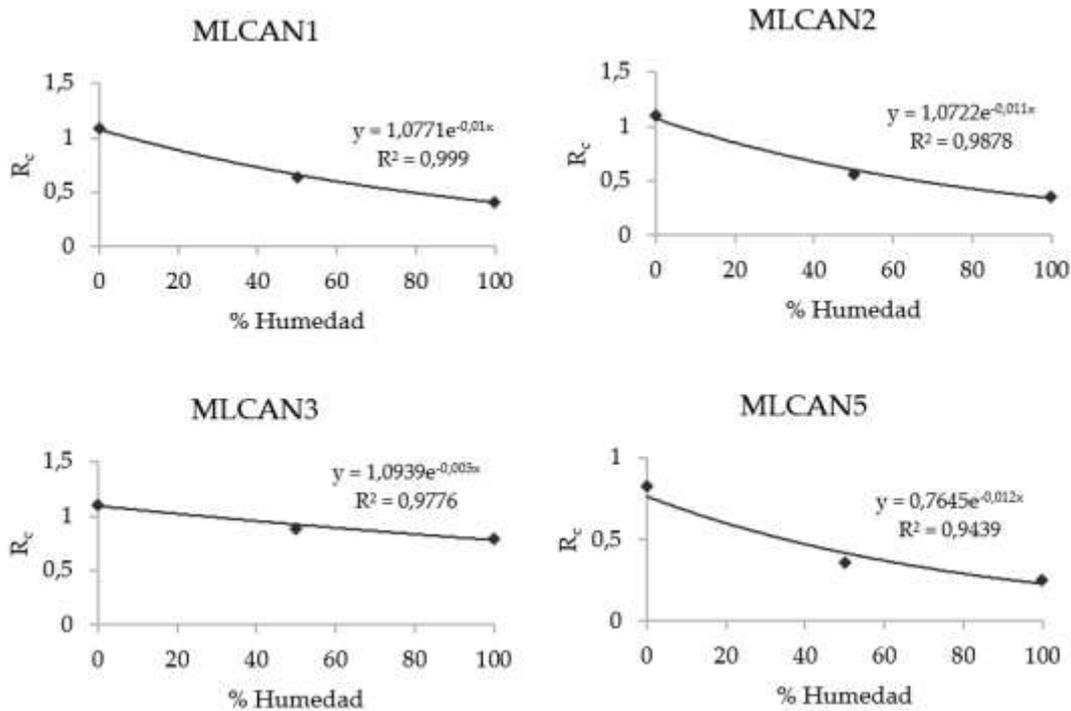


Figura 7.14. Ajuste exponencial entre las variables resistencia a compresión y contenido de humedad. Fuente: elaboración propia

Cuando se realiza el ensayo a compresión para el supuesto 0% de humedad, se obtienen los mayores resultados de resistencia a compresión en todos los casos, tratándose MLCAN2 del caso más favorable, para el que se obtienen mayores valores de resistencia, siendo el rango obtenido entre 12,71 y 13,19 MPa. Por otro lado, para MLCAN5 se han obtenido resultados de resistencia inferiores (6,42-7,17 MPa).

Para las probetas ensayadas al 50% de humedad, se aprecia un descenso de los valores de resistencia obtenidos en todos los litotipos, tratándose MLCAN3 del caso más favorable, con un rango de valores entre 4,26 y 13,13 MPa; y MLCAN5 de nuevo como el caso más desfavorable, con un rango entre 2,06 y 2,45 MPa.

Cuando se realiza el ensayo de resistencia a compresión con las probetas saturadas, se aprecia de nuevo un descenso de los valores obtenidos para todos los litotipos estudiados con respecto al 50% de humedad, aunque es menor que el obtenido entre el 0% y el 50% de humedad, donde se aprecia un descenso de los valores más acusado. De nuevo, MLCAN3 se trata del caso más favorable y

MLCAN5 el más desfavorable, con un rango de valores obtenidos entre 4,26 y 6,87 MPa y 1,27 y 2,28 MPa respectivamente.

En cuanto a la dispersión obtenida, cabe destacar que MLCAN1 es la que mayor dispersión presenta para el caso de las probetas en estado seco. A su vez, MLCAN3 presenta una mayor dispersión en las probetas ensayadas al 50% y 100% de humedad.

La tendencia muestra como en todos los supuestos, el aumento del contenido de humedad provoca un descenso en los valores de resistencia a compresión.

A la vista de los resultados obtenidos, podemos afirmar que MLCAN3 es el litotipo que mayores valores de resistencia a compresión presenta seguido de MLCAN1, MLCAN2, MLCAN5 y, por último, MLCAN4.

8.6. DETERMINACIÓN DE LA DURABILIDAD POR CRISTALIZACIÓN DE SALES

En la Tabla 7.9 se exponen los resultados de pérdida de masa (ΔM) obtenidos para el ensayo de durabilidad por cristalización de sales.

Litotipo	Testigos	Md (g)	Mf (g)	ΔM (%)	\bar{x} (%)
MLCAN 1	1,1	120,73	9,70	91,97	94,22
	1,2	119,30	6,23	94,78	
	1,3	126,38	4,21	96,67	
	1,4	119,11	8,58	92,80	
	1,5	119,21	6,07	94,91	
	1,6	125,55	7,25	94,23	
MLCAN 2	2,1	121,67	52,62	56,75	53,74
	2,2	81,43	37,79	53,59	
	2,3	80,43	39,51	50,88	
MLCAN 3	3,1	140,55	133,74	4,85	11,45
	3,2	133,05	117,77	11,48	
	3,3	128,28	101,33	21,01	
	3,4	131,95	125,68	4,75	
	3,5	141,56	139,66	1,34	
	3,6	127,82	95,50	25,29	
MLCAN 4	4,1	90,52	9,38	89,64	68,07
	4,2	105,82	55,15	47,88	
	4,3	77,32	25,75	66,70	
MLCAN 5	5,1	116,86	58,05	50,33	50,93
	5,2	113,61	62,60	44,90	
	5,3	117,14	56,91	51,42	
	5,4	114,33	44,83	60,79	
	5,5	131,77	122,09	7,35	
	5,6	110,51	10,18	90,79	

Tabla 7.9. Resumen resultados obtenidos del ensayo de cristalización de sales. Fuente: elaboración propia

El aspecto visual de las muestras durante el estudio de durabilidad por cristalización de sales se recoge en la Figura 7.15, donde se muestra el aspecto que presentan las probetas durante el proceso: antes, después de los ciclos cuarto y noveno y al finalizar el ensayo.



Figura 7.15. Estudio fotográfico del ensayo de durabilidad. Fuente: elaboración propia

El rango de valores medios de pérdida de masa oscila entre: 91,97- 96,67% (MLCAN1), 50,88-56,75% (MLCAN2), 1,34-25,29% (MLCAN3), 47,88-89,64% (MLCAN4), 7,35-90,79% (MLCAN5). Los porcentajes medios de pérdida de masa después del ciclo de cristalización de sales son elevados, siendo MLCAN1 el litotipo que mayor pérdida de masa presenta con un 94,22%, seguido de MLCAN4 con un 68,07%, MLCAN2 con un 53,74%, MLCAN5 con un 50,93% y, por último, MLCAN3 con un 11,45%.

La degradación de la roca en la zona de avance capilar es mayor que en la zona de inmersión, aunque la pérdida de material ocurra en ambas. Sin embargo, existe un mayor riesgo de sufrir procesos de hielo-deshielo en la zona de inmersión (Winkler, 1997).

MLCAN3 es el litotipo que presenta mayor resistencia a la durabilidad frente a la cristalización de sales, y se trata a su vez del litotipo que posee menor porosidad total y tamaño del poro, así como una mayor resistencia a compresión. El parámetro de resistencia resulta clave, ya que la presión de cristalización genera una tensión de tracción sobre la roca; cuanto mayor sea la resistencia de la roca, mayor soporta esta tensión, y por lo tanto es más durable (Benavente, 2004).

8.7. RELACIÓN ENTRE LAS DISTINTAS VARIABLES ESTUDIADAS

En el presente apartado se exponen los diagramas de correlación obtenidos para algunas de las variables estudiadas.

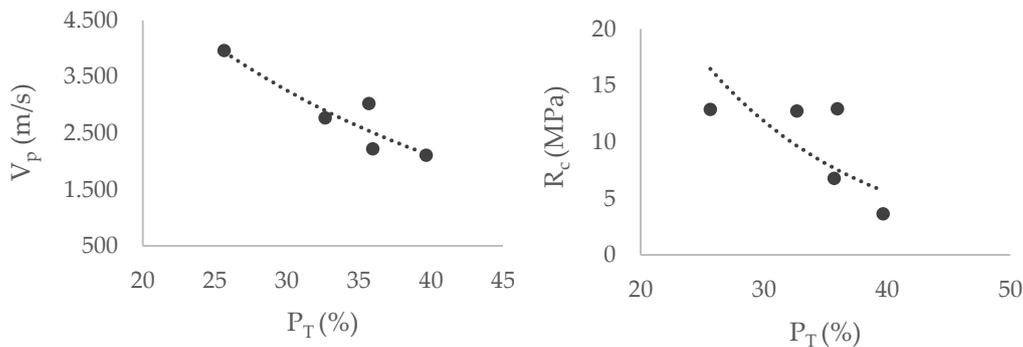


Figura 7.16. Relación entre la porosidad total y la velocidad de onda ultrasónica (izquierda). Relación entre la porosidad total y la resistencia a compresión (derecha). Fuente: elaboración propia

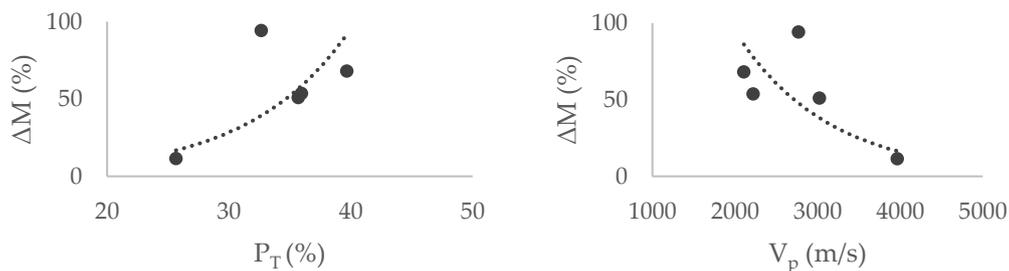


Figura 7.17. Relación entre la porosidad total y la pérdida de masa (izquierda). Relación entre la velocidad de onda ultrasónica (V_p) y la pérdida de masa (ΔM) (derecha). Fuente: elaboración propia

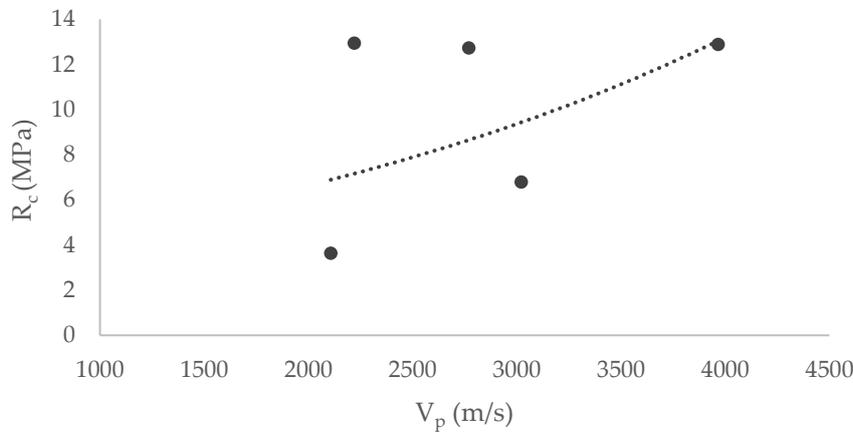


Figura 7.18. Relación entre propiedades mecánicas estáticas (V_p) y las dinámicas (R_c). Fuente: elaboración propia

A continuación, a la vista de los diagramas de correlación obtenidos, se establece la relación existente entre los distintos parámetros estudiados,

Entre la porosidad y la velocidad de onda ultrasónica, existe una clara relación inversa (Figura 7.16), ya que la señal inyectada suele sufrir una elevada atenuación en poros y fisuras en comparación con la que transmite por el medio sólido (Montoto San Miguel, 1996). La velocidad se verá más afectada cuando se mida perpendicularmente a la dirección de las fisuras que cuando se haga paralelamente a ellas; esta circunstancia permite una forma rápida y sencilla para evaluar posibles anisotropías en el seno de la roca y, a partir del cociente entre las velocidades máxima y mínima, establecer un “coeficiente de anisotropía”.

Asimismo, como se aprecia en la Figura 7.16, la porosidad total también influye sobre la resistencia, ya que al aumentar la porosidad disminuye a su vez la sección útil y aumentan los centradores de tensión. De igual forma, cuanto mayor sea el tamaño del poro, será menos resistente ya que la tensión se encuentra más concentrada en los poros (Benavente, 2004).

Entre la porosidad y la pérdida de masa existe una relación directa, al existir una relación inversa entre la porosidad y la velocidad de onda ultrasónica, de igual modo será inversa la relación existente entre esta última y la pérdida de masa (Figura 7.17).

Por último, se observa que entre las propiedades mecánicas estáticas (V_p) y dinámicas (R_c) existe una relación directa.

8.8. CARACTERÍSTICAS DE LOS LITOTIPOS DE LA CANTERA Y SU RELACIÓN CON LAS DISTINTAS CONSTRUCCIONES OBJETO DE ESTUDIO

En la Tabla 7.10 se presentan las principales características de los cinco litotipos estudiados de la cantera. Se resumen los parámetros de: porosidad (P_T); de manera cualitativa los resultados obtenidos de resistencia a compresión (R_c) (A: alta, I: intermedio, B: baja); tamaño del poro (T. Poro) (G: Grande, M: medio, P: pequeño); y contenido de arcillas y terrígenos (AB: abundantes, I: intermedios, AU: ausentes).

	MLCAN3	MLCAN5	MLCAN2	MLCAN4	MLCAN1
P_T (%)	18	35	31	31	30
R_c	A	I	A	I	B
T. Poro	M	G	M/P	P	P
Arcillas	AU	AU	AU	AU	I
Terrígenos	AU	AB	I	I	AU

Tabla 7.10. Principales características de los litotipos estudiados. Fuente: elaboración propia

A la vista de los resultados obtenidos, se aprecia que el litotipo MLCAN1 se corresponde con el caso más desfavorable, ya que presenta el mayor contenido de arcillas, una porosidad baja, y se han obtenido para este caso los valores menores de resistencia a compresión. Por el contrario, el litotipo MLCAN3 se trata del caso más favorable, presentando la porosidad más baja de los casos estudiados, con ausencia de arcillas y los valores de resistencia a compresión más elevados.

Una vez presentados los principales resultados obtenidos para cada uno de los litotipos de cantera, se procede a estudiar las posibles relaciones existentes entre estos y las diferentes construcciones objeto de estudio; asimismo, se realiza un estudio visual comparativo “in situ” (Figura 7.19).

Las muestras analizadas en la Muralla Púnica (MLA) y en el Real Arsenal de Marina (MLD) tienen mayor similitud con las de MLCAN1, ambas son compactas, presentan un tamaño de poro pequeño y ausencia de terrígenos y bioclastos.

En cuanto a las muestras correspondientes con el Castillo de la Concepción (MLB), se aprecia cierta semejanza con MLCAN3: ambas son compactas, presentan un tamaño de poro intermedio y contienen terrígenos y bioclastos.

En el caso de la Casa de la Pólvora (MLC) y el Cuartel de Antigüones (MLG), se detectan similitudes con MLCAN5: ya que son arenosas, presentan un tamaño de poro grande, y contienen terrígenos y bioclastos en abundancia.

Por último, en las muestras analizadas correspondientes al Real Hospital de Marina (MLE) y la Muralla de Carlos III (MLF), se detectan parámetros de proximidad con MLCAN4: son arenosas, presentan un tamaño de poro grande, y contienen terrígenos y bioclastos de forma moderada.



Figura 7.19. Estudio visual comparativo “in situ” entre las distintas construcciones y los litotipos de cantera. Fuente: elaboración propia

VIII. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Las conclusiones que se derivan de la presente Tesis Doctoral se presentan a continuación, incluyendo las aportaciones realizadas y las posibles futuras líneas de investigación.

En cuanto a la Arquitectura Militar de Cartagena:

Se ha detectado la presencia de la piedra Tabaire en la Arquitectura Militar de Cartagena, concretamente en nueve de las veintiocho fases y construcciones que componen su patrimonio militar.

La evidencia del empleo de este material local en la Arquitectura Militar de Cartagena queda de manifiesto desde la misma fundación de la ciudad en el s. III a.C. (Muralla Púnica), hasta las grandes obras de fortificación del s. XVIII, periodo de mayor explotación de la cantera. Posteriormente, comienza a ser sustituido por otros materiales, quedando su uso muy reducido y llegando a desaparecer de la Arquitectura Militar en la primera mitad del s. XIX (Cuartel de Guardiamarinas), prolongándose hasta principios del s. XX su uso en construcción civil.

Entre las posibles causas que llevaron a los ingenieros militares de la época a seleccionar este material para la construcción de los inmuebles objeto de estudio podrían estar: la facilidad para el labrado y la proximidad a la cantera original de extracción.

El Tabaire se emplea en distintos elementos constructivos, tales como: muros, fachadas, arcos, cimentación y elementos singulares, como es el caso del Castillo de la Concepción, donde el material se encuentra en los aljibes de la Torre.

En cuanto a la cantera original de extracción:

Los medios técnicos empleados para su extracción, transporte y puesta en obra fueron cuantiosos y de gran envergadura, empleando para ello numerosos medios de transporte y mano de obra especializada, siendo visible en la actualidad las marcas de cantero en determinadas zonas de la cantera.

La técnica del levantamiento fotogramétrico ha resultado de gran utilidad para conocer la geometría actual del terreno, facilitando la interpretación del

patrimonio y su entorno más cercano con mayor fidelidad, economizando tiempo y esfuerzo y permitiendo la posibilidad de una organización racional de los trabajos de medición y trazado.

La documentación gráfica planimétrica y volumétrica de la cantera y su entorno más cercano, obtenida mediante el levantamiento fotogramétrico, proporciona su inventariado y podría servir como apoyo a cualquier futura intervención para su conservación.

A través del estudio realizado en la cantera, se obtiene el volumen estimado de Tabaire extraído durante su periodo de explotación, desde el s. III a.C. hasta principios del s. XX.

Mediante el análisis de la documentación de obra existente del Real Arsenal de Marina, durante el periodo comprendido entre 1749 y 1779, se determina el volumen de Tabaire empleado en su construcción, así como el número de canteros empleados en su extracción y la cantidad de carros y carretas necesarios para su transporte a pie de obra.

En cuanto al estudio “in situ”:

Las principales lesiones que afectan a la piedra Tabaire son debidas principalmente a alteraciones cromáticas, depósitos, pérdida de sección, grietas, presencia de organismos vivos y modificaciones antrópicas.

Dada la heterogeneidad del material, no se han detectado patrones comunes respecto a las patologías detectadas, ya que en las diferentes construcciones se han encontrado zonas afectadas junto a otras sanas en áreas reducidas. Por lo tanto, resulta complicado asignar un proceso patológico determinado.

El método de designación empleado para la toma de muestras resulta de gran utilidad, simplificando en gran medida el trabajo de laboratorio.

La realización de los ensayos no destructivos de ultrasonidos y esclerómetro Schmidt en campo ha resultado más complicada de lo previsto. Por un lado, existen zonas de difícil acceso y en muchos casos la zona de aplicación no es adecuada, no siendo posible su medición en todas las construcciones analizadas. Sin embargo, si resulta útil para la medición de probetas en laboratorio.

Los valores de índice de rebote obtenidos confirman que se trata de una piedra que presenta baja dureza superficial. Como soporte, podría tener gran

influencia en la durabilidad de los revestimientos que se coloquen posteriormente sobre este.

Por otro lado, los valores de dureza superficial obtenidos son inferiores a los medidos en los afloramientos rocosos en estado natural. Estos últimos se encuentran superficialmente encostrados, por tanto, son más resistentes a la erosión.

En cuanto al estudio mineralógico y petrográfico:

Los difractogramas obtenidos mediante DRX, establecen que los minerales que constituyen la roca analizada son: calcita, cuarzo, illita, dolomita, anortita, caolinita y montmorillonita. Confirmados también a través de la técnica SEM.

Asimismo, a través de DRX, se detecta la presencia de sales (yeso, bloedita, epsomita, halita, anhidrita y thenardita) en las muestras tomadas en las construcciones objeto de estudio.

En cuanto al ensayo de Lámina Delgada, se han detectado fósiles comunes. Sin embargo, dado el número reducido de muestras analizadas de los litotipos de cantera y, debido a la variación detectada en la textura, se obtienen resultados poco concluyentes.

La oscilación de porosidad existente en la cantera se confirma a través de las curvas obtenidas de MIP. Por otro lado, se demuestra la existencia de poros interpartícula, presentes en la mayoría de las rocas, tanto en la cantera como en las distintas construcciones analizadas.

A la vista de los resultados obtenidos, se concluye la fuerte variabilidad litológica y geológica existente en la cantera, puesto que la extracción se realiza en distintas zonas y en diferentes periodos históricos.

En cuanto al estudio de caracterización petrofísica

En líneas generales, el Tabaire presenta porosidad alta, tamaño de poros pequeños, baja resistencia mecánica y se encuentra muy poco cementado, lo que lo hace poco resistente a la meteorización. Siendo, por tanto, común encontrar la piedra recubierta, en los casos en los que se encuentra expuesta, para protegerla de la acción atmosférica, tradicionalmente se encalaba o recubría con yeso.

Al tratarse de una roca muy porosa de elevada absorción de agua por capilaridad, se degrada en gran medida debido a los ciclos de humedad-sequedad. Este factor pudo ser determinante a la hora de que los ingenieros militares optaran por su disposición en cimentación.

Los resultados obtenidos para la determinación de la resistencia a compresión para los distintos estados de saturación de la piedra establecen que, en todos los supuestos, el aumento del contenido de humedad provoca un descenso en los valores de resistencia a compresión, debiéndose las variaciones entre los distintos litotipos analizados al resto de parámetros estudiados en cuanto a la caracterización petrofísica.

Se han detectado similitudes entre los datos petrofísicos obtenidos para las diferentes construcciones y la cantera original de extracción. Las diferencias obtenidas podrían deberse a los distintos estados de conservación de la piedra, ya que en la cantera no se encuentra alterada, mientras que en los inmuebles presenta numerosas lesiones.

Para poder establecer posibles relaciones entre los distintos litotipos analizados en la cantera original de extracción y las construcciones objeto de estudio, resulta necesario complementar los resultados obtenidos mediante el estudio mineralógico y petrográfico con el estudio visual realizado "in situ".

Como futuras líneas de investigación

Se plantea aplicar la misma metodología diseñada en este trabajo, en cuanto al estudio del impacto ambiental, caracterización y estado de conservación, para el análisis y puesta en valor de los principales materiales de construcción empleados en la Arquitectura Militar de Cartagena.

En referencia al estudio de procedencia, sería interesante continuar con el análisis de la totalidad de la cantera, mediante su estudio petrográfico, la realización de un sondeo y la obtención de su perfil, pudiendo determinar de esta forma si existe variabilidad lateral en la cantera.

Para continuar evaluando el impacto ambiental de la piedra Tabaire, sería conveniente evaluar la dimensión medioambiental en su totalidad, tratando de calificar y cuantificar el peso de sus impactos durante todo su ciclo de vida, hasta las mismas prestaciones del material.

Dado el estado de conservación en el que se encuentra el Tabaire y los procesos de deterioro que le afectan, resulta de gran importancia estudiar distintos tratamientos de consolidación, que favorezcan su futura conservación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcañiz Martínez, J.H. (2011). *Chequeo de estructuras de hormigón armado: análisis de la relación de resultados de probetas testigo y ultrasonidos* (tesis doctoral). Universidad de Alicante, Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Alicante.

Alonso, F.J. Esbert, R.M. Ordaz, J. Vázquez, P. (2006). Análisis del deterioro en los materiales pétreos de edificación. *Revista Electrónica*, 3, 23-32.

Antolinos, J.A. García, P. (2003). *Primeras actuaciones de recuperación arqueológica y ambiental en las canteras romanas de arenisca (Canteras, Cartagena, Murcia)*. En: Rábano, I., Manteca, I., García, C. (eds.), *Patrimonio geológico y minero y desarrollo regional*, Madrid: 381-8.

Antón, C. Climent, M. A. De Vera, G. Sánchez, I. Andrade, C. (2013). An improved procedure for obtaining and maintaining well characterized partial water saturation states on concrete samples to be used for mass transport tests. *Materials and Structures*, 46, 1389–1400.

Arana Castillo, R. (2007). *El Patrimonio Geológico de la Región de Murcia*. Murcia: Academia de Ciencias de la Región de Murcia.

Arana, R. Mancheño, M. A. Manteca Martínez, J. I. Rodríguez Estrella, T. Rodríguez Martínez-Conde, J. A. Serrano, F. (2003). *Las canteras de "Roca Tabaire" de Canteras (Cartagena, Murcia). Contexto geológico e importancia como patrimonio geológico y minero*. Instituto geológico y minero de España, Madrid: 75-85. ISBN: 84-7840-497-X.

Bails, B. (1796). *De la Arquitectura Civil*, Madrid: edición facsímil, Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia, 1983. Estudio crítico por Pedro Navascués Palacio. Tomo II, 194.

Belda Reyes, S. Ferrándiz Araújo, V. (2012). *El Anfiteatro romano, compendio del saber tecnológico y constructivo de una época: un ejemplo en Carthago Nova* (trabajo final de carrera). Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena.

Bell, F.G. (1993). Durability of carbonate rock as building stone with comments on its preservation. *Environmental Geology*, 21, 187-200.

Bell, F.G. (2000). *Engineering properties of soils and rocks*. 4ª Ed. Blackwell Science Oxford, 482 p.

Benavente, D. (2002). *Modelización y estimación de la durabilidad de materiales pétreos porosos frente a la cristalización de sales* (tesis Doctoral). Universidad de Alicante, Facultad de Ciencias, Alicante.

Benavente, D. (2003). *Capítulo 3 Técnicas y Métodos de Trabajo* [PDF file]. Recuperado de: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/9912/5/Benavente-GarciaDavid_4.pdf.

Benavente, D. García del Cura, M.A. Fort, R. Ordóñez, S. (2004). Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. *Engineering Geology*, 74, 113-127.

Benavente, D. (2006). *Propiedades físicas y utilización de rocas ornamentales*. En: *Utilización de rocas y minerales industriales* / ed. Mª Ángeles García del Cura y Juan Carlos Cañaveras. Alicante: Universidad de Alicante. (Seminarios de la Sociedad Española de Mineralogía). pp. 123-153.

Briguz y Bru, A. G. [1738] 1992. *Escuela de arquitectura civil, en que se contiene los ordenes de arquitectura, la distribución de los Planos de Templo y Casas, y el conocimiento de los materiales*. Valencia: Oficina de Joseph de Orga. Facs. ed. Zaragoza: Colegio Oficial de Arquitectos de Aragón.

Burke, N. (1991). Testing of concrete- freeze- thaw Resistance- Scaling of cubes in water and in 3% NaCl colution- Recommendations and Commentary- Ausschuss fur Stahlbeton (DafStb, as a supplement to DIN/ISO). *Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton*, 422, 12-15.

Calderón, M. (2015). Excavaciones de época moderna en Cartagena. *ArtyHum: revista de artes y humanidades*, 15, 41-55. ISSN 2341-4898.

Chacón, J.M. (2012). *El Cuartel de Presidarios y Esclavos de Cartagena* (tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena.

Choquette, P.W., Pray, L.C. (1970). Geology nomenclature and classification of porosity sedimentary carbonates. *AAPG Bulletin*, 54, 207-250.

Corbalán Hernández, M.J. García León, J. (2011). *Evolución topográfica del almarjal de Cartagena* (Proyecto Final de Carrera). Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena.

Dullien F.A.L. (1992). *Porous Media Fluid Transport and Pore Structure*. Academic Press, San Diego, 574 p.

Esbert, R.M.; Ordaz, J; Alonso, F.J. Montoro, M. (1997). *Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos*. Col·legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona.

Eslava Galán, J. (1984). Materiales y técnicas constructivas en la fortificación bajomedieval. *Cuadernos de Estudios Medievales y Ciencias y Técnicas Historiográficas*, 12-13: 271-278. [<http://hdl.handle.net/10481/30267>]

Farmer, I.W. (1968) *Engineering properties of rocks*. Spon, London, 180.

Fernández, A. (2004). Representación de la arquitectura ficticia de las ciudades romanas de Carthago Nova y Valentia. En Ramallo, S.F. (ed.), *La decoración arquitectónica en las ciudades romanas de Occidente*. En libro de actas del Congreso Internacional Cartagena del 8 al 10 de octubre de 2003. Murcia: 519-34.

Fitzner, B. Heinrichs, K. (2004). *Photo atlas of weathering forms on stone monuments*.

Forbes, R.J. (1966). *Studies in ancient technology*, Leiden.

Fort, R. (1996). *El agua en los materiales pétreos: comportamiento*. En: *Degradación y conservación del Patrimonio Arquitectónico* (F. Mingarro. Ed.), Ed. Complutense, Madrid, 237-248.

García de Miguel, J. M. (2008). *Tratamiento y conservación de la piedra, el ladrillo y los morteros en monumentos y construcciones*. Madrid. ISBN: 978-84-612-7642-4.

Conesa García, C., García García, E. (2003). Las áreas históricas de inundación en Cartagena: problemas de drenaje y actuaciones. *Boletín de la A.G.E.*, 35, 79-100.

Gauri, K.L., Bandyopahyay, J.K. (1999). *Carbonate stone: chemical behavior, durability and conservation*. New York, John Wiley & Sons, 284 p.

González Simancas, M. (1929). *Excavaciones en Cartagena. Memoria de los trabajos practicados en 1923 y 1927*. Junta Superior de Excavaciones y Antigüedades, núm. gral. 102, núm. 4 de 1928. Madrid, 8-11.

Goodman, R.E. (1989). *Introduction to rock mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 562 p.

Gregg, S.J., Sing, K.S.W. (1982). *Adsorption, surface area, and porosity*, 2nd ed. Academic Press, London, 303 p.

Guéguen, Y. Palciauskas, V. (1994). *Introduction to the physics of rock*. Princeton, University Press. Princeton, 294 p.

Hall, C., Hoff, W.D. (2002). *Water Transport in Brick, Stone and Concrete*, Taylor and Francis, London, 318 p.

Hammecker, C. (1995). The importance of the petrophysical properties and external factors in stone decay on monuments. *Pure and Applied Geophysics*, 145, 337-361.

Hernández, P., Antolinos, J.A. (2002). *Del patrimonio cultural a la arqueología del paisaje: el Proyecto Atabaire (Cartagena-España) como modelo de recuperación y puesta en valor de una cantera histórica*. En: Actas do Congresso internacional sobre patrimonio arqueológico e minero, Lisboa: 649-54. ISBN: 972-98469-8-7.

Hoffmann, D., Niedack-Nad, M., Niesel, K. (1996). Evaporation as a feature of characterising stone. En: 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Berlin, 453-460.

ICOMOS. Illustrated glossary on stone deterioration patterns. Francia, 2008. ISBN: 978-2-918086-00-0.

Iniesta, A. y Martínez, J.A. (2002). *Estudio y catalogación de las defensas de Cartagena y su bahía*. Murcia: Dirección General de Cultura.

Künzel, H.M. (1995). *Simultaneous Heat and Moisture transport in building components: one- an two-dimensional calculations using simple parameters*. IRB Verlag. Stuttgart. 102 p.

Lama, R.D. y Vutukuri, V.S. (1978). *Handbook on Mechanical properties of Rocks, 4 vols.; series on Rock and Soil Mechanics, vol.2 (1974/75)*, Trans-Tech Publications.

Lasheras Estrella, A. (2011). *Estudio de las lesiones que afectan al mortero de revestimiento del antiguo Hospital de Marina de Cartagena* (trabajo final de carrera). Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena.

Lasheras A., Lanzón, M (2011). *Estudio de las lesiones que afectan al mortero de revestimiento del antiguo Hospital de Marina de Cartagena (1762)*. XVIII Congreso Internacional Conservación y Restauración de Bienes Culturales. Granada, 9-11 de noviembre 2011, 652-655. ISBN 978-84-338-5339-4.

Lanzón Torres, J. M. Piñero Martínez, A. (2012). *Caracterización químico-física de la piedra Tabaire y eficacia del tratamiento de consolidación mediante hidróxido cálcico*. XI Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación. Cascais: ICES; CICOP, 401-410. ISBN: 84-695-3538-2.

Marín Baño, C. (1997-1998). Un modelo estratigráfico de la Cartagena Púnica: La muralla de Quart- Hadast. *AnMurcia* (13-14), 121.

Martín Camino, M. (2010). «Si quaeris miracula»: la Muralla Púnica de la Casa de Misericordia (Cartagena) y la metamorfosis urbana del espacio del cerro de San José en la historiografía moderna. *Revista del Museo Arqueológico Municipal de Cartagena, MASTIA*, 9, 79-109.

Martínez Andreu, M. (2004). La topografía en Carthago Nova. Estado de la cuestión. *MASTIA*, 3, 11-30.

Martínez López, J.A. (2008). *El fuerte de Navidad en el contexto del sistema defensivo del puerto de Cartagena: historia, arquitectura y rehabilitación* (tesis doctoral). Universidad de Murcia.

Martínez López, J.A. (2015). *Los sistemas defensivos del Real Arsenal de Cartagena (S. XVIII)*. Defensive Architecture of the Mediterranean. XV to XVIII centuries / Vol II. Editorial Universitat Politècnica de València. doi: 10.1007/ 978-0-387-85784-8.

Martínez López, J.A. (2016). *Cartagena Plaza Fuerte. 1503-1996*. Ministerio de Defensa – Instituto de historia y Cultura Militar- Museo Histórico Militar de Cartagena- UCAM- Aula de Arquitectura Militar. Murcia: 34-50. ISBN: 978-84-16045-78-5.

Martínez Martínez, J. (2008). *Influencia de la alteración sobre las propiedades mecánicas de calizas, dolomías y mármoles: evaluación mediante estimadores no destructivos (ultrasonidos)* (tesis doctoral). Universidad de Alicante, Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medioambiente, Alicante.

Mas García, J. (1986). *Historia de Cartagena*. Murcia: Ed. Mediterráneo.

Mercader, M.P. Marrero, M. Solís, J. Montes, M. V. Ramírez, A. (2010). Cuantificación de los recursos materiales consumidos en la ejecución de la cimentación. *Informes de la Construcción*, 62 (517), 125-132.

Montoto San Miguel, M. (2001). *Diagnosis del estado de la piedra monumental mediante técnicas no destructivas*. III Congreso Nacional de Arqueometría. Sevilla: 15-27. ISBN: 84-472-0552-5.

Montoto San Miguel, M. (1996). *Técnicas no destructivas aplicadas a la conservación del Patrimonio Histórico*. PH Cuadernos, Junta de Andalucía. Consejería de Cultura. Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico y Editorial Comares, 85-94. ISBN: 84-86944-12-0.

Mut, V. (1664). *Capítulo XXVIII de la materia de los terraplenos y muralla en Arquitectura militar*. Mallorca: 93-98.

Navarro Gómez, I. (2015). *Influencia de la expansión y transformación mineral en la alteración de granitos por la acción del fuego* (trabajo fin de grado). Universidad de Alicante, Facultad de Ciencias, Alicante.

Ontiveros Ortega, E. Sebastian Pardo, E. Valverde Espinosa, I. Gallego Roca, F.J. (2008). Estudio de los materiales de construcción de las murallas del Albayzín (Granada). *Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico I*, 66, 32-47.

Ordaz, J., Esbert, R. (1985). *Porosity and capillarity in some sandstone and dolomite monumental stone*. 5th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Lausanne, 93-102.

Ortega Madrid, J. (2016). Historia y etnografía de Canteras: La ruta de los Atabayres. *MVRGETANA*, 135, 103-129.

Parrott, L.J. (1994). Moisture conditioning and transport-properties of concrete test specimens. *Mater. Struct.*, 27 (172), 460-468.

Peñalver Martínez, M.J. (2011). *Génesis y materialización de la dársena del puerto de Cartagena a lo largo del siglo XVIII. Una propuesta metodológica para el análisis del Patrimonio construido* (tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena.

Peñalver Martínez, M.J. Maciá Sánchez, J.F. Ramírez Pacheco, G. (2015). *Puesta en obra de la fábrica de sillería de las obras portuarias del siglo XVIII: el Real Arsenal de Cartagena*. En el libro de actas del Noveno Congreso Nacional y Primer Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción., pp. 1287-1297. ISBN 9788497285506

Ramallo, S.F. Arana, R. (1987). *Canteras romanas de Carthago Nova y alrededores* (Hispania Citerior), Murcia.

Ramallo Asensio S.F., Ros Sala M. (2017). Planificación y Transformaciones urbanas de época Augustea en Carthago Nova. *Gerión. Revista de Historia Antigua*, 35, 667.

Rodríguez Estrella, T. (1979). *Contribución de la Hidrogeología al conocimiento tectónico en el sureste español*. Pamplona: II Simp. Nac. de Hidrología.

Rodríguez Estrella, T. (2006). *Geología de la Región de Murcia*. En C. Conesa García, El medio físico de la Región de Murcia (pp. 11-45). Murcia: Universidad de Murcia, servicio de publicaciones.

Rodríguez Nuere, B. (2014). Necesidad y significación del Plan Nacional de Arquitectura Defensiva. *Arquitectura Defensiva. Patrimonio Cultural de España*, pp. 19-27.

Rojas, C. (1598). *Capítulo VII que enseña a fabricar con tierra y fagina en Teoría y práctica de fortificación*. Madrid. pp. 49-52.

Rouquerol, J., Avnir, D., Fairbridge, C.W., Everett, D.H., Haynes, J.H., Pernicone, N., Ramsay, J.D.F., Sing, K.S.W., Unger, K.K. (1994). Recommendations for the characterization of porous solids. *Pure & Applied Chemistry*, 66, 1739-1758.

Rubio Paredes, J.M. (1991). *La muralla de Carlos III en Cartagena*. Murcia: Real Academia Alfonso X El Sabio.

Scherer, G.W. (1990). The theory of drying. *Journal of the American Ceramic Society*, 73, 3-14.

Schön, J.H. (1996). *Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics*. Handbook of geophysical exploration. Section I, Seismic Exploration Vol. 18. Pergamon, New York, 583 p.

Soler Cantó J. (1999). *El Hospital Militar de Marina de Cartagena*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.

Soler Huertas, B. Antolinos Marín, J.A. (2007). La arenisca en la arquitectura romana de Carthago Nova. Aspectos jurídicos y económicos. *Verdolay*, 10, 109-146.

Soler Huertas, B. Antolinos Marín, J.A. Noguera Celdrán, J.M. Linares, A.A. (2014) *Producción, aprovisionamiento y empleo de materiales constructivos en Carthago Nova*. Arqueología de la construcción IV. Las Canteras en el mundo antiguo: sistemas de explotación y procesos constructivos. En libro de actas del congreso de Padova, 22-24 de noviembre de 2012. ISBN: 978-84-00-09832-2.

Spairani Berrio, Y. (2016). *La basílica de Santa María de Elche. Análisis histórico, arquitectónico y constructivo. Estudio diagnóstico (tesis Doctoral)*. Universidad de Alicante, Alicante.

Streckeisen, A. L. (1967). Classification and nomenclature of igneous rocks. (Final report of an inquiry). *Neues Jahrbuch fur Mineralogie, Abhandlungen*, 107, 144-240.

Valdeón, L., de Freitas M.H., King, M.S. (1996). Assessment of the quality of building stones using signal processing procedures. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 29, 299-308.

Winkler, E.M. (1997). *Stone in architecture. Properties. Durability* (3ª edición). Berlin: Springer Verlag.

Normativa ensayos

UNE EN 22-182 (1985). *Mármoles y calizas ornamentales: absorción y peso específico aparente*.

UNE-EN 1936 (1999). *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total*.

UNE EN 13755 (2002). *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica*.

UNE EN 1015-11 (2000). *Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido*.

UNE EN 12370 (1999). *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de sales*.

UNE EN 14579 (2005). *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la velocidad de propagación del sonido*.

UNE EN 1936 (2007). *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total*.

UNE EN 1925 (1999). *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido.*

UNE EN 1926 (2007). *Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la resistencia a la compresión uniaxial.*

ASTM D5873-14. *Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org.

ASTM C1202-17. *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org.

ASTM C1202-91. *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1991, www.astm.org.

ASTM C 1202-97. *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1997, www.astm.org.

RILEM TC 116-PCD. *Permeability of concrete as a criterion of its durability.*

Legislación

Ley 16/1985 del Patrimonio Histórico Español. Disposición adicional 2ª.

Decreto 24/2001, de 9 de marzo de 2001, B.O.R.M. nº 65, de 20 de marzo de 2001.

Páginas web

www.astm.org

https://www.instop.es/leica_viva/gso8plus.php

<https://www.agisoft.es/products/agisoft-photoscan/>

<https://sstti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/difraccion-de-rayos-x.html>

<https://www1.sedecatastro.gob.es/>

Fuentes documentales

Plano del Puerto de Cartagena. 02/07/1670. Anónimo. A.G.S., MPD XXVI-65 (Guerra y Marina, Leg. 2338). Fuente: Ministerio de Educación, Cultura y Deportes. Archivo General de Simancas.

Plano del Puerto y Bahía de Cartagena y su cercanía demostrando los Castillos y Baterías ejecutadas, las que no lo son y las proyectadas 13/12/1741. E. Panón. A.G.S., MPD IX-78 (Guerra Moderna, Leg. 3713). Fuente: Ministerio de Educación, Cultura y Deportes. Archivo General de Simancas.

Vista y perfiles sobre la línea N.O. Plano de una parte de la Casa del Rey (Casa de la Pólvora), y del Proyecto de un Tinglado aprobado situado al este, que debe servir para poner a Cubierto los Pertrechos de Artillería de esta Plaza de Cartagena (1752). Feringán y Cortés, Sebastián. A.G.S, MPD VI-159. Fuente: Ministerio de Educación, Cultura y Deportes. Archivo General de Simancas.

Plano de Parte del Proyecto del Arsenal de Cartagena. Feringán y Cortés, Sebastián, 1700-1762, Cartagena, 7 de septiembre de 1757. A.G.S., MPD XIII-072. Fuente: Ministerio de Educación, Cultura y Deportes. Archivo General de Simancas.

Plano del Arsenal de Cartagena con las obras realizadas en el último trimestre de 1763. Vodopich, Mateo. A.G.S., MPD X-138. Fuente: Ministerio de Educación, Cultura y Deportes. Archivo General de Simancas.

Estado de materiales empleados en la construcción del Arsenal de Cartagena de siglo XVIII. P01129. Fuente: Archivo Naval de Cartagena.

Perfil y Vista interior sobre la Línea del Plano General números 9. 10. de la Teneduría general acabada en el Arsenal de Cartagena. Feringán y Cortés, Sebastián. A.G.S., MPD XXV-21. Fuente: Ministerio de Educación, Cultura y Deportes. Archivo General de Simancas.

Perfil sobre la línea R.Q. del plano del Muelle de la Dársena y demuestra su construcción, posición y fondo (1749). Feringán y Cortés, Sebastián. A.G.S., MPD VI-86. Fuente: Ministerio de Educación, Cultura y Deportes. Archivo General de Simancas.

Plano General del Cuartel en el qual se manifiesta de Color Amarillo el proyecto de la Capilla en el Parage. A. Seidel, Fernando. 7 de octubre de 1785. A.G.M.A.B, sg.148. Fuente: Ministerio de Educación, Cultura y Deportes. Archivo General de la Marina Álvaro de Bazán.

