

## ↻ Proyectos

# Estudio de los materiales de construcción de las murallas del Albayzín (Granada)

**Esther Ontiveros Ortega**, Centro de Intervención, IAPH. **Eduardo Sebastián Pardo**, Dpto. Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada. **Ignacio Valverde Espinosa** y **F. Javier Gallego Roca**, Dpto. de Construcciones Arquitectónicas, Universidad de Granada

### Resumen

El trabajo recoge el estudio, desde el punto de vista constructivo, de los distintos recintos amurallados de la ciudad de Granada, conocidos históricamente como alcazabas y arrabales. Las murallas, de origen árabe y construidas en tapial, constituyen un elemento importante del patrimonio histórico de esta ciudad, que ha perdurado a lo largo de más de diez siglos poniendo de manifiesto su resistencia y durabilidad.

Los morteros de cal son componentes fundamentales de estas fábricas, actuando como una capa exterior de protección o como un constituyente esencial del muro.

El estudio se ha realizado diferenciando entre material de interior de muro y revestimientos, llevando simultáneamente un estudio comparativo con el área fuente de aprovisionamiento del material, que aflora en la colina donde se encuentran emplazadas dichas murallas.

### Palabras clave

Albayzín de Granada | Análisis | Arquitectura islámica | Caracterización de materiales | Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico | Granada | Hormigón de cal | Metodología | Mortero árabe | Murallas | Patrimonio inmueble | Tapial calicastro | Tapial real



Cerca de Don Gonzalo / FOTO: ESTHER ONTIVEROS ORTEGA

## INTRODUCCIÓN

Se denomina tapial a una técnica o material de construcción que utiliza un molde o encofrado para levantar muros de tierra. El procedimiento consiste en colocar dos tableros que sirven de molde, verticales y paralelos, separados según el grosor que se quiere dar al muro, y sujetos por travesaños o agujas. El cajón se va rellenando con tierra y/o mortero de cal, por tongadas o capas apisonadas.

Granada presentó, prácticamente desde su origen, un amplio desarrollo de cercas y murallas construidas en tapial. El estudio de los restos emergentes resulta de interés para conocer la técnica de construcción empleada entre los siglos XI y XIV.

Los restos de murallas más antiguos documentados se atribuyen a tiempos romanos fenicios; su estudio topográfico parece indicar que el contorno amurallado de esta primitiva ciudad coincide en algunos puntos con la musulmana de los Ziries (GÓMEZ MORENO, 1907). A mediados del siglo VIII, el gobernador de Elvira, Ased Ibn Abderrahaman, reconstruye esta primitiva fortaleza siguiendo su trazado original, y el último valí de Elvira, Zawi Ben Zirien, en el año 1010, antes de su marcha a África, vuelve a rehacerlas.

Habus, primer monarca Ziri, fortificó y amplió esta primitiva fortaleza, citada en la bibliografía como "Qasaba Qadima" o alcazaba vieja. Con la llegada al poder de Habus Badis (1035) el primitivo recinto se amplió, pasando a llamarse Alcazaba Gidida o "nueva", aunque no hay constancia real de esta diferenciación, porque es posible que este término relatado en las fuentes documentales se refiera a las murallas de la alcazaba de la Alhambra. Durante su reinado, que duró hasta el año 1073, la ciudad se amplió, primeramente, a través del barrio del Zenete y, posteriormente, por la ladera sur hasta del río Darro, surgiendo así el barrio de la Cauracha y el de los Renegados. Con el último monarca ziri, Abd-Alla, (1073-1090), la ciudad siguió creciendo, traspasando el barrio de Haxariz entre San Pedro, la cuesta del Chapiz y San Juan de los Reyes. En este periodo el barrio judío, emplazado en la colina de la Alhambra, se ensancha a lo largo de la orilla izquierda del río Darro y, al pie de la Alhambra, se crea el barrio de la Almazora que, pasando el Mauror, se relaciona con la colina del Albayzín.

Con la llegada de los Almorávides (1090) la Medina cobra mayor importancia, y durante el periodo almohade, que duró hasta el año 1238, se produjo una auténtica renovación interna en la ciudad, disponiéndose para albergar la llegada de numerosa población procedente de las áreas conquistadas por los cristianos. Entre 1035 y 1238 se terminó de construir la cerca de la Medina de Poniente (SECO DE LUCENA, 1910), a la que pertenece Puerta Elvira, que ya existía en el siglo IX formando parte de la fortaleza militar existente en esta zona.

El año 1238 marcó el inicio de la dinastía Nazarí, cuando Al-Ahmar consigue consolidar el último reino islámico sobre la península. Esta situación convierte a la ciudad en refugio de los musulmanes procedentes fundamentalmente de Úbeda y Baeza, que al asentarse en la colina dan al barrio su nombre definitivo, Albayzín (pequeña Baeza). Esta zona fue creciendo paulatinamente durante toda la época nazarí. A mediados del siglo XIV existían ya cuatro arrabales, el arrabal del Albayzín, situado al norte de la Alcazaba, los arrabales de Nayd, la Antequeruela y el de los Alfareros, situados próximos a la colina de la Alhambra, y por último, el arrabal de Bib-Arrambla, contiguo a la Medina, orientado hacia el oeste.

Los hallazgos arqueológicos estudiados indican que no hay constancia de que se conserven restos fenicio-romanos (BOSQUEL MAUREL, 1988); los restos emergentes más antiguos pertenecen a la *alcazaba Cadima*, y corresponden a un torreón vinculado a la puerta Bab Qastar (Puerta de Hernan Roman), otro adosado al convento de las Tomasas, correspondiente a la primitiva puerta de Bab al-Bunut (Puerta de las Banderas), mandada demoler en 1556; un paño que arranca desde plaza de Bibalbonut y concluye en el Arco de las Pesas, y dos torreones en las calles Guinea y San Juan de los Reyes, relacionados estos últimos a la antigua Cauracha.

De la Alcazaba Gidida se conserva un lienzo de más de 400 m de longitud, con cuatro grandes torreones cilíndricos (ver imagen p. 35) y ocho rectangulares, que arranca del Arco de las Pesas (Puerta del Ensanche), continúa por la cuesta de la Alhacaba hasta la puerta que conocemos como Monaita. Desde esta puerta la muralla descendía por el lugar llamado Cruz de Quirós y Cuesta del Perro, hasta alcanzar la portería del convento de San Gregorio el Bético; actualmente se conservan restos de este lienzo en el callejón del Perro y cuesta de la Loma y un torreón próximo a la placeta de la Santísima Trinidad.

De la Cerca de la Medina no se conserva ningún lienzo; sólo restos en la cuesta de los Abarqueros, adosados a una casa en la Plaza Mariana Pineda, y otros recientemente descubiertos en el convento de la Encarnación, además de este recinto se conservan Puerta Elvira y la Puerta de Bib-Arrambla, reconstruida, esta última, por Torres Balbas en los bosques de la Alhambra.

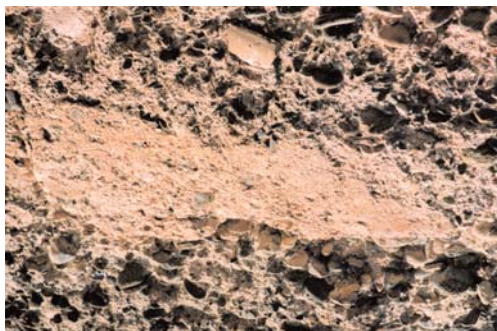
De los *arrabales* se conserva casi completa la cerca del *arrabal del Albayzín*, denominada cerca del Norte (SECO DE LUCENA, 1910), que ha llegado a nuestros días con el sobrenombre de Cerca Don Gonzalo (imagen p. 38). Hay constancia, según Gómez-Moreno (1892), de que la cerca fue construida entre 1329 y 1359 durante el reinado de Yusuf I. Actualmente se conserva un importante fragmento de lienzo que va desde el Sacromonte hasta la ermita de San Miguel, y otro desde esta misma ermita a la cuesta de San Antonio, con algunas interrupciones. El tramo que iba de la carretera de Murcia a Puerta Elvira ha desaparecido.



1 Muralla Ziri / FOTO: ESTHER ONTIVEROS ORTEGA



2 Plano de las murallas. Elaboración propia a partir de Seco de Lucena, 1910



➤ Tapial hormigón de cal, Alcazaba Cadima / FOTO: ESTHER ONTIVEROS



➤ Tapial real, variedad 1, Muralla Ziri / FOTO: ESTHER ONTIVEROS



➤ Tapial real, variedad 2, corte transversal (Arco Elvira) / FOTO: ESTHER ONTIVEROS



➤ Tapial calicestrado, corte transversal (Muralla San Antonio) / FOTO: ESTHER ONTIVEROS

Del resto de los arrabales *Alfajarín* (alfareros), Nayd y Bib-arrambla, no se conserva prácticamente nada. El arrabal de al Fajarín se construyó probablemente a finales del s. XIII o comienzos del XIV, y hay constancia de que el barrio de Al-Nayd, contiguo al de los Alfareros, estaba protegido por una cerca muy endeble que se pudo constatar porque existió hasta finales del siglo XIX.

Los cambios sociales y estratégicos que se inician en la época moderna se traducen en lo innecesario de las murallas como cerca urbana. De esta forma Granada, durante el s. XVI, se va a extender superando las murallas en la zona Sur y Oeste.

En el s. XIX se impulsa el derribo de las murallas y puertas de la antigua Medina que eran consideradas, en esa época, incompatible con el ensanchamiento y la regularización de plazas y calles. Las reformas llevadas a cabo a finales de este periodo destrozan gran parte de la ciudad vieja. Así, en 1895, al abrir la Gran Vía de Colón, se eliminó el barrio de la Mezquita Mayor.

## METODOLOGÍA DE ESTUDIO

El estudio de estos lienzos de murallas se desarrolló en dos fases: fase de campo y fase de laboratorio.

### Fase de campo

En esta fase se realizó la localización y observación organoléptica de los restos dispersos que aún se conservan (ver mapa p. 35), lo que permitió poner de manifiesto los siguientes aspectos:

#### Forma constructiva

Se diferenciaron al menos tres variedades de tapial en base al tipo de tierra, a la forma de mezclar el aglomerante (cal) con el material terroso y su disposición en los muros (VALVERDE ESPINOSA, et al., 1992, 1997; ONTIVEROS, 1995).

→ Tapial monolítico de "hormigón de cal". Se observa en los lienzos de la alcazaba Cadima (1013-1035). La fábrica se obtiene rellenando los tableros con una mezcla de grava-arena y cal, dando como resultados una fábrica grosera de aspecto muy homogéneo y de gran consistencia. Con esta misma tipología está construida la alcazaba de la Alhambra.

→ Tapial Real. Se han observado dos variedades, la más habitual se caracteriza por presentar de forma alternativa unos niveles de hormigón/mortero de cal y tierra de 1 a 2 cm de espesor y estar revestida por una capa centimétrica de mortero. Con esta última tipología esta construida la alcazaba Gidida. La otra modalidad, observada en puerta Elvira, se caracteriza por presentar dos capa de hormigón de cal de 8 a 10 cm

espesor, a techo y muro del cajón entre una capa de aproximadamente 70 cm de tierra. Aunque la Puerta pertenece a la cerca de la Medina, su construcción se asocia más al periodo Ziri (1035-1090).

→ Tapial calicestrado. Se ha observado en el arrabal del Albayzín, vinculado a la etapa nazarí (siglo XIV). El hormigón de cal/mortero aparece predominantemente en las caras exteriores del muro, acuñándose hacia el interior formando un revestimiento de 6 a 8 cm. de grosor que protege la fábrica interior de tierra. Con esta misma tipología están construidas las murallas de la Alhambra (DE LA TORRE, 1992).

En los tres casos que se han descrito la fábrica presenta un revestimiento de mortero constituido por una capa milimétrica muy rica en cal.

#### Tierra empleada

Las observaciones realizadas sobre los restos permitió correlacionar el material constitutivo de estas fábricas y su entorno. Generalmente la materia prima utilizada para la elaboración del tapial suele localizarse sobre el terreno o en puntos próximos a la construcción, de acuerdo con el principio básico de cualquier construcción de tierra: coste mínimo para su obtención.

Las murallas están levantadas sobre materiales de la denominada "Formación Alhambra", nivel geológico de aproximadamente 200 m de potencia, constituido por sedimentos detríticos gruesos ligados a abanicos aluviales del Plioceno basal (~5 Ma), son conglomerados de cantos heterométricos, aunque relativamente bien redondeados, de rocas metamórficas mayoritariamente.

#### Patologías

Las patologías que suelen afectar normalmente a este tipo de construcciones son debidas al acceso del agua al interior del muro y a problemas de tipo estructural (asentamiento diferencial). Se manifiestan como pérdida de material; fundamentalmente en la base del muro, en la zona superior y en los mechinales (orificios dejados por las agujas que sostienen los tableros del encofrado), y con la presencia de grietas y fracturas (VALVERDE ESPINOSA et al., 1992).

Los indicadores de alteración (ALCALDE et al., 1996) observados sobre el tapial han sido:

→ Modificadores superficiales con desarrollo irregular de pátinas de envejecimiento natural, amarillas y anaranjadas, formación de pátinas y costras biológicas por crecimiento de líquenes, hongos y en último término plantas superiores, ligadas a zonas de mala evacuación del agua y poco contaminadas y, finalmente, eflorescencias de sales sobre morteros de cemento, relacionado con intervenciones más o menos recientes.

→ Eliminación o pérdida de material con formación de huecos y desarrollo de estriado, muy frecuente en construcciones del siglo XIV, asociado a la humedad existente en los muros y la exposición a la acción eólica. Se observan también formación de cavernas y excavación, resul-

**Las patologías que suelen afectar normalmente a este tipo de construcciones son debidas al acceso del agua al interior del muro y a problemas de tipo estructural**



📍 Cerca de Don Gonzalo / FOTO: ESTHER ONTIVEROS

tado de la eliminación del material en mechinales y basamento. La pérdida del material en los revestimientos, que protegían la fábrica interior del muro, favorece la disgregación, descohesión intergranular y erosión observada en estas tapias.

La toma de muestras se llevó a cabo en dos etapas, sobre el monumento, y posteriormente en los afloramientos de cantera. Las muestras de murallas se agruparon por recintos (tabla 1, p. 42). Se diferenció entre muestras de interior de muro (IM) y revestimientos (REV); cuando la tipología del tapial lo requiriera. Simultáneamente se llevó a cabo un estudio sobre la cantera (formación Alhambra), que permitió diferenciar, en el afloramiento, tres niveles de materiales atendiendo a su granulometría. Se extrajeron un total de 57 muestras de las cuales 36 fueron de murallas y 21 de suelos.

Durante esta fase se realizaron medidas de la densidad in situ, tanto de los lienzos de muralla como sobre los distintos niveles de cantera diferenciados.

### Fase de laboratorio

Comprende el análisis experimental para la caracterización de los materiales encontrados en estos muros, tierra y morteros/hormigones de cal. La metodología aplicada sobre el material terroso está basada en los trabajos expuestos por Cope (1984), Doat et al (1985) y Houben & Guillaud (1989), fundamentada en las propiedades físicas del suelo, aspectos composicionales e influencia del tipo de arcilla y tierra compactada sobre su resistencia y durabilidad. Para el estudio de los morteros y hormigones se utilizaron diferentes técnicas y ensayos (ver gráficos 1 y 2, p. 40).

## RESULTADOS

### Caracterización textural y clasificación del suelo

El material previamente se disgregó con mazo de goma, con la finalidad de modificar lo menos posible la granulometría original del árido y preparar el material para la realización del resto de los ensayos. Se determinaron las siguientes propiedades.

→ Granulometría. Se obtuvieron las curvas granulométricas para material de cantera y murallas. En estas últimas (ver gráfico, p. 41) diferenciando entre muestras de interior de muro y revestimiento. En el ensayo se han despreciado las partículas de tamaño superior a 38.1 mm, estando la proporción de las partículas mayores de 20 mm por encima del 52%, dentro de esta fracción se incluyen, incluso, bloques de gran tamaño.

→ Plasticidad. Se obtiene a través de los límites de Atterberg, que representan los distintos estados de consistencia que pueden presentar los suelos; límite líquido ( $w_L$ ), límite plástico ( $w_P$ ) e índice de plasticidad ( $I_p$ ).

Esta propiedad resulta de interés porque condiciona el grado de cohesión que puede adquirir un material terroso, parámetro que está directamente relacionado con el porcentaje y naturaleza de las arcillas. Los resultados obtenidos se indican en la tabla 2 (p. 42), junto a la denominación del tipo de suelo, de acuerdo con el Sistema Unificado de clasificación de suelos SUCS (ASTM-D2487).

Las curvas granulométricas y los datos de plasticidad obtenidos en muestras de murallas para interior de muro presentan características similares a las muestras de cantera, relacionándose con los distintos niveles definidos. La geometría de las curvas indica que las murallas más antiguas están construidas mayoritariamente con el nivel 1. Hay que destacar que las muestras analizadas en Puerta Elvira no se adecúan a ningún nivel estudiado, al pertenecer a material coluvial de la vega granadina. Con el nivel 2 se ha levantado el tramo de la cerca Don Gonzalo y San Miguel y con el nivel 3 el de San Antonio (suelo rojo), salvo el tramo más inferior que corresponde al nivel 1. Estos aspectos ponen de manifiesto la similitud entre las murallas y el terreno donde están emplazadas.

Los revestimientos, texturalmente, presentan características semejantes, independientemente del tipo de recinto, en general en la mayoría de los casos la fracción dominante es la arena, aunque es frecuente encontrar áridos tamaño grava. Se observa un cribado del material por encima del tamiz N° 8 A.STM (2,5 mm) y una disminución importante del contenido en finos.

### Densidad y compactación

La densidad se ha determinado in situ por medio del trolex (método de radioisótopos), sobre el material de cantera y murallas. La densidad óptima que pueden alcanzar los niveles de cantera se ha establecido mediante el ensayo proctor normal (NLT-108/72 y ASTM D 698) y la densidad de los revestimientos por pesada hidrostática. Los datos indicados en el gráfico 3 (p. 40) muestran que los valores están próximos a 2, los más bajos corresponden al tapial calicastro y los más altos a los hormigones de cal y tapial real.

La compactación que presentan estos muros en su totalidad está por debajo de las densidades proctor óptimas obtenidas en laboratorio con material de cantera. Los revestimientos son los que presentan densidades menores, debido a su granulometría (más fina) y adición de cal, ya que ésta reduce la densidad pero a cambio le confiere al material mayor resistencia y cohesión.

### Análisis químicos y contenido en materia orgánica

Mediante espectrometría de emisión por plasma acoplado (ICP) y fluorescencia de rayos X (FRX), se han determinado los elementos químicos



Gráfico 1. Métodos y técnicas de análisis utilizadas para la caracterización del material terroso

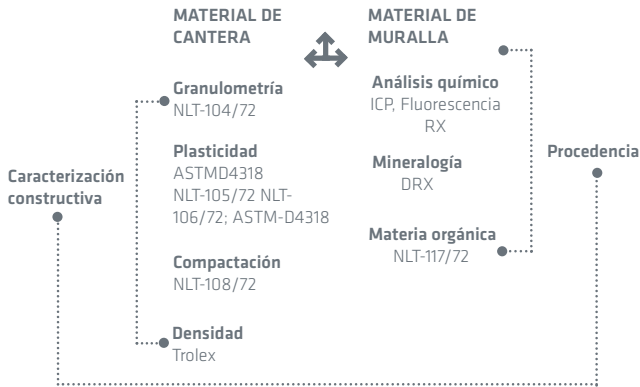


Gráfico 2. Metodología utilizada para el estudio de los morteros y hormigones de cal

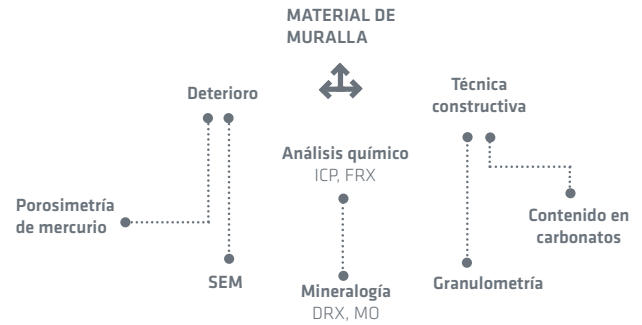


Gráfico 3. Valores de densidad obtenidos mediante el Trolex, Proctor Normal y pesada hidrostática

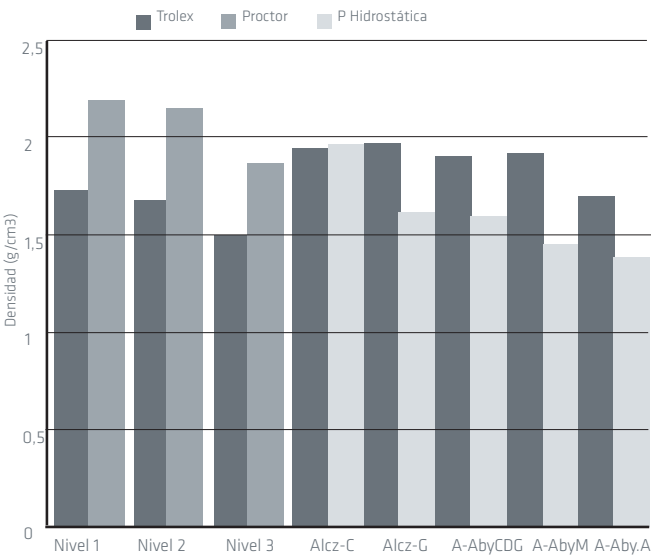


Gráfico 4. Contenido en SO<sub>3</sub>, Cl<sup>-</sup> y materia orgánica

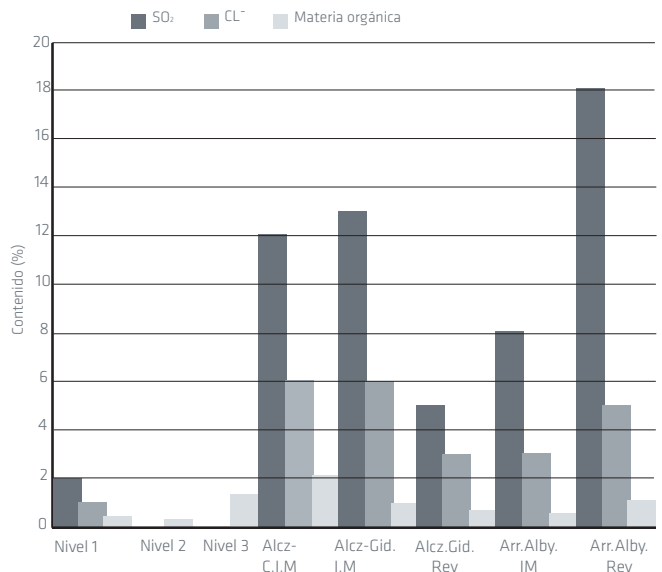


Gráfico 5. Composición mineralógica del interior del muro, fracción < 0.074 mm

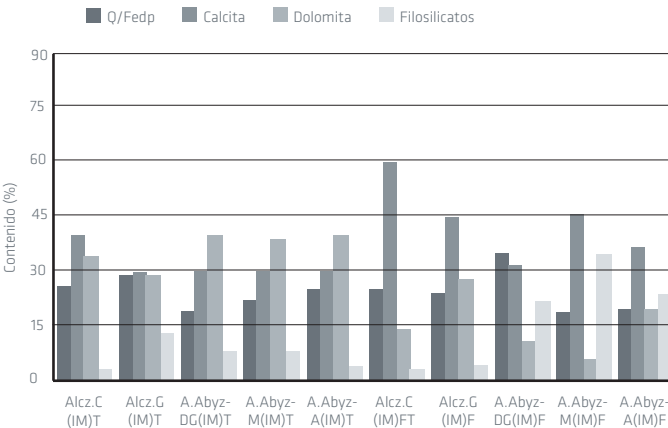
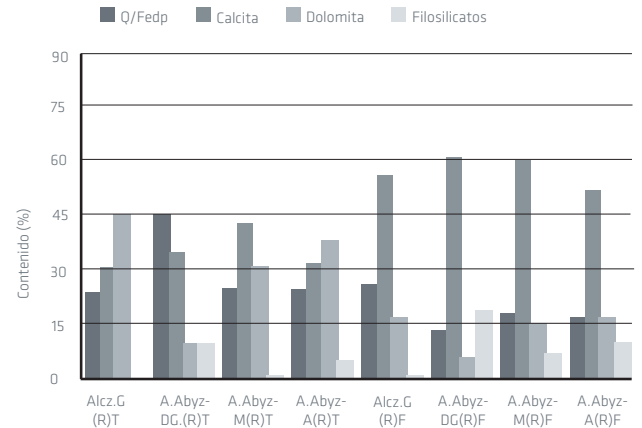


Gráfico 6. Composición mineralógica de revestimientos, fracción < 0.074 mm



cos mayoritarios (Al, Fe, Mg, Ca, K, Na, P, Ti, S, Cl, y Si) y traza (Co, Cu, Cr, Ni, Sr, V, Y, Zn, Pb, Zr, Nb y Li) de las distintas muestras analizadas. Los datos obtenidos muestran un incremento generalizado en Ca en muestras de murallas respecto a cantera y una reducción en álcalis (Na, K) por lavado, dada la alta movilidad de estos últimos elementos. Los contenidos en  $SO_2$  y  $Cl^-$  junto a Cu, Ni y Co, asociados a los componentes de alteración, también siguen esta tendencia. El incremento se explica por su entrada en los muros a través del suelo, la contaminación y materiales de restauración. Sus valores se muestran en el gráfico 4, junto con el contenido en materia orgánica. La presencia de dicho componente, no aconsejable en este tipo de construcciones, es muy reducida, <1%. Las fábricas de hormigón de cal (alcazaba Cadima) son la que presenta los valores más altos, atribuible a la adicción de fibras orgánicas durante la construcción.

### Composición mineralógica

Al tratarse de un material granulométricamente muy heterogéneo, el análisis mineralógico se ha llevado a cabo por fracciones:  $\Phi$  [ $> 6,36 / 6,36-0,08 / <0,074$  mm]. La fracción predominante encontrada (se excluye la fracción  $>38,1$  mm) en las muestras de murallas está en un rango que va de 6,35 a 0,074 mm, por lo que se ha considerado esta fracción la más adecuada para establecer correlaciones con el material de cantera. En la interpretación de los resultados se ha tenido en cuenta que parte de la cal agregada a la fábrica queda adherida a los áridos después de la disgregación manual del mortero.

La fracción menor de 0,074 mm también resulta de utilidad para este estudio por dos razones: en ella se concentra la fracción arcillosa y la mayor parte de la cal agregada a los muros.

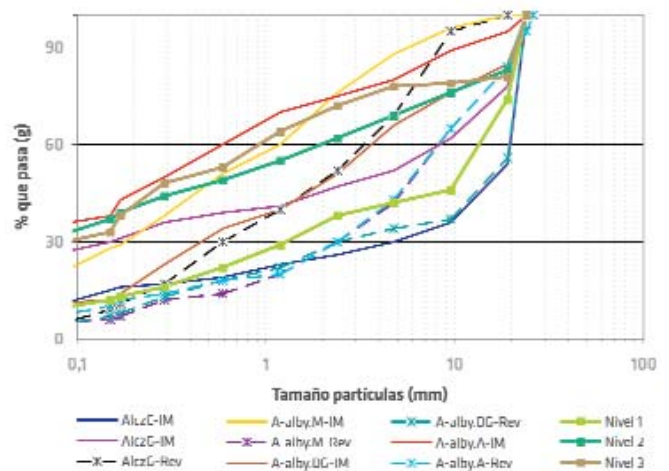
Como se puede ver en las tablas 3 y 4 (p. 42), el material analizado está compuesto por cuarzo-feldspatos, calcita, domita y filosilicatos, en proporción variable según el tipo de suelo y contenidos significativos de óxidos de hierro, concentrados en la fracción arcillosa.

La variación entre los distintos niveles de cantera analizados reside fundamentalmente en la proporción y naturaleza de filosilicatos. Las muestras del nivel 2 y 3 presentan contenidos significativos de este componente; siendo la composición de la fracción arcilla, mayoritariamente esmectitas e illitas, que suponen el 80% del total de este componente; además se han encontrado cloritas, caolinitas, paragonita e indicios de inteestratificados.

La composición de las fracciones  $>6,35$  mm es muy semejante en todas las muestras analizadas, detectándose un descenso de calcita en la fracción intermedia (6,35 y 0,074 mm). En murallas, en esta fracción, se observan incrementos de más del 10% de este componente atribuibles a la cal adherida al árido.

Los revestimientos presentan características texturales semejantes, independientemente del tipo de recinto. La fracción dominante es la arena

Curvas granulométricas medias obtenidas de los distintos lienzos de muralla y niveles de cantera estudiados



**TABLA 1. Identificación de las muestras**

MURALLAS		CANTERA	
Localización	Tipo de muestras		
Alcazaba Cadima (ALZ-C)	IM	NIVEL 1	
Alcazaba Gidida (ALZ-G)	IM, REV	NIVEL 2	
.....			
Arrabal del	Cerca	IM y REV	NIVEL 3
Albayzín	D. Gonzalo (G)		
A-ABY	Muralla san miguel. (M)	(IM y REV)	Suelos pardos
	Muralla san Antonio (A)	IM y REV	Suelos rojos
.....			

**TABLA 2. Clasificación de los suelos**

MUESTRAS	MÓDULO GRANULO MÉTRICO	LI	Lp	Ip	PLASTICIDAD	TIPO DE SUELO
Nivel 1	>4-5	-	-	x-	ML	GW-GM
Nivel 2	3-4	24	19.0	5.3	CL-ML	SC-SM
Nivel 3	2-3	x-, 21.8	x- 15.3	x-, 6.5	CL, CL-ML	SM (suelos rojos), SC-SM (suelos pardos)
ALZ-C (IM)	5.3	x-	x-	x-	ML	GP, GW, SP (Arco Elvira)
ALZ-G (IM)	5.3	23.5	17.2	6.3	ML	GC, GW-GM, SC-SM
A-Abby.CDG (IM)	3.5	24.5	19.2	5.3	CL-ML	SC-SM
A-Abby M (IM)	3.5	23	18.9	4.9	CL-ML	SC-SM
A-Abby A (IM)	2.5	x-	x	x-	CL	SM, GP-GM
ALZ-G (REV)	5.4	x	x	x	x	SW, SP
A-Abby.DG (REV)	5.2	x	x	x	x	SW,SP
A-Abby M (REV)	5.1	x	x	x	x	SP-SM, GC-GM
A-Abby A (REV)	3		x	x	x	GW,SP-SM

**TABLA 3. Composición mineralógica de las muestras por fracciones obtenidas por difracción de rayos x**

MUESTRAS	MINERALOGÍA MINERALOGÍA Φ > 6,35				MINERALOGÍA MINERALOGÍA Φ > 6,36-0.074				MINERALOGÍA MINERALOGÍA Φ < 0,074			
	Q/FELPTO	Cc	DTA	FILOS	Q/FELPTO	Cc	DTA	FILOS	Q/FELPTO	Cc	DTA	FILOS
Nivel 1	38	32	27	<5	49	12	36	4	39	27	24	5
Nivel 2	23	36	39	2	25	16	55	4	18	30	14	33
Nivel 3	34	38	25	<5	57	12	27	4	52	9	10	35
ALZ-C (IM)	29	29	40	<5	21	30	45	<5	19	54	29	<5
ALZ-G (IM)	30	35	31	<5	28	37	30	<5	23	50	22	<5
A-Abby.DG (IM)	16	35	47	<5	35	38	17	12	35	36	17	12
A-Abby M (IM)	17	37	42	<5	27	32	36	<5	18	42	7	<5
A-Abby A (IM)	13	22	62	<5	21	30	44	<5	21	35	18	<5
ALZ-G (REV)	26	31	39	<5	21	39	36	<5	22	56	18	5
A-Abby.DG (REV)	55	25	16	<5	43	31	21	<4	26	59	9	7
A-Abby M (REV)	23	33	40	<4	27	33	36	<4	22	63	11	5
A-Abby A (REV)	23	30	44	<5	35	37	23	5	20	60	16	5

Q: cuarzo; Felpaos: feldespatos; Dta: dolomita; Filos: filosilicatos

**TABLA 4. Mineralogía de la fracción arcilla en la fracción Φ < 0,073mm**

MUESTRAS	% DEL TOTAL	ESMECTITAS	ILITAS/ PARAGONITAS	CLOLITA+ CAOLINITA
Nivel 1	5%	52	42	5
Nivel 2	35%	44	42	14
Nivel 3	33%	45	42	13

**TABLA 5. Porosidades obtenidas por pesada hidrostática y porosimetría de mercurio**

MUESTRAS	POROSIDAD AGUA	POROSIDAD MERCURIO	MACROP r>2.5 μ	MICROP r>2.5 μ	_PORO DOMINANTE	ÁREA SUPERFICIAL (GR/CM2)
Alcazaba Cadima	25.6%	7%	1	6	0.01-10 μm	1.800
Alcazaba Gidida	37%	18	1	17	0.01-10 μm	1.800
Arrabal del	38	15	3	12	0.5-20 μm	2.0873
Albayzín (MSM)						
Arrabal del	74.5	23	4	19	0.5-1 μm	1.945
Albayzín (MSA)						
Arrabal del	35	13	3	10	0.2-2 μ	1.181
Albayzín (CDG)						

Los gráficos 5 y 6 (p. 40) muestran la composición mineralógica total y la fracción fina ( $< 0,074$ ) de los distintos lienzos de murallas. En muestras de interior de muro, para esta fracción, se detecta un aporte de cal que puede superar el 20% en tapial de hormigón de cal (Alcazaba Cadima). En el caso de los revestimientos el incremento de calcita es mayor en el tapial calicastro (construcciones de época nazarí).

La composición de las pátinas observadas en la globalidad de los lienzos de murallas es calcita, en una proporción que supera el 75%, pero además se ha encontrado contenido significativo de oxalatos, dolomita, cuarzo, trazas de óxidos de hierro y yeso, este último procedente de la contaminación ambiental.

### **Porosidad**

La porosidad total al agua se ha determinado por pesada hidrostática y la distribución del tamaño de poro por porosimetría de mercurio, los valores medios obtenidos se indican en la tabla 5. Los datos en los distintos recintos son muy semejantes; presentando una porosidad al agua en torno al 35%, con un rango de variación que va del 25%, en murallas de la alcazaba Cadima, hasta el 70%, para los revestimientos más degradados (San Antonio). La porosidad total al mercurio es más baja, está entorno al 15%.

El rango de distribución de tamaño de poro de estos morteros/hormigones es amplio (ver gráfico p. 44) si lo comparamos con los materiales utilizados en restauraciones. Los morteros originales presentan un contenido mayor de poros de tamaño comprendido entre  $0,03-0,8 \mu\text{m}$  y ausencia de poros de tamaño mayor a  $11 \mu\text{m}$ , por contra en los morteros de intervención (cemento Pórtland) se observa un mayor porcentaje de poros de rango comprendido entre  $2$  y  $10 \mu\text{m}$  y la presencia de poros de tamaño entorno  $20 \mu\text{m}$ .

### **Estudio petrográfico**

El estudio textural llevado a cabo sobre los morteros y hormigones de cal indica que se trata de un material granular compuesto por granos monominerales y/o fragmentos de rocas de distinta naturaleza; distribuidos de manera regular a través de la pasta carbonatada. La naturaleza de los áridos es fundamentalmente metamórfica (esquistos y mármoles dolomíticos), aunque también se observan rocas carbonatadas con textura micrítica. Sus formas varían desde cantos subangulosos a subredondeados, y su tamaño desde decimétrico hasta arcilloso, predominando el tamaño milimétrico.

En el estudio se han diferenciados dos tipos básicos de materiales: morteros/hormigones de época califal-ziri y morteros de época nazarí. Los más antiguos presentan mayor calidad, al observar un alto grado de cristalinidad del cemento carbonatado, donde son frecuentes la recris-

talización de la calcita sellando poros y fisuras (ver imagen p. 45), formando un mosaico de cristales esparíticos en crecimiento granular. Se han detectado pequeños núcleos de calcita micrítica, que originalmente correspondían a nódulos de cal mal apagada (óxido de calcio), y que posteriormente se han hidratado en el interior del mortero, sufriendo procesos de disolución y alguna que otra factura por retracción.

Los morteros de época nazarí son más porosos y los procesos de disolución del carbonato son más frecuentes, la calcita recristalizada presenta formas aciculares creciendo perpendicularmente en las paredes de los poros o fracturas. Estos poros y fisuras aparecen rellenos en algunos casos por cristales de yeso de alteración

El contacto de estos áridos con el aglomerante es regular, pero es frecuente encontrar bordes de crecimiento cristalino y procesos de reactividad (intercambio catiónico), hecho que se manifiesta por un aumento de la fracturación, porosidad en los bordes de estos cristales y/o rocas, remplazamientos de calcita por dolomita y recristalización de ceolitas u otros componentes como consecuencia de la alteración de los silicatos en ambientes alcalinos.

Las pátinas exteriores desarrolladas sobre los muros, presentan la superposición de las capas observadas. Sobre la zona exterior del mortero, muy rica en cal, se desarrollan unos cristales de calcita creciendo en drusa, que actúan como una capa de impermeabilización de la superficie. Sobre esta capa suele haber otra de exudación de calcita de aspecto microcristalino, bajo una pequeña película de un material, probablemente yeso.

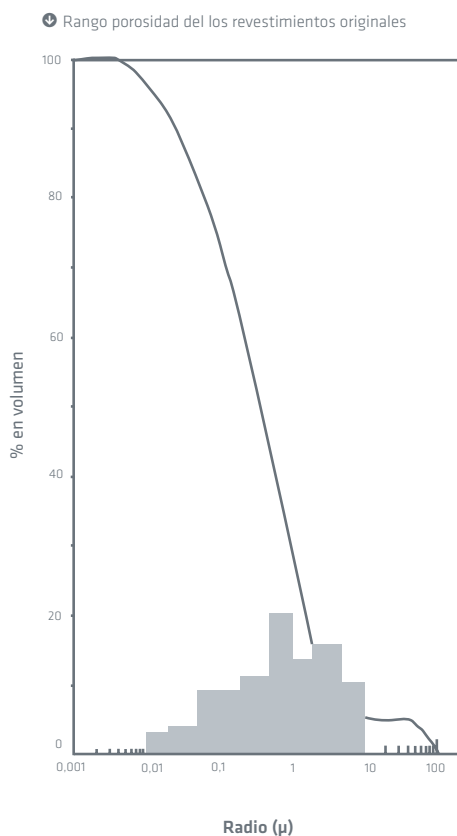
A través de esta técnica se ha podido constatar la presencia de fibras de materia orgánica bien conservadas en los muros de la alcazaba Cadima, indicándonos el aporte de este tipo de material.

### Análisis por microscopía

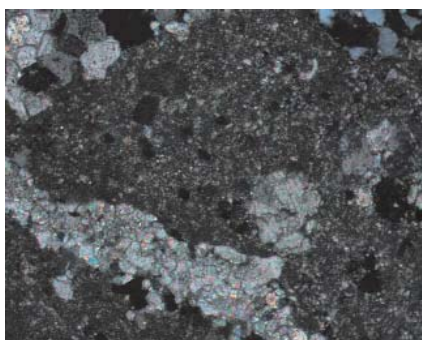
La microscopía electrónica, al ser extraordinariamente sensible, permite detectar componentes minoritarios y traza, que resultan de interés para poner de manifiesto el estado de conservación que presentan los materiales. Además, no sólo permite un estudio composicional mediante visualización y toma de fotografías, sino también un estudio morfológico de estas formas de alteración.

Las sales observadas son de yeso y cloruros y se localizan en los poros. El yeso aparece en forma masiva, acicular y tabular y los cristales de cloruros (Na y Ca) con hábito cúbico (ver imagen p. 46).

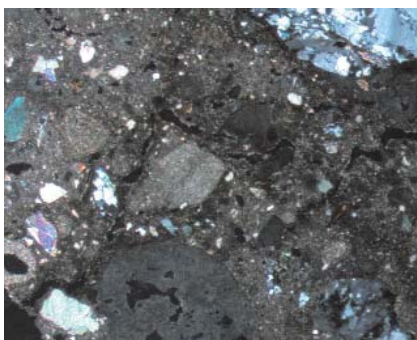
Aunque las murallas se localizan en una zona alejada del casco urbano se han detectado esferas de contaminación en los revestimientos, ricas en S y Pb, más frecuentes en las murallas de época nazarí. La



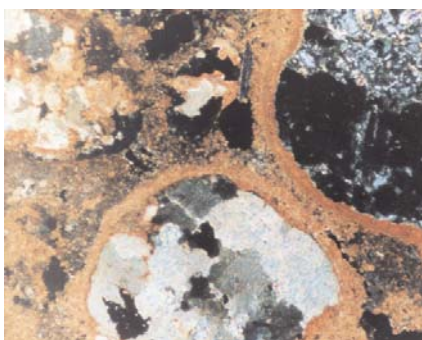
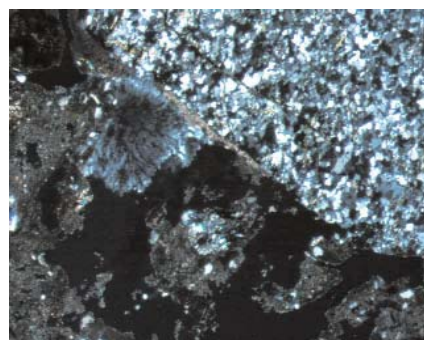
⬇ Mortero Ziri. Cristales de calcita rellenando fisuras de retracción y poros en el mortero. Escala: 1cm:90\_m / FOTO: ESTHER ONTIVEROS



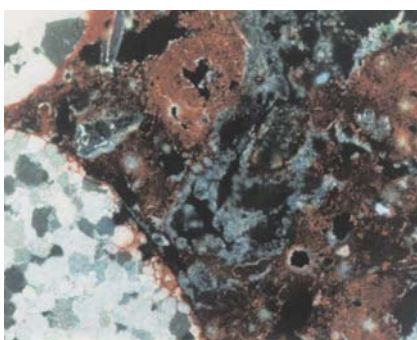
⬇ Mortero Ziri. Nódulos de óxido de calcio hidratados y transformado en portlandita parcialmente disueltos. Presencia de fisuras de retracción. Escala: 1cm:90\_m / FOTO: ESTHER ONTIVEROS



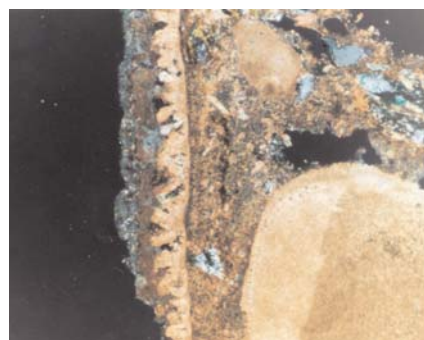
⬇ Mortero Ziri. 10X. Recristalización de cristales de yeso en los poros. Escala: 1cm : 45\_m / FOTO: ESTHER ONTIVEROS



⬇ Mortero Nazari. Recristalizaciones de calcita en contacto con los áridos. Escala: 1cm : 45im. / FOTO: ESTHER ONTIVEROS

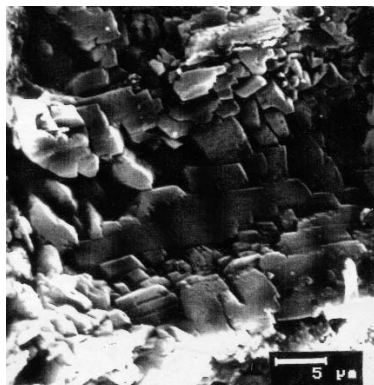


⬇ Mortero Nazari. Interacción entre áridos de naturaleza calcárea (mármoles y calizas) y la cal. Escala: 1cm : 45\_m / FOTO: ESTHER ONTIVEROS

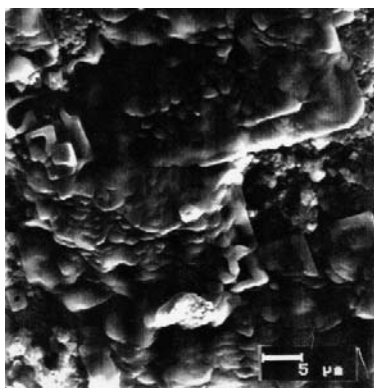


⬇ Mortero Nazari. Aspecto que presentan las pátinas desarrolladas sobre los revestimientos Escala: 1cm : 90\_m / FOTO: ESTHER ONTIVEROS

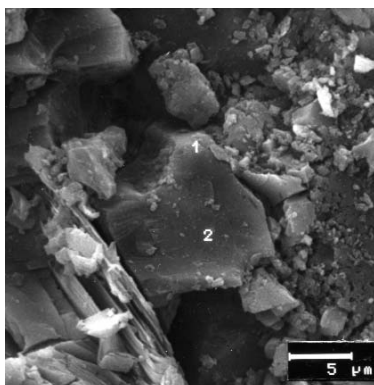
➡ Crecimiento de yeso en forma tabular / FOTO: ESTHER ONTIVEROS



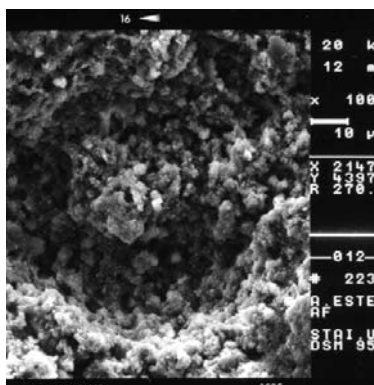
➡ Formación de halita en el seno del mortero / FOTO: ESTHER ONTIVEROS



➡ Reacción árido alcalis en un cristal de dolomita / FOTO: ESTHER ONTIVEROS



➡ Nódulos de cal mal apagada / FOTO: ESTHER ONTIVEROS



alteración biológica también se ha puesto de manifiesto con la presencia de restos de micelos de hongos más frecuentes en la muralla Ziri (menos intervenida).

La presencia de placas de calcita recién formada indica la existencia de nódulos de cal mal apagada observadas anteriormente por microscopía óptica. La cal viva en presencia de agua cambia las condiciones del medio, provocando la puesta en disolución del calcio y su posterior depósito en forma de portlandita. Esto favorece la alcalinidad del medio y por tanto su capacidad de respuesta con posibles áridos reactivos. La presencia de feldespatos y micas lo pone de manifiesto.

La reacción árido-álcali en el mortero genera geles que normalmente se desarrollan alrededor de los áridos, tapizando su superficie en función de las condiciones espaciales y la concentración catiónica. Si en la reacción domina la cal se forma un gel de cal alcalino silícico, si por el contrario dominan los álcali se forma un gel alcalino que es expansivo en presencia de agua. Los geles encontrados en estos morteros son muy ricos en Si, lo que pone de manifiesto su expansividad en presencia de agua.

## CONCLUSIONES

El estudio llevado a cabo nos indica que en la elaboración de los distintos lienzos de murallas se ha empleado el material disponible en el terreno, independientemente de su granulometría o contenido arcilloso. Las transformaciones que sufre el material son mínimas y se reduce a un cribado selectivo o eliminación de ciertas fracciones, fundamentalmente en la construcción de los revestimientos del tapial calicastroado.

La tendencia evolutiva del tipo constructivo se refleja en el aporte de cal y la disposición del material en el muro, reflejando, con el tiempo, un mayor grado de complejidad de la técnica de elaboración del tapial. Se pasa del hormigón de cal, para construcciones más antiguas, al tapial calicastroado para construcciones más recientes; pasando por la tapia real, en construcciones de época ziri. Este proceso evolutivo lleva implícito un ahorro en el aporte de cal, que en último término se reduce en las zonas externas o revestimientos.

La homogeneidad exterior se observa en la globalidad de los recintos y está relacionada con el proceso constructivo del tapial, fruto del alisado que deja el tablero como consecuencia del proceso de compactación y la fluencia de la cal hacia el exterior.

Uno de los mayores problemas que presenta este tipo de construcciones es su conservación, una vez que la fábrica interior queda expuesta

tras la pérdida de su revestimiento. El agua es la causante, no solo de la disolución del cemento carbonatado, sino también de la hidratación de los geles silícico-cálcico generados por la reacción de los áridos en ambientes alcalinos. Estos componentes son muy ávidos al agua y pueden generar presiones que favorezcan la disgregación del mortero de protección y la consiguiente destrucción de la fábrica de tapial.

Se ha observado una relación proporcional entre el aporte de cal y la calidad de los morteros. Así, los morteros que constituyen el hormigón de cal y el tapial real presentan más calidad que los revestimientos de época nazarí.

Durante el proceso de restauración de este tipo de construcciones se aconseja reponer las zonas de colapso reproduciendo las técnicas de construcción antiguas (tierra seca sometida a riego y luego apisonada), con tierra del lugar, y revestidas con mortero de cal así como tomar las medidas adecuadas para impedir el estancamiento del agua en el interior de las fábricas.

## Bibliografía

**COPE, M.** (1984). Une meuselleure connaissance du materiaux terre. En *Acta de coloques Modernité de la Constructure en Terre*, 1984, pp. 15-25

**DE LA TORRE, M. J.** (1995) *Estudio de los materiales de construcción de la Alhambra*. En Monografía Arte y Arqueología. Universidad de Granada, IAPH, 1995

**DOAT, P.; HAYS, A.; HOUBEN, H.; MATUK, S.; VITOUX, F.** (1985). Constructure en terre. En *CRATERre Syros/Alternatives* Paris, 1985

**GALLEGO ROCA, F. J.; VALVERDE ESPINOSA, I.; LÓPEZ OSORIO, J. M.; MARTÍN BARRANCO, M. J.; SANTOS FERNÁNDEZ, A.; ONTIVEROS ORTEGA, E.; FAJARDO MARTÍNEZ, R.** (1992) The City walls of Granada (Spain). Use, Conservation and Restoration. *7th Conferência Internacional sobre o estudo e conservação da Architecture de terre*. Portugal (272-277)

**GÓMEZ MOREN, O. M.** (1994) *Guía de Granada*. Granada: Ed. Universidad, Servicio de Publicaciones, 1994

**HOUBEN, M.; GUILLAND, M.** (1989) *Traité de Constructure en terre*. Vol. 1. Marselle. 1989

**ONTIVEROS, E.** (1995) *Estudio de los materiales empleados en la construcción de los tapiales de las murallas de Granada* [literatura gris]. Tesis Doctoral. Granada: Universidad de Granada

**ONTIVEROS, E.; VALVERDE, I.; SEBASTIÁN, E.** (1996) Técnicas de análisis aplicadas al estudio de los tapiales de las murallas de Granada. *3th Internacional Congreso of Restoration of Building and Architectural Heritage*. Granada, 1996

**ONTIVEROS ORTEGA, E.; SEBASTIÁN PARDO, E.; VALVERDE ESPINOSA, I.** (1999) Deterioration in IX-XIV century arab rampart (Granada, Spain) *Materials and structures*, Vol 32, 1999, pp 45-51 Rilem 159-5997

**SECO DE LUCENA PAREDES, L.** (1970) *Notas arqueológicas granadinas. Estructura del casco urbano de Granada musulmana*. Cuadernos de la Alhambra VI, 1970

**SECO DE LUCENA PAREDES, L.** (1974) *Las Cercas y Puertas árabes de Granada*. Obra Cultural de la Caja de Ahorros de Granada, 1974

**SORIANO CARRILLO, J.; RIESTO PÉREZ, I.; DE LA PEÑA QUEVEDO, C.** (1984). Influencia de la naturaleza de los áridos en el comportamiento del hormigón. En *I Congreso español de geología*. Segovia, 1984, pp. 959-969

**VALVERDE ESPINOSA, I.; LÓPEZ OSORIO, J. M.; MONTORO GARCÍA, R.; PAREJO FERNÁNDEZ, A.; LÓPEZ ROBLES, M.; RODRÍGUEZ GALLEGU, M. G.; ONTIVEROS ORTEGA, E.** (1992) *Arquitectura en tierra en el Albayzín de Granada*. En *Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación*. Canarias, 1992

**VALVERDE ESPINOSA, I.; LÓPEZ OSORIO, J. M.; SEBASTIÁN PARDO, E.; ONTIVEROS ORTEGA, E.** (1993) Study of the materials used in the earthen wals of the city of Granada (Spain). Portugal, 1993, pp. 464-468