

CARACTERIZACIÓN ANALÍTICA DE LA MURALLA DE TAPIAL ALMOHADE DE SAN JUAN DE AZNALFARACHE (SEVILLA, ESPAÑA)

F. J. Alejandro, J.J. Martín del Río

Dpto. de Construcciones Arquitectónicas II, E.U.A.T., Universidad de Sevilla, Sevilla, España.

Tlf. 954556656 / 556611. falejan@us.es; jjdelrio@us.es

Palabras clave: caracterización - tapial almohade - muralla San Juan Aznalfarache

Resumen

Con motivo de las obras correspondientes a la Línea 1 del Metro de Sevilla (España), se ha desarrollado un proyecto donde se ha estudiado una muestra correspondiente al tapial de la muralla almohade de San Juan de Aznalfarache (Sevilla) construida en el siglo XII (año 1195). Los objetivos del estudio eran los de determinar la composición química, mineralógica, la textura, la granulometría, las propiedades físicas y mecánicas para caracterizar el tapial. Los parámetros y propiedades determinadas permitirán en un futuro la comparación con tapiales coetáneos o con otros de diferentes épocas.

La metodología llevada a cabo ha consistido en la determinación química de carbonatos y sulfatos. El contenido de carbonatos mediante el calcímetro de Bernard UNE 103200:1993 permite aproximar el contenido original de cal de estos, además del contenido en sulfatos de acuerdo con la norma UNE-EN 1744-1-1999 posibilita la valoración de la presencia de yeso en dicha muestra. Además del análisis químico se realizó una distribución granulométrica del tapial y posterior análisis mineralógico mediante difracción de rayos X. La mineralogía global de la muestra se ha determinado mediante el método de polvo, seleccionando la fracción granulométrica de $\varnothing < 4\text{mm}$, que es la que corresponde a la matriz cementante de mortero para el tapial, para la identificación de los minerales presentes en la fracción de arcilla se ha separado la fracción de $\varnothing < 2\text{micras}$, y se ha utilizado la técnica del agregado orientado. La observación y el estudio textural se ha llevado a cabo con microscopio óptico. Por último se llevó a cabo la determinación de las propiedades físicas y mecánicas: densidad real, densidad aparente y porosidad accesible al agua según la norma EN-1936 1999 y las resistencias mecánicas mediante el tallado de probetas cúbicas, posterior refrentado y rotura en prensa hidráulica a compresión.

Como resultados relevantes: se trata de un tapial fabricado con cal sin la presencia de yeso como conglomerante. La presencia de cal se ha constatado con el análisis químico además del uso de la lupa binocular, observándose la abundante presencia de nódulos de cal y restos de carbón. La fracción de naturaleza silícea-silicatada del árido, está formada mayoritariamente por cuarzo, habiéndose identificado también feldespatos (feldespato potásico, la ortoclasa, y feldespatos sódico-cálcicos, plagioclasas) y micas (moscovita y flogopita) como trazas (<5% peso). El contenido de minerales de la arcilla ha sido también muy bajo (<5% peso), habiéndose detectado la presencia de illita. Se han identificado silicatos de alta temperatura (diopsido) que proceden probablemente del empleo de restos cerámicos en el tapial. La porosidad abierta del tapial ha sido elevada, y su origen probable es el elevado contenido de finos en el tapial, que poseen una gran superficie específica y durante el amasado demandan gran cantidad de agua. Cuando ésta se elimina por evaporación, se genera en la estructura del tapial una elevada porosidad abierta. Este hecho ha influido en los resultados de resistencia a compresión ya que se pueden calificar como bajos.

1.- Introducción

Será en 1193 cuando, Abú Yusuf manda construir la fortaleza amurallada de San Juan de Aznalfarache, para que sirviera *“para albergar a los combatientes por la fe y para espantar a los infieles. Ordenó que estuviera en la cima del Aljarafe para que controlará la garganta del río. (...) Lo llamó Hins al-Faray”* (1). De las fuentes se desprende que esta fortificación fue concebida con una múltiple funcionalidad:

a) Palaciega: el alcázar sirvió de residencia al califa Abu Yusuf, se usó con intención propagandística, recibiendo en el mismo a delegaciones extranjeras.

b) Defensiva: dentro del recinto amurallado se instaló la población guerrera, reforzando la finalidad defensiva de este complejo, separados de la población autóctona, afincada, ya como arrabal en el cerro de chaboya.

c) Fines estratégicos: como parte del cinturón defensivo de la capital junto con Aznalcázar, Alcalá del Río y Alcalá de Guadaira, frente a los ataques de los reinos cristianos.

d) De control: de las vías de comunicación militar y comercial así como las comunicaciones de Sevilla con el Aljarafe y sus zonas productivas, no ya sólo fluviales, sino también terrestres.

Para ello se construyó el sistema amurallado visible en la actualidad mayoritariamente, de forma rectangular con una extensión de aproximadamente 1.450 metros de perímetro y un ancho medio de 2 metros, construidos en tapial. Se mantienen algunas torres, la mayoría de las cuales son tipo contrafuerte. Torres cuadrangulares de refuerzo en las esquinas y zonas muy puntuales de quiebro y dos torres poligonales en las esquinas NE y SW.

Se destacan dos causas principales que motivarán la construcción de este recinto, en primer lugar, Isbiliya (Sevilla) en 1163, se convierte en la capital del califato de Al-Andalus y en segundo lugar el aumento de los ataques de los reinos cristianos (castellanos y portugueses). Para eso se creara un cinturón defensivo alrededor de la capital compuesto por: Hisn al-Faray (San Juan de Aznalfarache), Hisn al-Qasar (Aznalcázar), Qalat Ragwal (Alcalá del Río) y Qalat Yabir (Alcalá de Guadaira). De este modo se “cerraban” territorialmente los accesos a la capital. Hay que tener en cuenta la política almohade basada en la fortificación y defensa de los enclaves de interés como los: centros urbanos (control político y religioso), así como los de control estratégico-militar, como San Juan, de control visual de la capital y del camino de subida al Aljarafe.

2.- Metodología y resultados de la caracterización del tapial

2.1.1.- Análisis químico: Determinación de carbonatos, residuo insoluble y sulfatos

La determinación de carbonatos (expresados como CaCO_3) mediante el calcímetro de Bernard según norma UNE103200:1993, tiene validez para aproximar el contenido original de cal (Ca(OH)_2) en los tapiales confeccionados con ella, ya que ésta con el tiempo se carbonata y transforma en carbonato de calcio (CaCO_3). Se ha de tener en cuenta sin embargo, que tanto la tierra como los áridos empleados en su elaboración pueden contener de forma natural fracciones de naturaleza carbonatada (por ejemplo: el albero), por lo que no siempre todo el contenido de carbonatos es siempre atribuible a la adición de cal.

La fracción insoluble obtenida después de realizar sobre una muestra un ataque con ácido clorhídrico (HCl) 1:1 a ebullición, es indicativa del contenido de árido de naturaleza silíceo (cuarzo) y de naturaleza silicatada (feldespatos, micas, minerales de la arcilla, etc.), ya que estos minerales no se atacan ni se disuelven por la acción de este ácido.

Se ha analizado también el contenido en sulfatos (expresado como SO_3) según UNE-EN 1744-1-1999, que permite valorar la presencia de yeso en el tapial, bien porque se ha

añadido intencionadamente como conglomerante, o que esté presente como impureza de las materias primas o como producto de la alteración del mismo. También puede este parámetro ofrecer información sobre la presencia de sales conteniendo sulfatos (SO_4^{2-}).

En la tabla 1 se muestran los resultados correspondientes al análisis de la fracción granulométrica de $\varnothing < 4 \text{ mm}$ para el tapial, correspondiente a la matriz cementante de mortero del mismo, y a diferentes muestras de morteros de cal utilizadas como referencia.

Tab.1 Contenido en carbonatos, fracción insoluble y SO_3 del tapial

Muestras	Carbonatos (%) (expresados como CaCO_3)	Fracción insoluble en HCl (%) (árido silíceo y silicatado)	Contenido en SO_3 (%)
Tapial	38,6	51,9	0,23
Morteros referencia			
1:1 (cal:arena)	21	79	--
1:2 (cal:arena)	15	85	--
1:3 (cal:arena)	11	89	--

Se puede observar como en el tapial el contenido en CaCO_3 ha sido elevado 38,6%. Si se compara este resultado obtenido con el de los morteros de referencia, se podría concluir que se trata de un conglomerado muy rico en cal, pero se debe tener en cuenta que no todo el CaCO_3 analizado proviene de la cal, sino que puede proceder en gran parte del árido. Si se puede afirmar que el tapial se elaboró con cal, ya que se ha observado tanto visualmente como mediante microscopía óptica presencia de nódulos de cal.

Respecto al contenido de SO_3 , ha sido muy bajo para la muestra de tapial (0,23%), teniendo por lo tanto escasa relevancia, e indicando que no se utilizó yeso (sulfato de calcio dihidrato, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) para su elaboración. El origen este contenido SO_3 puede ser diverso: el suelo, impurezas de la cal utilizada en la confección del hormigón de cal, sulfatos presentes en los áridos utilizados para fabricar la cimentación, etc..

2.1.2.- Análisis mineralógico

El análisis mineralógico del tapial se ha realizado mediante difracción de rayos X empleando un difractómetro marca Bruker-AXS modelo D8 advance. La mineralogía global de la muestra se ha determinado mediante el método de polvo, seleccionando la fracción granulométrica de $\varnothing < 4\text{mm}$, que es la que corresponde a la matriz cementante de mortero para el tapial. Para la identificación de los minerales presentes en la fracción de arcilla se ha separado la fracción de $\varnothing < 2\text{micras}$, y se ha utilizado la técnica del agregado orientado, realizando posteriormente la solvatación con etilenglicol. Los resultados obtenidos se muestran en la (Tab. 2) y en las figuras 1 y 2.

Las fases minerales identificadas en la muestra del tapial han sido las propias que cabría esperar teniendo en cuenta su naturaleza. El cuarzo, feldespatos (albita, anortita y ortosa) y micas (moscovita y flogopita) tienen su origen en la tierra y áridos empleados para fabricar el hormigón del tapial, mientras que la calcita y dolomita pueden proceder tanto de la tierra/áridos como de la cal añadida para fabricar el hormigón. La presencia de silicatos de alta temperatura (diópsido) se explica teniendo en cuenta la presencia de fragmentos de teja y ladrillo utilizados como árido grueso en el hormigón. El contenido de minerales de la arcilla ha sido muy bajo, y dentro de esta fracción el mineral que se ha identificado es la illita.

Tab.2 Composición mineralógica del tapial de la

muralla almohade de San Juan de Aznalfarache

Muestra	Tapial
Cuarzo-SiO₂	++++
Calcita-CaCO₃	+++
Dolomita-CaMg(CO₃)₂	++
Feldespatos	
Anortita	+
Albita	+
Ortosa	+
Micas	
Moscovita	+
Flogopita	+
Goetita-FeO(OH)	+
Minerales de la arcilla	+
	illita
Silicatos cerámicos (alta temp.)	
Diopsido	+

+ + + + muy abundante; + + + abundante; + + medio; + indicios; -- no detectado

Con la semicuantificación realizada mediante DRX, se ha confirmado la mayor abundancia de cuarzo (mineral mayoritario de la fracción insoluble en ácido clorhídrico) que de fases minerales carbonatadas (calcita y dolomita), tal y como se mostró en el apartado anterior correspondiente al análisis químico.

2.1.3. - Observación mediante lupa binocular

Se ha llevado a cabo la observación y el estudio con lupa binocular (Nikon Stereoscopic SMZ-2T) a un aumento 20X de las muestras del tapial de la muralla de San Juan de Aznalfarache. A continuación se comentan las figuras más significativas:

En la figura 1 se puede apreciar claramente un nódulo de cal, muy abundantes en este hormigón. Se pueden observar las típicas fisuras de retracción plástica o hidráulicas originadas por la evaporación del agua de amasado. La presencia de estos nódulos es una clara evidencia de la adición de cal a la tierra para la fabricación del tapial.



Fig. 1: Nódulo de cal.



Fig. 2: Partícula de carbón.

En la figura 2, del mismo hormigón, se aprecia también en la zona superior derecha un grano de carbón de mayor tamaño.

La abundante presencia de restos de carbón observados tiene su posible justificación en el hecho de que el carbón suele estar presente en los morteros y tapias antiguos confeccionados con cal, ya que es una impureza resultante del proceso de calcinación de la misma en hornos alimentados con leña.

2.1.4.- Determinación de propiedades físicas: densidad real, densidad aparente y porosidad accesible al agua

Las propiedades físicas que se van determinar en el tapial son la densidad real, densidad aparente y la porosidad accesible al agua, caracterizándose todas ellas por suministrar información sobre la estructura del material. El método seguido para la determinación de estas tres propiedades se basa en saturación con agua de la muestra sometida a vacío, según EN-1936:1999.

Los resultados obtenidos para las muestras de tapial se muestran en la siguiente tabla:

Tab. 3 Densidad del tapial de la muralla almohade de San Juan de Aznalfarache

Muestra	Densidad Real (gr/cm ³)	Densidad Aparente (gr/cm ³)	Porosidad Abierta (%)
Tapial Muralla	2,65	1,66	37,22

Respecto a la densidad real, se ha de comentar que su valor es el que cabría esperar teniendo en cuenta la densidad real de los minerales mayoritarios que lo componen: cuarzo con 2,62 gr/cm³ y calcita con 2,71 gr/cm³.

Los hormigones/morteros con los que se ejecutan los muros de tapial suelen presentar unos valores de porosidad abierta elevados, superiores al 30%, por lo que se los puede clasificar como materiales muy porosos. El origen de esta alta porosidad puede justificarse probablemente por la abundante presencia de finos de Ø<0,063 mm, fracción granulométrica en donde se concentran los minerales de la arcilla y otros minerales como la cal, calcita, etc., caracterizándose todos ellos por poseer una elevada superficie específica de *adsorción* y algunos además con elevada capacidad de *absorción* de agua. Durante el amasado demandan gran cantidad de agua, que posteriormente, cuando se elimina por evaporación este agua, se genera en la estructura del tapial una elevada porosidad abierta.

El valor de 37,22% obtenido para el tapial se puede interpretar como intermedio, considerando el intervalo habitual de este tipo de materiales de construcción (30%-50%).

2.1.5.- Determinación de las resistencias mecánicas

Debido al gran tamaño de las muestras de tapial extraídas de la muralla ha sido posible realizar la determinación de las resistencias mecánicas. Para ello, como primer paso se han tallado probetas cúbicas (relación ancho-alto de 1:1) con dimensiones de arista que oscilan entre los 5cm y 10cm. Después se procedió a su refrentado con mortero de cemento (dosificación 1:1 en peso), con el objeto de eliminar las irregularidades en las caras que entran en contacto con las bases de la prensa. Una vez curado el mortero (28 días) se pasó al secado de las mismas y posteriormente a su rotura en la prensa (UNE-EN 1015-11:2000).

Tab. 4. Resistencia a compresión del tapial de la muralla de San Juan de Aznalfarache

Muestras	Resistencia a Compresión (N/mm ²)
Muestra 1	3,1
Muestra 2	2,8
Muestra 3	3,2
Media	3,1

Al poderse tallar un total de tres muestras, los resultados obtenidos corresponden a la media de tres ensayos. En la tabla 4 se exponen los mismos: A la hora de realizar una valoración del resultado de resistencia a compresión obtenido para el tapial, se han tomado como referencia los valores determinados para otros tapias correspondientes a estudios realizados sobre distintos lienzos de la muralla de Sevilla:



Fig. 3: Ensayo a compresión de probetas talladas.

Tab. 5. Resistencia a compresión de tapias de la muralla San Juan de Aznalfarache

Año	Empresa / Localización	Rc (N/mm ²)
1985	--	9,5
1993	Alfonso Jiménez / Catedral-Puerta San Cristobal	3,3-8,4
1994	Sando / Plaza Virgen de los Reyes	3,6-5,8
1995	Martín Casilla / Puerta Real	18,4-21,3

A pesar de la amplitud del intervalo de valores que se muestran en la tabla 5, se puede considerar que la resistencia a compresión para un tapial se sitúa habitualmente entre los 2,0 y 10,0 N/mm². Por tanto, la media de 3,1 N/mm² obtenidos para el tapial de la muralla de San Juan se puede considerar como baja.

2.1.6.- Granulometría

El estudio de la granulometría del tapial se ha realizado en una primera fase mediante la fragmentación manual de la muestra del tapial hasta tamaño inferior a 16mm. Posteriormente se ha agitado la muestra con agua durante 1 hora para conseguir la disgregación de la misma, pasando a realizar su tamizado en húmedo. Esta técnica tiene el inconveniente de que pueden existir partículas y granos que se encuentran fuertemente adheridas entre si (por ejemplo por la acción conglomerante de la cal) y no se dispersan mediante la agitación en medio acuoso, situación que puede desencadenar en la obtención de curvas granulométricas con desviaciones. Teniendo en cuenta que la composición de un tapial debe ser mayoritaria en tierra, que es a su vez el conglomerante principal, y que ésta se deshace fácilmente por la acción del agua, se ha optado por esta técnica frente a otras más agresivas como son el ataque con ácidos, que destruyen la fracción granulométrica caliza y generan con seguridad desviaciones en las curvas granulométricas de los conglomerados.

Las luces de la serie de tamices utilizada han sido: 0.063mm, 0.125mm, 0.25mm, 0.5mm, 1mm, 2mm, 4mm, 8mm, 16mm, 31.5mm y 63mm. La curva granulométrica obtenida se representa en la figura 4.

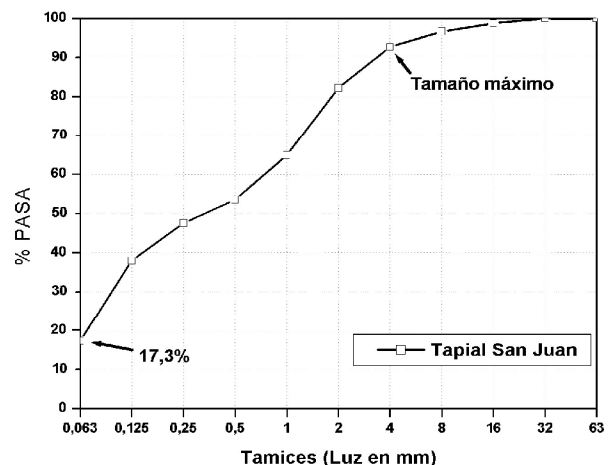


Fig. 4: Curva granulométrica del tapial.

Se puede observar como para el tapial el porcentaje de finos menores de 0,063 mm (63 micras) ha sido del 17,3%, que aunque es un valor elevado, no llega a ser muy alto, debido probablemente a la escasez de minerales de la arcilla encontrados en su composición. El tamaño máximo del árido ha sido de 4 mm, por lo que podría considerarse técnicamente como un mortero según las actuales definiciones para hormigones y morteros (UNE-EN 13139 y UNE-EN 12620, 2003).

3.- Conclusiones

A tenor de los resultados obtenidos con los diferentes análisis y observaciones se puede concluir que:

- Se trata de un tapial fabricado con cal, siendo siempre su contenido de conglomerante inferior al 38,6% en peso (puede existir en el árido una fracción de naturaleza carbonatada). La presencia de cal se ha constatado mediante la lupa binocular, observándose la abundante presencia de nódulos de cal y restos de carbón.
- La fracción de naturaleza silícea-silicatada del árido, está formada mayoritariamente por cuarzo, habiéndose identificado también feldespatos (feldespato potásico, la ortoclasa, y feldespatos sódico-cálcicos, plagioclasas) y micas (moscovita y flogopita) como trazas (<5% peso). El contenido de minerales de la arcilla ha sido también muy bajo (<5% peso), habiéndose detectado la presencia de illita. Se han identificado silicatos de alta temperatura (diopsido) que proceden probablemente del empleo de restos cerámicos en el tapial. El contenido en SO₃ ha sido muy bajo, por lo que se puede descartar el empleo de yeso como conglomerante.
- La porosidad abierta del tapial ha sido elevada, y su origen probable es el elevado contenido de finos en el tapial, que poseen una gran superficie específica y durante el amasado demandan gran cantidad de agua. Cuando ésta se elimina por evaporación, se genera en la estructura del tapial una elevada porosidad abierta.
- La resistencia a compresión del tapial se puede calificar como baja, teniendo una especial incidencia en este hecho la elevada porosidad abierta del mismo (a mayor porosidad en un material, existe menor sección resistente, y por tanto menores resistencias mecánicas). Durante el amasado demandan gran cantidad de agua, que posteriormente, cuando se elimina por evaporación, se genera en la estructura del tapial una elevada porosidad abierta.

Notas Y Citas

1. IBN 'IDÁRI. Trad. J. Rámirez del Río. Extraído de *Sevilla Almohade* de VALOR PIECCHOTTA, M., p.19

Agradecimientos

Nuestro más sincero agradecimiento a la empresa responsable de la excavación arqueológica CLAVE CYR S.L. y en especial a la arqueóloga Dña. Laura Mercado, directora de la excavación por la información facilitada sobre la muralla almohade de San Juan de Aznalfarache (Sevilla, España). Este trabajo se ha realizado dentro del marco del proyecto I+D BIA2004-01092 del MCYT, "Propuesta de mantenimiento, evaluación y rehabilitación de fábricas históricas de tapial en la provincia de Sevilla".

Bibliografía

AENOR. UNE-EN 13139:2003. Áridos para morteros.
AENOR. UNE-EN 12620:2003. Áridos para hormigón.
AENOR. UNE-EN 1744-1:1999. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos.
AENOR. UNE-EN 1015-11:2000. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido.
CEN. EN-1936:1999. Determination of a real density and apparent density, of total and open porosity.
DOMÍNGUEZ BERENJENO, E. L. *El Castillo de Alcalá de Guadaira y la defensa de Sevilla (ss. XI-XVI)*. pg. 17-29.
Jedrzejewska, H. "Ancient mortars as criterion in analyses of old architecture". En *ICCROM Symposium Mortars. Cements and grouts used in the conservation of historic buildings*. Roma, 1981, 313-329.