



Escuela
Politécnica
Superior

Caracterización de la Cal de Marrakech. Técnica del Tadelakt



Grado en Arquitectura Técnica

Trabajo Fin de Grado

Autor:

Juan Pedro Andreo Romero

Tutor:

Raúl Hugo Prado Govea

Octubre 2023



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

CARACTERIZACIÓN DE LA *CAL DE MARRAKECH.* TÉCNICA DEL *TADELAKT*

Juan Pedro Andreo Romero

Trabajo Fin de Grado en Arquitectura Técnica



No se permite un uso comercial de la obra original ni de las posibles obras derivadas, la distribución de las cuales se debe hacer con una licencia igual a la que regula la obra original

Esta obra se encuentra bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

RESUMEN

En este trabajo de investigación se determinan las propiedades químicas, físicas y mecánicas más representativas de la *Cal de Marrakech* mediante los siguientes ensayos en laboratorio:

1. Ensayos químicos –espectroscopia de energía dispersiva de rayos X, agua libre y pérdida por calcinación–.
2. Ensayos físicos –diámetro del escurrimiento, tamaño de partícula, densidad aparente, consistencia normal, tiempos de fraguado y reactividad–.
3. Ensayos mecánicos –resistencia a flexión, resistencia a compresión y resistencia a la adhesión–.

Además, se realiza una comparativa entre los resultados de los diferentes ensayos de la *Cal de Marrakech* y los datos de la ficha técnica de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 (Cales Pascual S.L., s. f.).

Se observa que lo que la hace única respecto al resto de cales para la construcción elaboradas en Occidente es que, debido al proceso de calcinación incompleta en hornos tradicionales de leña, la *Cal de Marrakech* incorpora agregados naturales en su composición que actúan como árido, por lo que el material se amasa directamente con agua, sin adición de arena (El Amrani et al., 2018, p. 754).

Sin embargo, se trata de un material que excede los valores característicos permitidos de tamaño de partícula y que presenta una deficiente resistencia a compresión, por lo que no cumple los requisitos establecidos en la norma UNE-EN 459-1 (2016) referente a las cales para la construcción.

Por otra parte, se analiza y se aplica la técnica del *Tadelakt* –cuyo componente principal es la *Cal de Marrakech*–: se trata de un revestimiento tradicional originario de Marrakech (Marruecos) que presenta un acabado liso y brillante, que posee propiedades hidrófugas y que actúa como revestimiento protector de soportes situados en ambientes húmedos con condiciones extremas de calor y humedad elevada (Wolff, 2013, p. 1).

Palabras clave: ensayos en laboratorio, revestimiento tradicional, revoco de cal, bioconstrucción, normativa UNE.

AGRADECIMIENTOS

Han sido casi dos años de interminables horas de coche para asistir a la universidad, de comer y cenar mientras conducía, de noches sin dormir para poder compaginar los estudios con el trabajo, de vacaciones de verano en el laboratorio y de fines de semana redactando este documento...

En primer lugar, quiero agradecer a todos mis seres queridos —a quienes todavía están y a quienes se fueron antes de tiempo— por todo el apoyo prestado: no hubiese podido terminar este trabajo sin vuestra ayuda.

Quiero agradecer a mi tutor su incansable apoyo, dedicación y esfuerzo. Siempre has estado disponible: mañanas, tardes y noches, tanto en días laborables como en festivos.

Quiero agradecer a Paloma Folache su inestimable labor a la hora de ayudarme a comprender los entresijos de este material tan complejo. Han sido necesarios varios cursos de formación y muchas horas de conversación telefónica. Te dedico el contenido de este trabajo.

Quiero agradecer a todos los integrantes del Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la EPS de la UA (San Vicente del Raspeig, Alicante, España) que me hayan permitido utilizar las instalaciones y el equipamiento disponible para realizar los ensayos. Habéis sido de gran ayuda.

Quiero agradecer al Equipo Directivo del Colegio Siglo XXI (Puerto de Mazarrón, Murcia, España) todas las facilidades que me ha brindado para poder asistir a la universidad.

Quiero agradecer a la empresa Alen y Calche S.L. (Los Molinos, Madrid, España) y al Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la EPS de la UA (San Vicente del Raspeig, Alicante, España) que me hayan proporcionado los materiales y herramientas necesarias para la realización de este trabajo.

Por último, quiero agradecer a todas aquellas personas que, de una forma u otra, han contribuido a que este trabajo sea como es. No me gustaría dejarme a nadie, así que no especifico nombres: sabéis quiénes sois.

Índice de contenidos

Resumen	5
Agradecimientos	7
<i>Índice de contenidos</i>	<i>ix</i>
<i>Índice de figuras</i>	<i>xii</i>
<i>Índice de tablas</i>	<i>xiv</i>
<i>Índice de ecuaciones</i>	<i>xvi</i>
<i>Índice de siglas y acrónimos</i>	<i>xvii</i>
<i>Índice de abreviaturas, operadores y unidades</i>	<i>xviii</i>
1. Introducción	21
2. Antecedentes	23
3. Objetivos	25
4. Metodología	27
4.1. Análisis en laboratorio	27
4.2. Materiales	27
4.3. Toma de muestras de ensayo	28
4.4. Consideraciones previas sobre la <i>Cal de Marrakech</i>	29
4.5. Formación	30
5. Ensayos químicos	31
5.1. Espectroscopia de energía dispersiva de rayos X	31
5.2. Agua libre	33
5.3. Pérdida por calcinación	34
6. Ensayos físicos	37
6.1. Diámetro del escurrimiento	38
6.1.1. <i>Cal blanca EN 459-1 NHL 3,5</i>	39
6.1.2. <i>Cal de Marrakech</i>	41

6.2.	Tamaño de partícula	43
6.2.1.	<i>Mortero seco normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5</i>	45
6.2.2.	<i>Cal de Marrakech –como conglomerante–</i>	46
6.2.3.	<i>Cal de Marrakech –como mortero seco–</i>	47
6.3.	Densidad aparente	48
6.3.1.	<i>Cal de Marrakech</i>	48
6.3.2.	<i>Mortero de Cal de Marrakech en estado endurecido</i>	51
6.4.	Consistencia normal.....	53
6.5.	Tiempos de fraguado.....	55
6.6.	Reactividad	58
7.	Ensayos mecánicos	61
7.1.	Resistencia a flexión	61
7.2.	Resistencia a compresión.....	63
7.3.	Resistencia a la adhesión.....	65
8.	Comparativa de resultados	69
8.1.	Espectroscopia de energía dispersiva de rayos X	69
8.2.	Agua libre.....	70
8.3.	Pérdida por calcinación.....	71
8.4.	Diámetro del escurrimiento.....	72
8.5.	Tamaño de partícula	73
8.5.1.	<i>Cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y Cal de Marrakech</i>	73
8.5.2.	<i>Mortero seco normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y mortero seco de Cal de Marrakech</i>	74
8.5.3.	<i>Otros morteros secos de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y mortero seco de Cal de Marrakech</i>	75
8.6.	Densidad aparente	76
8.6.1.	<i>Cal de Marrakech</i>	76
8.6.2.	<i>Mortero de Cal de Marrakech en estado endurecido</i>	77
8.7.	Consistencia normal.....	78
8.8.	Tiempos de fraguado.....	78
8.9.	Reactividad	80
8.10.	Resistencia a flexión	81
8.11.	Resistencia a compresión.....	81
8.12.	Resistencia a la adhesión.....	82

9. Conclusiones.....	85
10. Técnica de aplicación del <i>Tadelakt</i>	89
10.1. Materiales y herramientas.....	89
10.2. Preparación del soporte	90
10.3. Preparación de la mezcla	90
10.4. Aplicación de la primera capa	91
10.5. Aplicación de la segunda capa.....	92
10.6. Alisado.....	92
10.7. Aplicación de jabón	93
10.8. Aplicación de cera –opcional–	94
10.9. Trabajo de campo	95
11. Futuras líneas de investigación	97
Referencias	99
Anexos	101
Anexo I. Procedimiento de amasado del mortero normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5.....	101
Anexo II. Procedimiento de amasado del mortero de <i>Cal de Marrakech</i> ...	102
Anexo III. Elaboración de bolsas de arena normalizada CEN	103
Anexo IV. Elaboración de probetas de ensayo de mortero de <i>Cal de Marrakech</i>	105

Índice de figuras

Figura 4.1. Saco de <i>Cal de Marrakech</i>	28
Figura 4.2. Saco de cal blanca	28
Figura 4.3. Recipientes de plástico	29
Figura 4.4. Divisor de muestras	29
Figura 5.1. Horno.....	34
Figura 5.2. Desecador	34
Figura 5.3. Crisol con tapa en horno de mufla	36
Figura 5.4. Pesado de la muestra	36
Figura 6.1. Molde, tolva, pisón y mesa de sacudidas	39
Figura 6.2. Mediciones de la torta.....	39
Figura 6.3. Máquina de tamizado	45
Figura 6.4. Columna de tamizado.....	45
Figura 6.5. Medidor de densidad aparente	49
Figura 6.6. Artefacto improvisado	49
Figura 6.7. Molde de acero	52
Figura 6.8. Probetas de 40 x 40 x 40 cm.....	52
Figura 6.9. Aparato de Vicat, molde de plástico y placa de vidrio	55
Figura 6.10. Ensayo de penetración	55
Figura 6.11. Ensayo de tiempos de fraguado.....	58
Figura 6.12. Cámara húmeda.....	58
Figura 6.13. Vaso Dewar	60
Figura 6.14. Termómetro	60
Figura 7.1. Ensayo de resistencia a flexión.....	63
Figura 7.2. Probetas de ensayo	63
Figura 7.3. Ensayo de resistencia a compresión	65
Figura 7.4. Máquina de ensayo	65
Figura 7.5. Ensayo de resistencia a la adhesión	68
Figura 7.6. Marcado de círculos.....	68
Figura 8.1. Valores de espectroscopia de energía dispersiva de rayos X –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y <i>Cal de Marrakech</i> –.....	70
Figura 8.2. Tamaño de partícula –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y <i>Cal de Marrakech</i> – .	74
Figura 8.3. Tamaño de partícula –mortero seco normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y mortero seco de <i>Cal de Marrakech</i> –.....	75
Figura 8.4. Tamaño de partícula –otros morteros secos de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y mortero seco de <i>Cal de Marrakech</i> –	76
Figura 8.5. Curva de apagado por vía húmeda – <i>Cal de Marrakech</i> –	80

Figura 10.1. Herramientas y jabón	89
Figura 10.2. Saco de Cal de <i>Marrakech</i>	89
Figura 10.3. Soportes cerámicos con capa base de mortero NHL	90
Figura 10.4. Bolas de arcical	90
Figura 10.5. Amasado mecánico	91
Figura 10.6. Mezclas coloreadas	91
Figura 10.7. Primera capa en color rojo	92
Figura 10.8. Primera capa en color verde	92
Figura 10.9. Alisado con llana	93
Figura 10.10. Pulido con piedra	93
Figura 10.11. Primera mano de jabón.....	94
Figura 10.12. Segunda mano de jabón	94
Figura 10.13. Muestras sobre arcical	95
Figura 10.14. Muestras circulares coloreadas	95
Figura 10.15. Muestras sobre material cerámico	95
Figura 10.16. Muestras para ensayos	95
Figura 11.1. Amasadora	102
Figura 11.2. Amasado de mortero de <i>Cal de Marrakech</i>	102
Figura 11.3. Saco de arena viva.....	104
Figura 11.4. Bolsas de arena normalizada CEN	104
Figura 11.5. Molde de acero en la compactadora	107
Figura 11.6. Armario húmedo	107

Índice de tablas

Tabla 4.1. Cursos de formación	30
Tabla 5.1. Ensayo de espectroscopia de energía dispersiva de rayos X –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y <i>Cal de Marrakech</i> –	32
Tabla 5.2. Valores de espectroscopia de energía dispersiva de rayos X –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y <i>Cal de Marrakech</i> –	32
Tabla 5.3. Ensayo de agua libre – <i>Cal de Marrakech</i> –	34
Tabla 5.4. Valor de agua libre – <i>Cal de Marrakech</i> –	34
Tabla 5.5. Ensayo de pérdida por calcinación – <i>Cal de Marrakech</i> –	35
Tabla 5.6. Valor de pérdida por calcinación – <i>Cal de Marrakech</i> –	35
Tabla 6.1. Ensayo de diámetro del escurrimiento –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–	40
Tabla 6.2. Valor de diámetro del escurrimiento –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–	40
Tabla 6.3. Relación agua / conglomerante –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–	40
Tabla 6.4. Ensayo de diámetro del escurrimiento – <i>Cal de Marrakech</i> –	42
Tabla 6.5. Valor de diámetro del escurrimiento – <i>Cal de Marrakech</i> –	42
Tabla 6.6. Relación agua / conglomerante – <i>Cal de Marrakech</i> –	42
Tabla 6.7. Métodos para obtener el tamaño de partícula	43
Tabla 6.8. Ensayo de tamaño de partícula –mortero seco normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–	46
Tabla 6.9. Valor de tamaño de partícula –mortero seco normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–	46
Tabla 6.10. Ensayo de tamaño de partícula – <i>Cal de Marrakech</i> como conglomerante–	47
Tabla 6.11. Valor de tamaño de partícula – <i>Cal de Marrakech</i> como conglomerante–	47
Tabla 6.12. Ensayo de tamaño de partícula – <i>Cal de Marrakech</i> como mortero seco–	48
Tabla 6.13. Valor de tamaño de partícula – <i>Cal de Marrakech</i> como mortero seco–	48
Tabla 6.14. Ensayo de densidad aparente – <i>Cal de Marrakech</i> –	50
Tabla 6.15. Valor de densidad aparente – <i>Cal de Marrakech</i> –	50
Tabla 6.16. Ensayo de densidad aparente –mortero de <i>Cal de Marrakech</i> en estado endurecido–	52
Tabla 6.17. Valor de densidad aparente –mortero de <i>Cal de Marrakech</i> en estado endurecido–	52
Tabla 6.18. Ensayo de consistencia normal – <i>Cal de Marrakech</i> –	54
Tabla 6.19. Valor de consistencia normal – <i>Cal de Marrakech</i> –	55
Tabla 6.20. Ensayo de tiempos de fraguado – <i>Cal de Marrakech</i> –	57
Tabla 6.21. Valores de tiempos de fraguado – <i>Cal de Marrakech</i> –	58
Tabla 6.22. Ensayo de reactividad – <i>Cal de Marrakech</i> –	59
Tabla 6.23. Valor de reactividad – <i>Cal de Marrakech</i> –	60

Tabla 7.1. Ensayo de resistencia a flexión – <i>Cal de Marrakech</i> –	62
Tabla 7.2. Valor de resistencia a flexión a los veintiocho días – <i>Cal de Marrakech</i> – ...	63
Tabla 7.3. Ensayo de resistencia a compresión – <i>Cal de Marrakech</i> –	64
Tabla 7.4. Valor de resistencia a compresión a los veintiocho días – <i>Cal de Marrakech</i> –	65
Tabla 7.5. Ensayo de resistencia a la adhesión –mortero de <i>Cal de Marrakech</i> en estado endurecido–	67
Tabla 7.6. Valor de resistencia a la adhesión a los veintiocho días –mortero de <i>Cal de Marrakech</i> en estado endurecido–	68
Tabla 8.1. Valores característicos de espectroscopia de energía dispersiva de rayos X – cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y <i>Cal de Marrakech</i> –	69
Tabla 8.2. Valores característicos de agua libre –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y <i>Cal de Marrakech</i> –	70
Tabla 8.3. Valores característicos de pérdida por calcinación –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y <i>Cal de Marrakech</i> –	71
Tabla 8.4. Valores característicos de diámetro del escurrimiento –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y <i>Cal de Marrakech</i> –	72
Tabla 8.5. Valores característicos de tamaño de partícula –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y <i>Cal de Marrakech</i> –	73
Tabla 8.6. Valores característicos de tamaño de partícula –mortero seco normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y mortero seco de <i>Cal de Marrakech</i> –	74
Tabla 8.7. Valores característicos de tamaño de partícula –otros morteros secos de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y mortero seco de <i>Cal de Marrakech</i> –	75
Tabla 8.8. Valores característicos de densidad aparente –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y <i>Cal de Marrakech</i> –	77
Tabla 8.9. Valores característicos de densidad aparente –mortero normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y mortero de <i>Cal de Marrakech</i> en estado endurecido–	77
Tabla 8.10. Valores característicos de consistencia normal –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y <i>Cal de Marrakech</i> –	78
Tabla 8.11. Valores característicos de tiempos de fraguado –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y <i>Cal de Marrakech</i> –	79
Tabla 8.12. Valores característicos de reactividad –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y <i>Cal de Marrakech</i> –	80
Tabla 8.13. Valores característicos de resistencia a flexión –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y <i>Cal de Marrakech</i> –	81
Tabla 8.14. Valores característicos de resistencia a compresión –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y <i>Cal de Marrakech</i> –	82
Tabla 8.15. Valores característicos de resistencia a la adhesión –mortero normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y mortero de <i>Cal de Marrakech</i> en estado endurecido–	82
Tabla 11.1. Composición en masa –bolsa de arena normalizada CEN–.....	103

Índice de ecuaciones

Ecuación 5.1. Contenido en agua libre.....	33
Ecuación 5.2. Pérdida por calcinación	35
Ecuación 6.1. Masa de material retenida en cada tamiz	44
Ecuación 6.2. Porcentaje acumulado de material que pasa por cada tamiz	44
Ecuación 6.3. Densidad aparente – <i>Cal de Marrakech</i> –	50
Ecuación 6.4. Densidad aparente –mortero de <i>Cal de Marrakech</i> en estado endurecido–	51
Ecuación 7.1. Resistencia a flexión.....	62
Ecuación 7.2. Resistencia a compresión	64
Ecuación 7.3. Resistencia a la adhesión	67

Índice de siglas y acrónimos

Siglas y acrónimos

UNE	Una norma española
EN	Norma europea
NHL	Cal hidráulica natural
CE	Conformidad europea
EPS	Escuela Politécnica Superior
UA	Universidad de Alicante
CEN	Comité Técnico: cemento y cales de construcción

Índice de abreviaturas, operadores y unidades

Abreviaturas

et al.	Y otros
p.	Página
pp.	Páginas
S.L.	Sociedad limitada
s.f.	Sin fecha
S.R.L.	Sociedad de responsabilidad limitada

Operadores

<	Menor que
>	Mayor que
≤	Menor o igual que
±	Más menos
≥	Mayor o igual que
-	Resta
+	Suma
x	Multiplicación
/	División
:	División

Unidades

h	Hora
°C	Grado Celsius
%	Porcentaje
mm	Milímetro
g	Gramo
kg	Kilogramo
dm ³	Decímetro cúbico
kg / dm ³	Kilogramo por decímetro cúbico
l	Litro
m ³	Metro cúbico
kg / m ³	Kilogramo por metro cúbico
min	Minuto
MPa	Megapascal
N	Newton
mm ²	Milímetro cuadrado
N / mm ²	Newton por milímetro cuadrado
m	Metro lineal
m ²	Metro cuadrado
s	Segundo

1. INTRODUCCIÓN

Tadelakt significa *alisar por frotamiento* en el idioma marroquí: se trata de un revestimiento tradicional originario de Marrakech (Marruecos), compuesto fundamentalmente por *Cal de Marrakech* y otros materiales como jabón vegetal negro de aceite de oliva, cera de carnauba y pigmentos naturales inorgánicos (Leis et al., 2016, p. 5).

Para su realización, se utilizan herramientas tradicionales como una paleta de albañil, un fratás de madera y una piedra pulida, entre otras.

Tanto el material como la técnica de aplicación dan nombre a este tipo de acabado –*Tadelakt*–, que destaca por las siguientes características:

- Presenta un acabado liso y brillante.
- Posee propiedades hidrófugas.
- Actúa como revestimiento protector de soportes situados en ambientes húmedos con condiciones extremas de calor y humedad elevada (Wolff, 2013, p. 1).

El *Tadelakt* es un concepto profundamente arraigado a la tradición, al arte y al estatus social de la ciudad de Marrakech: comenzó a utilizarse en los depósitos de agua y su uso se fue extendiendo poco a poco a los baños públicos, a los palacios, a las viviendas tradicionales con patio y, finalmente, a todo tipo de edificación residencial, tanto en interiores como en exteriores. (Alen y Calche S.L. y Okambuva.coop, s. f., p. 2).

En relación con su componente principal, la *Cal de Marrakech*, se comprueba que apenas existe información publicada al respecto: tan solo unos pocos artículos en revistas especializadas.

También se identifican un par de guías de aplicación del revestimiento y varios artículos en distintas páginas web sobre bioconstrucción, que desarrollan determinados aspectos generales del material, pero nada específico en relación con el análisis técnico del mismo y sus propiedades.

Por lo tanto, se decide llevar a cabo este trabajo de investigación con el objetivo de caracterizar la *Cal de Marrakech* a partir del análisis de muestras de ensayo en laboratorio.

2. ANTECEDENTES

En este capítulo se citan las fuentes de información más relevantes y se resumen las ideas principales de la revisión bibliográfica que se lleva a cabo sobre la *Cal de Marrakech*:

1. La revista *Journal of Materials and Environmental Sciences* (Marruecos) publica el artículo *From the stone to the lime for Tadelakt: Marrakesh traditional plaster* (El Amrani et al., 2018):
 - El *Tadelakt* se elabora con un tipo de cal hidráulica natural muy particular que se produce en los alrededores de Marrakech.
 - Debido al proceso de calcinación incompleta en hornos tradicionales de leña, la *Cal de Marrakech* incorpora agregados naturales en su composición que actúan como árido –dosificación en masa conglomerante / árido aproximada 1:3¹–, por lo que el material se amasa directamente con agua, sin adición de arena.
 - Si bien la composición mineralógica de la *Cal de Marrakech* es variable debido al proceso artesanal de calcinación, la presencia de hidróxido de magnesio $[Mg(OH)_2]$ y de silicato de aluminio y magnesio hidratado $[(Mg_2Al_2)Si_8O_{20}(OH)_2 \cdot 4H_2O]$ contribuye a evitar la aparición de fisuras en el revestimiento.
 - Desde un punto de vista mineralógico, la *Cal de Marrakech* es el único tipo de cal que posibilita una correcta realización del auténtico *Tadelakt*.
2. La empresa *La Banca della Calce* (Italia) publica una ficha técnica de la *Cal de Marrakech* con algunos de los parámetros más representativos del material: composición mineralógica, aspecto, color, peso específico, agua libre, tamaño máximo del árido, pérdida por calcinación y pH (La Banca della Calce S.R.L., s. f.-a).

¹ Una dosificación 1:3 está formada por una parte de conglomerante –cal– y tres partes de árido –arena–.

4. Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-2 (2022), el Laboratorio de investigación, diagnóstico, análisis y consultoría de Patrimonio Cultural *R&C Art* (Italia) publica un análisis químico de la *Cal de Marrakech* (R&C Art S.R.L., 2016):
 - Se determina la composición mineralógica.
 - Se calcula el índice de hidraulicidad².
 - Se clasifica como cal hidráulica natural débilmente hidráulica³.
5. La revista de decoración *Nomad Bubbles* publica el artículo *El Tadelakt: una técnica milenaria de Marruecos* (Beleta Astort, 2023):
 - La *Cal de Marrakech* es un tipo de cal artesanal que se obtiene de la cocción de bloques de piedra caliza procedentes de las canteras de la región de Marrakech, en la Cordillera del Alto Atlas (Marruecos).
 - El método de cocción en hornos tradicionales de leña se transmite de generación en generación y es idéntico al descrito por Vitruvio y utilizado por los romanos hace dos mil años.
 - El fuego del horno se alimenta constantemente, durante unas 36 h, con madera de olivo, ramas de palmera y restos vegetales para mantener una llama alta y una temperatura aproximada de 900 °C.
 - Una vez cocidas, las piedras calizas se dejan enfriar, se pulverizan con agua hasta su reducción a polvo, se tamizan y se ensacan.

² El índice de hidraulicidad (I_H) se define como el cociente entre los componentes ácidos y los componentes básicos del material: un mayor contenido de arcilla implica mayor hidraulicidad, mayor resistencia mecánica y menor tiempo de fraguado (Lapiente Aragón, s. f., pp. 31-33).

$$I_H = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO}}$$

³ La siguiente tabla establece una clasificación de los distintos conglomerantes en función de su índice de hidraulicidad (Lapiente Aragón, s. f., p. 34):

Conglomerante	Hidraulicidad	I_H	Contenido arcilla
Yeso	No hidráulico	-	-
Cal aérea	No hidráulica	< 0,10	0 - 5 %
Cal hidráulica	Débilmente hidráulica	0,10 - 0,16	5 - 8 %
	Medianamente hidráulica	0,16 - 0,30	8 - 14 %
	Normalmente hidráulica	0,30 - 0,40	14 - 19 %
	Eminentemente hidráulica	0,40 - 0,50	19 - 22 %
Cemento	Hidráulico	> 0,50	> 22 %

3. OBJETIVOS

En este capítulo se formulan los objetivos de este trabajo de investigación, en función de la experiencia y de los conocimientos adquiridos hasta el momento sobre la *Cal de Marrakech*:

1. Determinar las propiedades químicas de la *Cal de Marrakech* mediante la realización de los siguientes ensayos en laboratorio:
 - Óxido de calcio (CaO) y óxido de magnesio (MgO).
 - Sulfatos (SO₃).
 - Agua libre.
 - Determinación volumétrica de dióxido de carbono (CO₂).
 - Pérdida por calcinación.
 - Cal útil.
2. Determinar las propiedades físicas de la *Cal de Marrakech* mediante la realización de los siguientes ensayos en laboratorio:
 - Tamaño de partícula.
 - Densidad aparente.
 - Estabilidad de volumen.
 - Consistencia normal.
 - Tiempos de fraguado.
 - Reactividad.
 - Rendimiento.
 - Mortero normalizado en masa y demanda de agua para los valores de escurrimiento y penetración.
 - Retención de agua.
 - Determinación del contenido de aire.
3. Determinar las propiedades mecánicas de la *Cal de Marrakech* mediante la realización de los siguientes ensayos en laboratorio:
 - Resistencia a compresión.
 - Resistencia a tracción.
 - Resistencia a la adhesión.
4. Realizar un estudio comparativo entre los resultados de los diferentes ensayos de la *Cal de Marrakech* y los datos de la ficha técnica de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5.

Una vez obtenidos los resultados de los diferentes ensayos, se pretende dar respuesta, entre otras, a las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuál es la clasificación del material según el tipo de cal para la construcción? ¿Se trata de una cal aérea o de una cal con propiedades hidráulicas?
- ¿Cuál es el resultado de la comparativa química con otros tipos de cales para la construcción como la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5?
- ¿Cumple los criterios establecidos en la normativa UNE? ¿Existe la posibilidad de obtener el Marcado CE del material?
- ¿Cuáles son las diferencias más significativas con el resto de cales para la construcción?
- Debido a la presencia natural de árido en su composición, ¿puede amasarse directamente con agua, sin adición de arena?
- ¿Cuál es su comportamiento frente a la microfisuración?
- ¿Cuál es la diferencia entre la curva granulométrica del material y la de otros tipos de cales para la construcción como la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5? ¿Y respecto a un mortero normalizado de cal?
- Debido a la presencia natural de árido en su composición, ¿se considera adecuado el procedimiento de apagado de la *Cal de Marrakech*?
- ¿Cuál es la dosificación conglomerante / árido?
- Debido a la presencia natural de árido en su composición, ¿se considera un conglomerante, una pasta o un mortero⁴?

⁴ Diferencias entre conglomerante, pasta y mortero (Herreruela García, 2021. pp. 7-13):

- Un conglomerante –yeso, cal, cemento...– es un material que une y da cohesión a otras sustancias a partir de procesos químicos que originan un nuevo producto.
- Una pasta es un producto que se obtiene al mezclar conglomerante con agua, sin adición de arena.
- Un mortero es un producto que se obtiene al mezclar conglomerante, agua y arena.

4. METODOLOGÍA

4.1. Análisis en laboratorio

En este trabajo de investigación se realiza un estudio comparativo de las características químicas, físicas y mecánicas más representativas de los siguientes materiales:

- Cal blanca EN 459-1 NHL 3,5.
- Mortero normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5.
- *Cal de Marrakech*.

Para llevar a cabo los diferentes ensayos, se utilizan las instalaciones y el equipamiento disponible del Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la EPS de la UA (España).

En los diferentes apartados correspondientes a la fase de investigación, se incluye la siguiente información relativa a los ensayos que se llevan a cabo:

- Normativa UNE de referencia.
- Tipo y designación del material.
- Fecha, lugar y duración aproximada del ensayo.
- Procedimiento operatorio del ensayo.
- Resultados del ensayo.

4.2. Materiales

La parte experimental de este trabajo de investigación se realiza con los siguientes materiales de construcción:

- Un saco de *Cal de Marrakech* de 25 kg, suministrado de forma gratuita por la empresa española Alen y Calche S.L.
- Un saco de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 de 25 kg, suministrado de forma gratuita por el Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la EPS de la UA (España).
- Sacos de arena viva de 25 kg.
- Bardos cerámicos de dimensiones 700 x 235 x 33 mm.



Figura 4.1. Saco de Cal de Marrakech

Fuente: alenycalche.es



Figura 4.2. Saco de cal blanca

Fuente: calespascual.com

4.3. Toma de muestras de ensayo⁵

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 196-7 (2008), se determinan los aspectos generales de la toma de muestras (pp. 7-12):

- Para reducir al mínimo la absorción de humedad y de dióxido de carbono del ambiente, una vez abiertos los sacos, se almacenan en recipientes de plástico rígidos, secos, limpios, estancos y con posibilidad de cierre sellado con su tapa.
- Los distintos recipientes se identifican por colores y se etiquetan sobre el cuerpo de los mismos, no sobre la tapa.

⁵ Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-2 (2022), la toma de muestras de materiales en polvo se realiza de acuerdo con la norma UNE-EN 196-7 (2008) (p. 11).

- Para obtener muestras representativas y homogéneas, el material se reduce en masa con un divisor de muestras y, en los instantes previos al ensayo en cuestión, se calienta hasta alcanzar masa constante⁶.
- La manipulación de las muestras se realiza lo más rápidamente posible.



Figura 4.3. Recipientes de plástico

Fuente: elaboración propia



Figura 4.4. Divisor de muestras

Fuente: elaboración propia

4.4. Consideraciones previas sobre la Cal de Marrakech

Debido a la presencia natural de árido en su composición, una posible clasificación de la Cal de Marrakech atiende a los siguientes estados en los que se puede analizar el material:

- Conglomerante –material en polvo tal y como se suministra–.
- Mortero en estado fresco.
- Mortero en estado endurecido.

Por lo tanto, cada uno de los diferentes estados del material se ensaya atendiendo a los criterios establecidos en la normativa UNE que, en su caso, corresponda.

⁶ Un material alcanza masa constante cuando dos pesadas consecutivas, efectuadas a intervalos de 2 h de secado en el horno, no difieren en más del 0,2 % de la masa total de la muestra (UNE-EN 1015-10, 2000, p. 7).

4.5. Formación

Para adquirir un conocimiento más amplio acerca de las características, propiedades y usos tanto del *Tadelakt* como de la *Cal de Marrakech*, se lleva a cabo la siguiente formación:

1. Taller práctico de *Tadelakt* —aplicación y formulación—:
 - Lugar: Morón de la Frontera (Sevilla, España).
 - Fecha: 5-6 de febrero de 2022.
 - Duración: 16 h.
2. Curso certificado de aplicador de *Tadelakt* auténtico:
 - Lugar: Almazora (Castellón, España).
 - Fecha: 11-13 de febrero de 2022.
 - Duración: 18 h.
3. Curso de *Tadelakt* auténtico:
 - Lugar: Iscles (Huesca, España).
 - Fecha: 1-5 de agosto de 2022.
 - Duración: 30 h.

La siguiente tabla muestra un resumen de los contenidos que se tratan en los diferentes cursos:

Teoría	Práctica
El ciclo de la cal	Prácticas sobre bardo y sobre pared
Tipos de cales para la construcción	Preparación del soporte
La <i>Cal de Marrakech</i> : calcinación, origen y propiedades	Elaboración y coloración de la mezcla
La técnica del <i>Tadelakt</i>	Trabajo sobre superficies curvas
Jabón de cal	Bruñido con piedra y espátula
Soportes: compatibilidad y preparación	Aplicación de jabón de cal
Preparación y uso de pigmentos	Uso de distintos tipos de ceras
	Técnicas decorativas

Tabla 4.1. Cursos de formación

Fuente: elaboración propia

También se plantea la posibilidad de realizar una estancia formativa en los alrededores de Marrakech junto a un maestro artesano del lugar pero, por motivos varios, este viaje está pendiente de realización.

5. ENSAYOS QUÍMICOS

En este capítulo se llevan a cabo los siguientes ensayos químicos en laboratorio⁷:

1. Espectroscopia de energía dispersiva de rayos X:
 - Cal blanca EN 459-1 NHL 3,5.
 - *Cal de Marrakech*.
2. Agua libre:
 - *Cal de Marrakech*.
3. Pérdida por calcinación:
 - *Cal de Marrakech*.

5.1. Espectroscopia de energía dispersiva de rayos X

A continuación, se determina la composición química de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y de la *Cal de Marrakech*.

Atendiendo a los criterios establecidos en la tabla 1 de la norma UNE-EN 459-2 (2022), los ensayos químicos deben efectuarse en materiales cuya granulometría no supere los 2 mm, por lo que las muestras de ensayo de ambos materiales, de 15 g aproximadamente, se trituran y se muelen previamente (p. 12).

Se decide adoptar el método de *espectroscopia de energía dispersiva de rayos X* para obtener el porcentaje en masa de los diferentes elementos químicos presentes en ambos materiales.

⁷ Debido a la limitación de tiempo disponible durante la fase de investigación, se decide no llevar a cabo la realización de los siguientes ensayos químicos que forman parte del planteamiento inicial de este trabajo de investigación –ver Capítulo 3. Objetivos en p. 25–:

- Óxido de calcio (CaO) y óxido de magnesio (MgO).
- Sulfatos (SO₃).
- Determinación volumétrica de dióxido de carbono (CO₂).
- Cal útil.

El ensayo del material, en forma de polvo, se lleva a cabo en los Servicios Técnicos de Investigación del Vicerrectorado de Investigación de la UA (España), con fecha 20 de julio de 2022 y con una duración aproximada de 1,5 h.

Se realizan tres análisis de cada muestra de material, por lo que la composición química se corresponde con la media aritmética de los tres valores obtenidos.

La siguiente tabla muestra los resultados del ensayo:

	Espectroscopia de energía dispersiva de rayos X							
	C	O	Mg	Al	Si	Cl	Ca	Fe
Cal blanca	14,2 %	40,3 %	0,3 %	0,4 %	3,8 %	-	41,0 %	-
	13,8 %	39,1 %	-	0,3 %	1,3 %	-	45,5 %	-
	12,7 %	45,5 %	0,2 %	0,5 %	5,3 %	-	35,7 %	-
Cal Marrakech	14,2 %	42,2 %	1,3 %	3,0 %	3,9 %	0,2 %	33,5 %	1,8 %
	10,8 %	40,8 %	0,6 %	0,9 %	1,6 %	0,3 %	45,0 %	-
	10,6 %	51,6 %	1,0 %	1,5 %	3,7 %	0,2 %	31,3 %	-

Tabla 5.1. Ensayo de espectroscopia de energía dispersiva de rayos X –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y Cal de Marrakech–

Fuente 1 –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–: (Servicios Técnicos de Investigación, 2022a)

Fuente 2 –Cal de Marrakech–: (Servicios Técnicos de Investigación, 2022b)

Por lo tanto, los valores obtenidos durante el ensayo de espectroscopia de energía dispersiva de rayos X de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y de la *Cal de Marrakech* son los siguientes:

	Espectroscopia de energía dispersiva de rayos X							
	C	O	Mg	Al	Si	Cl	Ca	Fe
Cal blanca	13,6 %	41,6 %	0,2 %	0,4 %	3,5 %	-	40,7 %	-
Cal Marrakech	11,8 %	44,9 %	1,0 %	1,8 %	3,1 %	0,2 %	36,6 %	0,6 %

Tabla 5.2. Valores de espectroscopia de energía dispersiva de rayos X –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y Cal de Marrakech–

Fuente: elaboración propia

5.2. Agua libre

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-2 (2022), se determina el valor de agua libre de la *Cal de Marrakech* (pp. 23-24).

El ensayo del material, en forma de polvo, se lleva a cabo en el Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la EPS de la UA (España), con fecha 20 de julio de 2022 y con una duración aproximada de 1 h.

A continuación, se describe el procedimiento operatorio del ensayo:

1. En una balanza, se pesa una muestra de 9,999 g de *Cal de Marrakech* en un recipiente de vidrio pre-pesado.
2. Se calienta en el horno a una temperatura constante de 105 °C durante 12 h, hasta alcanzar masa constante.
3. Se saca del horno.
4. Se cubre para evitar que se absorba tanto el dióxido de carbono como el vapor de agua del ambiente.
5. Se enfría a temperatura ambiente en el desecador.
6. Se destapa y se pesa de nuevo.

En definitiva, la pérdida de masa que experimenta la muestra seca se atribuye al contenido en agua libre, es decir, al contenido de agua cuyas moléculas no interaccionan directamente con el material, según la siguiente ecuación:

$$w_{H_2O} = \frac{m_5 - m_6}{m_5} \times 100$$

Ecuación 5.1. Contenido en agua libre

Fuente: (UNE-EN 459-2, 2022, p. 24)

Donde:

- w_{H_2O} es el contenido en agua libre, en % en masa.
- m_5 es la masa de la muestra antes de calentar, en g.
- m_6 es la masa de la muestra después de calentar, en g.

La siguiente tabla muestra los resultados del ensayo:

m_5	m_6	w_{H_2O}
9,999 g	9,812 g	1,87 %

Tabla 5.3. Ensayo de agua libre –*Cal de Marrakech*–*Fuente: elaboración propia*

Por lo tanto, el valor obtenido durante el ensayo de agua libre de la *Cal de Marrakech* es el siguiente:

Agua libre	1,87 %
------------	--------

Tabla 5.4. Valor de agua libre –*Cal de Marrakech*–*Fuente: elaboración propia*

Figura 5.1. Horno

Fuente: elaboración propia

Figura 5.2. Desecador

Fuente: elaboración propia

5.3. Pérdida por calcinación

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-2 (2022), se determina el valor de pérdida por calcinación de la *Cal de Marrakech* (pp. 32-33).

El ensayo del material, en forma de polvo, se lleva a cabo en el Laboratorio de materiales de Ingeniería Civil de la EPS de la UA (España), con fecha 21 de julio de 2022 y con una duración aproximada de 1 h.

A continuación, se describe el procedimiento operatorio del ensayo:

1. En una balanza, se pesa una muestra de 5,053 g de *Cal de Marrakech* en un crisol de porcelana sin esmaltar pre-pesado.
2. Se calienta en el horno de mufla a una temperatura constante de 1050 °C durante 2 h.
3. Se saca del horno.
4. Se cubre con su tapa para evitar que se absorba tanto el dióxido de carbono como el vapor de agua del ambiente.
5. Se enfría a temperatura ambiente en el desecador.
6. Se destapa y se pesa de nuevo.

En definitiva, la pérdida de masa que experimenta la muestra seca se atribuye a la pérdida por calcinación, es decir, al contenido de agua libre, agua combinada y dióxido de carbono presentes en el material, según la siguiente ecuación:

$$LoI = \frac{m_{11} - m_{12}}{m_{11}} \times 100$$

Ecuación 5.2. Pérdida por calcinación

Fuente: (UNE-EN 459-2, 2022, p. 33)

Donde:

- LoI es la pérdida por calcinación, en % en masa.
- m_{11} es la masa de la muestra antes de calcinar, en g.
- m_{12} es la masa de la muestra después de calcinar, en g.

La siguiente tabla muestra los resultados del ensayo:

m_{11}	m_{12}	LoI
5,053 g	4,282 g	15,26 %

Tabla 5.5. Ensayo de pérdida por calcinación –*Cal de Marrakech*–

Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, el valor obtenido durante el ensayo de pérdida por calcinación de la *Cal de Marrakech* es el siguiente:

Pérdida por calcinación	15,26 %
-------------------------	---------

Tabla 5.6. Valor de pérdida por calcinación –*Cal de Marrakech*–

Fuente: elaboración propia



Figura 5.3. Crisol con tapa en horno de mufla

Fuente: elaboración propia



Figura 5.4. Pesado de la muestra

Fuente: elaboración propia

6. ENSAYOS FÍSICOS

En este capítulo se llevan a cabo los siguientes ensayos físicos en laboratorio⁸:

1. Diámetro del escurrimiento:
 - Cal blanca EN 459-1 NHL 3,5.
 - *Cal de Marrakech*.
2. Tamaño de partícula:
 - Mortero seco normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5.
 - *Cal de Marrakech*.
3. Densidad aparente:
 - *Cal de Marrakech*.
 - Mortero de *Cal de Marrakech* en estado endurecido.
4. Consistencia normal:
 - *Cal de Marrakech*.
5. Tiempos de fraguado:
 - *Cal de Marrakech*.
6. Reactividad:
 - *Cal de Marrakech*.

⁸ Debido a la limitación de tiempo disponible durante la fase de investigación, se decide no llevar a cabo la realización de los siguientes ensayos físicos que forman parte del planteamiento inicial de este trabajo de investigación –ver Capítulo 3. Objetivos en p. 25–:

- Estabilidad de volumen.
- Rendimiento.
- Retención de agua.
- Determinación del contenido de aire.

6.1. Diámetro del escurrimiento

Para realizar este ensayo se precisa un mortero normalizado con la siguiente composición en masa (UNE-EN 196-1, 2018, p. 22; UNE-EN 459-2, 2022, p. 69):

- Una parte de cal.
- Tres partes de arena normalizada CEN⁹.
- La cantidad de agua necesaria para obtener un valor de diámetro del escurrimiento definido.

A continuación, se describe el procedimiento operatorio del ensayo:

1. Se coloca la tolva –dispositivo de llenado– sobre el molde en el centro de la superficie limpia y seca de la mesa de sacudidas.
2. Se llena el molde hasta la mitad con una capa de mortero en estado fresco, mientras se mantienen el molde y la tolva firmemente unidos sobre la placa de la mesa de sacudidas.
3. Se realizan diez compactaciones ligeras con el pisón –barra de compactación–.
4. Se termina de llenar el molde con otra capa de mortero en estado fresco, mientras se mantienen el molde y la tolva firmemente unidos sobre la placa de la mesa de sacudidas.
5. Se retira la tolva.
6. Se enrasa la superficie del mortero con la regla.
7. Al cabo de 10-15 s, se retira el molde de forma lenta y verticalmente.
8. Se efectúan quince sacudidas manuales a la placa de forma periódica durante 15 s, una por segundo.
9. Se mide con la regla el diámetro de la torta en dos direcciones perpendiculares: el valor medio obtenido representa el diámetro del escurrimiento.

⁹ Ver Anexo III. Elaboración de bolsas de arena normalizada CEN en p. 103.



Figura 6.1. Molde, tolva, pisón y mesa de sacudidas

Fuente: elaboración propia



Figura 6.2. Mediciones de la torta

Fuente: elaboración propia

6.1.1. Cal blanca EN 459-1 NHL 3,5

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-2 (2022), se determina el valor de diámetro del escurrimiento de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 (pp. 64-70).

El ensayo del material, en forma de mortero en estado fresco, se lleva a cabo en el Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la EPS de la UA (España), con fecha 14 de junio de 2022 y con una duración aproximada de 1,5 h.

A continuación, se describe el procedimiento operatorio del ensayo:

1. En una balanza, se pesa una muestra suficiente de agua en una jarra de plástico pre-pesada.
2. En una balanza, se pesa una muestra de 450 g de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 en una bandeja de plástico pre-pesada.
3. En una balanza, se pesa una muestra de 1350 g de arena normalizada CEN en una bandeja de plástico pre-pesada.
4. Se realiza el amasado del mortero normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5¹⁰.
5. Se lleva a cabo el ensayo de diámetro del escurrimiento¹¹.

¹⁰ Ver Anexo I. Procedimiento de amasado del mortero normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 en p. 101.

¹¹ Ver apartado 6.1. Diámetro del escurrimiento en p. 38.

6. Se realizan tantas amasadas con diferentes cantidades de agua como sea necesario hasta obtener un valor de diámetro del escurrimiento de (165 ± 3) mm.

La siguiente tabla muestra los resultados del ensayo:

	Cal blanca	Arena CEN	Agua	Diámetros torta		Diámetro escurrimiento
1	450 g	1350 g	375 g	125 mm	126 mm	125,5 mm
2	450 g	1350 g	400 g	143 mm	142 mm	142,5 mm
3	450 g	1350 g	450 g	165 mm	164 mm	164,5 mm

Tabla 6.1. Ensayo de diámetro del escurrimiento –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–

Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, el valor obtenido durante el ensayo de diámetro del escurrimiento de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 es el siguiente:

Diámetro del escurrimiento	164,5 mm
----------------------------	----------

Tabla 6.2. Valor de diámetro del escurrimiento –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–

Fuente: elaboración propia

La siguiente tabla muestra la relación agua / conglomerante empleada para determinar el valor de diámetro del escurrimiento de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5:

Cal blanca	Agua	Relación a / c
450 g	450 g	1

Tabla 6.3. Relación agua / conglomerante –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–

Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, la dosificación en masa del mortero normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 está formada por:

- 1 parte de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5.
- 3 partes de arena normalizada CEN.
- 1 parte de agua.

En adelante, se utiliza esta dosificación como parámetro de referencia para realizar las amasadas de los distintos ensayos de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 que se llevan a cabo durante este trabajo de investigación.

6.1.2. Cal de Marrakech

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-2 (2022), se determina el valor de diámetro del escurrimiento de la *Cal de Marrakech* (pp. 64-70).

Debido al proceso de calcinación incompleta en hornos tradicionales de leña, la *Cal de Marrakech* incorpora agregados naturales en su composición que actúan como árido, por lo que el material se amasa directamente con agua, sin adición de arena (El Amrani et al., 2018, p. 754).

Sin embargo, la tabla 5 de la norma UNE-EN 459-2 (2022) establece que el procedimiento de amasado de las cales con propiedades hidráulicas –con el que se obtiene el valor de diámetro del escurrimiento– incluye una fase de adición de arena (p. 69.)

En consecuencia, para determinar el valor de diámetro del escurrimiento de la *Cal de Marrakech*, se decide adoptar el procedimiento de *amasado de la cal en pasta* con el que se obtiene el valor de consistencia normal (UNE-EN 459-2, 2022, pp. 53-54).

El ensayo del material, en forma de mortero en estado fresco, se lleva a cabo en el Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la EPS de la UA (España), con fecha 14 de junio de 2022 y con una duración aproximada de 2,5 h.

A continuación, se describe el procedimiento operatorio del ensayo:

1. En una balanza, se pesa una muestra suficiente de agua en una jarra de plástico pre-pesada.
2. En una balanza, se pesa una muestra de 500 g de *Cal de Marrakech* en una bandeja de plástico pre-pesada.
3. Se realiza el amasado del mortero de *Cal de Marrakech*¹².
4. Se lleva a cabo el ensayo de diámetro del escurrimiento¹³.

¹² Ver Anexo II. Procedimiento de amasado del mortero de *Cal de Marrakech* en p. 102.

¹³ Ver apartado 6.1. Diámetro del escurrimiento en p. 38.

6. Se realizan tantas amasadas con diferentes cantidades de agua como sea necesario hasta obtener un valor de diámetro del escurrimiento de (165 ± 3) mm¹⁴.

La siguiente tabla muestra los resultados del ensayo:

	<i>Cal Marrakech</i>	Agua	Diámetros torta		Diámetro escurrimiento
1	500 g	250 g	183 mm	184 mm	183,5 mm
2	500 g	240 g	176 mm	179 mm	177,5 mm
3	500 g	230 g	174 mm	174 mm	174 mm
4	500 g	220 g	134 mm	140 mm	137 mm
5	500 g	225 g	164 mm	164 mm	164 mm

Tabla 6.4. Ensayo de diámetro del escurrimiento –*Cal de Marrakech*–

Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, el valor obtenido durante el ensayo de diámetro del escurrimiento de la *Cal de Marrakech* es el siguiente:

Diámetro del escurrimiento	164 mm
----------------------------	--------

Tabla 6.5. Valor de diámetro del escurrimiento –*Cal de Marrakech*–

Fuente: elaboración propia

La siguiente tabla muestra la relación agua / conglomerante empleada para determinar el valor de diámetro del escurrimiento de la *Cal de Marrakech*:

<i>Cal Marrakech</i>	Agua	Relación a / c
500 g	225 g	0,45

Tabla 6.6. Relación agua / conglomerante –*Cal de Marrakech*–

Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, la dosificación en masa del mortero de *Cal de Marrakech* está formada por:

¹⁴ La tabla 4 de la norma UNE-EN 459-2 (2022) no especifica un valor característico de diámetro del escurrimiento para las cales hidráulicas naturales con una resistencia a compresión inferior a 2 MPa –ver Tabla 7.4. Valor de resistencia a compresión a los veintiocho días –*Cal de Marrakech*– en p. 65–, por lo que se decide adoptar el valor de referencia más cercano: NHL 2 = (165 ± 3) mm (p. 69).

- 1 parte de *Cal de Marrakech*.
- 0,45 partes de agua.

En adelante, se utiliza esta dosificación como parámetro de referencia para realizar las amasadas de los distintos ensayos de la *Cal de Marrakech* como mortero en estado fresco o endurecido que se llevan a cabo durante este trabajo de investigación¹⁵.

6.2. Tamaño de partícula

La siguiente tabla muestra los dos métodos de referencia existentes para obtener el tamaño de partícula, mediante tamices de diferentes aberturas:

Abertura tamiz	Método	Material
10 - 5 - 2 mm	Tamizado en seco	Cales vivas
0,2 - 0,09 mm	Tamizado por chorro de aire	Cales con propiedades hidráulicas

Tabla 6.7. Métodos para obtener el tamaño de partícula

Fuente: elaboración propia a partir de datos de norma UNE-EN 459-2 (2022)

Al no disponer del equipo necesario para realizar el ensayo de *tamizado por chorro de aire* —método de referencia para las cales con propiedades hidráulicas—, se decide adoptar el método de *tamizado en seco* para obtener el valor de todos los tamaños de partícula del mortero normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y de la *Cal de Marrakech*.

A continuación, se describe el procedimiento operatorio del ensayo:

1. En una balanza, se pesa una muestra de material en una bandeja de plástico pre-pesada.
2. Se calienta en el horno a una temperatura constante de 105 °C durante 12 h, hasta alcanzar masa constante.
3. Se saca del horno.
4. Se cubre para evitar que se absorba tanto el dióxido de carbono como el vapor de agua del ambiente.
5. Se enfría a temperatura ambiente.

¹⁵ Esta cuestión no es de aplicación a los ensayos de *Cal de Marrakech* en polvo.

6. Se vierte la muestra en la columna de tamizado formada por tapa, fondo y varios tamices de ensayo que se disponen, de arriba a abajo, en orden decreciente de paso de malla.
7. Se sacude la columna de forma mecánica en la máquina de tamizado durante 5 min.
8. Se separan los tamices uno a uno.
9. Se agita cada tamiz de forma manual con ayuda del fondo y la tapa, de forma que no se pierda material, comenzando con el de tamaño de abertura más grande.
10. Se trasvasa todo el material que pasa por cada tamiz sobre el inmediatamente inferior de la columna, antes de continuar la operación con el siguiente tamiz.
11. Se pesa el material retenido por cada tamiz y se registra su masa.
12. Se pesa el material que permanece en el fondo y se registra su masa.

En definitiva, tras separar el material en varias clasificaciones de tamaño de partícula decrecientes, la fracción de masa retenida en cada tamiz de ensayo se relaciona con la masa total de la muestra, según la siguiente ecuación:

$$R_i = \frac{R_i}{M_1} \times 100$$

Ecuación 6.1. Masa de material retenida en cada tamiz

Fuente: (UNE-EN 459-2, 2022, p. 37)

Donde:

- R_i es la masa de material retenida en cada tamiz, en g.
- M_1 es la masa total de la muestra, en g.

Asimismo, el porcentaje acumulado de material que pasa por cada tamiz se presenta en forma numérica, según la siguiente ecuación:

$$P_i = 100 - \text{acumulado } R_i$$

Ecuación 6.2. Porcentaje acumulado de material que pasa por cada tamiz

Fuente: (UNE-EN 459-2, 2022, p. 37)

Donde:

- P_i es el porcentaje acumulado de material que pasa por cada tamiz.
- R_i es la masa de material retenida en cada tamiz, en g.



Figura 6.3. Máquina de tamizado

Fuente: elaboración propia



Figura 6.4. Columna de tamizado

Fuente: elaboración propia

6.2.1. Mortero seco¹⁶ normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 196-1 (2018), se determina el valor de tamaño de partícula del mortero seco normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 (p. 10).

Para realizar este ensayo se precisa un mortero seco normalizado con la siguiente composición en masa (UNE-EN 196-1, 2018, p. 22):

- Una parte de cal.
- Tres partes de arena normalizada CEN.

El ensayo del material, en forma de polvo, se lleva a cabo en el Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la EPS de la UA (España), con fecha 28 de junio de 2022 y con una duración aproximada de 3 h.

La siguiente tabla muestra los resultados del ensayo:

¹⁶ Un mortero seco es aquel que no tiene agua en su composición, solamente conglomerante y arena.

Abertura tamiz	Retenido		Pasa
	Valor individual	Valor acumulado	Valor acumulado
2 mm	0,0 g	0,0 %	100,0 %
1,6 mm	5,1 g	5,4 %	94,6 %
1 mm	18,7 g	20,0 %	74,6 %
0,5 mm	24,9 g	26,2 %	48,4 %
0,16 mm	17,4 g	18,3 %	30,1 %
0,08 mm	11,2 g	11,8 %	18,3 %
Fondo	17,9 g	18,3 %	0,0 %
Total	95,2 g	100,0 %	-

Tabla 6.8. Ensayo de tamaño de partícula –mortero seco normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–

Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, el valor obtenido durante el ensayo de tamaño de partícula del mortero seco normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 es el siguiente:

Abertura tamiz	2 mm	1,6 mm	1 mm	0,5 mm	0,16 mm	0,08 mm	Fondo
Valor acumulado	0,0 %	5,4 %	25,4 %	51,6 %	69,9 %	81,7 %	100,0 %

Tabla 6.9. Valor de tamaño de partícula –mortero seco normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–

Fuente: elaboración propia

6.2.2. *Cal de Marrakech –como conglomerante–*¹⁷

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-2 (2022), se determina el valor de tamaño de partícula de la *Cal de Marrakech* como conglomerante (pp. 36-37).

¹⁷ La siguiente tabla muestra los diferentes tamaños de abertura de los tamices de ensayo en función del estado que presenta el material, así como la norma UNE correspondiente para su ensayo:

UNE-EN 459-2 –conglomerante–	UNE-EN 196-1 –mortero seco–
10 - 5 - 2 - 0,2 - 0,09 mm	2 - 1,6 - 1 - 0,5 - 0,16 - 0,08 mm

El ensayo del material, en forma de polvo, se lleva a cabo en el Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la EPS de la UA (España), con fecha 28 de junio de 2022 y con una duración aproximada de 2,5 h.

La siguiente tabla muestra los resultados del ensayo:

Abertura tamiz	Retenido		Pasa
	Valor individual	Valor acumulado	Valor acumulado
10 mm	0,0 g	0,0 %	100,0 %
5 mm	0,0 g	0,0 %	100,0 %
2 mm	3,0 g	3,7 %	96,3 %
0,2 mm	31,1 g	38,2 %	58,1 %
0,09 mm	15,2 g	18,7 %	39,4 %
Fondo	32,2 g	100,0 %	0,0 %
Total	81,5 g	100,0 %	-

Tabla 6.10. Ensayo de tamaño de partícula –*Cal de Marrakech* como conglomerante–

Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, el valor obtenido durante el ensayo de tamaño de partícula de la *Cal de Marrakech* como conglomerante es el siguiente:

Abertura tamiz	10 mm	5 mm	2 mm	0,2 mm	0,09 mm	Fondo
Valor acumulado	0,0 %	0,0 %	3,7 %	41,9 %	60,6 %	100,0 %

Tabla 6.11. Valor de tamaño de partícula –*Cal de Marrakech* como conglomerante–

Fuente: elaboración propia

6.2.3. *Cal de Marrakech* –como mortero seco–¹⁸

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 196-1 (2018), se determina el valor de tamaño de partícula de la *Cal de Marrakech* como mortero seco (p.º10).

¹⁸ Ver nota al pie 17 en p. 46.

El ensayo del material, en forma de polvo, se lleva a cabo en el Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la EPS de la UA (España), con fecha 28 de junio de 2022 y con una duración aproximada de 3 h.

La siguiente tabla muestra los resultados del ensayo:

Abertura tamiz	Retenido		Pasa
	Valor individual	Valor acumulado	Valor acumulado
2 mm	2,0 g	2,4 %	97,6 %
1,6 mm	8,0 g	9,6 %	88,0 %
1 mm	6,1 g	7,3 %	80,7 %
0,5 mm	12,2 g	14,7 %	66,0 %
0,16 mm	21,5 g	25,8 %	40,2 %
0,08 mm	10,4 g	12,5 %	27,7 %
Fondo	23,0 g	27,7 %	0,0 %
Total	83,2 g	100,0 %	-

Tabla 6.12. Ensayo de tamaño de partícula –*Cal de Marrakech* como mortero seco–

Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, el valor obtenido durante el ensayo de tamaño de partícula de la *Cal de Marrakech* como mortero seco es el siguiente:

Abertura tamiz	2 mm	1,6 mm	1 mm	0,5 mm	0,16 mm	0,08 mm	Fondo
Valor acumulado	2,4 %	12,0 %	19,3 %	34,0 %	59,8 %	72,3 %	100,0 %

Tabla 6.13. Valor de tamaño de partícula –*Cal de Marrakech* como mortero seco–

Fuente: elaboración propia

6.3. Densidad aparente¹⁹

6.3.1. *Cal de Marrakech*

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-2 (2022), se determina el valor de densidad aparente de la *Cal de Marrakech* (pp. 40-42).

¹⁹ La densidad aparente de un material considera el volumen total del mismo, es decir, tanto la parte sólida como los huecos existentes –accesibles e inaccesibles– (Prado Govea, s. f.).

Al no disponer del equipo necesario para realizar el ensayo, se decide improvisar un artefacto de fabricación casera lo más semejante posible al aparato de la figura 4 de la norma UNE-EN 459-2 (2022), que se compone de los siguientes elementos (p. 41):

- Una probeta cilíndrica de plástico con una capacidad de 0,656 l.
- Un trozo rectangular de cartón –mecanismo de apertura y cierre–.
- Un recipiente troncocónico de cartón –tolva o cabezal de llenado–.

Al retirar el mecanismo de apertura y cierre, el material contenido en la tolva cae dentro de la probeta cilíndrica.



Figura 6.5. Medidor de densidad aparente

Fuente: *directindustry.es*



Figura 6.6. Artefacto improvisado

Fuente: *elaboración propia*

El ensayo del material, en forma de polvo, se lleva a cabo en el Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la EPS de la UA (España), con fecha 22 de julio de 2022 y con una duración aproximada de 1,5 h.

A continuación, se describe el procedimiento operatorio del ensayo:

1. En una balanza, se pesa una muestra de 750 g de *Cal de Marrakech* en una bandeja de plástico pre-pesada.
2. Se calienta en el horno a una temperatura constante de 105 °C durante 12 h, hasta alcanzar masa constante.
3. Se saca del horno.
4. Se cubre para evitar que se absorba tanto el dióxido de carbono como el vapor de agua del ambiente.

5. Se vierte la muestra en la tolva del aparato con una cuchara metálica, procurando que la *Cal de Marrakech* rebase por encima del borde superior y adquiera un ángulo natural de inclinación.
6. Se abre el mecanismo de apertura y cierre.
7. Al cabo de 2 min, se retira la tolva vacía.
8. Se enrasa con una regla la *Cal de Marrakech* que rebasa por encima del borde superior del recipiente cilíndrico.
9. Se determina la masa del contenido del recipiente.
10. El ensayo se realiza tres veces, utilizando cada vez una muestra diferente de *Cal de Marrakech*.

La densidad aparente se corresponde con la media aritmética de los tres valores obtenidos, según la siguiente ecuación:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{s,sec}}{V_s}$$

Ecuación 6.3. Densidad aparente –*Cal de Marrakech*–

Fuente: (UNE-EN 459-2, 2022, p. 42)

Donde:

- ρ_{ap} es la densidad aparente, en kg / dm³.
- $m_{s,sec}$ es la masa de la muestra seca en el recipiente, en kg.
- V_s es el volumen del recipiente, en dm³.

La siguiente tabla muestra los resultados del ensayo:

	m	V	ρ
1	0,554 kg	0,656 dm ³	0,84 kg / dm ³
2	0,551 kg	0,656 dm ³	0,84 kg / dm ³
3	0,547 kg	0,656 dm ³	0,83 kg / dm ³

Tabla 6.14. Ensayo de densidad aparente –*Cal de Marrakech*–

Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, el valor obtenido durante el ensayo de densidad aparente de la *Cal de Marrakech* es el siguiente:

Densidad aparente	0,84 kg / dm ³
-------------------	---------------------------

Tabla 6.15. Valor de densidad aparente –*Cal de Marrakech*–

Fuente: elaboración propia

6.3.2. Mortero de Cal de Marrakech en estado endurecido

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 1015-10 (2007), se determina el valor de densidad aparente del mortero de *Cal de Marrakech* en estado endurecido (pp. 6-8).

El ensayo del material, en forma de mortero en estado endurecido, se lleva a cabo en el Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la EPS de la UA (España), con fecha 20 de julio de 2022 y con una duración aproximada de 1,5 h.

A continuación, se describe el procedimiento operatorio del ensayo:

1. Se utilizan tres probetas de ensayo de mortero endurecido de *Cal de Marrakech* de dimensiones 40 x 40 x 40 mm²⁰.
2. A los veintiocho días se sacan del armario húmedo, instantes previos al ensayo en cuestión.
3. Se calientan en el horno a una temperatura constante de 105 °C durante 12 h, hasta alcanzar masa constante.
4. Se sacan del horno.
5. Se cubren para evitar que se absorba tanto el dióxido de carbono como el vapor de agua del ambiente.
6. Se pesan las probetas y se registra su masa.
7. Se miden las probetas y se registran sus dimensiones.

La densidad aparente se corresponde con la media aritmética de los tres valores obtenidos, según la siguiente ecuación:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{s,sec}}{V_s}$$

Ecuación 6.4. Densidad aparente –mortero de *Cal de Marrakech* en estado endurecido–

Fuente: (UNE-EN 1015-10, 2007, p. 8)

Donde:

- ρ_{ap} es la densidad aparente, en kg / m³.
- $m_{s,sec}$ es la masa seca de la probeta de ensayo, en kg.
- V_s es el volumen seco de la probeta de ensayo, en m³.

La siguiente tabla muestra los resultados del ensayo:

²⁰ Ver Anexo IV. Elaboración de probetas de ensayo de mortero de *Cal de Marrakech* en p. 105.

Probeta	Dimensiones	$m_{s,sec}$	V_s	ρ_{ap}
1	0,04 x 0,04 x 0,039 m	0,074 kg	$62,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$	1185,897 kg / m^3
2	0,039 x 0,04 x 0,039 m	0,078 kg	$60,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$	1282,895 kg / m^3
3	0,04 x 0,04 x 0,039 m	0,077 kg	$62,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$	1233,974 kg / m^3

Tabla 6.16. Ensayo de densidad aparente –mortero de *Cal de Marrakech* en estado endurecido–

Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, el valor obtenido durante el ensayo de densidad aparente del mortero de *Cal de Marrakech* en estado endurecido es el siguiente:

Densidad aparente	1230 kg / m^3
-------------------	------------------------

Tabla 6.17. Valor de densidad aparente –mortero de *Cal de Marrakech* en estado endurecido–

Fuente: elaboración propia



Figura 6.7. Molde de acero

Fuente: elaboración propia

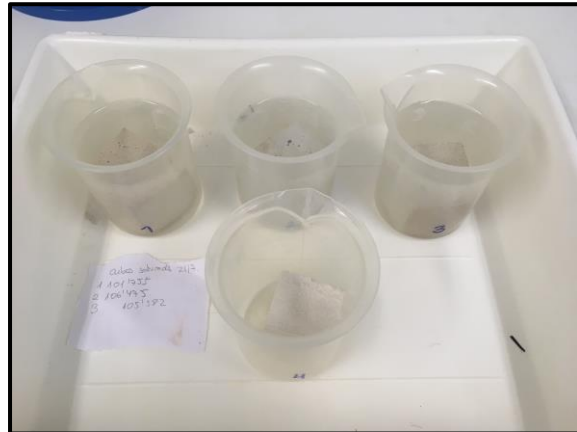


Figura 6.8. Probetas de 40 x 40 x 40 cm

Fuente: elaboración propia

6.4. Consistencia normal²¹

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-2(2022), se determina el valor de consistencia normal de la *Cal de Marrakech* (pp. 51-54).

El ensayo del material, en forma de mortero en estado fresco, se lleva a cabo en el Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la EPS de la UA (España), con fecha 6 de julio de 2022 y con una duración aproximada de 1 h.

A continuación, se describe el procedimiento operatorio del ensayo:

1. En una balanza, se pesa una muestra suficiente de agua en una jarra de plástico pre-pesada.
2. En una balanza, se pesa una muestra de 500 g de *Cal de Marrakech* en una bandeja de plástico pre-pesada.
3. Se realiza el amasado del mortero de *Cal de Marrakech*²²—.
4. Se coloca el molde troncocónico de plástico sobre la placa de vidrio ligeramente engrasada.

²¹ La consistencia es una de las propiedades del mortero en estado fresco que más influye en las prestaciones finales del material:

- Indica su trabajabilidad una vez amasado.
- Su valor depende del diámetro del escurrimiento.
- Se adquiere mediante la adición de agua a la mezcla de conglomerante y árido.
- Está directamente relacionada con la relación agua / conglomerante.
- Es determinante a la hora de alcanzar las propiedades resistentes del mortero en estado endurecido.

Se distinguen 3 tipos diferentes de consistencia (Chinchón Yepes, s. f., pp. 3-5):

Consistencia	Diámetro escurrimiento	Propiedades mortero
Seca (S)	< 140 mm	Mezclas excesivamente secas y no trabajables
Plástica (P)	140 - 200 mm	Mezclas trabajables que facilitan su puesta en obra
Fluida (F)	> 200 mm	Mezclas muy fluidas con tendencia a la segregación

²² Ver Anexo II. Procedimiento de amasado del mortero de *Cal de Marrakech* en p. 102.

6. Inmediatamente después de la preparación de la mezcla, el molde se llena de mortero en estado fresco con una cuchara metálica hasta que rebosa por el borde superior, sin compactación ni vibración excesiva.
7. Se elimina el exceso de mortero con una regla metálica, realizando movimientos transversales de sierra.
8. Se calibra el aparato de Vicat, bajando la sonda hasta que entre en contacto con la placa de vidrio.
9. Se ajusta la *puesta a cero* en la escala del aparato.
10. Se levanta la sonda hasta la posición de espera.
11. Se coloca el conjunto molde-placa de vidrio, lleno de mortero, bajo la sonda del aparato.
12. Se baja la sonda lentamente hasta que entre ligeramente en contacto con la parte superior del mortero.
13. En esta posición, se espera entre 1 y 2 s.
14. Se suelta la sonda, permitiendo que penetre verticalmente en el centro del mortero a los 4 min después del *instante cero*.
15. Se registra la lectura de la escala –distancia entre la parte inferior de la sonda y la placa de vidrio– al finalizar la penetración.
16. Se limpia la sonda tras cada penetración.
17. Se realizan tantas amasadas con diferentes cantidades de agua como sea necesario hasta obtener una lectura de (6 ± 2) mm.

En definitiva, la consistencia normal de una mezcla presenta una resistencia especificada a la penetración de una sonda normalizada, mientras que la cantidad de agua necesaria para su elaboración se determina mediante sucesivos ensayos de penetración en mezclas con diferentes contenidos de agua.

La siguiente tabla muestra los resultados del ensayo:

	<i>Cal Marrakech</i>	Agua	Penetración
1 ²³	500 g	225 g	7,5 mm

Tabla 6.18. Ensayo de consistencia normal –*Cal de Marrakech*–

Fuente: elaboración propia

²³ El valor requerido se alcanza en el primer intento, utilizando la misma dosificación empleada para obtener el valor de diámetro del escurrimiento –ver Tabla 6.6. Relación agua / conglomerante –*Cal de Marrakech*– en p. 42–.

Por lo tanto, el valor obtenido durante el ensayo de consistencia normal de la *Cal de Marrakech* es el siguiente:

	<i>Cal Marrakech</i>	Agua
Consistencia normal	500 g	225 g

Tabla 6.19. Valor de consistencia normal –*Cal de Marrakech*–

Fuente: elaboración propia

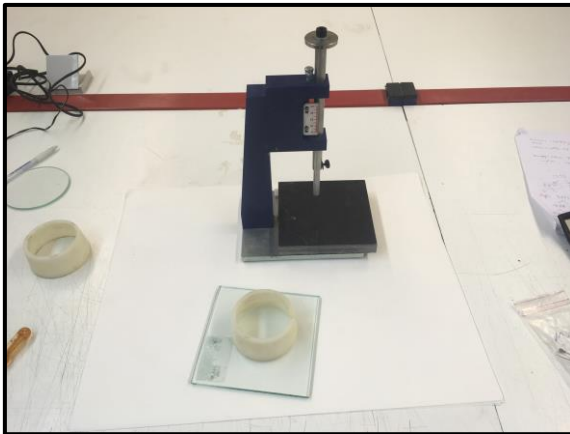


Figura 6.9. Aparato de Vicat, molde de plástico y placa de vidrio

Fuente: elaboración propia

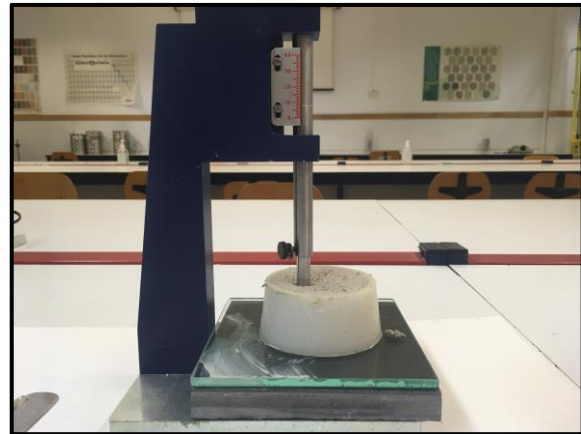


Figura 6.10. Ensayo de penetración

Fuente: elaboración propia

6.5. Tiempos de fraguado

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-2 (2022), se determinan los valores de tiempo de principio y de final de fraguado de la *Cal de Marrakech* (pp. 54-56).

El ensayo del material, en forma de mortero en estado fresco, se lleva a cabo en el Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la EPS de la UA (España), con fecha 6 y 7 de julio de 2022 y con una duración aproximada de 30 h.

A continuación, se describe el procedimiento operatorio del ensayo:

1. En una balanza, se pesa una muestra de 225 g de agua²⁴ en una jarra de plástico pre-pesada.
2. En una balanza, se pesa una muestra de 500 g de *Cal de Marrakech*²⁵ en una bandeja de plástico pre-pesada.
3. Se realiza el amasado del mortero de *Cal de Marrakech*²⁶.
4. Se coloca el molde troncocónico de plástico sobre la placa de vidrio ligeramente engrasada.
5. Inmediatamente después de la preparación de la mezcla, el molde se llena de mortero en estado fresco con una cuchara metálica hasta que rebosa por el borde superior, sin compactación ni vibración excesiva.
6. Se elimina el exceso de mortero con una regla metálica, realizando movimientos transversales de sierra.
7. Se calibra el aparato de Vicat, bajando la aguja de acero hasta que entre en contacto con la placa de vidrio.
8. Se ajusta la *puesta a cero* en la escala del aparato.
9. Se levanta la aguja hasta la posición de espera.
10. Se coloca el conjunto molde-placa de vidrio, lleno de mortero, bajo la aguja del aparato.
11. Se baja la aguja lentamente hasta que entre ligeramente en contacto con la parte superior del mortero.
12. En esta posición, se espera entre 1 y 2 s.
13. Se suelta la aguja, permitiendo que penetre verticalmente en el centro del mortero.
14. Se registra la lectura de la escala –distancia entre la parte inferior de la aguja y la placa de vidrio– y el tiempo transcurrido desde el *instante cero*.
15. Se limpia la aguja tras cada penetración.
16. Entre los sucesivos ensayos de penetración, se guarda el conjunto molde-placa de vidrio en una cámara húmeda²⁷.

²⁴ Ver Tabla 6.6. Relación agua / conglomerante –*Cal de Marrakech*– en p. 42.

²⁵ Ver nota al pie 24 en p. 56.

²⁶ Ver Anexo II. Procedimiento de amasado del mortero de *Cal de Marrakech* en p. 102.

²⁷ Como cámara húmeda se utiliza una caja de plástico con tapa, con varios recipientes llenos de agua en su interior, en la que se alcanza un valor de humedad relativa superior al 90 % (UNE-EN 459-2, 2022, p. 54).

17. Se realizan tantas penetraciones como sea necesario sobre la misma probeta en posiciones separadas, a una distancia mínima de 10 mm del borde del molde o entre ellas, hasta obtener una lectura de (6 ± 3) mm: este momento se considera como *tiempo de principio de fraguado* de la *Cal de Marrakech*.
18. Se invierte el molde sobre la placa de vidrio –los ensayos de tiempo de final de fraguado se realizan sobre la otra cara de la probeta–.
19. Se adapta la aguja con un accesorio anular.
20. Se realizan tantas penetraciones como sea necesario sobre la misma probeta en posiciones separadas, a una distancia mínima de 10 mm del borde del molde o entre ellas, hasta que el accesorio anular de la probeta penetra solamente 0,5 mm: este momento se considera como *tiempo de final de fraguado* de la *Cal de Marrakech*.

En definitiva, los tiempos de principio y de final de fraguado se determinan mediante la penetración de una aguja en una mezcla de consistencia normal hasta alcanzar unos valores especificados.

La siguiente tabla muestra los resultados del ensayo:

	Tiempo desde <i>instante cero</i>	Penetración
1	15 min	0 mm
2	30 min	0 mm
3	60 min	0 mm
4	120 min	0 mm
5	180 min	0 mm
6	300 min	0 mm
7	450 min	0 mm
8	1500 min	0 mm
9	1560 min	0 mm
10	1620 min	0 mm
11	1680 min	2 mm
12	1740 min	4 mm
13	1755 min	0,5 mm

Tabla 6.20. Ensayo de tiempos de fraguado –*Cal de Marrakech*–

Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, los valores del ensayo de tiempos de fraguado de la *Cal de Marrakech* son los siguientes:

Tiempo de principio de fraguado	1740 min
Tiempo de final de fraguado	1755 min

Tabla 6.21. Valores de tiempos de fraguado –*Cal de Marrakech*–

Fuente: elaboración propia

Se decide repetir el ensayo de tiempos de fraguado de la *Cal de Marrakech* y se obtienen resultados similares a los expuestos anteriormente.

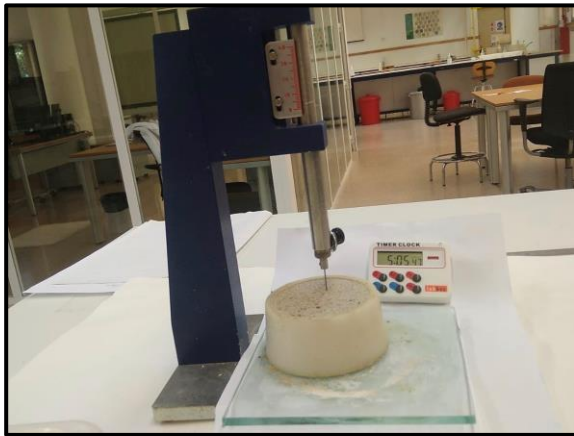


Figura 6.11. Ensayo de tiempos de fraguado

Fuente: elaboración propia



Figura 6.12. Cámara húmeda

Fuente: elaboración propia

6.6. Reactividad²⁸

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-2 (2022), se determina el valor de reactividad de la *Cal de Marrakech* (pp. 56-62).

El ensayo del material, en forma de polvo, se lleva a cabo en el Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la EPS de la UA (España), con fecha 26 de julio de 2022 y con una duración aproximada de 1 h.

A continuación, se describe el procedimiento operatorio del ensayo:

²⁸ A pesar de tratarse de un ensayo prescrito únicamente para las cales vivas (UNE-EN 459-1, 2016), se decide comprobar la reacción exotérmica que se produce cuando el árido de la *Cal de Marrakech*, presente de forma natural en el material, entra en contacto con el agua (p. 13).

1. En una balanza, se pesan dos muestras de agua, de 600 y 1200 g respectivamente, en dos jarras de plástico pre-pesadas.
2. En una balanza, se pesa una muestra de 300 g de *Cal de Marrakech* en una bandeja de plástico pre-pesada.
3. Se introduce la muestra de 600 g de agua en el vaso Dewar.
4. Se inserta el termómetro y el agitador de paletas.
5. Se pone en marcha la máquina.
6. Se comprueba que la temperatura se mantiene constante.
7. Con el agitador en marcha, se introduce la muestra de 1200 g de agua.
8. A continuación, se introduce la muestra de *Cal de Marrakech*.
9. Se anota el instante final de la adición de la *Cal de Marrakech* como *instante cero*.
10. Se mide la temperatura del interior del vaso de forma periódica y se registra el tiempo transcurrido desde el *instante cero*.
11. El valor de reactividad se expresa como el tiempo necesario para alcanzar la temperatura máxima.

En definitiva, la reactividad se determina midiendo el aumento de temperatura que se produce en la reacción del material con el agua.

La siguiente tabla muestra los resultados del ensayo:

	Tiempo	Temperatura
1	30 s	20,3 °C
2	60 s	20,3 °C
3	120 s	20,3 °C
4	180 s	20,4 °C
5	240 s	20,4 °C
6	300 s	20,5 °C
7	360 s	20,5 °C
8	420 s	20,5 °C
9	480 s	20,5 °C
10	540 s	20,4 °C

Tabla 6.22. Ensayo de reactividad –*Cal de Marrakech*–

Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, el valor obtenido durante el ensayo de reactividad de la *Cal de Marrakech* es el siguiente:

Reactividad

0 min

Tabla 6.23. Valor de reactividad –*Cal de Marrakech*–

Fuente: elaboración propia



Figura 6.13. Vaso Dewar

Fuente: elaboración propia



Figura 6.14. Termómetro

Fuente: elaboración propia

7. ENSAYOS MECÁNICOS

En este capítulo se llevan a cabo los siguientes ensayos mecánicos en laboratorio:

1. Resistencia a flexión:
 - *Cal de Marrakech*.
2. Resistencia a compresión:
 - *Cal de Marrakech*.
3. Resistencia a la adhesión:
 - Mortero de *Cal de Marrakech* en estado endurecido.

7.1. Resistencia a flexión

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 196-1 (2018), se determina el valor de resistencia a flexión a los veintiocho días de la *Cal de Marrakech* (pp. 25-26).

El ensayo del material, en forma de mortero en estado endurecido, se lleva a cabo en el Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la EPS de la UA (España), con fecha 12 de julio de 2022 y con una duración aproximada de 1 h.

A continuación, se describe el procedimiento operatorio del ensayo:

1. Se utilizan diez²⁹ probetas de ensayo de mortero endurecido de *Cal de Marrakech* de dimensiones 160 x 40 x 40 mm³⁰.
2. A los veintiocho días se sacan del armario húmedo, instantes previos al ensayo en cuestión.
3. Se coloca la probeta sobre la máquina de ensayo.
4. Se incrementa la carga verticalmente y de manera uniforme sobre la parte central de su cara superior, hasta la rotura.
5. Se registra el resultado obtenido.
6. Se conservan las mitades de los prismas utilizados cubiertas con un paño húmedo hasta la realización del ensayo de resistencia a compresión.

²⁹ Durante el proceso de desmoldeado, dos de las doce probetas se parten por la mitad, por lo que se descartan para realizar el ensayo.

³⁰ Ver Anexo IV. Elaboración de probetas de ensayo de mortero de *Cal de Marrakech* en p. 105.

7. El ensayo se repite diez veces, una por cada probeta.

En definitiva, se utiliza el método de carga de los tres puntos en una máquina de ensayo de resistencia a compresión que incorpora un dispositivo apropiado para medir la resistencia a flexión.

La resistencia a flexión se corresponde con la media aritmética de los diez valores obtenidos, según la siguiente ecuación:

$$R_f = \frac{1'5 \times F_f \times l}{b^3}$$

Ecuación 7.1. Resistencia a flexión

Fuente: (UNE-EN 196-1, 2018, p. 25)

Donde:

- R_f es la resistencia a flexión, en MPa.
- b es el lado de la sección cuadrada del prisma, en mm.
- F_f es la carga aplicada en la mitad del prisma en el momento de la rotura, en N.
- l es la distancia entre soportes, en mm.

La siguiente tabla muestra los valores del ensayo:

Probeta	F_f	b	l	R_f
1	82 N	40 mm	100 mm	0,2 MPa
2	119 N	40 mm	100 mm	0,3 MPa
3	160 N	40 mm	100 mm	0,4 MPa
4	237 N	40 mm	100 mm	0,6 MPa
5	129 N	40 mm	100 mm	0,3 MPa
6	175 N	40 mm	100 mm	0,4 MPa
7	204 N	40 mm	100 mm	0,5 MPa
8	136 N	40 mm	100 mm	0,3 MPa
9	152 N	40 mm	100 mm	0,4 MPa
10	170 N	40 mm	100 mm	0,4 MPa

Tabla 7.1. Ensayo de resistencia a flexión –*Cal de Marrakech*–

Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, el valor obtenido durante el ensayo de resistencia a flexión a los veintiocho días de la *Cal de Marrakech* es el siguiente:

Resistencia a flexión a los veintiocho días	0,4 MPa
---	---------

Tabla 7.2. Valor de resistencia a flexión a los veintiocho días –*Cal de Marrakech*–

Fuente: elaboración propia



Figura 7.1. Ensayo de resistencia a flexión

Fuente: elaboración propia



Figura 7.2. Probetas de ensayo

Fuente: elaboración propia

7.2. Resistencia a compresión³¹

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 196-1 (2018), se determina el valor de resistencia a compresión a los veintiocho días de la *Cal de Marrakech* (pp. 26-27).

El ensayo del material, en forma de mortero en estado endurecido, se lleva a cabo en el Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la EPS de la UA (España), con fecha 12 de julio de 2022 y con una duración aproximada de 2 h.

A continuación, se describe el procedimiento operatorio del ensayo:

1. Se utilizan los veinte semiprismas resultantes de las diez probetas de ensayo con las que se determina el valor de la resistencia a flexión de la *Cal de Marrakech*.
2. Se coloca el semiprisma sobre la máquina de ensayo.

³¹ Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-2 (2022), la resistencia a compresión se determina de acuerdo con la norma UNE-EN 196-1 (2018) (p. 75).

3. Se incrementa la carga verticalmente y de manera uniforme sobre sus caras laterales, hasta la rotura.
4. Se registra el resultado obtenido.
5. El ensayo se repite veinte veces, una por cada semiprisma.

La resistencia a compresión se corresponde con la media aritmética de los veinte valores obtenidos, según la siguiente ecuación:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

Ecuación 7.2. Resistencia a compresión

Fuente: (UNE-EN 196-1, 2018, p. 26)

Donde:

- R_c es la resistencia a compresión, en MPa.
- F_c es la carga aplicada en el momento de la rotura, en N.
- 1600 es la superficie de las placas auxiliares, en mm².

La siguiente tabla muestra los valores del ensayo:

Semiprisma	F_c	R_c	Semiprisma	F_c	R_c
1.1	1561 N	1,0 MPa	1.2	1719 N	1,1 MPa
2.1	1408 N	0,9 MPa	2.2	1442 N	0,9 MPa
3.1	1485 N	0,9 MPa	3.2	1223 N	0,8 MPa
4.1	1422 N	0,9 MPa	4.2	1687 N	1,1 MPa
5.1	1497 N	0,9 MPa	5.2	1498 N	0,9 MPa
6.1	1382 N	0,9 MPa	6.2	1518 N	0,9 MPa
7.1	1376 N	0,9 MPa	7.2	1239 N	0,8 MPa
8.1	1762 N	1,1 MPa	8.2	1721 N	1,1 MPa
9.1	1694 N	1,1 MPa	9.2	1613 N	1,0 MPa
10.1	1576 N	1,0 MPa	10.2	1467 N	0,9 MPa

Tabla 7.3. Ensayo de resistencia a compresión –*Cal de Marrakech*–

Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, el valor obtenido durante el ensayo de resistencia a compresión a los veintiocho días de la *Cal de Marrakech* es el siguiente:

Resistencia a compresión a los veintiocho días

0,9 MPa

Tabla 7.4. Valor de resistencia a compresión a los veintiocho días –*Cal de Marrakech*–*Fuente: elaboración propia*

Figura 7.3. Ensayo de resistencia a compresión

Fuente: elaboración propia

Figura 7.4. Máquina de ensayo

Fuente: elaboración propia

7.3. Resistencia a la adhesión

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 1015-12 (2016), se determina el valor de resistencia a la adhesión a los veintiocho días del mortero de *Cal de Marrakech* en estado endurecido (pp. 7-13).

El ensayo del material, en forma de mortero en estado endurecido, se lleva a cabo en el Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la EPS de la UA (España), con fecha 12 de julio de 2022 y con una duración aproximada de 2 h.

A continuación, se describe el procedimiento operatorio del ensayo:

1. Se sumergen dos bardos cerámicos de dimensiones 700 x 235 x 33 mm durante 2 h en un recipiente de plástico lleno de agua.
2. En una balanza, se pesan dos muestras de 607,5 g de agua³² –una por bardo– en una jarra de plástico pre-pesada.

³² Ver Tabla 6.6. Relación agua / conglomerante –*Cal de Marrakech*– en p. 42.

4. En una balanza, se pesan dos muestras de 1350 g de *Cal de Marrakech*³³ —una por bardo— en una bandeja de plástico pre-pesada.
5. Se realizan las dos amasadas —una por bardo— del mortero de *Cal de Marrakech*³⁴.
6. Inmediatamente después de la preparación de la mezcla, se extiende una capa de mortero de 10 mm de espesor sobre cada bardo con un fratás de madera.
7. Se cortan varios círculos de 50 mm de diámetro en las capas de mortero fresco aplicadas sobre los bardos con un anillo troncocónico de acero inoxidable.
8. Tras el fraguado inicial, se coloca un anillo sobre cada círculo.
9. Se presiona y se gira suavemente hasta que entra en contacto total con el soporte cerámico.
10. Se extrae con cuidado, girándolo suavemente.
11. Se colocan los bardos sobre una superficie horizontal en el armario húmedo.
12. A los veintiocho días se sacan del armario húmedo, instantes previos al ensayo en cuestión.
13. Se etiquetan los círculos.
14. Las pastillas para tracción de acero inoxidable se unen a los centros de cada círculo con resina epoxi bicomponente.
15. Se deja secar la resina epoxi bicomponente.
16. Con ayuda del equipo de tracción, se incrementa la carga de manera uniforme en dirección perpendicular a la pastilla, hasta la rotura.
17. Se registra el resultado obtenido.
18. El ensayo se repite diecinueve veces, una por cada círculo.

En definitiva, se trata de determinar la resistencia de unión entre un mortero para revestimiento y un soporte cerámico aplicando una carga de tracción sobre una pieza pegada a la superficie del material.

La resistencia a la adhesión se corresponde con la media aritmética de los seis³⁵ valores obtenidos, según la siguiente ecuación:

³³ Ver nota al pie 32 en p. 65.

³⁴ Ver Anexo II. Procedimiento de amasado del mortero de *Cal de Marrakech* en p. 102.

³⁵ Se descartan aquellos valores de rotura que no alcanzan el mínimo detectable por el equipo de tracción.

$$f_u = \frac{F_u}{A}$$

Ecuación 7.3. Resistencia a la adhesión

Fuente: (UNE-EN 1015-12, 2016, p. 11)

Donde:

- f_u es la resistencia a la adhesión, en N / mm².
- F_u es la carga aplicada en el momento de la rotura, en N.
- A es el área de la superficie de ensayo de la probeta cilíndrica, en mm².

La siguiente tabla muestra los valores del ensayo:

Probeta	F_u	A	f_u
1	-	1963,5 mm ²	-
2	-	1963,5 mm ²	-
3	176,58 N	1963,5 mm ²	0,1 N / mm ²
4	156,96 N	1963,5 mm ²	0,1 N / mm ²
5	-	1963,5 mm ²	-
6	-	1963,5 mm ²	-
7	235,44 N	1963,5 mm ²	0,1 N / mm ²
8	-	1963,5 mm ²	-
9	-	1963,5 mm ²	-
10	-	1963,5 mm ²	-
11	-	1963,5 mm ²	-
12	-	1963,5 mm ²	-
13	-	1963,5 mm ²	-
14	9,81 N	1963,5 mm ²	0,0 N / mm ²
15	9,81 N	1963,5 mm ²	0,0 N / mm ²
16	-	1963,5 mm ²	-
17	-	1963,5 mm ²	-
18	117,72 N	1963,5 mm ²	0,05 N / mm ²
19	-	1963,5 mm ²	-

Tabla 7.5. Ensayo de resistencia a la adhesión –mortero de *Cal de Marrakech* en estado endurecido–

Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, el valor obtenido durante el ensayo de resistencia a la adhesión a los veintiocho días del mortero de *Cal de Marrakech* en estado endurecido es el siguiente:

Resistencia a la adhesión a los veintiocho días	0,1 N / mm ²
---	-------------------------

Tabla 7.6. Valor de resistencia a la adhesión a los veintiocho días –mortero de *Cal de Marrakech* en estado endurecido–

Fuente: elaboración propia

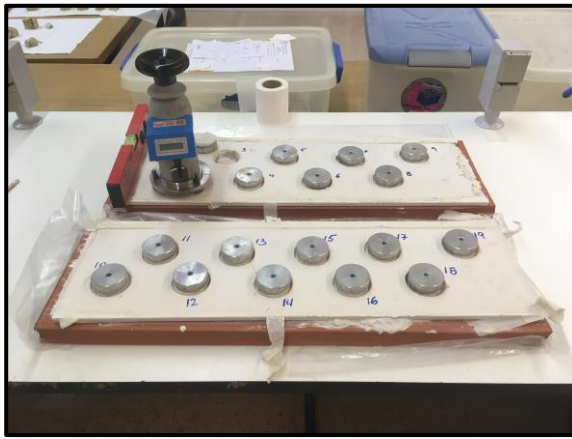


Figura 7.5. Ensayo de resistencia a la adhesión

Fuente: elaboración propia

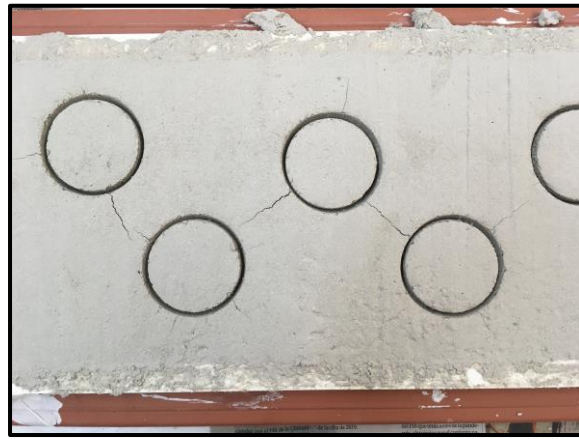


Figura 7.6. Marcado de círculos

Fuente: elaboración propia

8. COMPARATIVA DE RESULTADOS

En este capítulo se interpretan los resultados de los diferentes ensayos en laboratorio de los siguientes materiales:

- Cal blanca EN 459-1 NHL 3,5.
- Mortero normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5.
- *Cal de Marrakech*.

8.1. Espectroscopia de energía dispersiva de rayos X

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-1 (2016), se realiza una tabla comparativa con los resultados del ensayo químico de espectroscopia de energía dispersiva de rayos X de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y de la *Cal de Marrakech* (p. 20):

	Espectroscopia de energía dispersiva de rayos X							
	C	O	Mg	Al	Si	Cl	Ca	Fe
Cal blanca	13,6 %	41,6 %	0,2 %	0,4 %	3,5 %	-	40,7 %	-
<i>Cal Marrakech</i>	11,8 %	44,9 %	1,0 %	1,8 %	3,1 %	0,2 %	36,6 %	0,6 %

Tabla 8.1. Valores característicos de espectroscopia de energía dispersiva de rayos X –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y *Cal de Marrakech*–

Fuente 1 –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–: (Servicios Técnicos de Investigación, 2022a)

Fuente 2 –*Cal de Marrakech*–: (Servicios Técnicos de Investigación, 2022b)

En relación con el ensayo de espectroscopia de energía dispersiva de rayos X, se realizan las siguientes consideraciones:

- La tabla 16 de la norma UNE-EN 459-1 (2016) no especifica un valor característico para los elementos químicos presentes en las cales hidráulicas naturales, sino solamente para determinados compuestos como los sulfatos (SO_3) y la cal útil ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (p. 20).

La siguiente figura muestra una comparativa entre la composición química de ambos materiales, donde:

- El eje de abscisas representa los distintos elementos químicos presentes en cada material.
- El eje de ordenadas representa el porcentaje en masa de cada elemento químico.

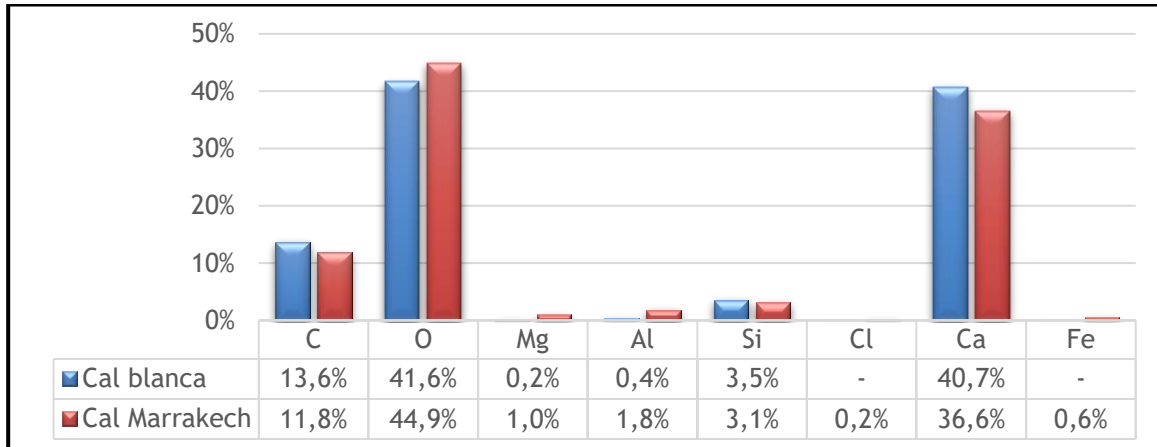


Figura 8.1. Valores de espectroscopia de energía dispersiva de rayos X –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y Cal de Marrakech–

Fuente 1 –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–: elaboración propia a partir de datos de Servicios Técnicos de Investigación (2022a)

Fuente 2 –Cal de Marrakech–: elaboración propia a partir de datos de Servicios Técnicos de Investigación (2022b)

8.2. Agua libre

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-1 (2016), se realiza una tabla comparativa con el resultado del ensayo químico de agua libre de la *Cal de Marrakech* y el valor obtenido de la ficha técnica de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 (p. 21):

	Agua libre			
	NHL < 2	NHL 2	NHL 3,5	NHL 5
	-	≤ 2 %	≤ 2 %	≤ 2 %
Cal blanca			0,90 %	
Cal Marrakech	1,87 %			

Tabla 8.2. Valores característicos de agua libre –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y Cal de Marrakech–

Fuente 1 –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–: ficha técnica (Cales Pascual, s. f.)

Fuente 2 –Cal de Marrakech–: elaboración propia

En relación con el ensayo de agua libre, se realizan las siguientes consideraciones:

- La tabla 18 de la norma UNE-EN 459-1 (2016) no especifica un valor característico de agua libre para las cales hidráulicas naturales con una resistencia a compresión inferior a 2 MPa, por lo que se decide adoptar el valor de referencia más cercano: $NHL\ 2 \leq 2\ \%$. En este supuesto, *la Cal de Marrakech cumple los requisitos de la norma* (p. 21).
- La cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 cumple los requisitos de la norma.

8.3. Pérdida por calcinación

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-1 (2016), se realiza una tabla comparativa con el resultado del ensayo químico de pérdida por calcinación de la *Cal de Marrakech* y el valor obtenido de la ficha técnica de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 (p. 21):

	Pérdida por calcinación
Cal blanca	-
<i>Cal Marrakech</i>	15,26 %

Tabla 8.3. Valores característicos de pérdida por calcinación –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y *Cal de Marrakech*–

Fuente 1 –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–: ficha técnica (Cales Pascual, s. f.)

Fuente 2 –Cal de Marrakech–: elaboración propia

En relación con el ensayo de pérdida por calcinación, se realizan las siguientes consideraciones:

- La tabla 18 de la norma UNE-EN 459-1 (2016) no especifica un valor característico de pérdida por calcinación para las cales hidráulicas naturales (p. 21).
- La ficha técnica no establece un valor para la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5.
- Por lo tanto, *no es posible realizar una comparativa* entre ambos materiales.

8.4. Diámetro del escurrimiento

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-2 (2022), se realiza una tabla comparativa con los resultados del ensayo físico de diámetro del escurrimiento de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y de la *Cal de Marrakech* (pp. 64-70):

	Diámetro del escurrimiento			
	NHL < 2	NHL 2	NHL 3,5	NHL 5
	-	(165 ± 3) mm	(165 ± 3) mm	(185 ± 3) mm
Cal blanca			164,5 mm	
<i>Cal Marrakech</i>	164 mm			
	Relación agua / conglomerante			
	Conglomerante	Agua	Arena	Relación a / c
Cal blanca	450 g	450 g	1350 g	1
<i>Cal Marrakech</i>	500 g	225 g	-	0,45

Tabla 8.4. Valores característicos de diámetro del escurrimiento –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y *Cal de Marrakech*–

Fuente: elaboración propia

En relación con el ensayo de diámetro del escurrimiento, se realizan las siguientes consideraciones:

- La tabla 4 de la norma UNE-EN 459-2 (2022) no especifica un valor característico de diámetro del escurrimiento para las cales hidráulicas naturales con una resistencia a compresión inferior a 2 MPa, por lo que se decide adoptar el valor de referencia más cercano: NHL 2 = (165 ± 3) mm (p. 69). En este supuesto, *la Cal de Marrakech cumple los requisitos de la norma.*
- La cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 cumple los requisitos de la norma.

8.5. Tamaño de partícula

8.5.1. Cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y Cal de Marrakech

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-1 (2016), se realiza una tabla comparativa con el resultado del ensayo físico de tamaño de partícula de la *Cal de Marrakech* y el valor obtenido de la ficha técnica de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 (p. 21):

	Tamaño de partícula				
	Retención acumulada				
	10 mm	5 mm	2 mm	0,2 mm	0,09 mm
	0 %	0 %	0 %	≤ 2 %	≤ 15 %
Cal blanca	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,6 %
<i>Cal Marrakech</i>	0,0 %	0,0 %	3,7 %	41,8 %	60,5 %

Tabla 8.5. Valores característicos de tamaño de partícula –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y *Cal de Marrakech*–

Fuente 1 –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–: ficha técnica (Cales Pascual, s. f.)

Fuente 2 –*Cal de Marrakech*–: elaboración propia

En relación con el ensayo de tamaño de partícula, se realizan las siguientes consideraciones:

- La *Cal de Marrakech* supera los valores característicos permitidos para los pasos de malla 2 - 0,2 - 0,09 mm, por lo que *no cumple los requisitos de la norma*.
- La cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 cumple los requisitos de la norma.

La siguiente figura muestra una comparativa entre el tamaño de partícula de ambos materiales y los valores característicos permitidos por la norma UNE-EN 459-1 (2016), donde:

- El eje de abscisas representa el tamaño de abertura del tamiz, en mm.
- El eje de ordenadas representa el porcentaje acumulativo de retención durante el tamizado.

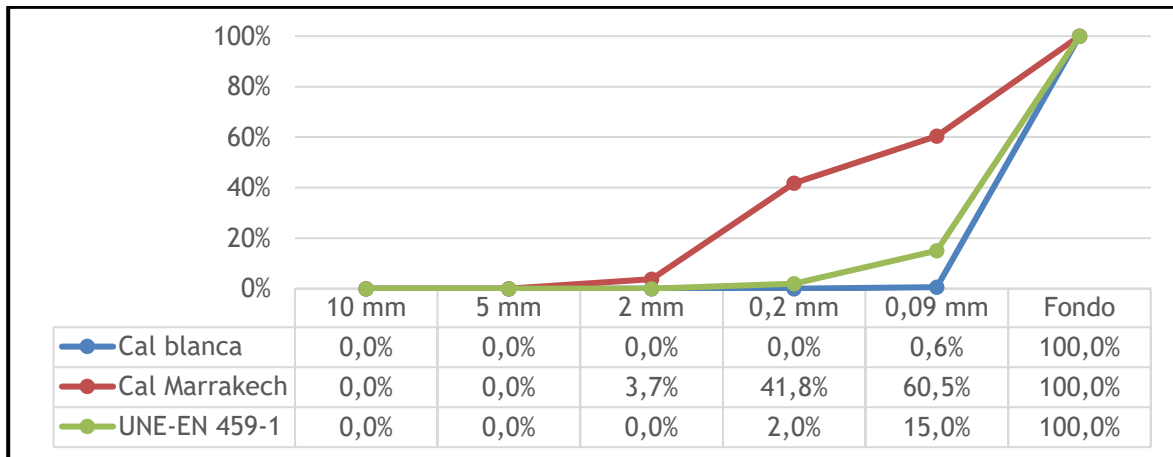


Figura 8.2. Tamaño de partícula –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y Cal de Marrakech–

Fuente 1 –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–: elaboración propia a partir de datos de ficha técnica (Cales Pascual, s. f.)

Fuente 2 –Cal de Marrakech–: elaboración propia

Fuente 3: elaboración propia a partir de datos de norma UNE-EN 459-1 (2016)

8.5.2. Mortero seco normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y mortero seco de Cal de Marrakech

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 196-1 (2018), se realiza una tabla comparativa con los resultados del ensayo físico de tamaño de partícula del mortero seco normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y del mortero seco de Cal de Marrakech:

	Tamaño de partícula					
	Retención acumulada					
	2 mm	1,6 mm	1 mm	0,5 mm	0,16 mm	0,08 mm
Mortero cal 1:3	0,0 %	5,4 %	25,4 %	51,6 %	69,9 %	81,7 %
Cal Marrakech	2,4 %	12,0 %	19,3 %	34,0 %	59,8 %	72,3 %

Tabla 8.6. Valores característicos de tamaño de partícula –mortero seco normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y mortero seco de Cal de Marrakech–

Fuente: elaboración propia

En relación con el tamaño de partícula, se realizan las siguientes consideraciones:

- La norma UNE-EN 196-1 (2018) no especifica un valor característico de tamaño de partícula para los morteros de cal.

La siguiente figura muestra una comparativa entre el tamaño de partícula de ambos materiales, donde:

- El eje de abscisas representa el tamaño de abertura del tamiz, en mm.
- El eje de ordenadas representa el porcentaje acumulativo de retención durante el tamizado.

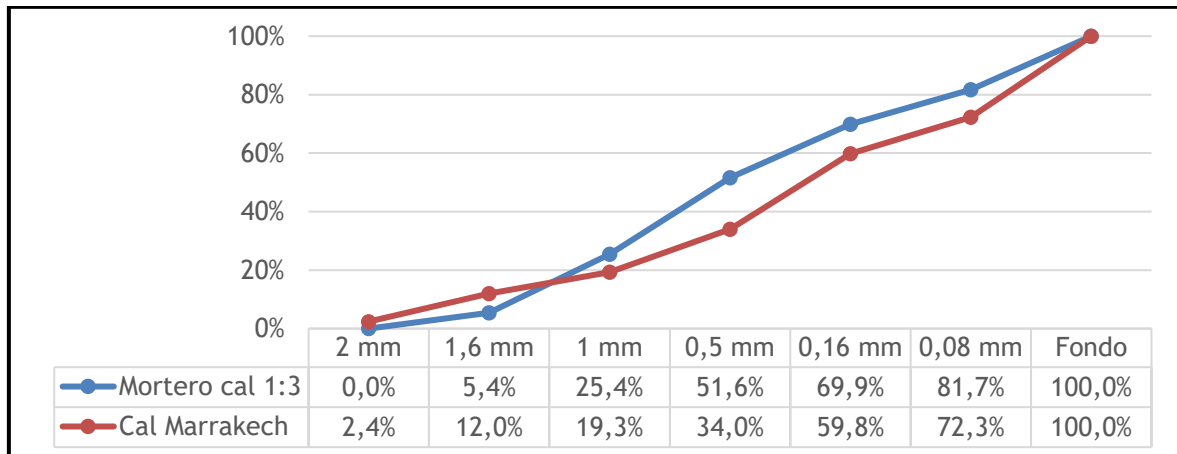


Figura 8.3. Tamaño de partícula —mortero seco normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y mortero seco de Cal de Marrakech—

Fuente: elaboración propia

8.5.3. Otros morteros secos de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y mortero seco de Cal de Marrakech

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 196-1 (2018), se realiza una tabla comparativa con los resultados del ensayo físico de tamaño de partícula de otros morteros secos de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y del mortero seco de Cal de Marrakech:

	Tamaño de partícula					
	Retención acumulada					
	2 mm	1,6 mm	1 mm	0,5 mm	0,16 mm	0,08 mm
Mortero cal 1:2	0,0 %	4,8 %	22,3 %	45,8 %	63,4 %	75,1 %
Cal Marrakech	2,4 %	12,0 %	19,3 %	34,0 %	59,8 %	72,3 %
Mortero cal 1:1	0,0 %	3,6 %	16,7 %	34,9 %	51,3 %	62,6 %

Tabla 8.7. Valores característicos de tamaño de partícula —otros morteros secos de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y mortero seco de Cal de Marrakech—

Fuente: elaboración propia

En relación con el tamaño de partícula, se realizan las siguientes consideraciones:

- La norma UNE-EN 196-1 (2018) no especifica un valor característico de tamaño de partícula para los morteros de cal.

La siguiente figura muestra una comparativa entre el tamaño de partícula de los diferentes materiales, donde:

- El eje de abscisas representa el tamaño de abertura del tamiz, en mm.
- El eje de ordenadas representa el porcentaje acumulativo de retención durante el tamizado.

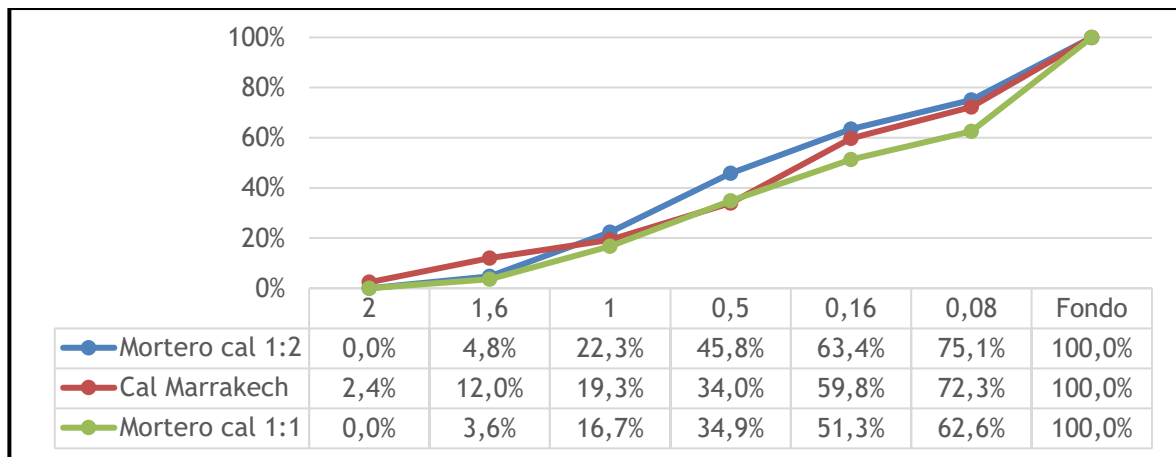


Figura 8.4. Tamaño de partícula —otros morteros secos de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y mortero seco de *Cal de Marrakech*—

Fuente: elaboración propia

8.6. Densidad aparente

8.6.1. *Cal de Marrakech*

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-1 (2016), se realiza una tabla comparativa con el resultado del ensayo físico de densidad aparente de la *Cal de Marrakech* y el valor obtenido de la ficha técnica de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 (p. 21):

	Densidad aparente
Cal blanca	0,68 kg / dm ³
Cal Marrakech	0,84 kg / dm ³

Tabla 8.8. Valores característicos de densidad aparente –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y Cal de Marrakech–

Fuente 1 –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–: ficha técnica (Cales Pascual, s. f.)

Fuente 2 –Cal de Marrakech–: elaboración propia

En relación con el ensayo de densidad aparente, se realizan las siguientes consideraciones:

- La tabla 18 de la norma UNE-EN 459-1 (2016) no especifica un valor característico de densidad aparente para las cales hidráulicas naturales (p. 21).

8.6.2. Mortero de Cal de Marrakech en estado endurecido

A continuación, se realiza una tabla comparativa con el resultado del ensayo físico de densidad aparente del mortero de *Cal de Marrakech* en estado endurecido y el valor obtenido de la ficha técnica de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5:

	Densidad aparente
Mortero cal 1:3	-
Cal Marrakech	1230 kg / m ³

Tabla 8.9. Valores característicos de densidad aparente –mortero normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y mortero de Cal de Marrakech en estado endurecido–

Fuente 1 –mortero normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–: elaboración propia a partir de datos de ficha técnica (Cales Pascual, s. f.)–

Fuente 2 –mortero de Cal de Marrakech en estado endurecido–: elaboración propia

En relación con el ensayo de densidad aparente, se realizan las siguientes consideraciones:

- La norma UNE-EN 1015-10 (2007) no especifica un valor característico de densidad aparente para los morteros de cal.
- La ficha técnica no establece un valor para el mortero normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5.
- Por lo tanto, *no es posible realizar una comparativa* entre ambos materiales.

8.7. Consistencia normal

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-2 (2022), se realiza una tabla comparativa con el resultado del ensayo físico de consistencia normal de la *Cal de Marrakech* y el valor obtenido de la ficha técnica de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 (pp. 51-54):

	Consistencia normal	
	Penetración (6 ± 2 mm)	
	Conglomerante	Agua
Cal blanca	-	-
<i>Cal Marrakech</i>	7,5 mm	-
	Conglomerante	Agua
Cal blanca	-	-
<i>Cal Marrakech</i>	500 g	225 g

Tabla 8.10. Valores característicos de consistencia normal –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y *Cal de Marrakech*–

Fuente 1 –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–: ficha técnica (Cales Pascual, s. f.)

Fuente 2 –*Cal de Marrakech*–: elaboración propia

En relación con el ensayo de consistencia normal, se realizan las siguientes consideraciones:

- La ficha técnica no establece un valor para la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5.
- Por lo tanto, *no es posible realizar una comparativa* entre ambos materiales.

8.8. Tiempos de fraguado

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-1 (2016), se realiza una tabla comparativa con el resultado del ensayo físico de tiempos de fraguado de la *Cal de Marrakech* y el valor obtenido de la ficha técnica de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 (p. 21):

	Principio de fraguado			
	NHL < 2	NHL 2	NHL 3,5	NHL 5
	-	> 1 h	> 1 h	> 1 h
Cal blanca			6,8 h	
<i>Cal Marrakech</i>	29 h			
	Final de fraguado			
	NHL < 2	NHL 2	NHL 3,5	NHL 5
	-	≤ 40 h	≤ 30 h	≤ 15 h
Cal blanca			-	
<i>Cal Marrakech</i>	29,25 h			

Tabla 8.11. Valores característicos de tiempos de fraguado –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y *Cal de Marrakech*–

Fuente 1 –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–: ficha técnica (Cales Pascual, s. f.)

Fuente 2 –*Cal de Marrakech*–: elaboración propia

En relación con el ensayo de principio de fraguado, se realizan las siguientes consideraciones:

- La tabla 18 de la norma UNE-EN 459-1 (2016) no especifica un valor característico de principio de fraguado para las cales hidráulicas naturales con una resistencia a compresión inferior a 2 MPa, por lo que se decide adoptar el valor de referencia más cercano: NHL 2 > 1 h. En este supuesto, *la Cal de Marrakech cumple los requisitos de la norma.*
- La cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 cumple los requisitos de la norma.

En relación con el ensayo de final de fraguado, se realizan las siguientes consideraciones:

- La tabla 18 de la norma UNE-EN 459-1 (2016) no especifica un valor característico de final de fraguado para las cales hidráulicas naturales con una resistencia a compresión inferior a 2 MPa, por lo que se decide adoptar el valor de referencia más cercano: NHL 2 ≤ 40 h. En este supuesto, *la Cal de Marrakech cumple los requisitos de la norma.*
- La ficha técnica no establece un valor para la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5.
- Por lo tanto, *no es posible realizar una comparativa entre ambos materiales.*

8.9. Reactividad

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-1 (2016), se realiza una tabla comparativa con el resultado del ensayo físico de reactividad de la *Cal de Marrakech* y el valor obtenido de la ficha técnica de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 (p. 21):

	Reactividad
Cal blanca	-
<i>Cal Marrakech</i>	0 min

Tabla 8.12. Valores característicos de reactividad –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y *Cal de Marrakech*–

Fuente 1 –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–: ficha técnica (Cales Pascual, s. f.)

Fuente 2 –*Cal de Marrakech*–: elaboración propia

La siguiente figura muestra la curva de apagado por vía húmeda de la *Cal de Marrakech*, donde:

- El eje de abscisas representa el tiempo transcurrido desde el *instante cero*, en min.
- El eje de ordenadas representa la temperatura del apagado, en °C.

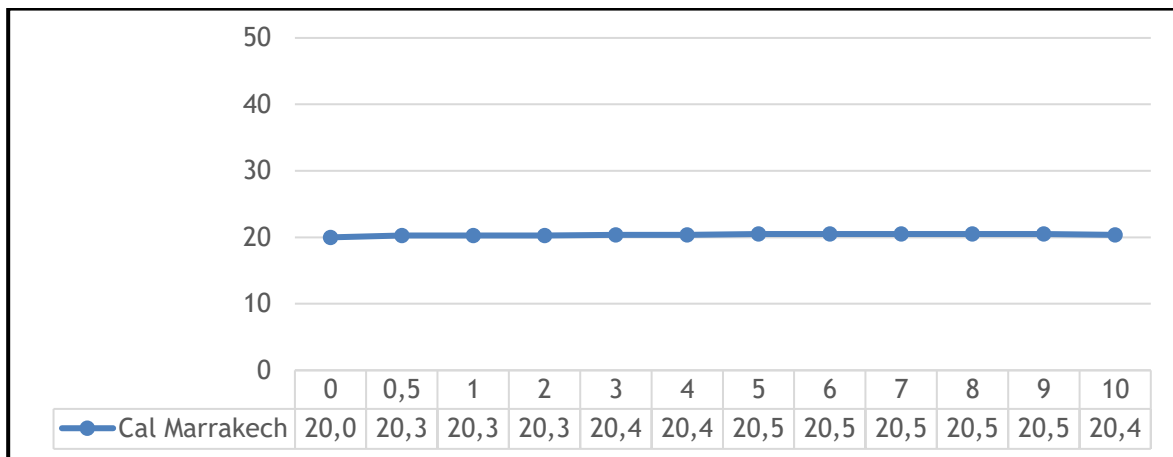


Figura 8.5. Curva de apagado por vía húmeda –*Cal de Marrakech*–

Fuente: elaboración propia

En relación con el ensayo de reactividad, se realizan las siguientes consideraciones:

- La tabla 18 de la norma UNE-EN 459-1 (2016) no especifica un valor característico de reactividad para las cales hidráulicas naturales (p. 21).
- La ficha técnica no establece un valor para la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5.
- Por lo tanto, *no es posible realizar una comparativa* entre ambos materiales.

8.10. Resistencia a flexión

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-1 (2016), se realiza una tabla comparativa con el resultado del ensayo mecánico de resistencia a flexión a los veintiocho días de la *Cal de Marrakech* y el valor obtenido de la ficha técnica de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 (p. 20):

	Resistencia a flexión
Cal blanca	-
<i>Cal Marrakech</i>	0,4 MPa

Tabla 8.13. Valores característicos de resistencia a flexión –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y *Cal de Marrakech*–

Fuente 1 –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–: ficha técnica (Cales Pascual, s. f.)

Fuente 2 –Cal de Marrakech–: elaboración propia

En relación con el ensayo de resistencia a flexión, se realizan las siguientes consideraciones:

- La tabla 18 de la norma UNE-EN 459-1 (2016) no especifica un valor característico de resistencia a flexión para las cales hidráulicas naturales (p. 20).
- La ficha técnica no establece un valor para la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5.
- Por lo tanto, *no es posible realizar una comparativa* entre ambos materiales.

8.11. Resistencia a compresión

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-1 (2016), se realiza una tabla comparativa con el resultado del ensayo mecánico de resistencia a compresión a los veintiocho días de la *Cal de Marrakech* y el valor obtenido de la ficha técnica de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 (p. 20):

	Resistencia a compresión			
	NHL < 2	NHL 2	NHL 3,5	NHL 5
	-	2 - 7 MPa	3,5 - 10 MPa	5 - 15 MPa
Cal blanca			3,5 MPa	
<i>Cal Marrakech</i>	0,9 MPa			

Tabla 8.14. Valores característicos de resistencia a compresión –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y *Cal de Marrakech*–

Fuente 1 –cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–: ficha técnica (Cales Pascual, s. f.)

Fuente 2 –*Cal de Marrakech*–: elaboración propia

En relación con el ensayo de resistencia a compresión, se realizan las siguientes consideraciones:

- La tabla 18 de la norma UNE-EN 459-1 (2016) no especifica un valor característico de resistencia a compresión para las cales hidráulicas naturales con una resistencia a compresión inferior a 2 MPa, por lo que *la Cal de Marrakech no cumple los requisitos de la norma*.
- La cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 cumple los requisitos de la norma.

8.12. Resistencia a la adhesión

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 1015-12 (2016), se realiza una tabla comparativa con el resultado del ensayo mecánico de resistencia a la adhesión a los veintiocho días del mortero de *Cal de Marrakech* en estado endurecido y el valor obtenido de la ficha técnica de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5:

	Resistencia a la adhesión
Mortero cal 1:3	-
<i>Cal Marrakech</i>	0,1 N / mm ²

Tabla 8.15. Valores característicos de resistencia a la adhesión –mortero normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 y mortero de *Cal de Marrakech* en estado endurecido–

Fuente 1 –mortero normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5–: elaboración propia a partir de datos de ficha técnica (Cales Pascual, s. f.)–

Fuente 2 –mortero de *Cal de Marrakech* en estado endurecido–: elaboración propia

En relación con el ensayo de resistencia a la adhesión, se realizan las siguientes consideraciones:

- La norma UNE-EN 1015-12 (2016) no especifica un valor característico de resistencia a la adhesión para los morteros de cal.
- La ficha técnica no establece un valor para el mortero normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5.
- Por lo tanto, *no es posible realizar una comparativa* entre ambos materiales.

9. CONCLUSIONES

En este capítulo se sintetizan los resultados de los distintos ensayos en laboratorio de la *Cal de Marrakech* y se extraen las principales conclusiones al respecto.

En relación con los ensayos químicos de espectroscopia de energía dispersiva de rayos X, agua libre y pérdida por calcinación:

- Además de su contenido en Carbono, Oxígeno, Magnesio, Aluminio, Silicio y Calcio, la *Cal de Marrakech* presenta pequeñas cantidades de hierro y cloro en su composición que la diferencian de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5.
- Debido a su contenido en calcio, silicio y aluminio, se engloba dentro del grupo de las cales con propiedades hidráulicas ³⁶ de la norma UNE-EN 459-1 (2016).
- Presenta un contenido de agua libre del 1,87 %.
- Presenta una pérdida por calcinación del 15,26 %.

En relación con los ensayos físicos de diámetro del escurrimiento, tamaño de partícula, densidad aparente, consistencia normal, tiempos de fraguado y reactividad:

³⁶ Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-1 (2016), las cales de construcción se clasifican en (pp. 7-8):

1. Cales aéreas.
 - Constituidas principalmente por óxido y/o hidróxido de calcio y/o magnesio.
 - Fragan y endurecen en contacto con el dióxido de carbono del aire.
2. Cales con propiedades hidráulicas.
 - Constituidas principalmente por hidróxido de calcio, silicatos de calcio y aluminatos de calcio.
 - Fragan y endurecen en contacto con el agua y/o bajo el agua.
 - La reacción con el dióxido de carbono del aire forma parte del proceso de endurecimiento.

- Para el amasado del material, la relación agua / conglomerante en masa que establece el ensayo de diámetro del escurrimiento es de 0,45 –es decir, por cada parte de *Cal de Marrakech* se añaden 0,45 partes de agua–.
- Debido a la presencia natural de árido en su composición, se superan los valores característicos permitidos de tamaño de partícula, por lo que *la Cal de Marrakech no cumple los requisitos de la norma UNE-EN 459-1 (2016)*.
- En comparación con el mortero seco normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 de dosificación en masa 1:3, *la Cal de Marrakech* presenta un exceso de árido de tamaño grande y un contenido deficiente de áridos de tamaño intermedio y pequeño.
- En comparación con el mortero seco normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 de dosificación en masa 1:3, *la Cal de Marrakech* presenta una dosificación en masa aproximada de 1:1,5 –es decir, por cada parte de conglomerante existen 1,5 partes de árido–.
- Debido a la presencia natural de árido en su composición, la densidad aparente de *la Cal de Marrakech* en polvo, cuyo valor es de 0,84 kg / dm³, es superior a la de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5.
- La densidad aparente del mortero de *Cal de Marrakech* en estado endurecido es de 1230 kg / m³.
- La relación agua / conglomerante en masa de los valores de consistencia normal y de diámetro del escurrimiento es la misma, es decir, 0,45.
- El tiempo de inicio y de final de fraguado es prácticamente el mismo, es decir, 29 y 29,25 h respectivamente.
- El ensayo de reactividad no muestra un incremento apreciable de temperatura, ya que la reacción exotérmica es inexistente, por lo que el procedimiento de apagado de *la Cal de Marrakech* se considera adecuado.

En relación con los ensayos mecánicos de resistencia a flexión, resistencia a compresión y resistencia a la adhesión:

- Se obtienen unos valores de 0,4 MPa, 0,9 MPa y 0,1 N / mm², respectivamente.

- Debido a la presencia natural de árido en su composición, las probetas de ensayo para obtener el valor de resistencia a flexión y a compresión se elaboran sin adición de arena. En consecuencia, no se alcanzan los valores característicos exigidos de resistencia a compresión, por lo que *la Cal de Marrakech no cumple los requisitos de la norma UNE-EN 459-1 (2016)*.
- A pesar de que no se dispone de los datos necesarios para calcular el índice de hidráulicidad³⁷, tanto el valor de fraguado lento como el de baja resistencia a compresión dan a entender que *la Cal de Marrakech se engloba dentro del grupo de las cales de construcción de baja hidráulicidad*³⁸.

³⁷ Ver notas al pie 2 y 3 en p. 24.

³⁸ Las cales de baja hidráulicidad son las más indicadas para la realización de revestimientos y acabados por ser más transpirables, más elásticas, más aislantes, más higroscópicas, tener menor tendencia a la fisuración a largo plazo y fraguar más lentamente que las cales de alta hidráulicidad (Brümmer, 2013, p. 2).

10. TÉCNICA DE APLICACIÓN DEL *TADELAKT*

En este capítulo se describe brevemente el procedimiento operatorio de la técnica de aplicación del *Tadelakt* (Alen y Calche S.L. y Okambuva.coop, s. f.; La Banca della Calce S.R.L., s. f.-b; Leis et al., 2016).

10.1. Materiales y herramientas

- *Cal de Marrakech*.
- Paleta o llana.
- Fratás de madera.
- Piedra de río cortada y pulida.
- Brocha.
- Trapo de tela.
- Film de plástico para redondeado de esquinas y rincones.
- Jabón vegetal procedente de restos de aceitunas negras.
- Cera de abeja –opcional–.
- Pigmentos minerales compatibles con la alcalinidad de la *Cal de Marrakech* –opcional–.



Figura 10.1. Herramientas y jabón

Fuente: elaboración propia



Figura 10.2. Saco de Cal de Marrakech

Fuente: alenycalche.es

10.2. Preparación del soporte

El soporte debe ser resistente, estable, uniforme, absorbente y presentar buena adherencia mecánica. En caso necesario, se debe aplicar una capa de regularización de mortero de cal hidráulica natural con acabado rugoso.

Antes de la aplicación del revestimiento, se debe comprobar que el soporte está húmedo, pero no mojado. En caso necesario, se debe humedecer con una brocha o un pulverizador.



Figura 10.3. Soportes cerámicos con capa base de mortero NHL

Fuente: elaboración propia



Figura 10.4. Bolas de arcical³⁹

Fuente: elaboración propia

10.3. Preparación de la mezcla

Para el amasado, se utiliza una relación en masa agua / conglomerante de 1:2, es decir, por cada litro de agua se añaden 2 kg de *Cal de Marrakech*.

El procedimiento consiste en verter el agua en un recipiente y añadir poco a poco la cal, amasando con una batidora eléctrica a velocidad lenta. Es conveniente dejar reposar la mezcla hasta el día siguiente, teniendo la precaución de sellar adecuadamente el recipiente con una bolsa de plástico.

Instantes previos a su utilización, se vuelve a amasar la mezcla. En caso necesario, se puede añadir una pequeña cantidad de agua, hasta obtener una consistencia plástica⁴⁰ del material.

³⁹ Mezcla de tierra, arena, paja, cal hidráulica natural y agua.

⁴⁰ Ver nota al pie 21 en p. 53.

Tradicionalmente, el *Tadelakt* es de color marfil, aunque existe la posibilidad de obtener otras tonalidades. Para ello, se pueden utilizar pigmentos minerales durante la fase de amasado añadiendo, como máximo, un 10 % en masa de pigmento respecto a la cantidad de *Cal de Marrakech* utilizada.

Para evitar la formación de grumos, se recomienda diluir previamente el pigmento en agua, removiendo sin parar hasta obtener una solución homogénea. A continuación, se agrega el producto a la mezcla.



Figura 10.5. Amasado mecánico

Fuente: elaboración propia



Figura 10.6. Mezclas coloreadas

Fuente: elaboración propia

10.4. Aplicación de la primera capa

La aplicación se realiza *a buena vista*, sin ayuda de guías o maestras que garanticen un perfecto aplomado.

Se debe proceder de abajo hacia arriba en el paramento, extendiendo una capa de mezcla de 2-3 mm de espesor con un fratás, una llana o una paleta, ejerciendo presión sobre el soporte en todo momento.

Tras la aplicación de la primera capa y una vez que pierde el brillo, se fratasca enérgicamente la superficie, obteniendo un acabado rugoso con el poro abierto.



Figura 10.7. Primera capa en color rojo

Fuente: elaboración propia



Figura 10.8. Primera capa en color verde

Fuente: elaboración propia

10.5. Aplicación de la segunda capa

Tan pronto como se finaliza la aplicación de la primera capa, se procede inmediatamente con la segunda. En caso necesario, se debe humedecer la superficie antes de continuar.

De la misma manera que en la primera capa, se debe proceder de abajo hacia arriba en el paramento, extendiendo una capa de mezcla de 2-3 mm de espesor con un fratás, una llana o una paleta, ejerciendo presión sobre el soporte en todo momento.

Tras la aplicación de la segunda capa y una vez que pierde el brillo, se frataso enérgicamente la superficie, obteniendo un acabado rugoso con el poro abierto.

10.6. Alisado

Tan pronto como se finaliza la aplicación de la segunda capa, se procede inmediatamente al alisado de la superficie con una paleta o una llana, obteniendo un acabado liso con el poro cerrado.

Una vez que el revestimiento ha obtenido la suficiente dureza, se utiliza una piedra pulida para realizar pequeños movimientos circulares en el mismo sentido de giro, rellenando los huecos existentes.

Las esquinas y rincones presentan un acabado redondeado, para lo cual se utiliza un trozo de film de plástico que se desliza a lo largo de la arista, aplicando una ligera presión.



Figura 10.9. Alisado con llana

Fuente: elaboración propia



Figura 10.10. Pulido con piedra

Fuente: elaboración propia

10.7. Aplicación de jabón

Al día siguiente, y antes de que transcurran 24 h desde la realización de la segunda mano, se aplica una solución de jabón en agua tibia al 10 % en masa, es decir, por cada litro de agua se utilizan 100 g de jabón, y se extiende con una brocha, abarcando pequeñas superficies del paramento.

A continuación, se utiliza una piedra pulida para realizar pequeños movimientos circulares en el mismo sentido de giro, hasta que el soporte absorbe completamente el producto.

Una vez finalizada la aplicación de la primera mano de jabón, se procede inmediatamente con la segunda, siguiendo el mismo procedimiento descrito en este apartado.



Figura 10.11. Primera mano de jabón

Fuente: elaboración propia

Figura 10.12. Segunda mano de jabón

Fuente: elaboración propia

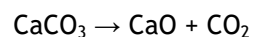
10.8. Aplicación de cera —opcional—

Es recomendable la aplicación de una capa de cera sobre aquellas superficies expuestas al contacto directo con el agua. Dicha operación debe realizarse a partir de los 30 días de la aplicación del jabón, una vez se ha producido la carbonatación⁴¹ del material.

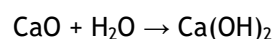
Para la preparación del producto, se calienta la cera al baño María y, una vez en estado líquido, se aparta del fuego y se añade la esencia de trementina. A continuación, se vuelve a calentar la mezcla, removiendo sin parar hasta obtener una solución homogénea.

⁴¹ El ciclo de la cal:

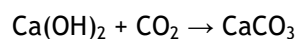
1. Comienza con la calcinación, descarbonatación o cocción de la piedra caliza, donde el carbonato cálcico se disocia en cal viva y en dióxido de carbono, que va a la atmósfera.



2. A continuación, se hidrata o se aporta agua a la cal viva, obteniéndose cal apagada.



3. Finalmente, la cal apagada, al entrar en contacto con el dióxido de carbono del aire, vuelve a convertirse en la piedra con que la se inicia el ciclo.



A las 24 h de la aplicación del revestimiento de cal se produce un primer endurecimiento, desde la superficie hacia el interior, debido a la evaporación del agua de la mezcla. La carbonatación total llega tras varios meses, de forma lenta y progresiva (Martín Sisí et al., 1999, pp. 10-30).

Se aplica una solución de cera en esencia de trementina al 20 % en masa, es decir, por cada litro de esencia de trementina se utilizan 200 g de cera, y se extiende con un trapo. Esta capa debe renovarse un par de veces al año.

10.9. Trabajo de campo

Para finalizar este capítulo, se incluye un breve reportaje fotográfico con algunas de las muestras realizadas, en las que se pueden apreciar distintas terminaciones y acabados sobre soportes varios:



Figura 10.13. Muestras sobre bola de arcical

Fuente: elaboración propia



Figura 10.14. Muestras circulares coloreadas

Fuente: elaboración propia



Figura 10.15. Muestras coloreadas sobre material cerámico

Fuente: elaboración propia



Figura 10.16. Muestras para ensayos

Fuente: elaboración propia

11. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En un principio, el planteamiento de este trabajo de investigación consistía en la *caracterización del Tadelakt como material y técnica de aplicación*, por lo que los objetivos de la pre-propuesta original eran los que se mencionan a continuación:

- Determinar las propiedades químicas, físicas y mecánicas tanto del *Tadelakt* como de la *Cal de Marrakech*.
- Realizar una comparativa climática entre el sureste español y la región de Marrakech.
- Realizar un estudio de eficiencia energética del revestimiento.
- Realizar un análisis de la huella de carbono de los distintos materiales que componen el revestimiento.
- Generar una partida de precio unitario descompuesto para la realización del revestimiento, tanto en m como en m².

Sin embargo, la cantidad de datos obtenidos durante la fase de investigación sobrepasa con creces la extensión habitual de un Trabajo de Fin de Grado. Por este motivo, se reconsideran los objetivos iniciales y se decide publicar únicamente aquellos resultados relacionados con el material principal del revestimiento: la *Cal de Marrakech*.

En consecuencia, el resto de información obtenida, así como la que resta aún por obtener, formará parte del futuro trabajo de investigación correspondiente a los estudios de posgrado del autor.

No obstante, se muestra una breve pincelada del trabajo de campo realizado hasta el momento en relación con la aplicación de la técnica del *Tadelakt*: muestras en diferentes formatos con acabados y terminaciones en varios colores⁴².

Para finalizar este capítulo, se proponen las siguientes líneas de investigación sobre la *Cal de Marrakech*:

⁴² Ver Capítulo 10. Técnica de aplicación del *Tadelakt* en p. 89.

- Comparativa química, física y mecánica de los diferentes materiales que se comercializan en el mercado nacional (España).
- Realización del resto de ensayos de la norma UNE-EN 459-2 (2022) que no se han llevado a cabo en este trabajo de investigación: óxido de calcio (CaO) y óxido de magnesio (MgO), sulfatos (SO₃), determinación volumétrica de dióxido de carbono (CO₂), cal útil, estabilidad de volumen, rendimiento, retención de agua y determinación del contenido de aire.
- Formulación de mezclas con cales y áridos locales.

REFERENCIAS

- Alen y Calche S.L. y Okambuva.coop. (s. f.). *Curso monográfico intensivo de Tadelakt* (p. 21).
- Beleta Astort, R. (2023). *El Tadelakt: una técnica milenaria de Marruecos*. Nomad Bubbles. <https://www.nomadbubbles.com/tadelakt-marruecos/>
- Brümmer, M. (2013). Estudio comparativo de cales hidráulicas. *Ecohabitar*, 36, 4.
- Cales Pascual S.L. (s. f.). *Cal blanca EN 459-1 NHL 3,5* [Ficha técnica].
- Chinchón Yepes, J. S. (s. f.). *Características de los morteros* (p. 31).
- El Amrani, A., Polidoro, C., Ibnoussina, M., Fratini, F., Rescic, S., Rattazzi, A., y Magrini, D. (2018). From the stone to the lime for Tadelakt. Marrakesh traditional plaster. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 9(3), 754-762.
- Herreruela García, F. (2021). Pastas, morteros, adhesivos y hormigones. En *Fundación Laboral de la Construcción y Tornapunta Ediciones* (3ª).
- La Banca della Calce S.R.L. (s. f.-a). *Calce di Marrakech: Scheda tecnica*.
- La Banca della Calce S.R.L. (s. f.-b). *Tadelakt: Manuale di posa* (p. 10).
- Lapuente Aragón, R. (s. f.). *Tema 13. Conglomerantes* (p. 129). Universidad de Alicante.
- Leis, T., Folache, P., Barahona, F., y Jürmann, K. (2016). *Tadelakt: Guía paso a paso* (p. 31).
- Martín Sisí, M., García y Conesa, O., y Azconegui Morán, F. (1999). Guía práctica de la Cal y el Estuco. En *Los oficios*.
- Prado Govea, R. H. (s. f.). *Propiedades de los materiales de construcción. Propiedades físicas. La densidad* (p. 4). Universidad de Alicante.
- R&C Art S.R.L. (2016). *Rapporto di prova: Calce in polvere per Tadelakt*.
- Servicios Técnicos de Investigación. (2022a). *Análisis químico de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5*.
- Servicios Técnicos de Investigación. (2022b). *Análisis químico de la Cal de Marrakech*.
- UNE-EN 1015-10. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido. (2007). En *Asociación Española de Normalización y Certificación [AENOR]*.
- UNE-EN 1015-12. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 12: Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros de revoco y enlucido endurecidos aplicados sobre soportes. (2016). En *Asociación Española de Normalización y Certificación [AENOR]*.

- UNE-EN 196-1. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias. (2018). En *Asociación Española de Normalización y Certificación [AENOR]*.
- UNE-EN 196-7. Métodos de ensayo de cementos. Parte 7: Métodos de toma y preparación de muestras de cemento. (2008). En *Asociación Española de Normalización y Certificación [AENOR]*.
- UNE-EN 459-1. Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad. (2016). En *Asociación Española de Normalización y Certificación [AENOR]*.
- UNE-EN 459-2. Cales para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo. (2022). En *Asociación Española de Normalización y Certificación [AENOR]*.
- Wolff, B. (2013). Hydrophobized lime plasters as protective surface in wet rooms in monument preservation. *Advanced Materials Research*, 688, 60-69.

ANEXOS

Anexo I. Procedimiento de amasado del mortero normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5⁴³

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 196-1 (2018), se describe el procedimiento de amasado del mortero normalizado de cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 (pp. 22-23):

1. Se introduce el agua en el recipiente de la amasadora.
2. Se añade la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 al recipiente, con un tiempo de adición de entre 5 y 10 s.
3. Se anota el instante final de la adición de la cal blanca EN 459-1 NHL 3,5 al recipiente como *instante cero*.
4. Inmediatamente, se pone en marcha la amasadora a velocidad lenta durante 60 s.
5. A partir de los 30 s de amasado, se añade la arena durante los 30 s siguientes.
6. Se pone de nuevo en marcha la amasadora a velocidad rápida durante otros 30 s.
7. Se detiene durante 90 s.
8. Durante los primeros 30 s, se rasca cualquier resto de mortero adherido a las paredes del recipiente, incorporándolo de nuevo a la mezcla.
9. Se pone de nuevo en marcha la amasadora a velocidad rápida durante otros 60 s.
10. Se detiene de forma definitiva.

⁴³ Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-2 (2022), el amasado del mortero normalizado de cal se elabora de acuerdo con la norma UNE-EN 196-1 (2018) (p. 69).

Anexo II. Procedimiento de amasado del mortero de *Cal de Marrakech*

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 459-2 (2022), se describe el procedimiento de amasado del mortero de *Cal de Marrakech* (pp. 53-54):

1. Se introduce el agua en el recipiente de la amasadora.
2. Se añade la *Cal de Marrakech* al recipiente, con un tiempo de adición de entre 5 y 10 s.
3. Se anota el instante final de la adición de la *Cal de Marrakech* como *instante cero*.
4. Inmediatamente, se pone en marcha la amasadora a velocidad lenta durante 90 s.
5. Se detiene durante 30 s
6. Durante este tiempo se rasca cualquier resto de mortero adherido a las paredes del recipiente, incorporándolo de nuevo a la mezcla.
7. Se pone de nuevo en marcha la amasadora a velocidad lenta durante otros 90 s.
8. Se detiene de forma definitiva.



Figura 0.1. Amasadora

Fuente: elaboración propia



Figura 0.2. Amasado de mortero de *Cal de Marrakech*

Fuente: elaboración propia

Anexo III. Elaboración de bolsas de arena normalizada CEN

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 196-1 (2018), se elaboran bolsas de arena normalizada CEN que se utilizan en determinados ensayos realizados en este trabajo de investigación (pp. 21-22).

A continuación, se enumeran las principales características de la arena normalizada CEN:

- Arena natural.
- Grano redondeado.
- Alto contenido en sílice.
- Distribución granulométrica dentro de unos valores establecidos.
- Contenido de humedad inferior al 0,2 % de la masa total de la muestra.
- Se envasa en bolsas de plástico de (1350 ± 5) g.

Ante la necesidad de disponer inmediatamente del material y tras varios intentos fallidos de encontrar el producto a corto plazo en el mercado nacional, se decide adquirir un saco de arena viva de 25 kg para, de esta forma, elaborar y estar en disposición de utilizar las bolsas de arena normalizada CEN a la mayor brevedad posible.

Se utiliza el método de *tamizado en seco* de la norma UNE-EN 459-2 (2022) para obtener los diferentes tamaños de partícula (pp. 36-37).

La siguiente tabla muestra la composición en masa de una bolsa de arena normalizada CEN:

Abertura tamiz	2 mm	1,6 mm	1 mm	0,5 mm	0,16 mm	0,08 mm
Cantidad	0 g	97,2 g	353,7 g	461,7 g	272,7 g	164,7 g

Tabla 0.1. Composición en masa –bolsa de arena normalizada CEN–

Fuente: elaboración propia a partir de datos de norma UNE-EN 196-1 (2018)

La elaboración de las bolsas de arena normalizada CEN se lleva a cabo en el Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la EPS de la UA (España), con fecha 9 de junio de 2022 y con una duración aproximada de 8 h.

A continuación, se describe el proceso operatorio de la elaboración:

1. Se coloca una muestra de arena viva en una bandeja de plástico.
2. Se calienta en el horno a una temperatura constante de 105 °C durante 12 h, hasta alcanzar masa constante.

3. Se saca del horno.
4. Se cubre para evitar que se absorba tanto el dióxido de carbono como el vapor de agua del ambiente.
5. Se enfría a temperatura ambiente.
6. Se preparan seis bandejas de plástico, identificadas cada una de ellas con su correspondiente tamaño de partícula.
7. Se vierte el material en la columna de tamizado formada por tapa, fondo y seis tamices de ensayo que se disponen, de arriba a abajo, en orden decreciente de paso de malla.
8. Se sacude la columna de forma mecánica en la máquina de tamizado durante 5 min.
9. Se separan los tamices uno a uno.
10. Se agita cada tamiz de forma manual con ayuda del fondo y la tapa, de forma que no se pierda material, comenzando con el de tamaño de abertura más grande.
11. Se clasifica el material retenido por cada tamiz en su bandeja correspondiente.
12. Se elabora y se identifica la bolsa de arena normalizada CEN, según la composición en masa establecida.
13. Se repite el procedimiento hasta conseguir las bolsas necesarias.



Figura 0.3. Saco de arena viva

Fuente: elaboración propia



Figura 0.4. Bolsas de arena normalizada CEN

Fuente: elaboración propia

Anexo IV. Elaboración de probetas de ensayo de mortero de Cal de Marrakech

Atendiendo a los criterios establecidos en la norma UNE-EN 196-1 (2018), se elaboran probetas de ensayo de mortero de *Cal de Marrakech* que se utilizan en determinados ensayos realizados en este trabajo de investigación (pp. 23-25).

Se trata de probetas prismáticas de las siguientes dimensiones:

- 160 x 40 x 40 mm, para los ensayos de flexión y compresión.
- 40 x 40 x 40 mm, para el ensayo de densidad aparente del mortero de *Cal de Marrakech* en estado endurecido.

Al no disponer del equipo necesario para realizar la compactación con mesa vibratoria –método de referencia–, se decide utilizar la compactadora para elaborar las probetas de ensayo de mortero de *Cal de Marrakech*.

La elaboración de las probetas de ensayo se lleva a cabo en el Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la EPS de la UA (España), con fecha 14 de junio de 2022 y con una duración aproximada de 2,5 h.

A continuación, se describe el procedimiento operatorio de la elaboración:

1. En una balanza, se pesa una muestra de 607,5 g de agua⁴⁴ en una jarra de plástico pre-pesada.
2. En una balanza, se pesa una muestra de 1350 g de *Cal de Marrakech*⁴⁵ en una bandeja de plástico pre-pesada.
3. Se realiza el amasado del mortero de *Cal de Marrakech*⁴⁶.
4. El molde de acero de la probeta se une firmemente a la mesa de la compactadora.
5. Inmediatamente después de la preparación de la mezcla, se llena cada uno de los tres compartimentos horizontales del molde con una primera capa de mortero en estado fresco, con una cuchara metálica.
6. La mezcla se extiende de manera uniforme con una espátula grande en posición vertical, pasándola a lo largo de cada compartimento del molde hacia delante y hacia atrás.

⁴⁴ Ver Tabla 6.6. Relación agua / conglomerante –*Cal de Marrakech*– en p. 42.

⁴⁵ Ver nota al pie 44 en p. 93.

⁴⁶ Ver Anexo II. Procedimiento de amasado del mortero de *Cal de Marrakech* en p. 102.

7. Se compacta la primera capa de mortero con sesenta golpes de la compactadora.
8. Se introduce la segunda capa de mortero en estado fresco, con el material rebosando por el borde superior.
9. La mezcla se extiende de manera uniforme con una espátula pequeña.
10. Se compacta la segunda capa de mortero con otros sesenta golpes.
11. Se retira el molde de la mesa de sacudidas.
12. Se elimina el exceso de mortero con una regla metálica en posición casi vertical en la dirección del movimiento, realizando movimientos transversales de sierra.
13. Se repite este procedimiento con la regla mantenida a un ángulo más agudo, para alisar la superficie.
14. Se elimina el mortero sobrante del perímetro del molde.
15. Se etiquetan los moldes para identificar posteriormente las probetas.
16. Sin pérdida de tiempo, se colocan los moldes sobre una superficie horizontal en el armario húmedo⁴⁷.
17. Se sacan del armario a las 48 h⁴⁸ para el desmoldeado.
18. Se etiquetan las probetas.
19. Se vuelven a introducir en el armario húmedo hasta instantes previos al ensayo en cuestión.
20. Se repite el procedimiento hasta conseguir las probetas de ensayo necesarias.

⁴⁷ Para la conservación de las probetas hasta el momento del ensayo, se improvisa un armario húmedo en el laboratorio, colocando varios recipientes llenos de agua en su interior y sellándolo con cinta de carroceros por el exterior, en el que se alcanza un valor de humedad relativa superior al 90 % (UNE-EN 196-1, 2018, p. 9).

⁴⁸ Para los ensayos a edades superiores a 24 h, el desmoldeado debe realizarse a las 20 - 24 h del enmoldado, aunque se puede retrasar 24 h más si se aprecia que el material no ha adquirido la resistencia suficiente para manipularlo sin riesgo de sufrir daños o roturas (UNE-EN 196-1, 2018, p. 24).

Anexo IV. Elaboración de probetas de ensayo de mortero de Cal de Marrakech



Figura 0.5. Molde de acero en la compactadora

Fuente: elaboración propia



Figura 0.6. Armario húmedo

Fuente: elaboración propia

