

ADDITIUS NATURALS AMB FUNCIONS HIDROFUGANTS EN MORTERS
DE CALÇ AÈRIA: UN ESTUDI COMPARATIU DE L'ARRÒS, EL NOPAL I
L'OLI DE LLINOSA

Autor: Andrea Pérez Ruiz
NIUB: 20425705

Treball Final de Grau

Grau en Conservació-Restauració de Béns Culturals

Tutor: Jorge Otero Hermo

Curs: 2024 - 2025

Resum

Aquest treball estudia l'eficàcia hidrofugant de tres additius naturals (pols de midó d'arròs, pols de nopal i oli de llinosa) incorporats a morters de calç aèria, amb l'objectiu de millorar-ne el comportament davant l'aigua en intervencions de conservació-restauració de patrimoni arquitectònic exposat a l'exterior. Mitjançant assaigs experimentals, s'han avaluat l'angle de contacte, l'absorció capil·lar, la porositat oberta i la duresa superficial. Els resultats indiquen que l'oli de llinosa i el nopal augmenten la hidrofobicitat, mentre que el midó d'arròs no presenta canvis significatius. L'oli de llinosa, però, pot comprometre la transpirabilitat del morter. Els additius no redueixen la porositat oberta de manera significativa, excepte en el cas de l'oli, tot i que el seu valor pot estar infraestimat. Pel que fa a la duresa superficial, només el nopal mostra un augment rellevant. Aquest estudi destaca el potencial d'aquests materials naturals com a alternatives sostenibles, tot i que caldrien assaigs de durabilitat i una revisió metodològica per validar els resultats a llarg termini.

Paraules clau

Morters de calç aèria / Additius hidrofugants / Arròs / Nopal / Oli de llinosa

Abstract

This study investigates the water-repellent effectiveness of three natural additives (rice starch powder, opuntia powder, and linseed oil) incorporated into non-hydraulic lime mortars, aiming to improve their performance against moisture in outdoor conservation-restoration interventions on architectural heritage. Through experimental tests, contact angle, capillary water absorption, open porosity, and surface hardness were evaluated. Results show that linseed oil and nopal increase hydrophobicity, while rice starch does not produce significant changes. However, linseed oil may compromise the mortar's breathability. The additives do not significantly reduce open porosity, except for linseed oil, whose value may be underestimated due to its high hydrophobicity. Regarding surface hardness, only the nopal additive shows a notable increase. This research highlights the potential of these natural materials as sustainable alternatives, though further durability tests and methodological adjustments are required to confirm long-term effectiveness.

Keywords

Non-hydraulic lime mortars / Water-repellent additives / Rice / Opuntia / Linseed oil

Andrea Pérez Ruiz - Additius naturals amb funcions hidrofugants en morters de calç aèria: un estudi comparatiu de l'arròs, el nopal i l'oli de llinosa

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024 - 2025

Agraïments

Jorge Otero
Marta Golobardes
Elisabeth Carvajal

Índex

1. Introducció.....	9
1.1. Morters de calç.....	10
1.1.1. Proporcions.....	11
1.1.2. Calç.....	11
1.1.3. Àrids.....	15
1.1.4. Aigua.....	15
1.1.5. Additius.....	16
1.2. Relació entre estructura porosa i comportament davant la degradació.....	17
1.2.1. Porositat, permeabilitat i absorció.....	17
1.2.2. Duresa.....	17
1.2.3. Tipologia de porus.....	17
1.2.4. Durabilitat i alteracions.....	18
1.3. Additius amb funcions hidrofugants.....	21
1.3.1. Arròs.....	22
1.3.2. Nopal.....	23
1.3.3. Oli de llinosa.....	24
2. Objectius.....	26
3. Metodologia.....	27
3.1. Preparació de les provetes.....	27
3.2. Assajos realitzats.....	31
3.2.1. Assaig de l'angle de contacte.....	32
3.2.2. Assaig d'absorció d'aigua per capil·laritat.....	32
3.2.3. Assaig de determinació de la densitat aparent i de la porositat oberta total accessible a l'aigua.....	35
3.2.4. Assaig de duresa superficial.....	37
4. Resultats.....	39
4.1. Resultat assaig de l'angle de contacte.....	39
4.2. Resultat assaig d'absorció d'aigua per capil·laritat.....	41
4.3. Resultat assaig de determinació de la densitat aparent i de la porositat oberta total accessible a l'aigua.....	43
4.4. Resultat assaig de duresa superficial.....	45
5. Conclusions.....	47
6. Bibliografia (format APA 7).....	50
7. Annexos.....	57
7.1. Annex I. Imatges Específiques.....	57
7.1.1. Assaig de l'angle de contacte.....	57
7.2. Annex II. Taules de dades ampliades.....	60

Andrea Pérez Ruiz - Additius naturals amb funcions hidrofugants en morters de calç aèria: un estudi comparatiu de l'arròs, el nopal i l'oli de llinosa

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024 - 2025

7.2.1. Assaig de l'angle de contacte.....	60
7.2.2. Assaig d'absorció d'aigua per capil·laritat.....	60
7.2.3. Assaig de determinació de la densitat aparent i de la porositat oberta total accessible a l'aigua.....	66
7.2.4. Assaig de duresa superficial.....	67
7.3. Annex III. Contribució als Objectius de Desenvolupament Sostenible.....	68

1. Introducció

Dins de l'àmbit de la conservació-restauració de materials inorgànics els morters constitueixen un element essencial, especialment en el tractament del patrimoni arquitectònic i tots els elements que en formen part, com ara jaciments arqueològics, pintures murals, revestiments o altres elements decoratius. Sovint aquests elements es troben exposats a la intempèrie, fet que els sotmet a agents de degradació externs, molts dels quals són difícils de controlar. A més, segons la funció que hagi de complir el morter (morter de junta, d'injecció, de revestiment...), cal que presenti unes característiques específiques com poca retracció, bona adherència, treballabilitat, permeabilitat al vapor, transpirabilitat, etc. (Henry i Stewart, 2012).

Davant d'aquests diversos factors condicionants, es pot acudir a la incorporació d'additius que modifiquin les característiques intrínseques del morter, amb l'objectiu de millorar les propietats físiques (ex.: reduir la porositat), mecàniques (ex.: augmentar la duresa), químiques-mineralògiques (ex.: afavorir la creació de cristalls millor formats, més resistent a la degradació) el qual es tradueix en un millor envelliment. Aquestes modificacions resulten beneficioses, ja que permeten allargar la vida útil de les intervencions realitzades pels conservadors-restauradors. Es redueix la necessitat de realitzar futures actuacions, contribuint a una conservació més eficient i sostenible dels béns patrimonials. Tanmateix, s'ha de tenir en compte que el morter nou afegit ha de tenir propietats similars al material petri, mineralògic, per a que sigui compatible i amb unes propietats mecàniques i estructurals inferiors (menys dur que la pedra i més porós). Si aquests aspectes no es contemplen, es corre el risc d'introduir un morter més durador que la mamposteria fent que, el deteriorament es doni a la pedra.

És molt habitual que l'aigua sigui un dels factors principals en el deteriorament dels materials porosos ja que participa en processos químics com la lixiviació de minerals, físics com el gel-desgel (*freeze-thraw*), i és fonamental en processos biològics. La manera com es desplaça l'aigua dins d'aquests materials depèn de les seves propietats físiques, com l'estructura interna, el grau de porositat, la capacitat d'absorció capil·lar i la seva permeabilitat. Les fonts més comunes d'humitat són la pluja, la condensació i l'ascens per capil·laritat (Teutonico, 1988). Per aquesta raó, la higroscopicitat dels morters de calç els converteix en materials més susceptibles als danys causats per l'aigua.

Per tal de combatre els efectes de degradació provocats per l'aigua als morters, tradicionalment era habitual emprar additius, els quals aportin propietats hidrofugants a l'argamassa (Otero, 2018). Aquest treball estudia la capacitat impermeabilitzant de tres materials específics: pols de midó d'arròs, pols de nopal i oli de llinosa, quan s'utilitzen com a additius en morters de calç aèria.

En primer lloc, s'estudiaran específicament els morters de calç aèria, analitzant-ne les propietats i les raons per les quals es recomana el seu ús en la conservació i restauració del patrimoni històric, atesa la seva compatibilitat amb els materials originals i el bon comportament a llarg termini. L'estudi dels

Andrea Pérez Ruiz - Additius naturals amb funcions hidrofugants en morters de calç aèria: un estudi comparatiu de l'arròs, el nopal i l'oli de llinosa

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024 - 2025

additius es durà a terme a través de dues vies complementàries, d'una banda, mitjançant la revisió bibliogràfica per conèixer els antecedents i aplicacions documentades, i de l'altra, a través d'una recerca empírica, en què es posaran a prova els materials escollits per avaluar-ne l'eficàcia.

La selecció d'aquests tres components es basa en una recerca prèvia de precedents històrics, en què aquestes mateixes substàncies han estat emprades en diverses èpoques amb la mateixa finalitat.

D'altra banda, el factor econòmic ha estat determinant ja que es tracta de materials de baix cost relatiu i de fàcil accés. A més, la seva composició natural pot suposar un impacte menor en comparació amb altres alternatives sintètiques.

1.1. Morters de calç

El morter és una mescla constituïda per una càrrega mineral (àrids), un aglomerant i aigua, a la qual es poden afegir additius amb l'objectiu de modificar o millorar les seves propietats físiques i mecàniques. Aquest treball se centra específicament en els morters de calç aèria. Al llarg de la història, aquest tipus de morter ha estat àmpliament utilitzat en la construcció d'estructures d'enginyeria civil i edificis. El seu ús generalitzat es deu, en gran part, a la facilitat d'obtenció de la calç a partir de roques carbonatades, molt abundants a l'escorça terrestre, fet que l'ha convertida en un dels conglomerants més emprats des de l'antiguitat (Moropoulou et al., 2005). A més, la bona conservació de nombrosos monuments i edificis històrics posa de manifest que, tot i que la calç presenta una resistència mecànica inferior en comparació amb els morters de ciment, és un material notablement durador i estable al llarg del temps (Stefanidou i Papayianni, 2005).

Actualment, en l'àmbit de la conservació-restauració del patrimoni arquitectònic, es tendeix a prioritzar l'ús de morters de calç en les intervencions. Aquesta elecció es fonamenta en el fet que aquests materials presenten una composició, unes característiques i unes propietats molt similars a les dels materials originals de les construccions històriques sobre les quals s'apliquen. A més, aquesta pràctica té en compte els criteris històrics i el principi de la mínima intervenció, que defensa la preservació de l'autenticitat i integritat de l'obra patrimonial (Gonzalez-Sanchez, 2021).

Els següents arguments són alguns dels motius que justifiquen la utilització de morters de calç per a la restauració de patrimoni històric (Gonzalez-Sanchez, 2021 [traducció pròpia]):

- Els morters de calç presenten major compatibilitat amb els mètodes d'edificació i els materials antics des de els punts de vista químic, estructural i mecànic.
- La quantitat de sals solubles aportada pel morter de calç és notablement inferior a la proporcionada pel ciment Portland. Això evita l'important dany en el sistema conjunt pedra/mortor originat pels cicles de re-cristal·lització (dissolució i precipitació) i/o hidratació.
- Manifesten una major flexibilitat sota determinades condicions mecàniques, aspecte essencial en previsió dels esperats moviments de les fàbriques de maçoneria: els morters de

calç posseeixen una compatibilitat tecnològica amb els materials antics molt superior en comparació amb els anàlegs del ciment.

- Els morters de calç proporcionen una avantatjosa estabilitat estructural de l'edifici a llarg termini, ja que en el cas de que s'originin fractures en el morter, aquestes poden esmenar-se mitjançant un procés d'autosegellat (*self-healing* en terminologia anglesa), vinculat als cicles de dissolució/re-precipitació de la calcita.

Pel que fa a la menor aportació de sals solubles per part dels morters de calç, cal tenir present que aquest avantatge pot quedar condicionat pel tipus de sorra utilitzada i el tipus de calç. En concret, si s'empra sorra marina o calç amb impureses, es podrien generar problemes similars als que es produeixen amb l'ús de ciment Portland, pel que fa a l'aportació de sals solubles (J. Chen et al., 2024).

1.1.1. Proporcions

Per parlar de les proporcions en la fabricació de morters, cal fer referència a Marc Vitruvi Polió, enginyer i arquitecte romà del segle I aC (Cartwright, s.d.). En la seva obra *De Architectura*, concretament al llibre segon, capítol quart, Vitruvi estableix criteris sobre les mescles de calç i sorra que continuen sent referents històrics en l'estudi dels materials de construcció. Vitruvi diferencia les proporcions de la mescla en funció del tipus de sorra emprada. D'aquesta manera, per la sorra de pedrera, recomana una proporció d'una part de calç per tres de sorra, mentre que per a la sorra de riu o marina, la proporció ha de ser d'una part de calç per dues de sorra. Aquesta variació es deu, segons explica l'autor, al fet que la sorra fluvial o provinent del mar presenta matèria orgànica, sals, mala adherència i dificultats per assecar-se (especialment la sorra marina). Aquesta característica pot afectar negativament a la resistència de les parets, sobretot en aquelles que no suporten grans càrregues, ja que si no es deixen descansar amb interrupcions, poden acabar debilitant-se. En aquest últim cas, menciona que per millorar la qualitat del morter és recomanable afegir una tercera part d'argila picada i grbellada, per modificar les propietats del morter (segellat, resistència o impermeabilitat) (Vitruvio Polión et al., 1987).

1.1.2. Calç

És l'aglomerant del morter, la seva funció és crear la unió entre la càrrega i l'aigua, formant una substància homogènia i estable un cop endurit. Aquesta inicia una reacció química que provoca que la mescla es solidifiqui i adquireixi resistència, mantenint la cohesió entre els altres components del morter (Z. Chen et al., 2024).

La calç és un terme general que engloba un ampli ventall de materials amb diferents característiques i formes d'ús. La Norma Europea UNE-EN 459-1:2016 estableix els següents tipus de calç, segons la seva composició química (Taula 1):

Calç aèria	Càlciques	Calcinació de roques calcàries pures > 95% de riquesa en calci.
	Dolomítiques	Calcinació de pedres dolomítiques que contenen magnesi.
Calç hidràulica	La pedra calcinada conté argiles riques en sílice, alumini i ferro, aquestes endureixen amb l'aigua. Conté més impureses i és menys blanca.	

Taula 1. Classificació dels tipus de calç (UNE-EN 459-1:2016).

Des del moment en què la matèria primera s'extreu de la pedrera fins que està llesta per ser emprada com a aglomerant, passa per una sèrie de processos coneguts com el "cicle de la calç". Aquest cicle comença amb una primera fase de calcinació de la pedra calcària o la dolomia per obtenir calç viva (CaO o MgO). Posteriorment, el seu apagament amb aigua permet obtenir calç apagada (portlandita: Ca(OH)_2 o brucita: Mg(OH)_2), un component que, en entrar en contacte amb el CO_2 atmosfèric, es transforma en calcita (i/o magnesita o hidromagnesita) (Cazalla Vázquez, 2002).

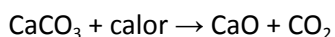
Cicle de la calç

Calcinació:

Consisteix a escalfar la pedra calcària a altes temperatures, està condicionat principalment per la composició química i la mida de les partícules de la pedra.

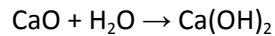
- Per a calcàries pures, la calcinació es produeix entre 800 i 1200 °C.
- Per a calcàries impures o dolomítiques, es descompon en dues etapes, el carbonat magnèsic entre 650 - 750 °C i el carbonat càlcic entre 800 i 900 °C (Jakić et al., 2016).

La mida de les partícules també és clau: com més petites són, més ràpid es calcinen, mentre que les partícules grans requereixen més temps perquè la calor arribi al nucli. A més, el grau de calcinació i la composició dels gasos dins del forn influeixen en les propietats finals de la calç viva, com la seva densitat, porositat, reactivitat i la mida del cristall format (Cazalla Vázquez, 2002). La reacció que dona a lloc durant la calcinació és la següent:



Apagat o hidratació de la calç:

Quan la calç viva o òxid de calci (CaO) entra en contacte amb l'aigua, es produeix la hidratació o apagat de la calç, formant-se hidròxid de calç. La reacció de l'aigua amb els òxids genera una reacció exotèrmica molt forta. Es crea una estructura microcristal·lina, anomenada portlandita (Guixeras i Argano, 2010), seguint la reacció:



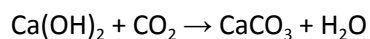
Hi ha diverses maneres d'apagar la calç, segons la quantitat d'aigua utilitzada. Una d'elles és l'apagat en sec, també conegut com a hidratació seca, es fa afegint la quantitat justa d'aigua perquè la calç viva (CaO) reaccionï. El producte resultant és una pols seca coneguda com a calç hidratada o calç en pols.

Una altra tècnica es fa submergint la calç en un excés d'aigua sobre la quantitat indispensable per a formar l'hidròxid. Això dona lloc a una massa pastosa, anomenada calç aèria en pasta. Aquesta pasta es pot obtenir tant de pedra calcària pura com de pedra dolomítica

La provenint de pedres calcàries pures es denomina "calç grassa", és de major qualitat en comparació a la obtinguda de pedres dolomítiques que també es coneix com a "calç dolomítica", "calç magra" o "calç grisa" popularment.

Carbonatació:

La carbonatació és el procés pel qual el morter de cal endureix lentament en contacte amb l'aire. Aquesta presa es produeix quan l'hidròxid de calci (Ca(OH)₂) reacciona irreversiblement amb el diòxid de carboni (CO₂) de l'atmosfera, formant carbonat càlcic (CaCO₃), que dona duresa i estabilitat al material (Cazalla Vázquez, 2002), seguint la fórmula:



Per evitar confusions entre la calç aèria i la hidràulica (Esquema 1), s'ha de tenir en compte que les calçs hidràuliques, tant si són naturals com si han estat modificades artificialment, es comercialitzen en forma de pols, ja que no poden ser apagades en massa, cosa que en provocaria l'enduriment prematur. Per tal de fer-les més fàcils de manipular, se sotmeten a un procés industrial d'apagat parcial, on només s'hidrata la fracció més reactiva (la calç viva, CaO), mitjançant polvorització controlada, evitant que reaccionin els components hidràulics (aluminosilicats). Aquest tipus de calç té la particularitat d'endurir en ambients humits, gràcies a la presència d'elements argilosos (Guixeras i Argano, 2010).

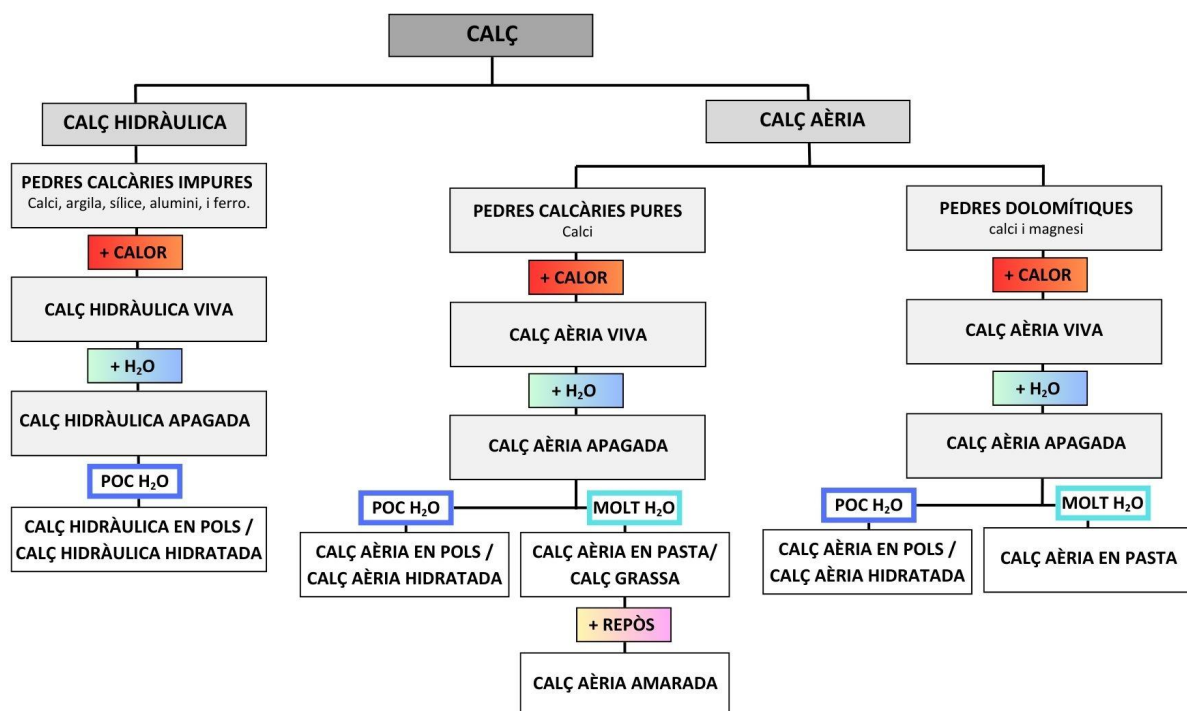
En canvi, la calç aèria està formada principalment per òxid o hidròxid de calci (i en alguns casos també de magnesi). Té la capacitat de endurir-se en contacte amb l'aire, després d'haver estat barrejat amb aigua, gràcies a la reacció amb el diòxid de carboni atmosfèric. Aquest tipus de calç s'obté a partir de pedres calcàries de gran puresa. El procés d'enduriment és molt lent, i pot durar

des d'anys fins a segles, fet que comporta una notable retracció volumètrica en els morters que la contenen (Cazalla Vázquez, 2002). Aquesta, es pot adquirir en dos formats, pols o pasta.

Concretament, en la restauració de patrimoni històric els morters de calç àeria són àmpliament utilitzats, ja que presenten una elevada compatibilitat amb els materials tradicionals emprats en les construccions antigues. Aquesta compatibilitat es deu, en gran part, a la seva naturalesa porosa i transpirable, que permet pas de la humitat sense generar pressions que podrien provocar fissures o desprendiments. A més, la calç àeria ofereix una baixa resistència mecànica i una certa elasticitat, cosa que la fa especialment adequada per a edificis antics que pateixen assentaments o moviments estructurals menors. Aquesta qualitat de ser “més tou” també evita tensions excessives entre materials (Bokan Bosiljkov, 2023).

D'altra banda, la calç hidràulica s'utilitza preferentment en situacions on es requereix una presa més ràpida i una resistència mecànica superior, com ara en zones humides, subaquàtiques o sotmeses a càrregues més grans. Això es deu a la seva capacitat d'endurir per carbonatació i mitjançant reaccions hidràuliques amb l'aigua. Tanmateix, la calç hidràulica pot resultar massa rígida o impermeable per a determinades estructures històriques delicades (Bokan Bosiljkov, 2023).

Esquema 1. Terminologia de la calç



Andrea Pérez Ruiz - Additius naturals amb funcions hidrofugants en morters de calç àeria: un estudi comparatiu de l'arròs, el nopal i l'oli de llinosa

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024 - 2025

1.1.3. Àrids

La càrrega d'un morter és el component més abundant, entre un 75% i un 85% de la mescla (Gonzalez-Sanchez, 2021). Aquesta càrrega està formada per àrids, materials petris que poden tenir diferents orígens. Els àrids naturals provenen de rius o platges, mentre que els àrids manipulats s'obtenen de pedreres i han estat prèviament triturats o picats. La seva mida ha d'estar compresa entre 0,075 mm i 5 mm, un criteri que permet diferenciar els morters dels formigons, ja que en aquests darrers la mida de l'àrid pot ser superior als 5 mm.

La funció principal dels àrids és establir el volum del morter, actuar com a material de farciment i reduir la retracció durant el procés d'assecatge. A més, contribueixen a definir el color i la textura del morter final. Per garantir un bon comportament mecànic i químic, els àrids han de ser durs, resistents, químicament inerts i estar lliures d'impureses que puguin comprometre l'estabilitat del conjunt. Aquests no contribueixen de forma activa en l'enduriment del morter (Cazalla Vázquez, 2002).

La diversitat en la granulometria és un aspecte rellevant per a la qualitat del morter. És important que els àrids presentin diferents granulometries, això afavoreix a l'empaquetament de les partícules, de manera que els grans més fins faciliten l'acció lligant amb els grans més gruixuts. Els morters antics que han perdurat fins a l'actualitat presenten una alta durabilitat i resistència als esforços mecànics degut al triatge de la mida dels grans (Stefanidou i Papayianni, 2005). No obstant, l'excés de contingut d'àrids fins disminueix la resistència i la permeabilitat del morter, el que augmenta les possibilitats de l'aparició de fissures.

A part de la granulometria, la varietat mineralògica també té un impacte directe en la resistència mecànica del morter. Durant el procés de carbonatació es formen enllaços entre la pasta i els àrids, els quals poden variar. Per exemple, els morters fabricats amb àrids de tipus calcític solen mostrar una resistència més elevada i fractures transgranulars, la qual cosa indica una forta cohesió entre els components. En canvi, quan s'utilitzen àrids silícics, s'observen fractures intergranulars, fet que suggereix una certa debilitat en la unió pasta-àrid o, més probablement, que l'àrid silícic presenta una duresa superior a la de la calç (Cazalla Vázquez, 2002).

1.1.4. Aigua

En els morters de calç aèria l'aigua no participa directament en les reaccions químiques, però és necessària com a mitjà per a que es produeixi la carbonatació. Generalment, qualsevol aigua d'origen natural pot utilitzar-se en la preparació de morters, sempre que no presenti un excés de sals o impureses que puguin alterar-ne les propietats. Tant l'aigua emprada per a l'amassat com per al curat ha de ser neta i lliure de substàncies perjudicials que, en determinades concentracions, podrien afectar el comportament del morter.

L'aigua potable és adequada per a aquest ús. Sovint, l'aigua de riu es considera més apta que la de pous o embassaments, ja que, aquests últims acostumen a contenir més matèria orgànica,

Andrea Pérez Ruiz - Additius naturals amb funcions hidrofugants en morters de calç aèria: un estudi comparatiu de l'arròs, el nopal i l'oli de llinosa

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024 - 2025

sediments, llims o partícules fines en suspensió, elements que poden reduir l'adherència entre l'aglomerant i l'àrid a causa de la seva mida microscòpica. Diversos estudis han demostrat que un contingut aproximat del 5 % en sals naturals pot disminuir la resistència del morter fins a un 30 %, i que aigües mineralitzades amb petites quantitats de sulfats o clorurs poden reduir la resistència fins a un 80 %. A més, la presència elevada de sals afavoreix l'aparició d'eflorescències (Gonzalez-Sanchez, 2021).

1.1.5. Additius

Els additius són substàncies que s'incorporen a la mescla del morter amb la finalitat de modificar o potenciar determinades propietats del material fresc o endurit. Aquests poden actuar sobre diversos aspectes del morter, com ara la resistència mecànica, la capacitat de repel·lència a l'aigua, el temps de presa (fraguet), la durabilitat, o fins i tot en la formació de la microestructura interna. Al llarg de la història, en els morters de calç s'han emprat additius naturals d'origen proteic (com la clara d'ou, la queratina, la sang o la caseïna), polisacàrids (com la goma aràbiga, els mucíl·lags vegetals o la farina d'arròs), així com olis i greixos naturals. També s'hi han afegit altres substàncies com la cera, el guix i extractes de cactus. La seva aplicació pot respondre tant a requisits funcionals específics de l'obra com a condicions ambientals o a la compatibilitat amb materials històrics de restauració (Otero, 2018). Cal remarcar que alguns additius orgànics (tant proteics com polisacàrids) poden tenir un efecte complex: si bé poden millorar l'adherència i la flexibilitat del morter, un excés en la seva dosificació pot afectar negativament la durabilitat o dificultar el procés de carbonatació (Jayasingh i and Selvaraj, 2022).

Un altre tipus d'agregat són les pòzzolanes, materials rics en sílice (SiO_2) i alumina (Al_2O_3). Des de l'antiguitat, s'han afegit als morters de calç aèria per conferir propietats hidràuliques. Ja Vitruvi en fa referència en els seus escrits, on assenyala que la qualitat dels morters pot millorar-se afegint-hi argila triturada. Entre els materials emprats tradicionalment com a pozzolanes destaquen les cendres volcàniques i la pols d'argila cuita (com la provinent de maons trencats). Aquest tipus d'agregat millora notablement les prestacions de la calç aèria, aportant-li més resistència mecànica, durabilitat i una major capacitat de fer presa en condicions adverses (Rogers, 2011).

En general, molts d'aquests additius actuen com a modificadors físics del morter, ja que poden reduir-ne la porositat, millorar-ne la plasticitat o ajustar-ne el temps de presa. A més, sovint augmenten la cohesió de la mescla, fet que facilita la seva aplicació i adherència sobre suports irregulars. Alguns també poden conferir al morter propietats hidrofugants, contribuint a una millor resistència a la penetració d'aigua i, per tant, una major durabilitat en ambients exposats a la humitat o a condicions climàtiques adverses (Ravi i and Thirumalini, 2019).

1.2. Relació entre estructura porosa i comportament davant la degradació

En aquest apartat, s'han utilitzat com a referència estudis sobre altres tipus de morters que no són exclosivament els de calç, ja que comparteixen mecanismes similars en la formació de la porositat i en el transport de fluids a través de la seva estructura.

1.2.1. Porositat, permeabilitat i absorció

Diverses propietats dels materials com la resistència mecànica, la permeabilitat, la densitat i l'absorció es veuen profundament condicionades per la porositat de la seva estructura interna. La permeabilitat, entesa com la capacitat d'un material per permetre el pas de fluids a través del seu medi porós, és un paràmetre clau en l'avaluació del seu comportament a llarg termini, especialment pel que fa a la seva durabilitat. La porositat determina, en gran mesura, la permeabilitat del material: una disminució de la porositat sol comportar també una reducció de la seva permeabilitat (Sandoval et al., 2019).

L'absorció, fa referència a la capacitat del material porós per captar i retenir aigua a través dels seus porus, principalment mitjançant fenòmens de capil·laritat. Aquest procés es produeix quan el morter entra en contacte amb aigua líquida i inicia la penetració dins la seva estructura, sovint impulsada per gradients de concentració o condicions d'humitat elevades. L'absorció és un paràmetre fonamental per avaluar el comportament higromètric i la resistència del morter (Villar-Cociña, 2002).

1.2.2. Duresa

La duresa és una propietat mecànica que indica la resistència d'un material al desgast o penetració i es relaciona amb la densitat i la compactació interna. Un morter més dur sol estar millor compactat, fet que redueix la seva porositat i, per tant, la seva capacitat d'absorció d'aigua. Així, la duresa pot actuar com un indicador indirecte del comportament del morter davant la humitat i la seva durabilitat (Kwong, 2019).

1.2.3. Tipologia de porus

Tanmateix, no només el volum de porus, sinó també la continuïtat i la connectivitat d'aquests juguen un paper decisiu en el transport de fluids. El flux es produeix a través de canals específics dins del sistema porós, fet que fa que la distribució i interconnexió dels porus siguin més determinants que la seva quantitat total (Hughes, 1985).

Per a la caracterització dels porus s'ha adoptat una classificació extreta d'*ARC Laboratory Handbook. Vol. 1 Introduction, Vol. 2 Porosity - Iccrom*, la qual tot i estar desenvolupada inicialment per a l'estudi de roques, resulta aplicable als morters de calç.

Els porus poden ser de diferents mides i formes (esfèrica, cilíndrica o allargada) i es poden ordenar segons la seva tipologia (Urland i Borrelli, 1999):

- Porus tancats: porus aïllats de la superfície externa, els quals no permeten l'accés d'aigua en estat líquid o en vapor. No tenen cap influència en la permeabilitat ni en el transport de líquids en els materials però sí que afecta a la seva densitat i propietats mecàniques i tèrmiques.
- Porus oberts: porus connectats amb la superfície externa del material, i per tant, accessibles a l'aigua. Tenen una relació directa amb la deterioració. Els porus oberts permeten el pas de fluids i retenen líquids per acció de la capil·laritat. Poden subdividir-se en porus sense sortida o interconnectats.

O segons el seu origen (Urland i Borrelli, 1999):

- Porus bàsics: porus inherents del procés de presa i enduriment del morter.
- Porus per dissolució: porus derivats de la dissolució química de carbonats (pèrdua de matriu).
- Porus de fractura: porus i microfissures provocades per moviments estructurals, càrregues i dilatacions.
- Porus de retracció: porus derivats de la contracció, com ara la retracció dels morters a causa de la pèrdua ràpida d'aigua.

1.2.4. Durabilitat i alteracions

La durabilitat d'un material, en aquest cas el morter de calç es defineix com la seva capacitat de resistir els processos de meteorització sense alteracions significatives. Aquesta estabilitat depèn de factors intrínsecs, com ara la naturalesa del material, la porositat accessible, la mida i forma dels porus, la microfissuració i les tensions internes, i de factors extrínsecs, com la seva ubicació, exposició climàtica o nivells de contaminació ambiental (Mingarro Martín, 1996).

L'aigua, en combinació amb una elevada porositat oberta i un tamany de porus gran en els morters de calç, actua com a agent de degradació. L'accessibilitat dels fluids per a penetrar a l'interior del material dona lloc a diversos mecanismes de degradació, com ara la proliferació microbiològica (gràcies a la disponibilitat d'espai i humitat), cicles de glaç i desglac o l'entrada i cristallització de sals solubles, que poden causar importants tensions internes. Els efectes visibles o simptomatologia associats a aquests processos inclouen diversos tipus d'alteració, com ara (Henry i Stewart, 2012):

- Taques a la junta o superfície
- Esquerdes
- Superfície friable, amb o sense eflorescències
- "Butllofes" i buits interiors
- Despreniments entre capes (deslaminació)
- Polvorització i pèrdua de material superficial
- Separació o desintegració interna

Andrea Pérez Ruiz - Additius naturals amb funcions hidrofugants en morters de calç aèria: un estudi comparatiu de l'arròs, el nopal i l'oli de llinosa

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024 - 2025

L'aigua pot penetrar en els materials porosos per diferents mecanismes: per absorció directa, per higroscopicitat (captació de vapor d'aigua) o per capil·laritat. Aquesta última és especialment crítica en contextos constructius, ja que provoca l'ascens de la humitat des del terra o des de zones en contacte amb aigua. La capil·laritat depèn del diàmetre dels porus i de la tensió superficial del líquid (l'aigua, en aquest cas) (Sastre Sastre, 2000).

Per tal de minimitzar aquests efectes, en restauració, es recomana utilitzar morters amb una porositat igual o superior a la del material original i amb una resistència mecànica compatible (La Spina, 2015). No és convenient tampoc emprar morters excessivament impermeabilitzats, ja que poden impedir la fluctuació d'humitat i la migració de sals a l'exterior. Això afavoreix l'acumulació interna i la cristal·lització dins dels porus, amb l'expansió i tensions consegüents, que poden afectar tant el morter com els materials que l'envolten (Henry i Stewart, 2012).

En vista de la influència decisiva que tenen la porositat i la permeabilitat en la durabilitat dels morters de calç (correlació descrita a la taula X), els quals presenten una alta capacitat d'absorció d'aigua per capil·laritat (Izaguirre et al., 2009), i considerant el seu paper com a facilitadors de diversos mecanismes de degradació, resulta oportú explorar estratègies per minimitzar-ne els efectes. En els següents apartats, s'analitzaran diversos additius amb funcions hidrofugants que es poden incorporar durant la preparació dels morters. Aquests additius tenen com a objectiu principal modificar el tipus de porositat per tant d'augmentar la permeabilitat del material, disminuint així la vulnerabilitat del morter davant de l'acció de l'aigua, les sals solubles o els agents microbiològics.

La següent taula recull de manera resumida la informació presentada en el darrer apartat:

Taula 2. Relació entre densitat, porositat, duresa i durabilitat.

Propietat	Definició	Relació amb altre propietats	Implicacions per a la durabilitat
Densitat	Massa per unitat de volum de morter.	Una densitat elevada sol indicar una matriu més compacta i menys porosa. Sovint està associada a una major duresa i, en alguns casos, a millor durabilitat.	Pot dificultar la penetració d'agents degradants (aigua, sals, contaminants). Però si és excessiva, pot reduir la capacitat de transpiració, afavorint l'acumulació d'humitat.
Porositat	Proporció del volum total que correspon a porus dins del morter.	Relació inversa amb la densitat i sovint també amb la duresa. Porus capil·lars afavoreixen l'absorció d'aigua.	Una porositat massa alta facilita la degradació (glaç/desglaç, sals, agents químics). Una porositat moderada és necessària per permetre la transpiració i

Andrea Pérez Ruiz - Additius naturals amb funcions hidrofugants en morters de calç aèria: un estudi comparatiu de l'arròs, el nopal i l'oli de llinosa

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, curs 2024 - 2025

			evitar acumulació interna d'humitat.
Duresa	Resistència del morter al desgast, rascat o penetració.	Major duresa s'associa amb una estructura més compacta i menys porosa. Pot indicar un major grau de carbonatació en morters de calç.	Millor resistència mecànica, però pot ser menys compatible amb materials històrics més tous. Pot reduir la capacitat d'adaptació o absorció de tensions.
Durabilitat	Capacitat del morter per mantenir les seves propietats en el temps davant agents de deteriorament.	Depèn d'un equilibri entre porositat, absorció, densitat i cohesió interna. També hi influeixen la composició, la calç, els àrids, els additius i les condicions ambientals.	Un bon balanç entre resistència mecànica, porositat controlada i permeabilitat adequada millora la durabilitat. Morters massa tancats o massa oberts poden ser igualment vulnerables.

1.3. Additius amb funcions hidrofugants

L'ús d'additius per millorar les prestacions dels morters de calç es remunta molts anys enrere. Civilitzacions com l'egípcia ja incorporaven components orgànics naturals, com la sang, els ous o la caseïna, per modificar i potenciar les propietats dels seus morters. Més endavant, les cultures grega i romana van perfeccionar aquesta pràctica afegint-hi materials inorgànics amb capacitat puzolànica, com ara la ceràmica triturada o cendres volcàniques, que permetien obtenir morters amb altes resistències i gran durabilitat (Gonzalez-Sanchez, 2021).

Actualment, dins de la gran varietat d'additius disponibles per a la modificació de morters, es poden identificar diversos grups principals segons la seva funció: superplastificants o reductors d'aigua, agents puzolànics, hidrofugants, additius fotocatalítics, agents incrementadors de la viscositat i millores d'adherència (Izaguirre Eseverri, 2010), els quals generalment s'apliquen en proporcions inferiors al 5% (Izaguirre et al., 2009). Aquest estudi s'ha centrat específicament en els additius amb capacitat hidrofugant, ja que, tal com s'ha exposat en els apartats previs, l'objectiu principal és identificar materials que permetin reduir l'absorció d'aigua dels morters de calç.

Els additius hidrofugants tenen com a finalitat principal reduir l'absorció d'aigua per capil·laritat en els morters un cop endurits. Tot i que no arriben a conferir una impermeabilitat absoluta al material, si que n'afebleixen la capacitat d'absorbir aigua a baixa pressió. Aquest efecte permet controlar fenòmens com els que s'han esmentat anteriorment.

Aquests additius també poden actuar com a agents airejants, generant microbombolles d'aire dins del morter. Aquesta incorporació d'aire millora la durabilitat dels morters, especialment perquè protegeix el material dels cicles de gel-desgel. Alhora, afavoreix la treballabilitat de la mescla, fet que pot comportar una reducció de la relació aigua/ciment (calç en aquest cas) i en conseqüència, obtenir materials més impermeables. A més, aquesta acció pot traduir-se en una reducció de la densitat aparent (Izaguirre et al., 2009).

No obstant això, en casos on l'additiu s'incorpora en forma de partícules molt fines, pot augmentar la demanda d'aigua per assolir una consistència adequada, la qual cosa podria repercutir negativament en les resistències mecàniques i augmentar la permeabilitat del morter a causa d'un excés d'aigua lliure (Gonzalez-Sanchez, 2021).

Segons González-Sánchez (2021), els additius hidrofugants poden actuar mitjançant diversos mecanismes que impedeixen l'entrada d'aigua al morter per capil·laritat. Un dels mecanismes és la capacitat de les partícules fines de l'additiu per ocloure físicament els buits del material. Un segon mecanisme es basa en la formació d'una pel·lícula hidrofòbica que recobreix els porus i la superfície del morter, gràcies a l'estructura molecular de l'additiu, composta per una part polar i una altra d'apolar. També es contempla una tercera via, la qual seria una combinació d'aquests dos processos.

La formació d'aquesta pel·lícula hidrofòbica pot produir-se per diferents vies, en funció del tipus de producte utilitzat:

- En el cas dels àcids grassos, aquests reaccionen amb els productes d'hidratació del ciment, donant lloc a una capa protectora sobre el material.
- Les emulsions de cera, quan entren en contacte amb el medi alcalí del morter, pateixen un procés de coalescència¹ que afavoreix la formació de la pel·lícula hidrofòbica.
- Els materials hidrofòbics amb una granulometria molt fina poden generar aquesta pel·lícula gràcies a la seva elevada superfície específica, que els permet distribuir-se eficaçment dins la matriu del morter i recobrir els canals capil·lars interns del material.

Un cop introduït el concepte i la funció dels additius hidrofugants en morters de calç, aquest treball se centrarà en tres materials concrets: l'arròs, el nopal i l'oli de llinosa. Aquests materials, que es poden classificar com a additius orgànics, presenten precedents històrics documentats del seu ús com a agents amb propietats hidrofugants en l'àmbit constructiu. La selecció d'aquests additius respon sovint a la disponibilitat dels recursos sovint a la disponibilitat dels recursos naturals a cada regió, fet que ha donat lloc al desenvolupament de tradicions específiques segons el context geogràfic. En els següents apartats es durà a terme una contextualització històrica de l'aplicació d'aquests productes tradicionals, amb l'objectiu de comprendre'n l'ús al llarg del temps. Aquest anàlisi preliminar servirà com a base per a la seva posterior avaluació experimental dins la part pràctica del treball.

1.3.1. Arròs

L'ús de l'aigua de cocció d'arròs glutinós en morters de calç es documenta per primer cop durant la dinastia Ming, tot i que les evidències arqueològiques en constaten l'aplicació des de la dinastia dels Regnes del Nord i del Sud (segles V - VI). Aquesta formulació es va emprar àmpliament en construccions com tombes, muralles, ponts i infraestructures hidràuliques, i es va mantenir en ús fins a èpoques modernes gràcies a la seva resistència i estabilitat al pas del temps (Yang et al., 2010).

Una de les qüestions més destacables és la capacitat d'aquest tipus de morter per conservar les seves propietats estructurals durant segles. Aquesta resistència es deu a la seva composició específica i al procés de solidificació, que implica reaccions químiques entre la calç i els components de l'aigua d'arròs. Quan la calç viva (CaO) es barreja amb aigua, es transforma en hidròxid de calci (Ca(OH)_2), generant una elevada temperatura i un entorn altament alcalí (pH d'aproximadament 12,4). Aquest ambient extremament bàsic, sumat a la calor de la reacció, té un efecte esterilitzant que elimina microorganismes i impedeix la degradació del material orgànic, fet que en garanteix la conservació prolongada (Yang et al., 2009).

¹ Fenomen pel qual les gotes d'un líquid dispers en un altre de no miscible o en un gas tendeixen a unir-se entre elles i formar agregats de majors dimensions (*coalescència* / *diccionari.cat*, s.d.).

Amb el temps, l'hidròxid de calci reacciona amb el CO_2 de l'aire i es converteix en carbonat càlcic (CaCO_3), que confereix consistència i estabilitat al morter. Com que aquest procés de carbonatació és lent (per la dificultat del CO_2 a penetrar en l'interior del material) l'ambient alcalí es manté actiu durant llargues etapes, continuant la seva funció protectora contra agents biològics (Yang et al., 2009).

Estudis recents han demostrat l'eficàcia d'aquests morters tradicionals, especialment en condicions ambientals adverses, gràcies a la seva microestructura compacta i persistent. El component clau d'aquesta millora és l'amilopectina, un polisacàrid altament ramificat que constitueix la major part del midó de l'arròs glutinós. Aquesta substància, juntament amb petites quantitats d'amilosa i proteïnes, afavoreix la formació d'una xarxa interna densa i cohesionada, millorant les propietats impermeables i la capacitat de protecció dels materials constructius amb el pas del temps (Otero et al., 2019).

Les investigacions indiquen que la calç i els components de l'arròs són els elements actius essencials del morter, mentre que materials com la sorra o l'argila actuen simplement com a agregats inerts. La incorporació d'arròs glutinós ha demostrat multiplicar significativament la resistència mecànica, incrementar la duresa superficial i prolongar la seva capacitat hidrofugant (Yang et al., 2009).

Aquestes prestacions excepcionals es deuen a dos mecanismes fonamentals: d'una banda, els polisacàrids de l'arròs modulen el procés de cristallització del carbonat càlcic, afavorint la formació de cristalls de mida nanomètrica i una configuració interna més compacta; de l'altra, es produeix una interacció física entre aquests cristalls i el material orgànic, que s'embolcallen i encaixen mútuament. Aquesta estructura híbrida orgànica-inorgànica, semblant a la que trobem en elements naturals com les closques de mol·luscs, confereix al morter una combinació de resistència, flexibilitat i estabilitat a llarg termini (Yang et al., 2009).

1.3.2. Nopal

Diversos estudis han analitzat l'ús d'additius orgànics com la goma de nopal en morters de calç destinats a la restauració del patrimoni arquitectònic. Aquesta substància vegetal, obtinguda de l'exudat del cactus, s'ha utilitzat àmpliament en morters de calç i de terra a diferents regions d'Amèrica Llatina (Guasch Ferré, 2016).

Les investigacions indiquen que el polisacàrid present en la goma de nopal contribueix a consolidar els materials terrosos, millorant-ne la cohesió i l'estabilitat. En morters de calç, aquest additiu millora la plasticitat de la pasta, afavoreix el procés de carbonatació, n'incrementa l'adherència i la resistència mecànica, i pot influir també en el color i la durabilitat dels revestiments (Guasch Ferré, 2016). Els polisacàrids solubles en aigua presents en el mucíl·lag formen sistemes hidrocol·loïdals que actuen com a agents de retenció d'humitat, ajudant a regular l'assecat del morter i prevenint l'aparició d'esquerdes durant el procés de curat (Guasch Ferré, 2016; Kita, 2013; Rodríguez-Navarro

Andrea Pérez Ruiz - Additius naturals amb funcions hidrofugants en morters de calç aèria: un estudi comparatiu de l'arròs, el nopal i l'oli de llinosa

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024 - 2025

et al., 2023) Aquests beneficis han afavorit a la seva aplicació en la conservació de revestiments arquitectònics deteriorats en nombrosos jaciments arqueològics.

El nopal s'incorpora al morter en forma de mucílag, una substància viscosa d'origen vegetal que s'extreu de les seves pales o cladodis. L'extracció es pot fer de diverses maneres, però la més habitual consisteix a tallar els cladodis en trossos i deixar-los en remull amb aigua durant un o dos dies, fins que se'n desprèn un líquid viscos de pH àcid (3-4). També es pot utilitzar mucílag fermentat, que té menys viscositat però presenta millors propietats de consolidació. Algunes pràctiques tradicionals inclouen l'extracció en aigua de calç a partir del parènquima de cladodis cremats i pelats, seguida d'un període de fermentació d'almenys 20 dies, obtenint un líquid molt alcalí (pH 13-14), que és menys viscos però més adherent. Segons les tècniques emprades, el mucílag pot variar notablement en les seves propietats d'assecat i formació de pel·lícules, fet que influeix directament en el comportament del morter (Kita, 2013).

Més enllà de les seves aplicacions com a modificador, el mucílag de nopal també es fa servir com a consolidant en morters de calç i terra, aplicat habitualment sobre la superfície mitjançant polvorització o amb pinzell. En aquest context, la seva capacitat de penetració varia segons el seu estat. El mucílag fresc, de naturalesa més viscosa, tendeix a romandre a la superfície i presenta una menor capacitat d'impregnació. En canvi, el mucílag fermentat, especialment aquell extret en aigua de calç, mostra una textura més fluida que li permet penetrar millor en el suport, fent-lo més apte per a tasques de consolidació profunda. Aquesta versió fermentada no només millora l'adhesió, sinó que, combinada amb hidròxid càlcic, pot afavorir la cohesió interna de materials com l'adob (Kita, 2013).

1.3.3. Oli de llinosa

Tot i que no és dels additius orgànics més habituals en la formulació tradicional de morters de calç, l'oli de llinosa s'ha emprat històricament en determinats contextos concrets, principalment amb finalitats d'impermeabilització o com a tractament superficial de manteniment. Aquest oli vegetal, extret de les llavors del lli (*Linum usitatissimum*), forma part d'un conjunt més ampli d'additius basats en lípids naturals (com el *ghee*, el greix de porc o l'oli d'oliva) que s'han utilitzat per modificar el comportament dels morters enfront de l'aigua. Els lípids tenen, en general, una funció hidrofugant: redueixen l'absorció d'aigua, milloren la capacitat de retenció hídrica i poden retardar el procés de carbonatació. En alguns casos, fins i tot poden afavorir determinades reaccions puzzolàniques, especialment quan es combinen amb materials com el metacaolí (Audenrode i Kock, 2024).

A la República Txeca, per exemple, durant els períodes del Renaixement i el Barroc, era habitual utilitzar tant l'oli de llinosa com el seu derivat, l'oli «stand» (espessit mitjançant polimerització parcial), en la preparació de revestiments de calç destinats a protegir i decorar superfícies arquitectòniques. Aquestes formulacions tradicionals, avui pràcticament en desús, han demostrat

una eficàcia notable en estudis recents pel que fa al comportament i la durabilitat dels morters de calç enriquits amb oli de llinosa (Nunes et al., 2020).

Diversos estudis recents han investigat l'evolució microestructural d'aquests morters amb addicions d'olis vegetals, centrant-se en la seva capacitat com a recobriments protectors per a materials porosos. Els resultats indiquen que la presència d'olis com el de llinosa pot incrementar la hidrofobicitat del morter sense comprometre'n la transpirabilitat, una qualitat fonamental en la restauració de béns patrimonials (Nunes et al., 2020).

Històricament, algunes fonts recullen receptes en què l'oli de llinosa es combinava amb altres ingredients com la llet per elaborar productes tècnics destinats, per exemple, a la fabricació de rellotges de sol o altres aplicacions exposades a condicions climàtiques adverses. No obstant això, cal remarcar que l'ús d'aquest additiu no va ser generalitzat ni sistemàtic en l'arquitectura tradicional, i sovint les fonts que el documenten no especifiquen proporcions exactes ni objectius tècnics clars (Audenrode i Kock, 2024).

Tot i ser l'oli més reactiu químicament entre els olis vegetals habitualment estudiats (gràcies al seu elevat contingut en enllaços dobles C=C), la seva eficàcia com a agent hidrofugant en pastes de calç no es pot explicar únicament per aquesta reactivitat. S'ha observat que altres factors, com la composició específica dels àcids grassos presents, poden influir notablement en el comportament final del morter. Això indica que cal analitzar el conjunt de propietats químiques i estructurals de l'oli per determinar-ne el potencial com a additiu funcional dins les formulacions de calç (Nunes et al., 2020).

2. Objectius

Aquest treball té com a objectiu general determinar quin dels tres materials naturals seleccionats (pols de midó d'arròs, pols de nopal i oli de llinosa) ofereix millors propietats hidrofugants quan s'incorpora com a additiu en un morter de calç aèria. La recerca s'inscriu en l'àmbit de la conservació-restauració de materials petris, amb especial atenció a la millora de la resistència a l'aigua dels morters utilitzats en el patrimoni arquitectònic exposat a la intempèrie.

Per tal d'assolir aquest objectiu general, s'han definit els següents objectius específics:

1. Avaluar l'eficàcia hidrofugant dels diferents additius naturals (aigua d'arròs glutinós, oli de llinosa i suc de nopal) incorporats als morters de calç, mitjançant la mesura de l'angle de contacte i l'absorció d'aigua per capil·laritat.
2. Analitzar l'efecte de cada additiu en la porositat total accessible a l'aigua, amb l'objectiu de determinar com influeixen en l'estructura interna del morter.
3. Comparar la duresa superficial dels morters aditivats amb la dels morters de calç sense additius (grup de control), per tal d'identificar possibles variacions en la resistència mecànica.

Aquest enfocament integral permetrà obtenir una visió global sobre el potencial d'aquests materials com a agents hidrofugants, i contribuirà a la recerca de solucions més sostenibles i eficients en el camp de la conservació i restauració dels béns culturals.

3. Metodologia

3.1. Preparació de les provetes

Materials emprats

- Calç apagada en pasta (CTS)
- Sorra de riu rentada fina (0 - 2 mm)
- Sorra de riu rentada gruixuda (0 - 4 mm)
- Pols de marbre blanc (Blanco Carrara MIK 000, 0,0 - 0,5 MM)
- Pols de midó d'arròs (SaporePuro)
- Pols de fulles de nopal (SaludViva)
- Oli de llinosa (Promade)
- Sal de cuina
- Aigua destil·lada

Estris i instruments de mesura

- Recipient de iogurt (150 ml)
- Vas de precipitats
- Paletí
- Regle
- Permanent (retolador)
- Higòmetre i termòmetre digital

Equip utilitzat per a la fabricació de les provetes

- Pinzell
- Cubell de plàstic
- 12 motlles cilíndrics de metall (8 cm de diàmetre i 4 cm d'alçada)
- Dues safates de plàstic
- Contenedor de plàstic amb tapa i petita obertura
- Dos pots de vidre

Disseny de les mescles

Per a la preparació del morter es va utilitzar una proporció d'1:3, és a dir, una part de calç per tres parts de càrrega (sorra). Aquestes proporcions es van determinar en volum i no en pes. Com a unitat de mesura es va emprar un pot de iogurt buit amb una capacitat de 150 ml, de manera que "una part" equivalia a 150 ml. Els additius es van incorporar en una proporció del 5% respecte al volum total de la mescla, és a dir, aproximadament 31 ml per cada 600 ml de morter base. Aquests volums es van mesurar amb un vas de precipitats per garantir-ne la precisió.

La càrrega del morter estava formada per una combinació d'àrids amb diferents granulometries: una part de sorra de riu rentada fina, una part de sorra de riu rentada gruixuda i una part de pols de marbre. Aquesta barreja permetia obtenir una millor distribució de partícules, reduint els buits interns i afavorint així la resistència i durabilitat del morter.

En primer lloc, es van mesurar la calç, els àrids i els additius en sec, utilitzant el pot de iogurt com a mesurador, i es van col·locar en un recipient gran. Amb una espàtula es va barrejar la mescla seca fins a obtenir una distribució homogènia dels components. Posteriorment, s'hi va afegir aigua progressivament fins a aconseguir una consistència adequada, corresponent a un diàmetre de 16 cm segons el mètode de *flow test* UNE-EN 1015-2:1999. Un cop assolida aquesta textura, es va continuar remenant fins a obtenir una massa completament homogènia.

Finalment, el morter es va col·locar dins de motlles per a la seva presa. Es van preparar un total de 12 provetes: tres de control (sense additius), tres amb pols de fulles de nopal, tres amb pols de midó d'arròs glutinós i tres amb oli de llinosa.

Cal precisar que el *flow test* només es va aplicar al morter de control. Per a la resta de mostres es va mantenir constant la proporció de tots els components, inclosa la quantitat d'aigua, amb l'objectiu de comparar els efectes dels diferents additius sense introduir noves variables. Com a conseqüència, la consistència final del morter va variar segons la naturalesa de cada additiu.

La diferència més notable es va observar en el morter amb pols de fulles de nopal, que presentava una textura significativament més seca. En canvi, els morters amb pols d'arròs glutinós tenien una consistència més esponjosa, mentre que els que contenien oli de llinosa mostraven una textura més tova i menys cohesionada. Tot i aquestes variacions, la majoria de les mostres es van mantenir dins d'un rang de consistència relativament similar al del morter de control. També es van observar canvis de coloració significatius. Les mostres amb nopal van adquirir un to lleugerament verdós, mentre que les que contenien oli de llinosa van presentar una coloració groguenca (Figura 1).

CO (provetes de control)

- 1 part de calç apagada en pasta
- 1 part de pols de marbre blanc
- 1 part de sorra de riu rentada fina
- 1 part de sorra de riu rentada gruixuda
- 80 ml d'aigua

AG (provetes amb pols de midó d'arròs)

- 1 part de calç apagada en pasta
- 1 part de pols de marbre blanc
- 1 part de sorra de riu rentada fina
- 1 part de sorra de riu rentada gruixuda
- 80 ml d'aigua
- 31 ml de pols de midó d'arròs

NC (provetes amb pols de nopal)

- 1 part de calç apagada en pasta
- 1 part de pols de marbre blanc
- 1 part de sorra de riu rentada fina
- 1 part de sorra de riu rentada gruixuda
- 80 ml d'aigua
- 31 ml de pols de nopal

OL (provetes amb oli de llinosa)

- 1 part de calç apagada en pasta
- 1 part de pols de marbre blanc
- 1 part de sorra de riu rentada fina
- 1 part de sorra de riu rentada gruixuda
- 80 ml d'aigua
- 31 ml d'oli de llinosa

Els diferents components del morter es van incorporar dins d'un cubell de plàstic (l'additiu es va afegir abans de mesclar), on es van barrejar manualment amb l'ajuda d'un paletí. La mescla es va remenar de manera constant fins a obtenir una consistència homogènia, assegurant que tots els materials quedessin ben integrats abans de ser emmotllats.

Emmotllament de les provetes

Un cop la mescla de morter va assolir una consistència homogènia, es va procedir a l'emmotllament en motlles cilíndrics, prèviament untats amb oli de llinosa per evitar adherències. Es van preparar dotze provetes, disposades en dues safates, i es van omplir fins a una alçada marcada de 2,5 cm. Cada proveta es va identificar mitjançant cinta adhesiva amb el tipus i número de mostra corresponent. Es van fabricar tres provetes per a cadascuna de les quatre formulacions assajades: CO (control), AG (pols de midó d'arròs), NC (pols de nopal) i OL (oli de llinosa).

El mètode d'emmotllament utilitzat no va seguir els estàndards més precisos pel que fa a la forma i acabat de les provetes. Es van fer servir motlles cilíndrics, tot i que els quadrangulars haurien estat

més adequats per a assaigs que requereixen mesuraments de superfície o volum. A més, les provetes no es van omplir completament, sinó fins a una alçada marcada manualment (2,5 cm), fet que va

Procés d'enduriment

Un cop emmotllades, les provetes es van col·locar dins d'un contenidor de plàstic amb tapa, habitualment emprat en la literatura especialitzada (Elert et al., 2022), amb una petita obertura per permetre un intercanvi controlat d'aire. Les dues safates amb les provetes es van disposar a l'interior del contenidor, i entre elles es van col·locar dos pots de vidre amb aigua saturada amb sal per mantenir una humitat relativa (HR) recomendada entre el 60 % i el 70 % (UNE-EN 1015-3:2000).

Aquesta entorn genera un ambient amb una HR elevada, condició que es considera òptima per a l'enduriment dels morters de calç, ja que evita una dessecació prematura que podria provocar esquerdes. La humitat no només prevé el resecament, sinó que facilita la difusió de CO_2 dins la pasta del morter, procés fonamental per a la carbonatació, mecanisme a través del qual la calç s'endureix. Aquest procés químic, en què l'hidròxid de calci $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ reacciona amb el diòxid de carboni (CO_2) per formar carbonat de calci (CaCO_3), és lent i requereix tant humitat com aire per produir-se de manera eficient (Greenspan, 1977).

Per controlar les condicions ambientals dins del contenidor, s'hi van instal·lar un higròmetre i un termòmetre digitals, que van permetre monitorar la HR i la temperatura durant tot el període de presa. El contenidor es va situar sobre un armari, allunyat de fonts de calor i de llum solar directa, amb la petita obertura de la tapa sempre oberta per afavorir l'entrada de CO_2 sense comprometre els nivells d'humitat.

Tot i que la norma europea EN 1015-3:1990 recomana una HR d'entre el 60 % i el 70 %, diversos estudis posteriors com El-Turki et al (2007) apunten que fins i tot valors més elevats (entre el 80 % i el 95 %) poden ser beneficiosos per afavorir la presa del morter. Per contra, valors inferiors al 40% poden ser contraproductius, ja que deshidraten el morter abans que la carbonatació es completi, debilitant-ne la resistència i la durabilitat.

La metodologia adoptada en aquest estudi es va enfocar a crear un ambient estable i humit, amb l'objectiu de promoure una presa lenta i homogènia, condició essencial per a la correcta formació de la microestructura del morter i per assolir unes condicions de fraguat òptimes. No obstant això, aquestes condicions es van veure alterades durant 21 dies, període en què la humitat relativa va disminuir fins al 40 % a causa d'un error de criteri. Aquesta baixada sobtada d'humitat podria haver afectat temporalment el procés d'enduriment del material. Aquesta anomalia s'ha tingut en compte en l'anàlisi i interpretació dels resultats.

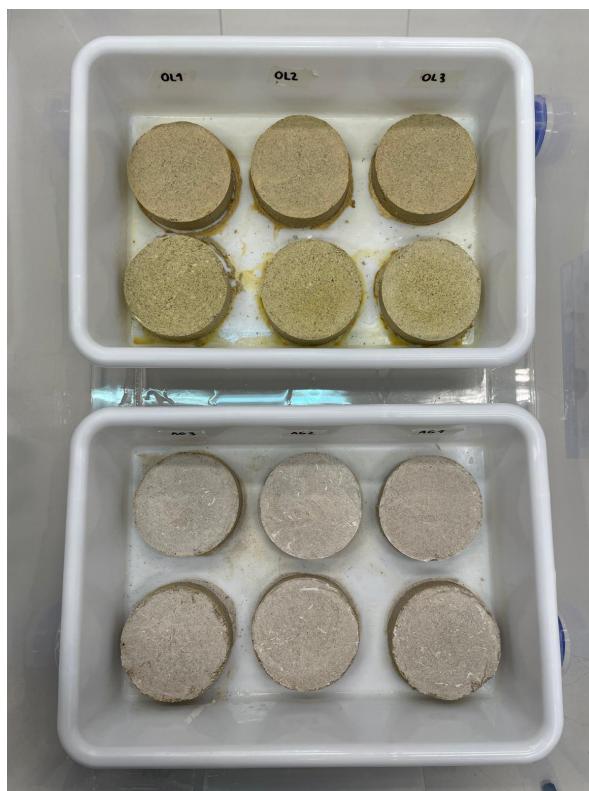


Figura 1. Provetes desemmotllades després de 7 dies.

3.2. Assajos realitzats

Els assaigs es van dur a terme 56 dies després de l'elaboració de les provetes de morter. Tot i que no es va realitzar cap prova química específica per comprovar el grau de carbonatació del material, com ara el test de la fenolftaleïna, es considera raonable suposar que, transcorregut aquest període, els morters havien experimentat cert grau d'enduriment i carbonatació.

La prova amb fenolftaleïna no es va poder dur a terme abans dels assaigs principals, ja que és un mètode destructiu: requereix tallar les provetes per exposar una secció transversal interna, que no hagi estat en contacte amb l'exterior ni amb cap superfície. Aquesta manipulació hauria inhabilitat les mostres per als posteriors assaigs, motiu pel qual es va prioritzar la conservació íntegra de les provetes.

Així doncs, els assaigs es van realitzar amb la premissa que el temps transcorregut (quasi dos mesos), conjuntament amb les condicions d'enduriment aplicades, havia estat suficient per garantir un enduriment mínim i unes condicions representatives del comportament del morter.

Cal aclarir que es va optar per treballar sobre la cara de les provetes que no havia estat en contacte amb l'oli de llinosa. Aquest producte s'havia aplicat prèviament en una de les cares del motlle per evitar que el morter s'hi adherís durant el procés d'enduriment, però la seva presència podia alterar

Andrea Pérez Ruiz - Additius naturals amb funcions hidrofugants en morters de calç aèria: un estudi comparatiu de l'arròs, el nopal i l'oli de llinosa

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024 - 2025

les propietats físiques o superficials del material, especialment relacionats amb l'absorció d'aigua, la textura o la cohesió superficial.

3.2.1. Assaig de l'angle de contacte

Objectiu

L'angle de contacte és l'angle que genera la gota d'un líquid en entrar en contacte amb un material sòlid. Si l'angle de contacte de la gota d'aigua és inferior a 90° es tracta d'una superfície hidrofílica, el que vol dir pot ser mullada més fàcilment. Pel contrari, si l'angle és superior a 90° es considera hidròfoba, per tant, repel·lència a l'aigua (Klein et al., 2012). Aquest assaig es va dur a terme per determinar la capacitat de repel·lència a l'aigua que presenta la superfície de les provetes de morter fabricades amb els diferents additius.

Material

- Superfície llisa de les provetes de morter endurides.
- Aigua destil·lada
- Pipeta
- Mòbil amb càmera (iPhone 12)
- Programa ImageJ amb el *plugin* "Contact Angle"

Procediment

L'assaig es va realitzar sobre les 12 provetes de morter endurides, 56 dies després de la seva elaboració.

Es van col·locar les provetes a una superfície plana i amb la pipeta es va dipositar una gota d'aigua destil·lada a una zona llisa dels morters. Aquest pas va ser gravat amb la càmera del mòbil, col·locada frontalment a 90° respecte la mostra. Des de l'aplicació de galeria de fotografies del dispositiu mòbil, es va capturar la imatge de la gota 1 segon després d'haver caigut. A partir d'aquestes imatges es va calcular l'angle de contacte format per la gota d'aigua amb el programa ImageJ, utilitzant el *plugin* "Contact Angle".

L'assaig es va realitzar un cop per proveta, és a dir, es van obtenir tres valors per cada material diferent, sobre els quals es va fer una mitja.

3.2.2. Assaig d'absorció d'aigua per capil·laritat

Objectiu

L'aigua pot penetrar dins d'una estructura a través de dos mecanismes principals: l'ascens capil·lar (també conegut com humitat ascendent) que prové del sòl, i la infiltració de l'aigua de pluja des de la part superior. L'ascens capil·lar es produeix gràcies a la presència de microporus amb diàmetres

Andrea Pérez Ruiz - Additius naturals amb funcions hidrofugants en morters de calç aèria: un estudi comparatiu de l'arròs, el nopal i l'oli de llinosa

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024 - 2025

d'entre 1 mm i 1 μ m. Aquest fenomen es produeix més ràpidament en porus petits, encara que la quantitat d'aigua que hi penetra és menor. En canvi, l'evaporació de l'aigua és més eficient en porus més grans (Charola et al., 2021).

Els porus capil·lars constitueixen la fracció més significativa de la porositat dels morters i exerceixen un rol fonamental en la seva permeabilitat. En funció del seu grau de connexió, els porus es poden classificar en oberts o tancats. Els porus oberts són aquells que permeten el pas de líquids o gasos i per tant, afavoreixen la permeabilitat, ja que comuniquen amb la superfície del material. En canvi, els porus tancats romanen aïllats dins de l'estructura i no participen en els processos de transferència. La suma dels porus oberts i tancats constitueix la porositat total del morter (Maria, 2010).

La finalitat d'aquest assaig és analitzar i comparar el coeficient d'absorció capil·lar dels morters elaborats amb els tres additius naturals, dels quals es planteja la hipòtesi que aporten propietats hidrofugants. En aquest estudi s'avalua específicament la porositat oberta de les provetes, ja que és aquest tipus de porus el que influeix directament en la capacitat d'absorció d'aigua.

Material

- Provetes de morter endurides
- Aigua destil·lada
- Dues safates de plàstic
- Baïeta
- Balança de precisió $\pm 0,01$ g
- Cronòmetre
- Paper absorbent

Procediment

El mètode d'assaig per determinar el coeficient d'absorció capil·lar és descrit en la norma (UNE-EN 1015-18:2003), titulada *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido"*. És necessari aclarir que no s'ha seguit aquest model d'assaig fidelment, sino que s'ha emprat com a guia orientativa, modificant alguns aspectes en funció de conveniència ja que l'estudi està subjecte als recursos accessibles. Per tant cal tenir en compte que:

- Les provetes són cilíndriques i no prismàtiques.
- L'assaig es va dur a terme 56 dies després de l'elaboració de les mostres, en comptes de 28 dies.
- Els morters no van ser assecats en una estufa (70 ± 5 °C) fins arribar a una massa constant.
- Les cares laterals de les provetes no van ser segellades per evitar que els laterals absorbissin aigua.

Andrea Pérez Ruiz - Additius naturals amb funcions hidrofugants en morters de calç aèria: un estudi comparatiu de l'arròs, el nopal i l'oli de llinosa

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024 - 2025

Malgrat no haver estat assecades a una estufa per tal d'obtenir un pes constant, les provetes van ser pesades en diferents moments i es va observar que els pesos registrats al cap de 21 dies des de la seva elaboració, 28 dies i 56 dies eren pràcticament constants, amb una desviació promig de $\pm 0,73$ g del conjunt de totes les mostres. L'assaig es va dur a terme en un ambient on la HR era del 70%

Les provetes de morter van ser posicionades en dues safates, dividides en grups de sis. Al fons del recipient es va col·locar un tros de baieta per cobrir-lo, deixant un espai d'aproximadament 1 cm amb una de les parets de la safata. Per aquest espai es va abocar l'aigua destil·lada, fins que la baieta va quedar completament empapada, en presionar-la lleugerament es veia el líquid a la superfície (Figura 2).

Les mostres de morter es van col·locar a sobre de la baieta i van ser retirades al cap d'1 min, 5 min, 10 min, 20 min, 30 min i 60 min (interval de temps acumulatiu). En cada interval de temps van ser pesades, incloent el pes inicial en sec. Per poder pesar-les es va eliminar l'excés d'aigua de la base de la proveta eixugant-la lleugerament amb un paper assecant, tot seguit es van posar cap per avall a la balança.

Durant l'assaig es va controlar que la baieta estigués igual d'humida constantment, agregant aigua quan era necessari.

A partir de les dades obtingudes amb els mesuraments de pes en els intervals indicats, es va calcular la massa d'aigua absorbida per unitat d'àrea (g/m^2) i el coeficient d'absorció per capil·laritat ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-0.5}$).



Figura 2. Provetes de morter col·locades sobre la baieta humida.

3.2.3. Assaig de determinació de la densitat aparent i de la porositat oberta total accessible a l'aigua

Objectiu

Avaluar la capacitat d'absorció d'aigua, calculant la porositat oberta i accessible dels quatre grups de morters.

Material

- Provetes de morter endurides
- Aigua destil·lada
- Recipient de plàstic més profund que les provetes
- Balança de precisió $\pm 0,01$ g
- Cronòmetre
- Paper absorbent

Andrea Pérez Ruiz - Additius naturals amb funcions hidrofugants en morters de calç aèria: un estudi comparatiu de l'arròs, el nopal i l'oli de llinosa

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024 - 2025

Procediment

L'assaig es va dur a terme seguint com a guia orientativa la norma UNE-EN 1936:2007, "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta total", amb algunes adaptacions pròpies a la naturalesa del material i les condicions de l'espai de treball.

Les provetes utilitzades eren de forma cilíndrica. Tot i que una de les cares de cada mostra presentava lleugeres irregularitats superficials, es considera que aquestes no afecten de manera significativa la precisió del càlcul volumètric, ja que totes les mostres mantenien dimensions similars i una geometria regular en general. La HR de l'espai on es va executar l'experiment era de 70%.

Les 12 provetes es van col·locar dins un recipient de plàstic i es van submergir completament en aigua destil·lada durant 24 hores a temperatura ambient (Figura 3). Transcorregut aquest temps, es va considerar que les mostres havien arribat a l'estat de saturació, és a dir, que no podien absorbir més aigua. A continuació, es van retirar del bany, es van eixugar lleugerament per eliminar l'excés superficial d'aigua i es van pesar immediatament.

Amb les dades de pes en estat sec (extretes de l'anterior assaig, dut a terme dues hores abans) i en estat saturat, es va calcular el percentatge de porositat oberta (P_o) de cada proveta mitjançant la fórmula establerta per la norma: $P_o = [(m_{\text{saturat}} - m_{\text{sec}}) / V] \times 100$



Figura 3. Provetes de morter submergides en aigua destil·lada.

3.2.4. Assaig de duresa superficial

Objectiu

Determinar si els additius han modificat les propietats de duresa superficial dels morters i comparar els valors entre sí.

Material

- Provets de morter endurides
- Superfície plana i dura on col·locar les provetes de morter
- PCE-2500N/PCE-2600N Härteprüfgerät (duròmetre)

Andrea Pérez Ruiz - Additius naturals amb funcions hidrofugants en morters de calç aèria: un estudi comparatiu de l'arròs, el nopal i l'oli de llinosa

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024 - 2025

Procediment

Després de l'assaig d'absorció d'aigua per immersió, les provetes necessitaven estar seques per poder dur a terme la prova del duròmetre. Per aquesta raó van ser introduïdes en un forn amb ventilació, seguint un assecat escalonat: primer a 50°C durant dues hores i posteriorment a 70°C durant cinc hores. L'objectiu d'aquest procés era assegurar l'eliminació completa de la humitat residual abans de qualsevol nova manipulació o mesura.

Un cop finalitzat l'assecat, es van tornar a pesar les mostres per comparar els valors amb els que s'havien obtingut abans de l'assaig amb aigua. Aquest pas va permetre comprovar si s'havia produït alguna alteració significativa en la massa dels morters com a conseqüència del procés d'immersió o assecat. Els resultats van mostrar una desviació mitjana de $\pm 0,66$ g entre el pes sec inicial (abans dels assajos) i el final, un valor que pot considerar-se molt baix, pel que es pot considerar que no es van produir grans modificacions en les provetes.

La duresa de les diferents formulacions de morter es va mesurar amb un duròmetre PCE-2500N/PCE-2600N Härteprüfgerät, basat en el principi de rebot (mètode Leeb). Tot i que aquest dispositiu està principalment dissenyat per a materials metàl·lics i d'alta resistència mecànica (*Material Hardness Tester for Metals PCE-2500N | PCE Instruments, s.d.*), s'ha utilitzat en aquest estudi amb un enfocament comparatiu, per valorar diferències relatives de duresa entre les diferents mostres de morter i no com a un indicador absolut de duresa.

Amb aquesta finalitat, les provetes es van col·locar sobre una superfície llisa i rígida (al terra) per garantir l'estabilitat durant la mesura. Es van realitzar tres impactes a punts diferents de cada proveta, obtenint un total de nou valors per cada família de morters. A partir d'aquests valors es va calcular la mitjana de duresa de cada tipus de morter, emprada com a indicador comparatiu entre les formulacions assajades.

4. Resultats

4.1. Resultat assaig de l'angle de contacte

Les imatges mostrades (Figura 4) han sigut seleccionades com a les més representatives del conjunt de cada família de provetes (per veure totes les fotografies de l'assaig, consultar Annex I, 7.1.1.).

- A) CO: el promig de l'angle de contacte de les provetes de control és de $53^\circ \pm 5^\circ$. Al ser inferior a 90° es pot determinar que la superfície de les mostres de morter de calç sense additius és hidròfila.
- B) AG: el promig de l'angle de contacte de les provetes fabricades amb pols de midó d'arròs és de $78^\circ \pm 6^\circ$. També és inferior a 90° , pel que es pot considerar que la superfície és hidròfila.
- C) NC: el promig de l'angle de contacte de les provetes fabricades amb pols de nopal és de $104^\circ \pm 9^\circ$. En superar els 90° d'angle de contacte es pot establir que la seva superfície és hidròfoba.
- D) OL: el promig de l'angle de contacte de les provetes fabricades amb oli de llinosa és de $104^\circ \pm 8^\circ$. Com en el cas anterior, es pot denominar com a superfície hidròfoba.

Els resultats obtinguts mostren que les provetes de morter més impermeables són les que contenen pols de nopal i oli de llinosa, amb angles de contacte superiors als 100° . En canvi, el morter amb pols de midó d'arròs presenta un angle de contacte inferior als 90° , cosa que el categoritza com a hidròfil. Tot i així, es distingeix de les provetes de morter sense additius, que també són hidròfiles, però amb un angle de contacte de $53^\circ \pm 5^\circ$, mentre que el morter de midó d'arròs assoleix els $78^\circ \pm 6^\circ$, acostant-se molt més als 90° .

Així doncs, tot i continuar dins la categoria d'hidròfils, els morters amb midó d'arròs han guanyat cert grau d'hidrofobicitat en comparació amb els que no incorporen additius. Els tres afegits han contribuït a millorar les propietats hidrofòbiques de la superfície dels morters, destacant especialment la pols de nopal i l'oli de llinosa.

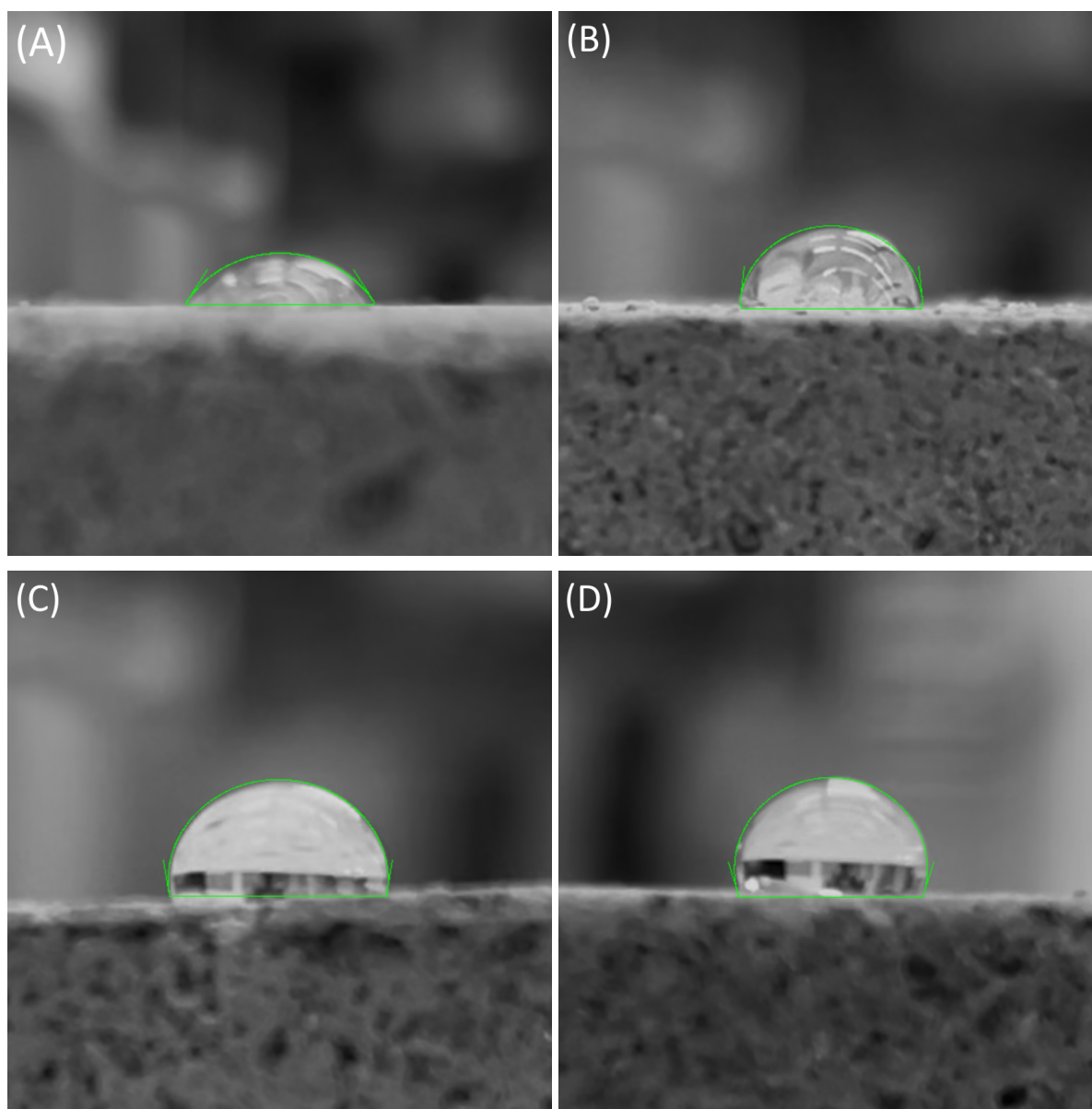


Figura 4. **(A)** Angle de contacte de la proveta CO2; **(B)** Angle de contacte de la proveta AG3; **(C)** Angle de contacte de la proveta NC3; **(D)** Angle de contacte de la proveta OL3.

(Taula de totes les mesures dels angles de contacte ubicada a l'Annex II, 7.2.1.)

4.2. Resultat assaig d'absorció d'aigua per capil·laritat

Les característiques descrites a la normativa UNE-EN 998-1:2018 respecte a l'índex d'absorció capil·lar en morters estableixen una classificació dels morters en funció del seu coeficient d'absorció d'aigua per capil·laritat:

- W0: sense requisits específics d'absorció capil·lar.
- W1: absorció capil·lar $\leq 0,4 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{-0,5}$
- W2: absorció capil·lar $\leq 0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{-0,5}$

Com s'observa a la Taula 3, els quatre tipus de morters emprats en l'estudi entren dins de la categoria W2. Això vol dir que poden ser aptes per a exteriors exposats a pluja o humitat.

Als gràfics està representada la massa d'aigua absorbida per unitat d'ària en (g/cm^2) en el temps ($\text{sec}^{-0,5}$), es van seleccionar aquestes unitats de mesura per tal de treballar més còmodament amb els valors. Tanmateix, l'índex d'absorció per capil·laritat si que s'ha expressat a la taula en $\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{-0,5}$, que és com la normativa UNE-EN 1015-18:2003 indica que s'ha de fer.

A la Figura 5 s'observa que tant el morter de control com el morter amb pols de midó d'arròs presenten una corba d'absorció capil·lar molt similar (a la Figura 6 es diferencia amb més claredat). Tots dos arriben a una fase d'estabilització del pes entre els 20 i 60 minuts. És probable que, encara que haguessin estat durant més temps en remull, l'increment d'aigua absorbida hagués estat poc significatiu. Aquests dos morters són els que han presentat els coeficients d'absorció capil·lar més elevats, amb els valors de $0,15 \pm 0,04 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{-0,5}$ per al morter amb midó d'arròs, i $0,14 \pm 0,04 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{-0,5}$ per a les mostres de control. Contra el que es podia esperar, el morter amb midó d'arròs ha mostrat un lleuger augment de la capacitat d'absorció respecte al que no conté additiu.

En canvi, les provetes amb pols de nopal mostren una absorció d'aigua més lenta i progressiva, sense arribar a un pes constant al llarg del temps d'assaig. Aquest comportament suggereix que, amb més temps de contacte amb l'aigua, aquestes mostres podrien haver continuat absorbint aigua, però a una velocitat més baixa. L'addició del nopal ha provocat una reducció significativa del coeficient d'absorció, que s'ha situat en $0,07 \pm 0,02 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{-0,5}$, és a dir, una disminució propera al 50% respecte als morters de control i els modificats amb midó d'arròs.

Pel que fa a les provetes amb oli de llinosa, són les que han mostrat una absorció pràcticament nul·la. El coeficient obtingut és de $0,00 \pm 0,00 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{-0,5}$, un valor tan baix que no es reflecteix de manera significativa en l'escala de l'assaig. Aquest additiu ha aconseguit reduir l'absorció per capil·laritat fins a un 100% respecte al morter sense additiu. Això indica que l'additiu presenta una capacitat hidrofugant molt elevada.

Un comportament tan repel·lent a l'aigua pot resultar contraproductiu. Si el morter perd la capacitat de permetre el pas d'aigua al seu interior, es comprometria la seva transpirabilitat. En aquest cas, la

humitat quedaria retinguda al suport original, el qual assumiria el paper de material de sacrifici, el morter és el que hauria d'assumir el deteriorament abans que els materials originals que protegeix.

Taula 3. Mitjana de l'índex d'absorció capil·lar dels morters segons l'additiu que contenen.

Mostres	Additiu	Índex d'absorció capil·lar ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{-0,5}$)
CO	-	0,14 ($\pm 0,04$)
AG	Pols de midó d'arròs	0,15 ($\pm 0,04$)
NC	Pols de nopal	0,07 ($\pm 0,02$)
OL	Oli de llinosa	0,00 ($\pm 0,00$)

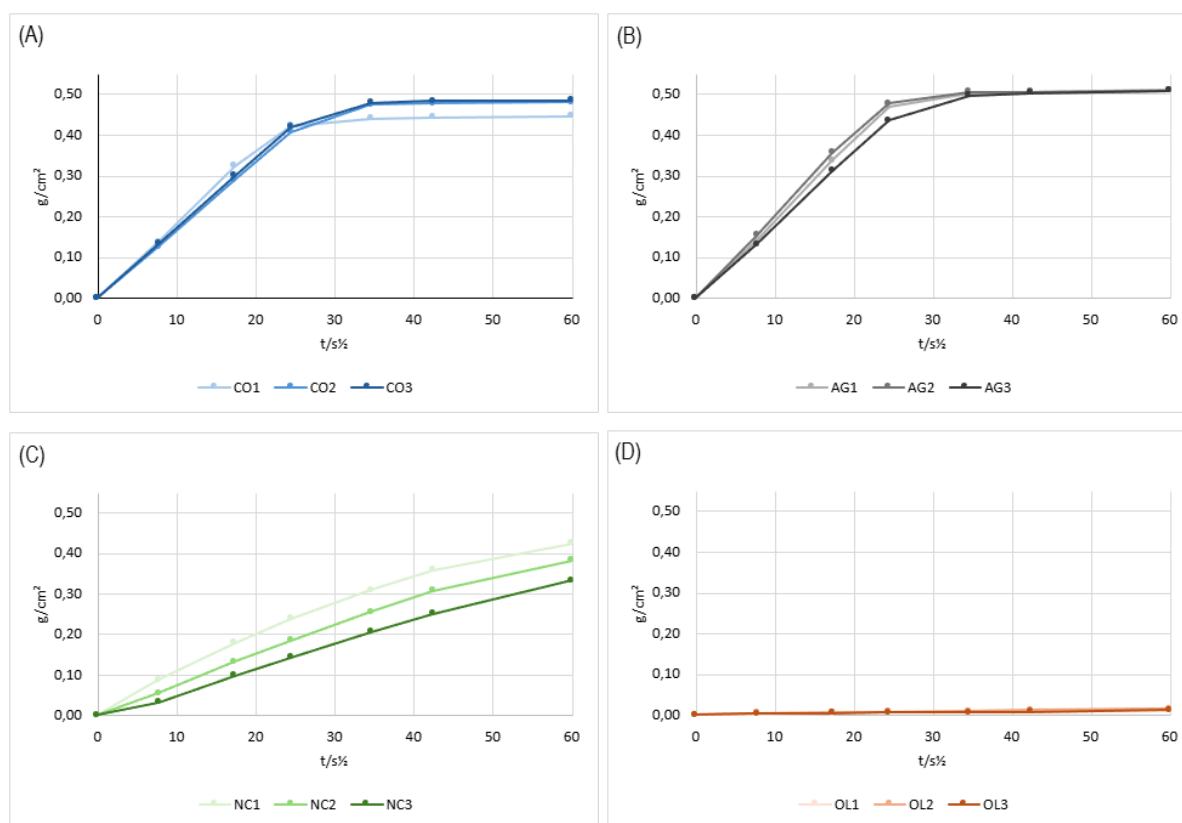


Figura 5. (A) Aigua absorbida en el temps de les provetes CO; (B) Aigua absorbida en el temps de les provetes AG; (C) Aigua absorbida en el temps de les provetes NC; (D) Aigua absorbida en el temps de les provetes OL.

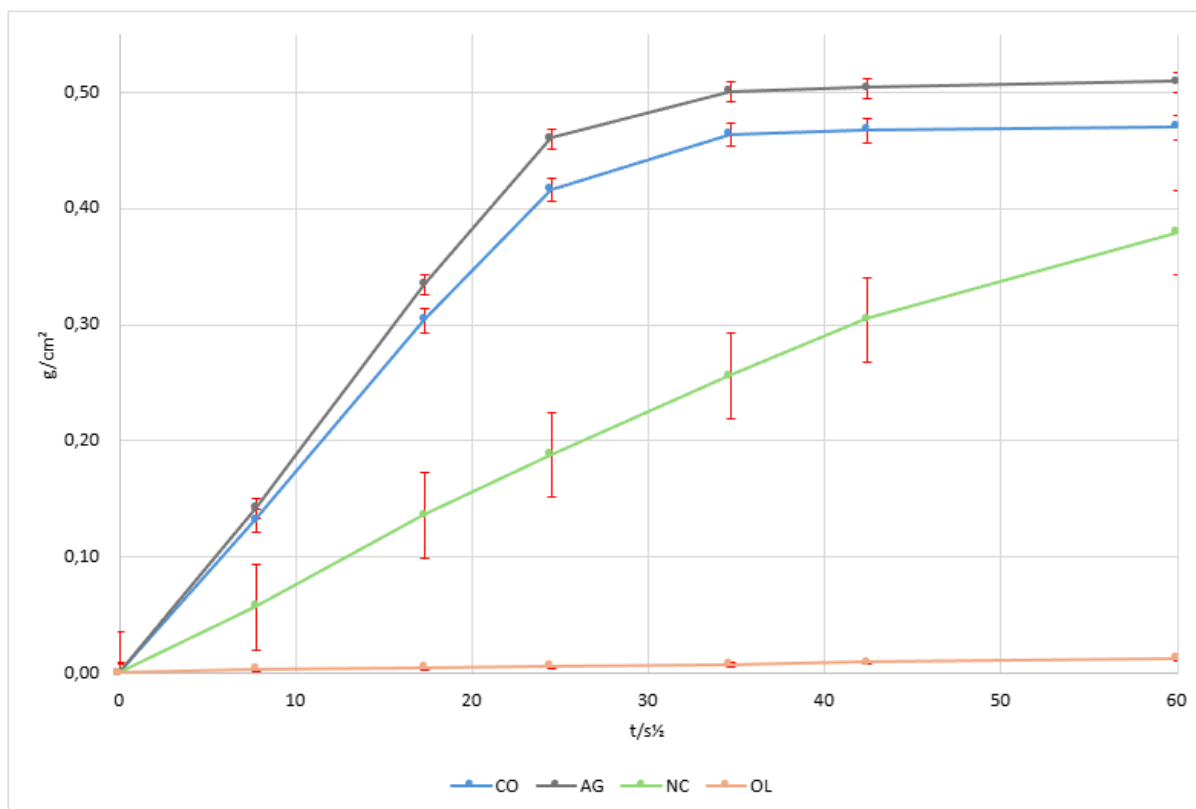


Figura 6. Comparativa de la mitja i desviació d'aigua absorbida en el temps, dels grups de provetes CO, AG, NC i OL.

(Totes les dades de pes i càlculs es recullen a l'Annex II, 7.2.2.)

4.3. Resultat assaig de determinació de la densitat aparent i de la porositat oberta total accessible a l'aigua

A la Taula 4 s'observa una reducció de la densitat aparent en tots els morters amb additius, especialment en el cas de la pols de nopal, seguit dels morters amb oli de llinosa i amb pols de midó d'arròs. Aquest descens podria deure's a la incorporació d'un volum d'aire més elevat durant la mescla, un fenomen habitual en morters als quals s'afegeixen agents hidrofugants (Izaguirre et al., 2009).

Tal com es mostra a la Taula 5, els tres primers morters presenten valors de porositat oberta molt similars, amb una desviació màxima entre ells de només 1,02%. El morter amb pols de nopal és el que presenta el valor més elevat, amb un $22,62\% \pm 0,26\%$, seguit pel midó d'arròs amb un $21,99\% \pm 0,37\%$, i el morter de control, sense cap additiu, amb un $20,21\% \pm 0,97\%$. Tenint en compte la desviació estàndard dels grups, es pot dir que tots tres presenten la mateixa porositat.

Aquests resultats indiquen que ni el midó d'arròs ni la pols de nopal han reduït la porositat oberta dels morters, al contrari, sembla que aquests additius poden haver afavorit un lleuger augment de la

porositat respecte al morter de control. Aquesta tendència resulta especialment interessant i pot suggerir una interacció amb l'estructura porosa del material.

És especialment rellevant destacar el cas del morter amb nopal: tot i presentar una capacitat d'absorció d'aigua més baixa inicialment ($0,07 \pm 0,02 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{-0.5}$), en comparació amb el morter de control ($0,14 \pm 0,04 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{-0.5}$) i el de midó d'arròs ($0,15 \pm 0,04 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{-0.5}$), al cap de 24 hores l'absorció d'aigua és gairebé completa. Aquest comportament pot indicar que, malgrat que tant el nopal com l'oli de llinosa són considerats tradicionalment agents hidrofugants, existeix una diferència significativa en l'efectivitat real d'ambdós materials. De fet, només l'oli de llinosa sembla mantenir un comportament clarament hidrofugant, tal com també s'ha observat en estudis previs (Nunes i Slížková, 2014).

Una possible explicació d'aquesta diferència és que la pel·lícula superficial generada pel nopal es degradi amb el contacte continuat amb l'aigua, fet que redueix progressivament la seva capacitat hidrofugant. Per tal de verificar aquesta hipòtesi, seria pertinent realitzar assaigs de durabilitat aplicant cicles accelerats de humitat i assecat, tal com proposa la norma EN 16581 (2014) o similars, que permeten avaluar el comportament dels materials sotmesos a condicions ambientals variables.

Pel que fa a les mostres de morter amb oli de llinosa, cal tenir en compte que el seu comportament extremadament hidrofugant ($3,76\% \pm 0,12\%$) dificulta l'absorció d'aigua. Aquest fet pot afectar la precisió dels resultats obtinguts mitjançant mètodes basats en la impregnació amb aigua, com és el cas de la determinació de la porositat oberta. En aquests casos, la mostra pràcticament no absorbeix líquid, cosa que pot donar lloc a una subestimació del volum real de porus accessibles.

Per tal d'obtenir una mesura més representativa de la porositat total d'aquest morter, es proposa complementar l'anàlisi amb tècniques alternatives que no depenguin de la presència d'aigua. Entre aquestes, es podrien considerar el picnòmetre amb gas (heli) o la porosimetria per intrusió de mercuri, que permeten caracteritzar la porositat del material amb més precisió, especialment en materials amb propietats hidrofugants molt marcades (EN 1936, 2006).

Taula 4. Mitjana de la densitat aparent dels morters segons l'additiu que contenen.

Provetes	Additiu	D (kg/m^3)
CO	-	1834 (± 90)
AG	Pols de midó d'arròs	1766 (± 17)
NC	Pols de nopal	1599 (± 65)
OL	Oli de llinosa	1731 (± 6)

Taula 5. Mitjana de la porositat oberta dels morters segons l'additiu que contenen.

Provetes	Additiu	Porositat oberta (vol. %)
CO	-	20,21% ($\pm 0,97$)
AG	Pols de midó d'arròs	21,99% ($\pm 0,37$)
NC	Pols de nopal	22,62% ($\pm 0,26$)
OL	Oli de llinosa	3,76% ($\pm 0,12$)

(Els càlculs i dades d'aquest assaig es troben a l'Annex II, 7.2.3.)

4.4. Resultat assaig de duresa superficial

Com més s'acosta un valor de HL (*Hardness Leeb*) als 950 HL, més gran és la duresa del material, per contra, valors propers als 100 HL indiquen una superfície més tova (UNE-EN ISO 16859-1:2016). En el cas de les provetes analitzades, els valors obtinguts se situen entre els 180 HL i els 210 HL (Taula 6), cosa que suggereix que els morters assajats presenten una duresa superficial relativament baixa.

En ordre creixent de duresa, les mostres es distribueixen de la manera següent:

- Morter de control
- Morter amb pols de midó d'arròs
- Morter amb oli de llinosa
- Morter amb pols de nopal

Els valors obtinguts, tot i ser baixos en el context de materials d'alta resistència, permeten establir comparacions relatives entre els diferents morters assajats i mostren una tendència a l'increment de la duresa quan s'incorporen additius. De fet, el morter amb pols de nopal és l'únic que resulta estadísticament més dur: la seva mitja, sumada al mínim valor de desviació estàndard (~ 198 HL), supera la mitja del morter de control més el seu màxim de desviació (~ 190 HL). Per tant, podem concloure que aquest additiu millora les propietats mecàniques mesurades en termes de duresa superficial, mentre que els altres dos no presenten canvis rellevants en aquest sentit.

Curiosament, aquest augment de la duresa no sembla derivar d'una reducció de porositat o estructural, sinó que simplement indica una major resistència superficial. Cal tenir en compte, però, que aquests assaigs només mesuren la duresa superficial. Per avaluar completament el comportament mecànic, seria necessari realitzar proves addicionals de duresa total, com ara assaigs de compressió i tracció. A més, seria interessant mesurar la duresa després d'assaigs de durabilitat amb cicles d'humitat i assecat (per exemple, segons la norma EN 16581:2014) per determinar si, a llarg termini, el morter amb nopal manté aquestes propietats hidrofugants i mecàniques.

Andrea Pérez Ruiz - Additius naturals amb funcions hidrofugants en morters de calç aèria: un estudi comparatiu de l'arròs, el nopal i l'oli de llinosa

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024 - 2025

Taula 6. Mitjana de la duresa (mètode Leeb) per cada tipus de morter.

Provetes	Additiu	Duresa Leeb (HL)
CO	-	184 HL (± 8)
AG	Pols de midó d'arròs	192 HL (± 15)
NC	Pols de nopal	211 HL (± 13)
OL	Oli de llinosa	194 HL (± 8)

(Els càlculs i dades d'aquest assaig es troben a l'Annex II, 7.2.4.)

5. Conclusions

En aquest treball s'han preparat provetes de morter de calç aèria amb tres materials naturals (pols de midó d'arròs, pols de nopal i oli de llinosa) per avaluar-ne les propietats hidrofugants en el context de la conservació-restauració de materials petris. L'objectiu general consistia a determinar quin d'aquests additius ofereix una millor resistència a l'aigua quan s'incorpora a la mescla de morter, atès que aquests morters s'utilitzen en el patrimoni arquitectònic exposat a la intempèrie. Per assolir aquest propòsit, es van plantejar tres objectius específics: avaluar l'eficàcia hidrofugant mitjançant la mesura de l'angle de contacte i l'absorció d'aigua per capil·laritat, analitzar l'efecte de cada additiu en la porositat total accessible a l'aigua i comparar la duresa superficial dels morters aditivats amb la dels morters sense additius. Aquest enfocament integral ha permès obtenir una visió global del potencial d'aquests materials com a agents hidrofugants, contribuint així a la recerca de solucions més sostenibles i eficients en l'àmbit de la conservació i restauració del patrimoni.

Els assaigs d'angle de contacte mostren que els morters amb pols de nopal i oli de llinosa adquireixen característiques clarament hidrofòbiques ($104^\circ \pm 9^\circ$ i $104^\circ \pm 8^\circ$, respectivament), mentre que el morter amb pols de midó d'arròs, amb un angle de $78^\circ \pm 6^\circ$, continua dins la categoria d'hidròfil tot i acostar-se als 90° . El morter de control, per la seva banda, presenta un angle de contacte de $53^\circ \pm 5^\circ$, indicatiu d'una superfície netament hidròfila. D'altra banda, els resultats de l'assaig d'absorció capil·lar confirmen aquesta tendència: els morters de control i amb midó d'arròs registren coeficients al voltant de $0,14\text{--}0,15 \text{ kg/m}^2\cdot\text{min}^{-0.5}$, mentre que el morter amb nopal redueix aquest valor a $0,07 \pm 0,02 \text{ kg/m}^2\cdot\text{min}^{-0.5}$ (una disminució d'aproximadament el 50 %) i el morter amb oli de llinosa mostra una absorció pràcticament nul·la ($0,00 \pm 0,00 \text{ kg/m}^2\cdot\text{min}^{-0.5}$). Per tant, només els additius de nopal i oli de llinosa compleixen plenament l'objectiu d'incrementar la resistència a l'aigua del morter, mentre que el midó d'arròs ofereix un augment moderat de la repel·lència superficial però no impedeix l'absorció capil·lar. Aquest comportament extremadament hidrofòbic de l'oli de llinosa podria, no obstant això, comprometre la transpirabilitat del morter, propiciant que la humitat es concentri en el material original que es pretenia protegir.

Els morters amb additius registren una densitat aparent inferior al morter de control, destacant especialment el descens en el cas de la pols de nopal, probablement a causa d'una major incorporació d'aire durant la mescla. Pel que fa a la porositat oberta, tant el morter amb nopal ($22,62 \pm 0,26 \%$) com el de midó d'arròs ($21,99 \pm 0,37 \%$) presenten valors lleugerament superiors al morter de control ($20,21 \pm 0,97 \%$), cosa que indica que aquests additius no redueixen la porositat accessible al volum d'aigua i que de fet, no la han modificat. En canvi, el morter amb oli de llinosa mostra una porositat aparent molt baixa ($3,76 \pm 0,12 \%$), però aquest resultat no reflecteix el volum real de porus, ja que l'elevada hidrofobicitat impedeix l'absorció d'aigua durant l'assaig i subestima la porositat total. Per avaluar de manera més precisa la porositat en materials amb propietats hidrofugants marcades, es recomana utilitzar tècniques que no depenguin de l'ús d'aigua, com ara el picnòmetre de gas o la porosimetria per intrusió de mercuri.

Els resultats de duresa Leeb mostren valors baixos (180–210 HL), però permeten comparar morters: el control és el més tou, seguit de midó d'arròs, oli de llinosa i, finalment, nopal, que és l'únic que presenta un augment estadísticament significatiu de duresa superficial. Aquest increment no sembla relacionat amb la porositat, sinó amb una major resistència de la superfície. Per obtenir unes conclusions més completes, caldrien proves addicionals de duresa total (compressió, tracció) i assaigs de durabilitat (cicles humitat–assecat) per verificar la persistència d'aquestes propietats al llarg del temps.

A la Taula 7 es reuneixen totes les dades de les anàlisis per tal de facilitar la comparació dels valors.

Com a conclusió final, l'oli de llinosa ha demostrat preliminarment oferir les millors condicions hidrofugants en termes de reducció de la penetració d'aigua (en excés), seguit de la pols de nopal, mentre que el midó d'arròs quasi no presenta millora. No s'ha observat cap variació en la porositat oberta de les mostres, cal destacar, però, que en el cas de l'oli de llinosa no s'ha pogut determinar amb precisió a causa de la seva elevada hidrofobicitat. No obstant això, per confirmar de manera rigorosa aquests resultats, caldria dur a terme assaigs addicionals de durabilitat (com cicles accelerats d'humitat i assecat) per valorar si les propietats hidrofòbiques es mantenen a llarg termini, ja que les provetes analitzades encara són molt joves. Seria recomanable tornar a analitzar aquests morters passats sis mesos i un any per mesurar canvis en paràmetres com la porositat o la duresa i verificar l'evolució del color, atès que la coloració podria variar amb el temps i influir en decisions estètiques i de conservació.

Cal tenir en compte també que aquest estudi s'ha realitzat amb additius en format experimental (pols de midó d'arròs en lloc d'aigua glutinosa i pols de fulles de nopal en comptes del mucíl·lag tradicional). Encara que aquests formats poden resultar més pràctics pel seu emmagatzematge i transport, caldrà comparar-los en el futur amb els productes convencionals per determinar si les seves propietats es mantenen o fins i tot milloren. A més, seria interessant ampliar l'estudi a altres mesures, com la retracció de les mostres, que no s'ha evaluat en aquest treball, ja que pot tenir un impacte important sobre la fissuració.

D'altra banda, cal assenyalar que, en el cas del morter amb nopal, la barreja inicial tenia una consistència més seca de l'òptima, la qual cosa podria afectar-ne la treballabilitat en una aplicació real. Si es modifiquen les proporcions afegint més aigua, potser s'obtidrien propietats diferents, per la qual cosa convindria dissenyar de nou l'experiment des de l'inici, ajustant aquests aspectes millorables.

Aquest treball ha donat lloc a una valuosa experiència d'aprenentatge, tant en la realització d'assajos experimentals com en la interpretació dels resultats. Ha permès evidenciar el potencial dels additius naturals i reforça la importància de continuar orientant la conservació-restauració cap a pràctiques més sostenibles, tot millorant progressivament els processos i criteris d'intervenció. Les aportacions d'aquesta recerca poden contribuir a ampliar el coneixement sobre l'ús d'additius naturals en morters de calç aèria compatibles amb el patrimoni històric.

Andrea Pérez Ruiz - Additius naturals amb funcions hidrofugants en morters de calç aèria: un estudi comparatiu de l'arròs, el nopal i l'oli de llinosa

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024 - 2025

Taula 7. Comparació de la mitjana de resultats obtinguts en els assajos fets als quatre grups de morters diferents.

Provetes	Additiu	Angle de contacte (°)	Densitat aparent (kg/m ³)	Porositat oberta (vol. %)	índex d'absorció per capil·laritat (kg/m ² ·min ^{-0.5})	Duresa (HL)
CO	-	53 (± 5)	1834 (± 90)	20,21 (± 0,97)	0,14 (± 0,04)	184 (± 8)
AG	Pols de midó d'arròs	78 (± 6)	1766 (± 17)	21,99 (± 0,37)	0,15 (± 0,04)	192 (± 15)
NC	Pols de nopal	104 (± 9)	1599 (± 65)	22,62 (± 0,26)	0,07 (± 0,02)	211 (± 13)
OL	Oli de llinosa	104 (± 8)	1731 (± 6)	3,76 (± 0,12)	0,00 (± 0,00)	194 (± 8)

6. Bibliografia (format APA 7)

- AENOR.** (2007). *UNE-EN 1936:2007. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.* Asociación Española de Normalización.
- Audenrode, F. V., & Kock, T. D.** (2024). *Testing historical recipes with organic additives to alter the water absorption of traditional lime mortar.* *MATEC Web of Conferences*, 403, 03010.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/202440303010>
- Bosiljkov, V. B., Padovnik, A., & Turk, T.** (2023). *Conservation and restoration of historic mortars and masonry structures.* In *Rilem Bookseries*. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-31472-8>
- Cartwright, M.** (s.d.). *Vitruvio.* Enciclopedia de la historia del mundo. Recuperat el 3 de maig 2025, de <https://www.worldhistory.org/trans/es/1-12057/vitruvio/>
- Cazalla Vázquez, O.** (2002). *Morteros de cal: Aplicación en el patrimonio histórico* [Tesis doctoral, Universidad de Granada]. <https://digibug.ugr.es/handle/10481/28626>
- CEN.** (2014). *EN 16581:2014. Conservació del patrimoni cultural. Superfícies de pedra. Mètode de prova per a determinar l'eficàcia dels tractaments hidrofugants aplicats sobre pedra natural.* Comitè Europeu de Normalització.
- AENOR.** (2003). *UNE EN 1015-18: Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18 : Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido.* Junio 2003.
- Charola, A. E., Otero, J., DePriest, P. T., & Koestler, R. J.** (2021). *Evaluación del patrimonio construido: Manual de ensayos simples.* Smithsonian Institution Scholarly Press.
<https://doi.org/10.5479/si.16569261>
- Chen, J., Jia, J., & Zhu, M.** (2024). Development of admixtures on seawater sea sand concrete: A critical review on Concrete hardening, chloride ion penetration and steel corrosion. *Construction and Building Materials*, 411, 134219.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134219>
- Andrea Pérez Ruiz - Additius naturals amb funcions hidrofugants en morters de calç aèria: un estudi comparatiu de l'arròs, el nopal i l'oli de llinosa
Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, curs 2024 - 2025

Chen, Z., Liu, H., Xu, L., & Ge, W. (2024). *A review of mechanical properties and carbonation behavior evolution of lime mortar for architectural heritages restoration. Minerals and Mineral Materials*, 3(1), Article e2023026 <https://doi.org/10.20517/mmm.2023.26>

Coalescència | diccionari.cat. (s.d.). *Gran diccionari de la llengua catalana*. Recuperat el 23 de maig 2025, de <https://www.diccionari.cat/GDLC/coalescencia>

Elert, K., Jroundi, F., Benavides-Reyes, C., Gómez, E. C., Gulotta, D., & Rodriguez-Navarro, C. (2022). Consolidation of clay-rich earthen building materials: A comparative study at the Alhambra fortress (Spain). *Journal of Building Engineering*, 50, 104081.

El-Turki, A., Ball, R. J., & Allen, G. C. (2007). The influence of relative humidity on structural and chemical changes during carbonation of hydraulic lime. *Cement and Concrete Research*, 37(8), 1233-1240. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.05.002>

EN 1936:2006. (s.d.). *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real aparente y de la porosidad abierta y total* [PDF]. Scribd. Recuperat el 2 de juny 2025, de <https://www.scribd.com/document/718959687/EN-1936-2006>

Figueiredo, C. D. P. (2018). *Properties and performance of lime Mortars for conservation: The role of binder chemistry and curing regime*. [Tesi doctoral, University of Bath.]

Gonzalez-Sanchez, J. F. (2021). *Desarrollo de nuevos morteros de restauración de cal con aditivos*. [Tesi doctoral, Universidad de Navarra] <https://hdl.handle.net/10171/60878>

Greenspan, L. (1977). Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *Journal of Research of the National Bureau of Standards. Section A, Physics and Chemistry*, 81A(1), 89-96. <https://doi.org/10.6028/jres.081A.011>

Guasch Ferré, N. (2016). *Optimització de mètodes multitècnica per a la caracterització de components orgànics i morters de calç tradicionals de l'antiguitat. Desenvolupament de metodologies experimentals per a la seva conservació i restauració. Aplicació a un cas*

Andrea Pérez Ruiz - Additius naturals amb funcions hidrofugants en morters de calç aèria: un estudi comparatiu de l'arròs, el nopal i l'oli de llinosa

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024 - 2025

d'estudi: Els estucs de la pintura mural de la cultura maia (antiga mesoamèrica) [Tesi doctoral, Universitat Politècnica de València].

<https://producciocientifica.uv.es/documentos/5eb09d222999527641125624>

Guixeras, M., & Argano, S. (2010). Perquè la calç: Quina, quan i com. *UNICUM*, 9, Article 9.

Henry, A., & Stewart, J. (2012). *Practical building conservation: mortars, plasters and renders*. Ashgate Publishing, Ltd.

Hughes, D. C. (1985). Pore structure and permeability of hardened cement paste. *Magazine of Concrete Research*, 37(133), 227-233. <https://doi.org/10.1680/mac.1985.37.133.227>

Izaguirre, A., Lanas, J., & Álvarez, J. I. (2009). Effect of water-repellent admixtures on the behaviour of aerial lime-based mortars. *Cement and concrete research*, 39(11), 1095-1104. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.07.026>

Izaguirre Eseverri, A. A. (2010). *Comportamiento de morteros de cal aérea con aditivos* [Tesi doctoral, Universitat del País Basc].

Jakić, J., Labor, M., & Martinac, V. (2016). Characterization of dolomitic lime as the base reagent for precipitation of $Mg(OH)_2$ from Seawater. *Chemical and biochemical engineering quarterly*, 30(3), 373-379. <https://doi.org/10.15255/CABEQ.2015.2325>

Jayasingh, S., & Selvaraj, T. (2022). Influence of organic additive on carbonation of air lime mortar – Changes in mechanical and mineralogical characteristics. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(5), 1776-1791. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1731716>

Kita, Y. (2013). The functions of vegetable mucilage in lime and earth mortars – A review. Comunicació presentada al *3rd Historic Mortars Conference, Glasgow, Regne Unit*.

Klein, N. S., Bachmann, J., Aguado, A., & Toralles-Carbonari, B. (2012). Evaluation of the wettability

Andrea Pérez Ruiz - Additius naturals amb funcions hidrofugants en morters de calç aèria: un estudi comparatiu de l'arròs, el nopal i l'oli de llinosa

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, curs 2024 - 2025

- of mortar component granular materials through contact angle measurements. *Cement and Concrete Research*, 42(12), 1611-1620. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.09.001>
- Kwong, T. H.** (2019). Compressive strength and water absorption of mortar incorporating silica fume. *SSRG International Journal of Civil Engineering*.
https://www.academia.edu/43678882/Compressive_Strength_and_Water_Absorption_of_Mortar_Incorporating_Silica_Fume
- La Spina, V.** (2015). Proyecto Coremans: Criterios de intervención en materiales pétreos. *Loggia: Arquitectura y restauración*, 28, 138.
- Maria, S.** (2010). Methods for porosity measurement in lime-based mortars. *Construction and Building Materials*, 24(12), 2572-2578. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.05.019>
- PCE-2500N Instruments** (s.d.) *Material Hardness Tester for Metals PCE-2500N*. Recuperat 15 maig 2025, de
https://www.pce-instruments.com/us/measuring-instruments/test-meters/material-tester-pce-instruments-material-hardness-tester-for-metals-pce-2500n-det_5850986.htm
- Mingarro Martín, F.** (1996). *Degradación y conservación del patrimonio arquitectónico: [Cursos de verano de El Escorial de la Universidad Complutense de Madrid, 1994]*.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=314707>
- Nunes, C., & Slížková, Z.** (2014). *Hydrophobic lime based mortars with linseed oil: Characterization and durability assessment*. *Cement and Concrete Research*, 61-62, 28-39.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.03.011>
- Nunes, C., Viani, A., & Ševčík, R.** (2020). *Microstructural analysis of lime paste with the addition of linseed oil, stand oil, and rapeseed oil*. *Construction and Building Materials*, 238, 117780.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117780>
- Otero, J.** (2018). *Lime based nanomaterials for the conservation of calcareous substrates in heritage*
Andrea Pérez Ruiz - Additius naturals amb funcions hidrofugants en morters de calç aèria: un estudi comparatiu de l'arròs, el nopal i l'oli de llinosa
Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, curs 2024 - 2025

structures [Tesi doctoral, Sheffield Hallam University]. SHURA.

<https://shura.shu.ac.uk/22428/>

Otero, J., Charola, A. E., & Starinieri, V. (2019). *Sticky rice–nanolime as a consolidation treatment for lime mortars. Journal of Materials Science*, 54(14), 10217-10234.

<https://doi.org/10.1007/s10853-019-03618-1>

Ravi, R., & Thirumalini, S. (2019). *Effect of natural polymers from cissus glauca roxb on the mechanical and durability properties of hydraulic lime mortar. International Journal of Architectural Heritage*, 13(2), 229-243. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1431732>

Rodriguez-Navarro, C., Ilić, T., Ruiz-Agudo, E., & Elert, K. (2023). *Carbonation mechanisms and kinetics of lime-based binders: An overview. Cement and Concrete Research*, 173, 107301.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107301>

Rogers, S. B. (2011). *Evaluation and testing of brick dust as a pozzolanic additive to lime mortars for architectural conservation* (Núm. 162) [Tesi de màster, University of Pennsylvania].

<https://repository.upenn.edu/handle/20.500.14332/36663>

Sandoval, G. F. B., Galobardes, I., Schwantes-Cezario, N., Campos, A., & Toralles, B. M. (2019). *Correlation between permeability and porosity for pervious concrete (PC). DYNA*, 86(209), 151-159.

Sastre Sastre, R. (2000). *Propietats dels materials i elements de construcció*. Edicions UPC.

<https://doi.org/10.5821/ebook-9788498802634>

Stefanidou, M., & Papayianni, I. (2005). *The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars. Cement and Concrete Composites*, 27(9), 914-919.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.05.001>

Teutonico, J. M. (1988). *A laboratory manual for architectural conservators*. ICCROM.

http://www.iccrom.org/ifrcdn/pdf/ICCROM_11_LabManual_en.pdf

Andrea Pérez Ruiz - Additius naturals amb funcions hidrofugants en morters de calç aèria: un estudi comparatiu de l'arròs, el nopal i l'oli de llinosa

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024 - 2025

UNE. (s.d.). UNE-EN 459-1:2016. *Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.* Asociación Española de Normalización. Recuperat el 2 de juny 2025, de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0056852>

UNE. (s.d.). UNE-EN 998-1:2018. *Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para enfoscado y enlucido.* Asociación Española de Normalización. Recuperat el 4 de maig 2025, de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0059828>

UNE. (s.d.). UNE-EN 1015-2:1999. *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 2: Determinación de la proporción de mezcla en masa y del contenido de aire fresco del mortero.* Asociación Española de Normalización. Recuperat el 2 de juny 2025, de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0009378>

UNE. (s.d.). UNE-EN 1015-3:2000. *Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (ensayo de la mesa).* Asociación Española de Normalización. Recuperat el 2 de juny 2025, de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0023381>

UNE. (s.d.). UNE-EN ISO 16859-1:2016. *Materiales metálicos. Ensayo de dureza mediante el método de rebote (método Leeb). Parte 1: Principios de ensayo (ISO 16859-1:2015).* Asociación Española de Normalización. Recuperat el 2 de juny 2025, de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0056031>

Urland, A., & Borrelli, E. (1999). *ARC Laboratory handbook: Vol. 2. Porosity.* ICCROM.

Villar-Cociña, E. (2002). *Kinetics of the water absorption in slag cement mortars.*

https://www.academia.edu/4799107/Kinetics_of_the_water_absorption_in_slag_cement_mortars

Vitruvio Polión, M. (1987). *Los diez libros de arquitectura* (D. Rodríguez Ruiz & J. Ortiz y Sanz, Trads.).

Akal. <https://produccioncientifica.ucm.es/documentos/5e7a9d952999522583e81b15>

Andrea Pérez Ruiz - Additius naturals amb funcions hidrofugants en morters de calç aèria: un estudi comparatiu de l'arròs, el nopal i l'oli de llinosa

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024 - 2025

Yang, F., Zhang, B., & Ma, Q. (2010). Study of sticky rice–Lime mortar technology for the restoration of historical masonry construction. *Accounts of Chemical Research*, 43(6), 936-944.

<https://doi.org/10.1021/ar9001944>

Yang, F., Zhang, B., Pan, C., & Zeng, Y. (2009). Traditional mortar represented by sticky rice lime mortar—One of the great inventions in ancient China. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 52(6), 1641-1647. <https://doi.org/10.1007/s11431-008-0317-0>

7. Annexos

7.1. Annex I. Imatges Específiques

7.1.1. Assaig de l'angle de contacte

Imatges preses per a la mesura de l'angle de contacte en cada proveta, després d'analitzar-les amb el programa ImageJ i el *plugin* "Contact Angle".

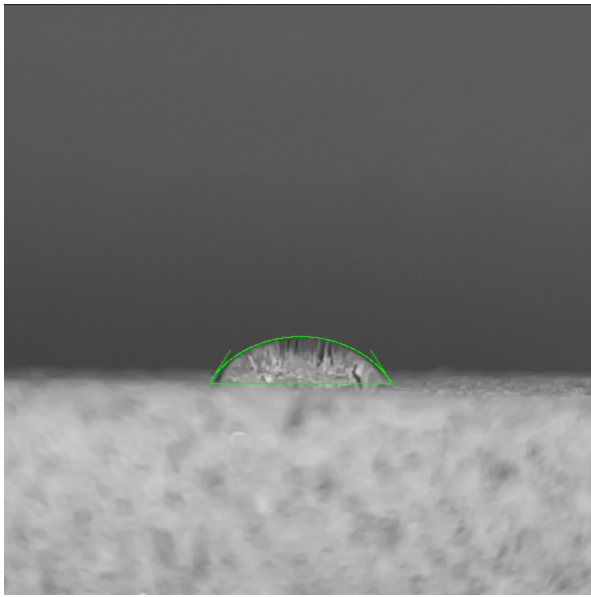


Figura 7. Angle de contacte de la proveta CO1.

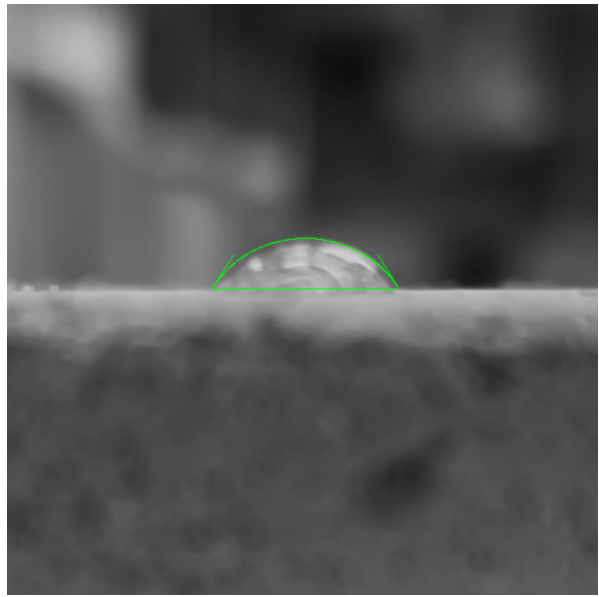


Figura 8. Angle de contacte de la proveta CO2.

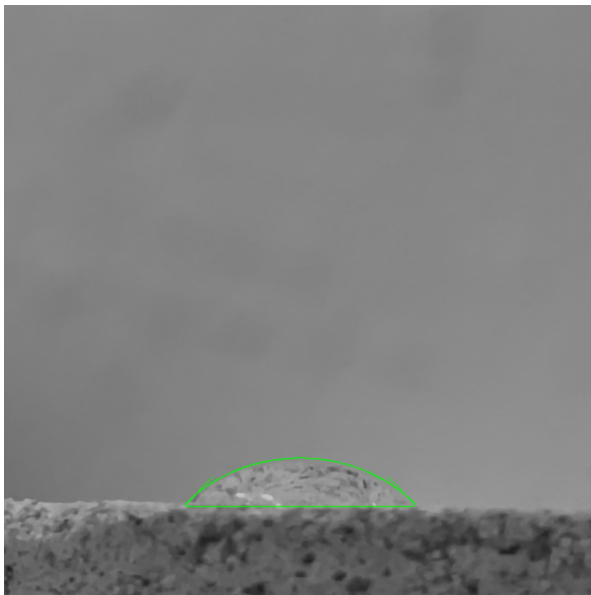


Figura 9. Angle de contacte de la proveta CO3.

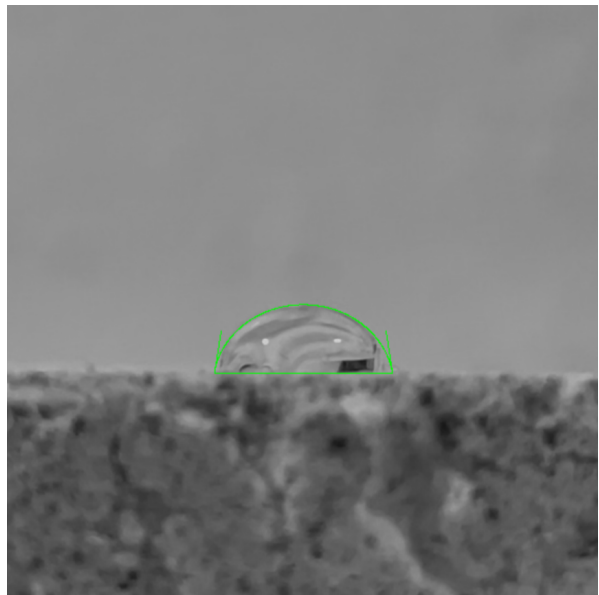


Figura 10. Angle de contacte de la proveta AG1.

Andrea Pérez Ruiz - Additius naturals amb funcions hidrofugants en morters de calç aèria: un estudi comparatiu de l'arròs, el nopal i l'oli de llinosa

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024 - 2025

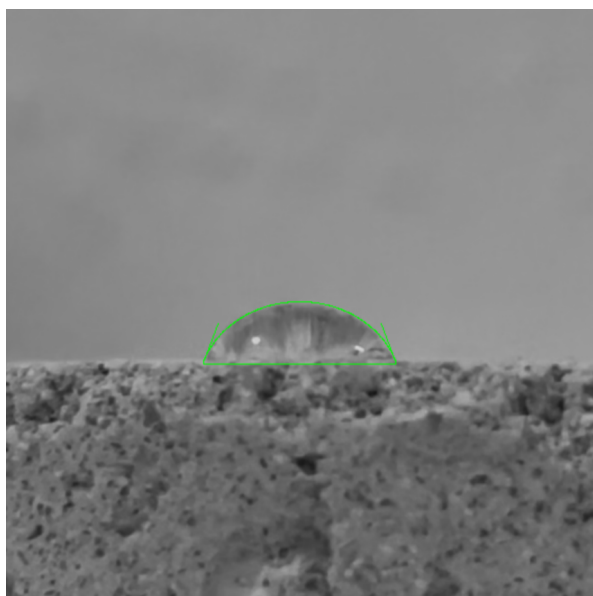


Figura 11. Angle de contacte de la proveta AG2.

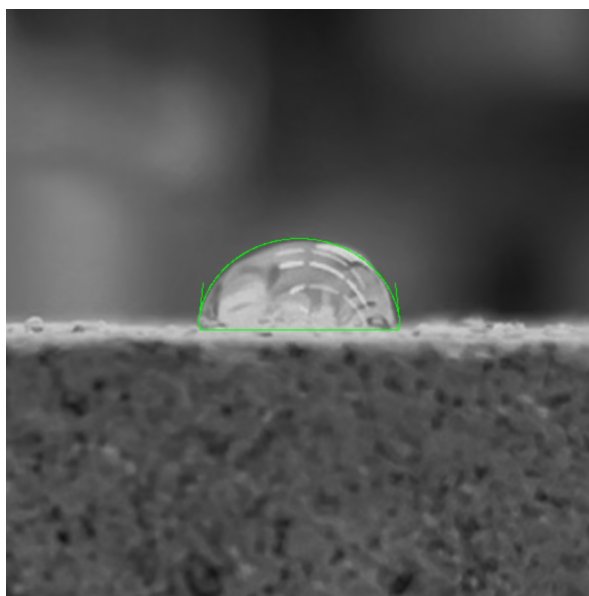


Figura 12. Angle de contacte de la proveta AG3.

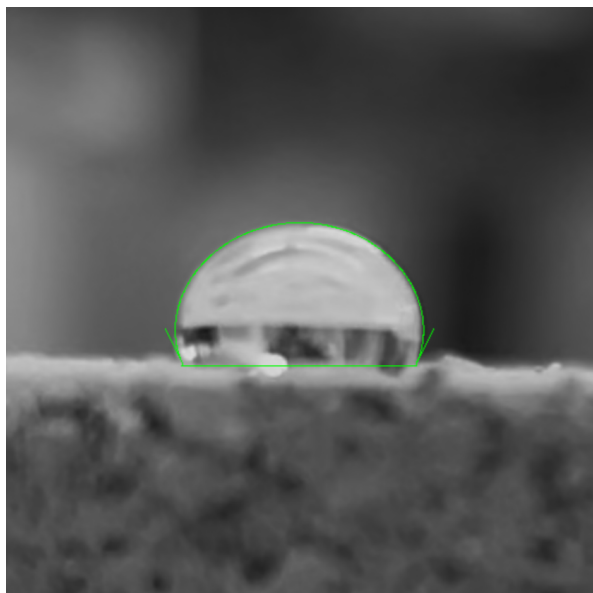


Figura 13. Angle de contacte de la proveta NC1.

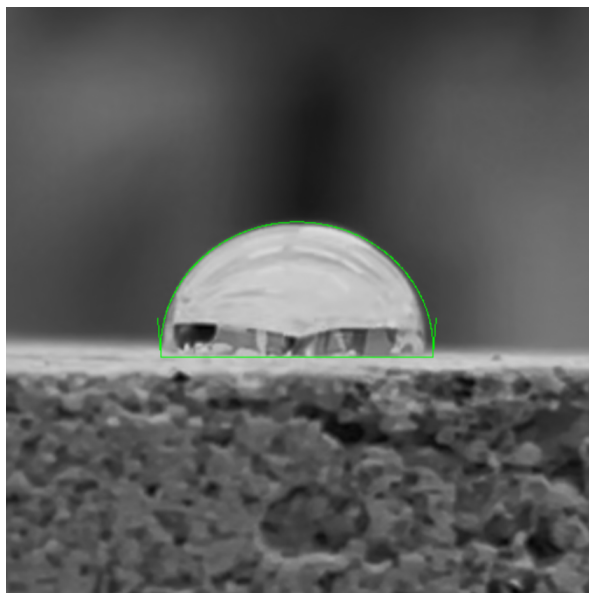


Figura 14. Angle de contacte de la proveta NC2.

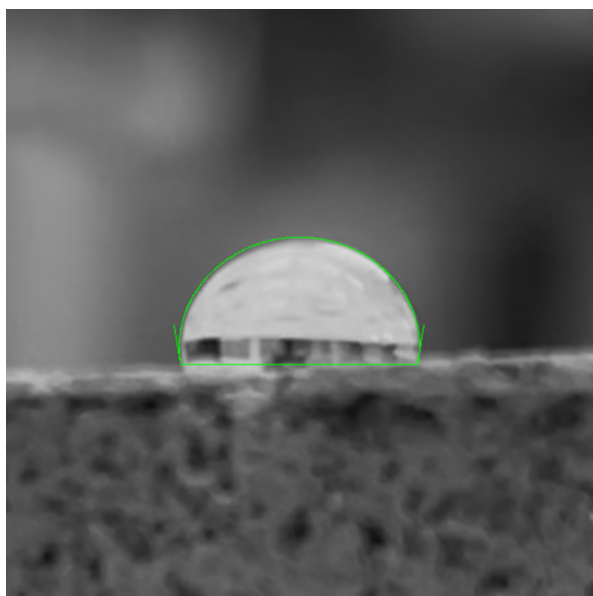


Figura 15. Angle de contacte de la proveta NC3.

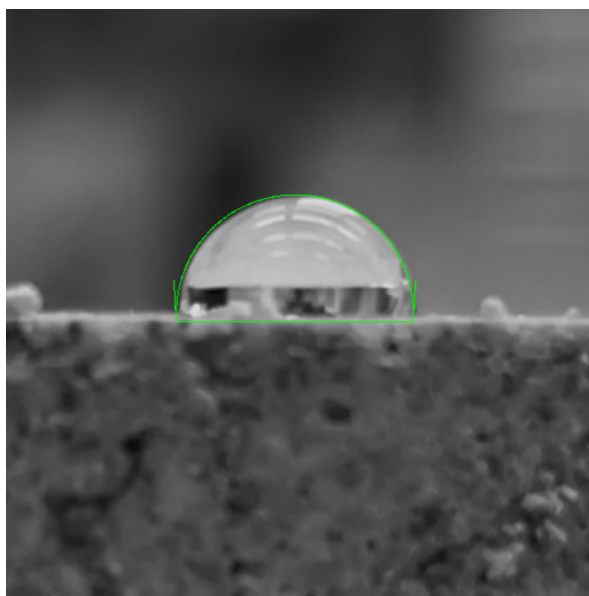


Figura 16. Angle de contacte de la proveta OL1.

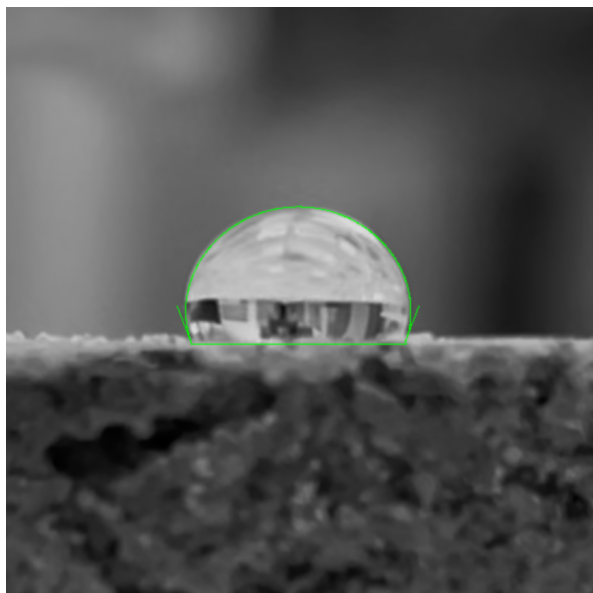


Figura 17. Angle de contacte de la proveta OL2.

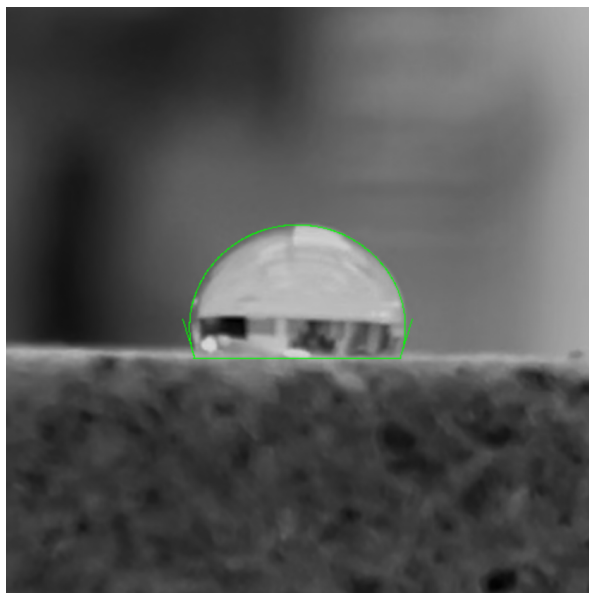


Figura 18. Angle de contacte de la proveta OL3.

7.2. Annex II. Taules de dades ampliades

7.2.1. Assaig de l'angle de contacte

Taula 8. Angles de contacte de cada proveta.

Proveta	Angle (Xº)
CO1	56,66
CO2	57,21
CO3	46,03
AG1	80,04
AG2	68,97
AG3	83,8
NC1	115,74
NC2	95,17
NC3	100,82
OL1	93,54
OL2	110,83
OL3	108,86

7.2.2. Assaig d'absorció d'aigua per capil·laritat

Taula 9. Mesures i càlculs de l'assaig d'absorció per capil·laritat de la proveta CO1.

t (s)	Mt (g)	ΔMt (g)	m (g / cm ⁻²)	C (kg/m ² ·min ^{-0.5})
0	213,78	0,00	0,00	0,00
60	220,69	6,91	0,14	0,18
300	230,01	16,23	0,32	0,19
600	234,97	21,19	0,42	0,17
1200	235,86	22,08	0,44	0,13
1800	235,98	22,2	0,44	0,10
3600	236,2	22,42	0,45	0,07

Taula 10. Mesures i càlculs de l'assaig d'absorció per capil·laritat de la proveta CO2.

t (s)	Mt (g)	ΔMt (g)	m (g /cm⁻²)	C (kg/m²·min^{-0.5})
0	226,79	0,00	0,00	0,00
60	233,06	6,27	0,12	0,16
300	241,29	14,5	0,29	0,17
600	247,26	20,47	0,41	0,17
1200	250,58	23,79	0,47	0,14
1800	250,77	23,98	0,48	0,11
3600	250,86	24,07	0,48	0,08

Taula 11. Mesures i càlculs de l'assaig d'absorció per capil·laritat de la proveta CO3.

t (s)	Mt (g)	ΔMt (g)	m (g /cm⁻²)	C (kg/m²·min^{-0.5})
0	222,19	0,00	0,00	0,00
60	228,87	6,68	0,13	0,17
300	237,23	15,04	0,30	0,17
600	243,26	21,07	0,42	0,17
1200	246,19	24	0,48	0,14
1800	246,42	24,23	0,48	0,11
3600	246,49	24,3	0,48	0,08

Taula 12. Mesures i càlculs de l'assaig d'absorció per capil·laritat de la proveta AG1.

t (s)	Mt (g)	ΔMt (g)	m (g /cm⁻²)	C (kg/m²·min^{-0.5})
0	206,62	0,00	0,00	0,00
60	213,68	7,06	0,14	0,18
300	223,53	16,91	0,34	0,19
600	230,12	23,5	0,47	0,19
1200	231,77	25,15	0,50	0,14
1800	231,92	25,3	0,50	0,12
3600	232,24	25,62	0,51	0,08

Taula 13. Mesures i càlculs de l'assaig d'absorció per capil·laritat de la proveta AG2.

t (s)	Mt (g)	ΔMt (g)	m (g /cm⁻²)	C (kg/m²·min^{-0.5})
0	210,62	0,00	0,00	0,00
60	218,34	7,72	0,15	0,20
300	228,48	17,86	0,36	0,21
600	234,61	23,99	0,48	0,19
1200	235,97	25,35	0,50	0,15
1800	236,03	25,41	0,51	0,12
3600	236,18	25,56	0,51	0,08

Taula 14. Mesures i càlculs de l'assaig d'absorció per capil·laritat de la proveta AG3.

t (s)	Mt (g)	ΔMt (g)	m (g /cm⁻²)	C (kg/m²·min^{-0.5})
0	212,88	0,00	0,00	0,00
60	218,34	7,72	0,15	0,20
300	228,48	17,86	0,36	0,21
600	234,61	23,99	0,48	0,19
1200	235,97	25,35	0,50	0,15
1800	236,03	25,41	0,51	0,12
3600	236,18	25,56	0,51	0,08

Taula 15. Mesures i càlculs de l'assaig d'absorció per capil·laritat de la proveta NC1.

t (s)	Mt (g)	ΔMt (g)	m (g /cm⁻²)	C (kg/m²·min^{-0.5})
0	189,46	0,00	0,00	0,00
60	193,8	4,34	0,09	0,11
300	198,43	8,97	0,18	0,10
600	201,39	11,93	0,24	0,10
1200	205	15,54	0,31	0,09
1800	207,42	17,96	0,36	0,08
3600	210,73	21,27	0,42	0,07

Taula 16. Mesures i càlculs de l'assaig d'absorció per capil·laritat de la proveta NC2.

t (s)	Mt (g)	ΔMt (g)	m (g /cm⁻²)	C (kg/m²·min^{-0.5})
0	196,85	0,00	0,00	0,00
60	199,55	2,7	0,05	0,07
300	203,49	6,64	0,13	0,08
600	206,12	9,27	0,18	0,08
1200	209,61	12,76	0,25	0,07
1800	212,26	15,41	0,31	0,07
3600	216,03	19,18	0,38	0,06

Taula 17. Mesures i càlculs de l'assaig d'absorció per capil·laritat de la proveta NC3.

t (s)	Mt (g)	ΔMt (g)	m (g /cm⁻²)	C (kg/m²·min^{-0.5})
0	191,59	0,00	0,00	0,00
60	193,17	193,17	0,03	0,04
300	196,47	196,47	0,10	0,06
600	198,74	198,74	0,14	0,06
1200	201,88	201,88	0,20	0,06
1800	204,12	204,12	0,25	0,06
3600	208,29	208,29	0,33	0,06

Taula 18. Mesures i càlculs de l'assaig d'absorció per capil·laritat de la proveta OL1.

t (s)	Mt (g)	ΔMt (g)	m (g /cm⁻²)	C (kg/m²·min^{-0.5})
0	201,08	0,00	0,00	0,00
60	201,17	0,09	0,00	0,00
300	201,26	0,18	0,00	0,00
600	201,35	0,27	0,01	0,00
1200	201,43	0,35	0,01	0,00
1800	201,48	0,4	0,01	0,00
3600	201,58	0,5	0,01	0,00

Taula 19. Mesures i càlculs de l'assaig d'absorció per capil·laritat de la proveta OL2.

t (s)	Mt (g)	ΔMt (g)	m (g /cm⁻²)	C (kg/m²·min^{-0.5})
0	208,17	0,00	0,00	0,00
60	208,41	0,24	0,00	0,01
300	208,46	0,29	0,01	0,00
600	208,51	0,34	0,01	0,00
1200	208,64	0,47	0,01	0,00
1800	208,73	0,56	0,01	0,00
3600	208,92	0,75	0,01	0,00

Taula 20. Mesures i càlculs de l'assaig d'absorció per capil·laritat de la proveta OL3.

t (s)	Mt (g)	ΔMt (g)	m (g /cm⁻²)	C (kg/m²·min^{-0.5})
0	199,88	0,00	0,00	0,00
60	200,04	0,16	0,00	0,00
300	200,13	0,25	0,00	0,00
600	200,14	0,26	0,01	0,00
1200	200,19	0,31	0,01	0,00
1800	200,28	0,4	0,01	0,00
3600	200,47	0,59	0,01	0,00

7.2.3. Assaig de determinació de la densitat aparent i de la porositat oberta total accessible a l'aigua

Taula 21. Mesures i càlculs de l'assaig de la densitat real i aparent i de la porositat oberta total accessible a l'aigua.

Proveta	l (cm)	A (cm²)	V (cm³)	M₀ (g)	M₁ (g)	ΔM₁ (g)	Po (%)
CO1	2,4	50,27	120,65	213,78	236,96	23,18	19,21
CO2	2,3	50,27	115,62	226,79	251,67	24,88	21,52
CO3	2,5	50,27	125,68	222,19	247,18	24,99	19,88
AG1	2,3	50,27	115,62	206,62	232,65	26,03	22,51
AG2	2,4	50,27	120,65	210,62	236,87	26,25	21,76
AG3	2,4	50,27	120,65	212,88	239,05	26,17	21,69
NC1	2,5	50,27	125,68	189,46	217,63	28,17	22,41
NC2	2,4	50,27	120,65	196,85	223,95	27,1	22,46
NC3	2,3	50,27	115,62	191,59	218,17	26,58	22,99
OL1	2,3	50,27	115,62	201,08	205,23	4,15	3,59
OL2	2,4	50,27	120,65	208,17	212,82	4,65	3,85
OL3	2,3	50,27	115,62	199,88	204,3	4,42	3,82

7.2.4. Assaig de duresa superficial

Taula 22. Mesures i càlculs de l'assaig de duresa superficial.

Proveta	presa 1 (HL)	presa 2 (HL)	presa 3 (HL)
CO1	172	191	178
CO2	178	194	187
CO3	176	197	181
AG1	174	196	182
AG2	200	193	174
AG3	187	225	195
NC1	220	222	195
NC2	204	230	222
NC3	197	210	196
OL1	199	193	187
OL2	200	189	213
OL3	192	183	189

7.3. Annex III. Contribució als Objectius de Desenvolupament Sostenible

Aquest treball s'emmarca dins dels Objectius de Desenvolupament Sostenible (ODS) establerts per les Nacions Unides i contribueix de manera directa a diversos d'ells:

ODS 4 – Educació de qualitat

Aquesta recerca forma part d'un programa de formació universitària especialitzat en conservació-restauració del patrimoni cultural, finançat majoritàriament amb fons públics. D'aquesta manera, contribueix a l'ODS 4 promovent l'accés a una educació superior de qualitat, fomentant un aprenentatge crític, pràctic i intercultural dins d'un àmbit clau com és el patrimoni cultural.

ODS 11 – Ciutats i comunitats sostenibles

La conservació i restauració del patrimoni arquitectònic afavoreix la preservació d'edificacions històriques i la seva integració activa en l'entorn urbà contemporani. Aquest treball contribueix a aquest objectiu promovent pràctiques que permeten allargar la vida de construccions existents, evitant la seva substitució i mantenint el valor cultural i identitari de les comunitats.

ODS 13 – Acció pel clima

Mitjançant l'estudi i ús d'additius naturals, biodegradables i de baix impacte ambiental, aquest treball fomenta alternatives més sostenibles i respectuoses amb el medi ambient en el camp de la conservació-restauració. Aquesta aproximació redueix l'ús de productes sintètics i contribueix a una pràctica més conscient envers l'emergència climàtica.

Aquest Treball Final de Grau segueix els criteris establerts en el Llibre d'estil de la Universitat de
Barcelona.

Andrea Pérez Ruiz - Additius naturals amb funcions hidrofugants en morters de calç aèria: un estudi comparatiu de l'arròs,
el nopal i l'oli de llinosa
Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024 - 2025