



HIDROFUGANTS EN PEDRA DE MONTJUÏC: REVISIÓ CRÍTICA I AVALUACIÓ EXPERIMENTAL DE LA SEVA EFICÀCIA I COMPATIBILITAT

Autora: Montserrat Burgaya Ribell
NIUB: 20311056

Treball Final de Grau

Grau en Conservació-Restauració de Béns Culturals

Tutor: Pau Arroyo

Curs: 2024/2025

Índex

1. Introducció	4
2. Objectius	5
3. Justificació	5
4. Antecedents	6
5. Marc teòric	8
5.1. Agents de degradació	8
5.2. Història dels tractaments hidrofugants	8
5.3. Funció de l'hidrofugant	9
5.4. El tractament hidrofugant	11
5.5. Mètodes d'aplicació	12
5.6. Classificació	13
5.6.1. Hidrofugants híbrids o organosilícis	14
5.6.1.1. Silans	14
5.6.1.2. Siloxans	15
5.6.1.3. Siliconats	16
5.6.2. Resines silicòniques	16
5.6.3. Productes orgànics	17
5.6.3.1. Resines acríliques	17
5.6.3.2. Resines viníliques	17
5.6.3.3. Resines poliuretàniques	18
5.6.3.4. Ceres	18
5.6.4. Fluoroelastòmers	18
5.6.5. Súperhidrofugants	19
5.6.6. Nanomaterials	19
5.7. Pedra de Montjuïc	21
5.7.1. Caracterització de la roca	22
5.7.2. El blanquet i el rebuig	22
6. Metodologia científica	24
6.1. Mostres	24
6.2. Productes a testar	27
6.3. Aplicació del producte	29
6.4. Proves analítiques	30
6.4.1. Variacions colorimètriques	30
6.4.2. Capacitat d'hidrorepel·lència (angle de contacte estàtic) UNE-EN 15802:2010	30
6.4.3. Absorció d'aigua pels mètodes de la pipeta UNE-EN 16302:2013	31
6.4.4. Tassa de transpirabilitat (permeabilitat al vapor d'aigua) UNE-EN 15803:2010	32
7. Resultats	35
7.1. Variacions colorimètriques	35

72. Capacitat d'hidrorepel·lència	35
73. Absorció d'aigua pels mètodes de la pipeta	36
74. Tassa de transpirabilitat (permeabilitat al vapor d'aigua)	37
8. Conclusions	41
9. Contribució als Objectius de Desenvolupament Sostenible	44
10. Bibliografia	45
11. Annexos	50
Annex 1	1
Annex 2	2
Annex 3	7
Annex 4	9
Annex 5	12
Annex 6	15
Annex 7	20
Annex 8	26
Annex 9	28
Annex 10	30

**Resum:**

El present treball analitza la idoneïtat de dos productes hidrofugants aplicats sobre la pedra de Montjuïc, un gres silícic àmpliament emprat en el patrimoni arquitectònic de Barcelona. A través d'una revisió teòrica, s'estudien els mecanismes d'acció, la classificació dels hidrofugants i els criteris de compatibilitat amb substrats porosos. Fent especial èmfasi en la transpirabilitat, la reversibilitat i l'estabilitat química com a criteris essencials per a la conservació-restauració.

La part experimental inclou l'aplicació de Nano Silo W® de CTS i TECNADIS PRS Performance® en mostres de pedra real i la posterior avaluació mitjançant assajos normalitzats: angle de contacte, absorció d'aigua i permeabilitat al vapor d'aigua. Els resultats mostren que tots dos productes ofereixen una bona hidrofobicitat, si bé Nano Silo W® presenta una compatibilitat físico-química lleugerament superior, gràcies a la seva formulació a base de nanopartícules de sílice funcionalitzades.

El treball conclou que la selecció d'un producte ha de basar-se en una anàlisi detallada del substrat, les condicions en què es localitza i en criteris científics que assegurin la durabilitat i compatibilitat del tractament aplicat, evitant danys futurs en el patrimoni.

Paraules clau:

Hidrofugació, degradació, compatibilitat, transpirabilitat, pedra de Montjuïc.

Abstract:

This study analyzes the suitability of two water-repellent products applied to Montjuïc stone, a siliceous sandstone widely used in the architectural heritage of Barcelona. Through a theoretical review, it examines the mechanisms of action, the classification of water repellents, and the compatibility criteria with porous substrates, placing particular emphasis on breathability, reversibility, and chemical stability as essential factors in conservation-restoration.

The experimental part includes the application of Nano Silo W® by CTS and TECNADIS PRS Performance® on real stone samples, followed by evaluation using standardized tests: contact angle, water absorption, and water vapor permeability. The results show that both products offer good hydrophobicity. However, Nano Silo W® demonstrates slightly superior physico-chemical compatibility due to its formulation based on functionalized silica nanoparticles.

The study concludes that the selection of a product must be based on a detailed analysis of the substrate, the environmental conditions in which it is located, and scientific criteria that ensure the durability and compatibility of the applied treatment, thus preventing future damage to the heritage.

Keywords:

Water repellency, degradation, compatibility, breathability, Montjuïc stone.

1. Introducció

Els monuments històrics han estat un dels primers objectes d'estudi en l'àmbit de la conservació-restauració. Amb la Carta d'Atenes es va establir els primers criteris i normes per dur a terme aquestes pràctiques enfocades a la recuperació i perdurabilitat del patrimoni arquitectònic (Le Corbusier, 1999). Fins als nostres dies, s'ha continuat avançant en l'estudi de materials i tècniques per millorar els processos de conservació i restauració tenint en compte totes les expressions artístiques.

El present treball se centra en un tractament específic, l'hidrofugació. Concretament, analitzant com afecta a les propietats físiques i hídriques del material un cop aplicat el producte en superfície.

L'hidrofugació s'empra per a la conservació a llarg termini; així i tot, ha creat controvèrsia des del seu inici pels dubtes que suposava l'aplicació del producte hidrofugant sobre un material porós a causa de la possible incompatibilitat química i la capa filmògena en què podia derivar. Aquest producte afecta la porositat del substrat i pot disminuir la seva transpirabilitat, ocasionant noves degradacions. A més, el fet de tractar-se d'un material que té la capacitat de penetració en el sistema porós, dificulta la reversibilitat i la posterior aplicació d'altres productes sobre el material tractat.

És per aquest motiu que es considera necessari aprofundir en l'estudi de la compatibilitat, funcionament i eficàcia dels productes hidrofugants, tenint en compte les característiques del substrat on s'apliquen.

En aquest cas s'ha escollit la pedra de Montjuïc com a material d'estudi, ja que es tracta d'un gres d'origen local àmpliament utilitzat en la construcció del patrimoni arquitectònic de la ciutat de Barcelona. A més de la seva importància històrica, cal destacar que, actualment, l'extracció d'aquesta pedra està prohibida, fet que dificulta la seva reposició i augmenta la necessitat de garantir la conservació dels elements construïts. El seu caràcter porós, la composició heterogènia i la vulnerabilitat a l'acció de l'aigua fan que sigui un cas d'estudi rellevant per avaluar la idoneïtat dels tractaments hidrofugants.

2. Objectius

A partir de la informació que es té i la que es pot aportar, es plantegen els següents objectius:

- Oferir una síntesi dels productes hidrofugants emprats al llarg de la història i en l'actualitat, incorporant els nanohidrofugants. Tenint en compte els substrats on és més indicat la seva aplicació, avantatges i inconvenients de cadascun dels tipus.
- Determinar en quins casos seria necessari o no aplicar un producte hidrofugant.
- En un marc de temps determinat, comparar l'efectivitat de dos hidrofugants emprats reiteradament en processos de conservació-restauració per determinar quina opció seria la més adient.

3. Justificació

La raó principal per la qual s'ha escollit aquest tema és la necessitat de donar resposta a la controvèrsia sobre si és perjudicial o no l'aplicació d'hidrofugants sobre el patrimoni petri, en aquest cas, concretant en la pedra de Montjuïc com a objecte d'estudi.

Fins al tancament de la pedrera de Montjuïc a mitjans del segle XX, el gres va ser àmpliament utilitzat tant en escultura com en arquitectura a Catalunya. Aquest és un dels fets més rellevants per dur a terme l'estudi, ja que cal assegurar-ne la perdurabilitat el màxim de temps possible a causa de les mínimes oportunitats de reposició o reintegració volumètrica disponibles.

L'elecció d'aquest tipus producte i tractament radica en la manca de consens, la diversitat d'hidrofugants en el mercat i els nous avenços científics que ofereixen productes amb característiques innovadores. És necessària una síntesi de les opcions més viables per utilitzar durant els tractaments d'hidrofugació i els seus mètodes d'aplicació. Això facilitarà la presa de decisions en futures intervencions.

L'estudi pretén servir de base per a futurs treballs, tenint en compte que, probablement, el mercat d'hidrofugants continuarà creixent, fent necessàries noves anàlisis que podrien basar-se en els criteris d'avaluació utilitzats. A més, cal destacar que gran part del patrimoni ja ha estat intervingut i és necessari un estudi sobre la compatibilitat entre els productes i els hidrofugants aplicats sobre el material original.

Finalment, la metodologia emprada pretén posar de manifest la facilitat amb la que es poden dur a terme anàlisis que determinin la influència immediata d'un producte sobre les propietats físiques d'un material. Essent aquest estudi una part necessària en qualsevol projecte de conservació-restauració sense la necessitat d'invertir una gran quantitat de recursos econòmics.

4. Antecedents

Nombrosos estudis empren una metodologia molt similar a la plantejada en el present treball, tots amb l'objectiu de conèixer la compatibilitat i la influència d'un producte hidrofugant sobre un substrat. En general, es conclou que tots productes disminueixen la hidrofília del material, però permetent, en un grau o un altre, la transpiració. La diferència entre productes, recau en com podrien afectar negativament l'obra. És a dir, quins d'ells disminueixen notablement la transpiració del material formant una capa filmògena superficial, quins tenen menor compatibilitat química, quins tenen pitjor envelliment, etc. La mínima diferència durant la comparativa dels valors resultants és la que es té en compte en aquests estudis. Per aquest motiu es conclou que alguns hidrofugants són més adients per tipus de substrat específics exposats a ambients concrets.

Tots aquests estudis es duen a terme amb normes estandarditzades i, la majoria, analitzen valors tals com la coloració, la porositat, la permeabilitat al vapor d'aigua, l'angle de contacte d'una gota en superfície, etc. Per tant, tot i que s'apliquen sobre substrats diferents, delimiten una metodologia estandarditzada amb objectius comuns en tots els estudis: la cerca d'un producte el més idoni possible i positiu en l'àmbit de la conservació d'un material concret.

A continuació s'indiquen els estudis més recents referents a la investigació dels efectes dels productes hidrofugants sobre materials inorgànics:

Villegas, R., & Castrillo, C. (2014). *Comportamiento de productos hidrófugos aplicados en piedras de diferente naturaleza. Cambios en las propiedades hídricas y respuesta a los factores de deterioro* [Universidad de Sevilla].

Amado, I. de R., Rivas, T., & Mosquera, M. J. (2017). *Eficacia de consolidantes e hidrofugantes de nueva síntesis en rocas graníticas optimización de métodos de evaluación* [Universidad de Vigo].

Gómez De Terreros Guardiola, M. G., & Enríquez Díaz, C. (2009). El comportamiento de la piedra de las fachadas del ángulo suroeste de la catedral de Sevilla tras su restauración. *revista PH*, 112.

Medeiros, M., Gomes, T., & Helene, P. (2006). *Hidrofugantes de superfície: Estudo da capacidades de barrar o ingresso de água no concreto*. Teoria e Prática na Engenharia Civil, 6.

A part d'aquests estudis, moltes empreses han optat per compartir i elaborar els anàlisis dels seus propis productes per mostrar als clients quin és el seu funcionament un cop s'apliquen. Un exemple n'és aquest:

Bohorquez Reyes, J. M. (2018) *Desarrollo de protector hidrorrepelente para uso en piedras areniscas y mármol para la empresa Conalmim S.A.S.* Fundación Universidad de América.

5. Marc teòric

5.1. Agents de degradació

La pedra està sotmesa a nombrosos processos de degradació que poden comprometre la seva estabilitat i conservació a llarg termini. Aquests són el resultat de la interacció entre les propietats intrínseques del material i els agents externs que n'afecten la superfície i l'estructura interna.

Un dels principals agents de deteriorament és l'aigua, tant per acció directa com per la capacitat de transportar altres components nocius que poden penetrar en la pedra i accelerar el procés de degradació. Per si sola, pot provocar erosió hídrica, que dona com a resultat la pèrdua de components i alteracions visibles (acanaladura, arrodoniment, alveolització o picat). Així com la dissolució dels elements que componen el substrat provocant disgregació, despreniments i pèrdues. A més, pot afectar l'apreciació estètica de l'obra, generant patines naturals, zones de rentat, escorrenties, taques d'humitat i tincions. En estat sòlid, especialment tenint en compte els cicles de gel i desgel, pot alterar la porositat interna del material, modificant les seves propietats i formant ruptures des de l'interior.

La pèrdua de matèria també pot ser accentuada quan l'aigua transporta partícules o contaminants. De manera que pot aportar brutícia que formi pel·lícules o crostes, així com patines, taques i decoloracions que afectin l'apreciació estètica. En el cas que transporti éssers vius, es podria produir colonització biològica en forma de patina o crosta, que, fins i tot, pot derivar en el creixement de vegetació de majors dimensions (González et al., 2005). D'altra banda, si conté sals solubles, pot provocar eflorescències, crostes (si es combina amb certs contaminants), patines naturals i ruptures internes del substrat a causa dels cicles de cristallització de les sals (Laborde Marqueze & Coremans, 2013).

5.2. Història dels tractaments hidrofugants

L'ús de tractaments per protegir els materials enfront l'aigua es remunta al segle I aC. En aquell moment, es feien servir morters de calç, sorra i ceràmica per millorar la hidrofobicitat, o bé s'aplicaven productes com ceros i olis a manera de capa superficial (Vitruvi, 2011). Aquestes tècniques es va continuar utilitzant durant els segles XVI - XVIII (Marcos Martínez, 2001; Torraca, 1988), fins als nostres dies.

Fins al segle XIX, els tractaments continuaven basant-se en productes naturals d'origen animal i vegetal. Tanmateix, amb el descobriment del primer polímer sintètic a finals de segle, el nitrat de cel·lulosa, es van començar a desenvolupar productes sintètics per a la conservació (Horie, 1990) centrats en la protecció de superfícies contra agents externs (Charola & Price, 1998). No obstant, l'ús de les resines termoestables no va ser comú fins a principis del segle XX (Horie, 2010). Des de

la segona meitat de segle, la indústria química ha continuat creant productes com els nanohidrofugants, que garanteixen la durabilitat d'obres que fins aleshores es consideraven peribles (Baldó, 2016).

Actualment, es distingeixen tres tipus de tractaments aplicats en superfície per a la protecció dels materials:

- Consolidants: retornen la consistència al material deteriorat, penetrant en el sistema porós.
- Hidrofugants: eviten l'entrada d'aigua, permetent la transpiració del material. És a dir, permetent el pas de la humitat a través dels porus.
- Impermeabilitzants: formen una pel·lícula que tanca la porositat superficial del material, impedit completament l'entrada d'aigua i bloquejant també la transpiració del substrat (Vilà & Isabel, 2022; Coronado, 2012).

L'evolució dels tractaments en arquitectura també contempla processos de reconstrucció, finalització i adaptació dels monuments. A la vegada, s'han desenvolupat tècniques de consolidació i fixació, i s'ha prioritzat el manteniment a llarg termini mitjançant programes de seguiment. L'objectiu actual és garantir l'estabilitat com a complement essencial dels processos de conservació i restauració, donant una major importància a la conservació preventiva per evitar la necessitat d'una restauració posterior. Aquest pensament va motivar la implantació dels tractaments hidrofugants.

5.3. Funció de l'hidrofugant

Els hidrofugants formen una pel·lícula que recobreix la superfície del substrat i redueixen la velocitat amb què l'aigua penetra als capil·lars del material. En un grau o un altre, penetra en la seva porositat per reduir l'entrada d'aigua sense obstruir completament la xarxa porosa; fet que permet mantenir la permeabilitat al vapor d'aigua i altres gasos. Tanmateix, aquesta pel·lícula no és eficaç en condicions de pressió hidràulica elevada, motiu pel qual els hidrofugants no són adequats per a la impermeabilització total (Juan Baldó, 2016; Charola & Price, 1998).

El procés d'unió dels hidrofugants amb el substrat es basa en mecanismes fisicoquímics específics. La superfície del material i el producte hidrofugant s'adhereixen mitjançant forces de Van der Waals, generades per la interacció electrostàtica entre les molècules bipolars que componen ambdues superfícies.

Les superfícies dels materials inorgànics, com la pedra, contenen grans quantitats d'àtoms d'oxigen, altament electronegatiu, que atrau electrons dels elements amb què forma enllaços. Derivant en la combinació d'àtoms d'oxigen amb hidrogen, formant grups hidroxils, que són

polars. Aquests grups tendeixen a atraure les molècules d'aigua (hidrofilitat), mitjançant ponts d'hidrogen (Torraca, 1988).

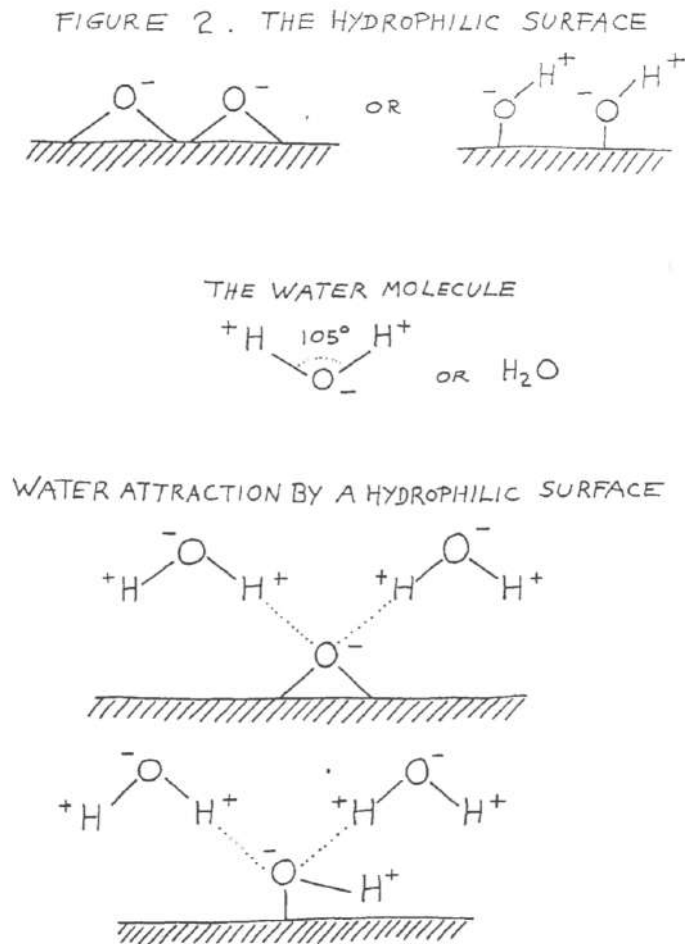


Fig. 1 Explicació gràfica de l'atracció entre molècules d'aigua (Torraca, 1988).

Un cop s'aplica el producte hidrofugant l'hidrofilitat disminueix perquè:

- La tensió superficial de l'aigua és de $72,8 \times 10^{-3}$ N/m, mentre que la dels hidrofugants és aproximadament de 20×10^{-3} N/m (Juan Baldó, 2016).
- En reduir-se l'energia superficial del substrat es modifica l'equilibri d'energies entre sòlid, líquid i gas (descriu en la llei de Young).

Aquesta diferència provoca la reducció d'adhesió de l'aigua, fent que les molècules tendixin a agrupar-se en forma de gotes (Amado et al., 2017) i, per tant, que no mulli la superfície del substrat, dificultant la seva penetració (Coronado Martín, 2012).

A més, cal tenir en compte que el producte hidrofugant té una part hidrofílica que s'adhereix amb la roca (gràcies a la similitud de tensió superficial), i una altra hidròfoba, que es posiciona cap a l'exterior (Amado et al., 2017). La poca atracció entre molècules de l'hidrofugant i l'aigua per la poca polaritat del producte evita la formació d'enllaços entre aquests dos components, resultant en una superfície hidròfoba (Torraca, 1988).

5.4. El tractament hidrofugant

Una de les decisions més rellevants a l'hora d'efectuar la hidrofugació d'una superfície és determinar la situació adequada per a la seva aplicació. Generalment, aquesta intervenció es considera en els següents casos:

- Quan la pedra queda exposada a agents ambientals.
- Quan la pedra presenta signes de degradació provocats per l'aigua i els materials transportats per aquesta, alterant les propietats i l'estat de conservació del substrat.

Abans de procedir amb la hidrofugació, és imprescindible realitzar un estudi previ que justifiqui l'aplicació del producte. Aquest ha de considerar les zones més compromeses per l'agent degradant, en aquest cas, l'aigua i els components que pugui aportar al material. En l'àmbit arquitectònic, és essencial analitzar les àrees per on circula l'aigua d'escorrentia, així com la possible presència de filtracions o d'entrada d'aigua per capil·laritat (Vilà Garcia, 2022). Aquesta fase de diagnòstic permet determinar quines zones es veuen més afectades i, en conseqüència, adaptar els tractaments i la quantitat de producte aplicat.

Tanmateix, aquesta decisió planteja altres qüestions fonamentals, com ara la reversibilitat del producte i la necessitat de manteniment. Els processos d'hidrofugació, en general, presenten una reversibilitat molt limitada, ja que el producte penetra en la porositat del material i, en alguns casos, forma enllaços químics forts amb els seus components. Això genera el debat sobre si l'aplicació d'un hidrofugant podria tenir un efecte més perjudicial per al substrat que l'acció mateixa de l'aigua com a agent degradant (Charola & Price, 1998).

Pel que fa al manteniment, en qualsevol projecte de conservació i restauració s'hauria de preveure un seguiment de l'estat de conservació de l'obra i de les intervencions realitzades. Aquest control permet verificar que les actuacions no comprometin l'estabilitat del material original i que compleixin la seva funció. A més, atès que l'efecte dels hidrofugants té una durabilitat limitada segons les especificacions del fabricant, el manteniment hauria d'incloure la revisió periòdica de la seva efectivitat i la seva possible reaplicació.

En cas que es consideri necessària una nova aplicació, caldria estudiar la compatibilitat del producte hidrofugant (o de qualsevol altre) amb els materials utilitzats en intervencions anteriors. (Charola & Price, 1998).

Sovint, els productes hidrofugants i consolidants coincideixen en la seva composició química, però contenen afegits que els hi confereixen propietats especials (biocides, filtres per a radiacions UV, etc.). Tanmateix, es diferencien pel mètode d'aplicació i pels objectius de la intervenció (Juan Baldó, 2016).

Un cop aplicat el producte hidròfug, aquest pot requerir la presència de components del substrat per conferir-li resistència a l'aigua o pot adherir-se superficialment i aportar hidrofobicitat per si sol. En cas de requerir d'un substrat i els seus components per aportar capacitats hidròfobes, aquestes s'aconsegueix mitjançant processos que varien depenent de l'hidròfugant. Normalment, es produeix la hidròlisi en presència d'aigua ambiental, del substrat, o com a component propi del producte. Seguidament, les molècules experimenten una reacció de condensació que dona lloc a la formació de la capa hidrofugant adherida al substrat (Charola & Price, 1998). La humitat relativa (HR) és un factor determinant en aquest procés. Amb una HR elevada, la hidròlisi es produeix ràpidament i de manera completa, però la polimerització i la penetració en el substrat són limitades. Per contra, amb una HR baixa, la hidròlisi és més lenta, però la polimerització es completa de manera eficient.

5.5. Mètodes d'aplicació

L'aplicació d'hidròfugants s'ha de realitzar sobre un suport net, estable i lliure de substàncies que puguin impedir la seva correcta penetració en els porus del material (Vilà Garcia, 2022). Per aquest motiu cal dur a terme les intervencions prèvies necessàries per garantir un substrat adequat. Un cop finalitzades, és essencial respectar els temps d'espera necessaris abans d'aplicar l'hidròfugant. Per exemple, la majoria d'aquests productes són incompatibles amb l'aigua, de manera que cal esperar almenys varis dies després d'un tractament aquós. En el cas d'un consolidant, es recomana un període mínim d'un mes abans de procedir a la hidrofugació per assegurar-ne l'eficàcia i evitar reaccions adverses entre els productes aplicats (Vilà Garcia, 2022).

La superfície tampoc ha d'estar exposada a fonts de calor o fred extremes, ni a la radiació solar directa. Així mateix, és fonamental que el material estigui lliure, en la mesura del possible, de sals solubles, ja que aquestes poden interferir en les reaccions químiques del producte, provocant hidròlisi massa ràpides i la formació de compostos inestables que no s'adhereixin correctament al substrat.

Pel que fa als mètodes d'aplicació, la seva elecció dependrà de les característiques del producte (habitualment un líquid de baixa viscositat) i de les característiques de la superfície a tractar, ja sigui una àrea delimitada de dimensions reduïdes o una superfície extensa. Els principals mètodes d'aplicació són (Juan Baldó, 2016; Gómez, 2001):

- Polvorització per grans superfícies.
- Aplicació amb brotxa per zones delimitades.
- Apòsits mitjançant materials com Arbocel®.
- Immersió quan el tractament es realitza en un taller o laboratori.

Segons nombroses referències (Illescas & Mosquera, 2012; Vilà Garcia, 2022; Coronado Martín, 2012), aquest procés hauria de realitzar-se fins a la saturació del substrat. En la majoria dels casos, dues capes són suficients per garantir una cobertura uniforme, assegurant la penetració i la formació d'una capa hidrofugant superficial.

Un altre factor clau a considerar en l'elecció d'hidrofugants és la seva reversibilitat. En molts casos, especialment en el cas d'hidrofugants inorgànics i híbrids (com els organosílics), la reversibilitat es veu limitada. Aquests productes generen enllaços estables amb el substrat, fet que pot dificultar la seva extracció en el futur sense afectar el material (Juan Baldó, 2016).

El grau de penetració del producte pot ser determinant en un procés de reversibilitat. La penetració d'un producte hidrofugant en un substrat porós inorgànic depèn de les seves característiques: els substrats més porosos i amb una mida d'accés major dels porus permeten una major penetració (Esbert, 1993). Així mateix, els productes amb partícules més petites, especialment els compostos a base de nanopartícules, també afavoriran una penetració més profunda. De fet, la mida dels porus i la configuració del sistema porós són factors més rellevants que altres característiques del material. En aquest sentit, s'han documentat casos en què, en superfícies amb una porositat oberta, el producte ha penetrat fins a 5 mm, mentre que en d'altres amb menor porositat pot arribar a penetrar fins a 5 cm (Esbert, 1993).

D'altra banda, cal tenir en compte que, en cas que la superfície hagi estat prèviament tractada o s'hi hagi aplicat algun producte, la penetració pot veure's afectada. Per exemple, si s'ha aplicat un consolidant, és probable que la penetració disminueixi, però, si la superfície està desgastada, la porositat oberta superficial facilitarà l'entrada del producte al sistema porós intern.

Una major penetració comporta una resistència més elevada als factors de degradació, com ara radiacions, desgast i abrasions, entre d'altres (Torraca, 1988). No obstant això, una penetració profunda també implica una menor reversibilitat.

5.6. Classificació

Hi ha diversos tipus d'hidrofugants depenent de la seva naturalesa, formulació i composició:

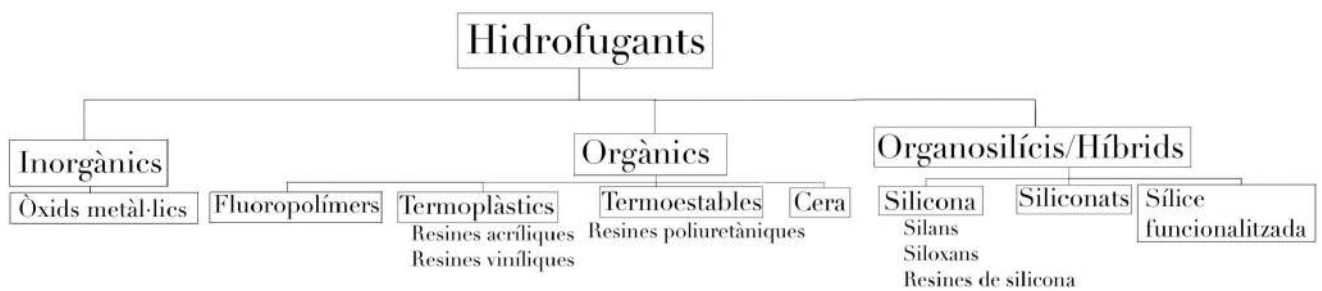


Fig. 2 Esquema on es mostra la classificació de productes hidrofugants segons la seva naturalesa.

5.6.1. Hidrofugants híbrids o organosilícis

Els hidrofugants híbrids es caracteritzen per la presència d'àtoms de silici units a grups orgànics, com els grups metil, que els confereixen propietats hidrofugants, flexibilitat i capacitat adherent; així com una resistència superior als agents externs i a la degradació química en comparació amb els hidrofugants orgànics.

Durant la seva aplicació, es produeix la precipitació de productes inorgànics com el diòxid de silici, que contribueix a la resistència del material. Presenten una elevada hidrofobicitat i una bona capacitat de penetració en superfícies poroses gràcies als silans, fet que millora la protecció contra la humitat interna.

Malgrat els seus avantatges, presenten una baixa reversibilitat a causa de l'alta resistència de la seva estructura. També tenen un cost elevat, derivat de la complexitat de la seva formulació, i requereixen condicions específiques d'aplicació, amb una temperatura compresa entre 15 i 25°C, i una humitat relativa entre el 40% i el 80%.

Dins d'aquesta categoria s'inclouen els silans, siloxans i siliconats (Bohorquez, 2018; Vilà & Isabel, 2022).

5.6.1.1. Silans

Els silans poden ser monomèrics, és a dir, molècules petites, o poden reaccionar entre si per formar siloxans, que són polímers més grans. El procés d'hidròlisi descompon les molècules de silà, formant grups silanol, els quals polimeritzen a través d'una reacció de condensació, donant lloc a un polímer de silicona, és a dir, una barrera hidrofòbica. Aquest procés comporta enllaços químics amb el substrat, fixant-se de manera permanent a la pedra i oferint una llarga durabilitat. La reacció de condensació es produeix un cop el producte és absorbit pel sistema porós del substrat, per la qual cosa el polímer també actua com a consolidant, proporcionant un reforç intern a la pedra (Charola & Price, 1998).

Aquests productes depenen del substrat per fixar-se ja que estan compostos per molècules lliures, fet que els fa més sensibles als factors ambientals. La cadena de reaccions també comporta un major risc de degradació abans de fixar-se, si el pH és molt alt o la humitat no és l'adequada, les reaccions químiques que uneixen el producte al substrat poden no completar-se adequadament. (Juan Baldó, 2016).

Els silans presenten poca degradació quan estan exposats a radiacions UV i altres agents ambientals, gràcies a la mida reduïda de la molècula, que permet una bona penetració. Aquest fet proporciona una barrera interna per evitar que l'aigua es filtri per capil·laritat, prevenint així també els efectes dels cicles de gel-desgel en l'interior de la pedra. Aquest producte és ideal per a materials molt porosos (Juan Baldó, 2016).

Pel que fa a les condicions d'aplicació, la temperatura ha de ser entre 10 i 25 °C i la HR entre el 40 i el 65%. El temps de curat varia entre 24 i 72 hores (Charola & Price, 1998).

5.6.1.2. Siloxans

N'hi ha de dos tipus:

- Oligomèrics, tenen una molècula petita, fet que permet una bona penetració (Bohorquez, 2018). Aquests es poden aplicar sobre superfícies humides i, tot i que necessiten condicions ambientals específiques per curar, continuen impregnant el material fins que es donen les condicions favorables per a la reacció.
- Polimèrics, estan formats per cadenes més llargues que els silans. Es diferencien d'ells per la seva menor penetració degut al volum de la molècula. Polimeritzen amb l'aire i formen una xarxa superficial hidrofòbica, tot i que si no catalitzen correctament poden resultar enganxosos (Juan Baldó, 2016). Un cop polimeritzats, presenten bona estabilitat química i tèrmica.

Les reaccions químiques que uneixen els siloxans amb el substrat són més dèbils, no depenen d'aquest per fixar-se perquè ja tenen una estructura estable abans d'aplicar-se, fet que els atorga una major resistència a agents degradants externs a llarg termini (Bohorquez, 2018).

Aquests productes són ideals per a zones on no es requereix una gran penetració, per tant són apropiats per a materials menys porosos.

Pel que fa a les condicions d'aplicació, la temperatura ambiental ha de ser entre 5 i 30 °C i la HR no ha de superar el 80%. El substrat no ha d'estar molt calent ni congelat i la humitat interior ha de ser el més reduïda possible. El temps de curat és entre 12 i 48 hores.

5.6.1.3. Siliconats

Els siliconats són hidrofugants solubles en aigua i en alcohol. Aquests productes formen unions químiques amb els components del substrat mitjançant un procés d'hidròlisi i polimerització, tot i que aquest procés és lent i es produeix de manera òptima només en materials molt porosos (Bohorquez, 2018). Reaccionen amb el CO_2 i la humitat ambiental per formar una capa hidrofugant composta per gel de sílice. No obstant, aquesta reacció pot generar eflorescències salines, principalment causades per carbonat sòdic (Bohorquez, 2018).

Els siliconats són útils per impregnar materials molt absorbents com el formigó porós i la ceràmica de tipus maó. També s'empren per formar barreres horitzontals en murs a través de tècniques d'injecció per combatre la humitat.

Pel que fa a les condicions d'aplicació, la temperatura ha de ser entre 5 i 35 °C i la HR ha d'estar al voltant del 75%. El substrat no ha de ser molt calent ni congelat. El temps de curat és de 12 a 24 hores i és important que la superfície estigui tan seca com sigui possible per aconseguir una millor absorció. Cal tenir en compte que, per sobre de 35 °C, els dissolvents poden evaporar-se massa ràpidament, reduint així la penetració i l'eficàcia del producte (Juan Baldó, 2016).

5.6.2. Resines silicòniques

Les resines silicòniques tenen una massa molecular elevada i, per això, formen una capa més externa en comparació amb els silans i els siloxans (Vilà Garcia, 2022). Contenen grups silanol, que reaccionen químicament amb el substrat formant enllaços estables, tot i que també poden curar per condensació formant polisiloxans (Juan Baldó, 2016).

Un dels seus principals avantatges és la seva resistència als agents externs com la contaminació, la lixiviació per acció de l'aigua, el desgast i la radiació UV. Aquesta resistència es deu a la xarxa tridimensional que formen després de l'aplicació. També es poden combinar amb altres productes per millorar les seves propietats.

No obstant, poden modificar l'aspecte estètic del material on s'apliquen, provocant brillantor o un possible ennegriment en captar brutícia. Per aquest motiu, s'aconsellen per a superfícies poc poroses com el marbre, la calcària, el granit i altres pedres compactes.

Pel que fa a la seva aplicació, cal evitar-ne un excés, ja que poden reduir la transpirabilitat del material. És fonamental que la superfície estigui neta, seca i lliure de sals solubles per assegurar una bona fixació i evitar eflorescències. La temperatura d'aplicació ha d'estar entre 10 i 30°C, amb una HR inferior al 75%. El temps de curat comença a partir de les 4-5 hores.

5.6.3. Productes orgànics

Els components orgànics presenten una major inestabilitat en la formació de pel·lícules superficials a causa del seu alt pes molecular, que dificulta la seva penetració en els materials. Això redueix la seva durabilitat enfront de factors ambientals adversos. Per aquest motiu, actualment s'estan desenvolupant estudis i comercialitzant productes basats en nanomaterials, que ofereixen una alternativa amb millor capacitat de penetració i estabilitat.

Els materials orgànics tendeixen a envellir més ràpidament a causa de diversos factors externs, com l'alteració per radiació UV, les variacions de temperatura, l'exposició a contaminants atmosfèrics i l'atac biològic. Aquest procés de degradació pot provocar canvis en el color del material, pèrdua de propietats adherents i reducció de l'elasticitat. A llarg termini, aquesta pèrdua d'elasticitat pot generar tensions internes en la superfície tractada, afavorint l'aparició de fractures (Juan Baldó, 2016).

5.6.3.1. Resines acríliques

Les resines acríliques s'obtenen per polimerització d'àcid acrílic, àcid metacrílic i els seus derivats. Són conegudes per la seva tendència a engrogir-se per efecte de la radiació UV si no es formulen amb filtres UV o antioxidants (Charola & Price, 1998).

Aquestes resines tenen una capacitat de penetració menor, formant una capa més superficial, fet que facilita la seva eliminació, però també limita la seva eficàcia i durabilitat. L'enllaç químic que estableixen amb el substrat no és profund i, a més, la majoria són sensibles a l'aigua, per la qual cosa la seva hidrorepel·lència disminueix amb el temps.

Un altre aspecte important a considerar és la temperatura de transició vítria, així com l'exposició a canvis de temperatura en la superfície on s'apliquen. Per aquest motiu, els productes hidrofugants a base de resines acríliques no són recomanats per a tractaments *in situ* ni per a béns exposats a la intempèrie (Charola & Price, 1998).

5.6.3.2. Resines viníliques

Les resines viníliques, com els acetats de polivinil i els policlorurs de vinil, són poc utilitzades en monuments a causa de la seva baixa estabilitat en condicions d'intempèrie i el seu envelliment accelerat; poden alterar l'aspecte estètic de la pedra experimentant canvis visuals amb la seva degradació. A més, tenen una capacitat de penetració limitada (Vilà Garcia, 2022).

En relació als avantatges, s'adhereixen bé a la superfície del material i són econòmiques. Les formulacions en emulsió aquosa són més respectuoses amb el medi ambient i adequades per a pedres de porositat mitjana. En canvi, les formulades amb dissolvents presenten una menor reversibilitat, però proporcionen més protecció.

5.6.3.3. Resines poliuretàniques

Les resines poliuretàniques es caracteritzen per la seva alta adherència a la superfície, així com per la seva resistència a l'abrasió, el desgast i les condicions d'intempèrie. A més, la seva flexibilitat els permet adaptar-se a les expansions i contraccions provocades pels canvis d'humitat, reduint el risc de desprendiment i clivellat, i augmentant la seva durabilitat (Pérez-Monserrat et al., 2007).

Tot i aquestes propietats favorables, tenen un cost més elevat. També presenten una reversibilitat limitada a causa de la formació d'enllaços químics forts durant el procés de curat i la seva alta resistència als agents químics.

Aquest tipus de resines són especialment recomanades per a materials més porosos que requereixen una protecció robusta i duradora. No obstant això, el seu curat requereix diversos dies per completar-se, fet que cal tenir en compte en la seva aplicació.

5.6.3.4. Ceres

Les ceres són substàncies lipofíliques que repelleixen els líquids, com l'aigua, però alhora permeten una certa transpirabilitat del material. Tot i això, la seva aplicació pot alterar l'aparença estètica del substrat.

Són emprades principalment en marbres d'interior i pedres ornamentals amb finalitats estètiques, ja que proporcionen un acabat específic i una protecció temporal contra taques. No obstant això, presenten una menor durabilitat en comparació amb altres hidrofugants a causa de la seva sensibilitat al desgast mecànic i la seva eficàcia limitada en la prevenció de la penetració de l'aigua (Vilà Garcia, 2022).

5.6.4. Fluoroelastòmers

Els fluoroelastòmers, en contenir un alt nombre de molècules de fluor, presenten una elevada estabilitat química, una gran resistència als agents externs i una baixa solubilitat. Aquests materials són especialment adequats per a entorns extrems.

S'utilitzen principalment com a juntes, segelladors i revestiments en entorns industrials; tenen una aplicació limitada en conservació-restauració, excepte en casos de conservació extrema. Aquests materials són costosos i complexos de fabricar, i la seva alta estabilitat química els fa poc reversibles.

5.6.5. Súperhidrofugants

Els súperhidrofugants, a més de proporcionar hidrorepel·lència, presenten propietats addicionals com la capacitat autonetejant i l'efecte antiadherent (Amado et al., 2017). Aquestes característiques s'aconsegueixen gràcies a la seva elevada hidrofobicitat, que impedeix la penetració de l'aigua i facilita que les gotes arrosseguin les partícules de brutícia presents a la superfície. Aquest efecte es deu a l'angle de contacte que estableixen amb l'aigua, superior a 150° (Vilà Garcia, 2022). Normalment, contenen productes afegits que confereixen altres propietats: biocides, filtres per radiacions UV, etc.

5.6.6. Nanomaterials

Els nanomaterials es caracteritzen per tenir almenys una de les seves dimensions en un interval d'1 a 100 nanòmetres. Aquesta mida proporciona una àrea superficial específica més gran, afavorint la col·lisió molecular i incrementant la velocitat de reacció (Waked, 2011).

En comparació amb els hidrofugants convencionals, presenten una major penetració i redueixen l'obstrucció de la porositat gràcies a la seva mida molecular. Aquesta característica també contribueix a millorar l'adhesió i estabilització del substrat, exercint un efecte consolidant.

L'aplicació de productes amb nanopartícules que presenten propietats hidrofugants millora l'eficàcia de la protecció davant l'acció de l'aigua. En aquest sentit, s'han emprat nanopartícules de sílice i polímers que modifiquen la rugositat superficial del material, dificultant l'adhesió de l'aigua i facilitant-ne el lliscament.

Els hidrofugants d'última generació poden combinar funcions consolidants i hidrofugants mitjançant l'addició d'un surfactant en la seva síntesi, el qual actua com a tamís molecular. Aquests productes es poden obtenir per diferents mètodes, com ara la modificació de compostos tradicionals d'hidrofugació, o mitjançant partícules de nano sílice funcionalitzades amb grups hidrofòbics, com l'addició de grups metil al TEOS (Juan Baldó, 2016).

Per a la producció de nanopartícules a base de silans o siloxans amb propietats hidrofugants, s'empra el mètode sol-gel. Aquest procés es basa en la hidròlisi d'un precursor (substància a partir de la qual es pot sintetitzar sílice) en una solució col·loïdal, donant lloc a la formació de grups silanol, funcionant de manera similar als silans convencionals. Durant la fase de condensació, aquests grups silanol reaccionen entre si formant enllaços que generen una xarxa tridimensional de sílice estable. Si el procés de condensació es controla adequadament i es desenvolupa de manera lenta, s'obtenen nanopartícules distribuïdes homogèniament sense tensions internes i la posterior formació de fractures (Alfieri, 2018).

Els principals precursors utilitzats per a la síntesi de nanohidrofugants són els següents:

- El metiltrietoxisilà (MTES) conté grups metil que impedeixen la formació d'enllaços d'hidrogen amb l'aigua, proporcionant una hidrofobicitat moderada sense alterar la transpirabilitat del substrat.
- L'octiltrietoxisilà (OTMS) incorpora grups alquil amb cadenes més llargues, augmentant l'hidrofobicitat. No obstant això, pot comprometre la transpirabilitat. S'empra en superfícies d'elevada porositat.
- El tridecafluorotiltrietoxisilà conté grups fluorats i presenta una hidrofobicitat molt elevada a més d'una gran resistència química. Tot i això, redueix significativament la transpirabilitat. Emprat en materials exposats a condicions ambientals extremes.
- El polidimetilsiloxà (PDMS) està format per grups siloxànics que generen una xarxa de sílice més flexible i estable, assegurant una bona hidrofobicitat sense comprometre la permeabilitat al vapor d'aigua. Aquest equilibri el fa especialment adequat per a la protecció de materials que requereixen transpirabilitat (Brinker & Scherer, 2010).

En el procés sol-gel, l'ús de surfactants és essencial per controlar la dispersió de les nanopartícules i evitar-ne l'agregació. L'agent redueix les forces de Van der Waals i les interaccions entre les nanopartícules de sílice durant la síntesi, implicant la formació d'estructures grans o cristalls no desitjats (Universidad de Alcalá, s.d.).

El seu mecanisme d'acció es basa en la seva estructura amfifílica. La part hidrofòbica interacciona amb les nanopartícules de sílice, mentre que la part hidrofílica s'orienta cap al medi aquós, estabilitzant les partícules i assegurant-ne una funcionalització adequada. A més, modifica la superfície de les nanopartícules de sílice creant una capa que millora l'adhesió al substrat, assegurant una protecció més duradora (Brinker & Scherer, 2010).

Finalment, cal destacar que l'elecció del surfactant és clau en la síntesi dels nanohidrofugants. En aquest sentit, els surfactants no iònics són especialment adequats, ja que tenen una menor tendència a interaccionar amb els precursors, assegurant una millor estabilització de les nanopartícules (Campos Fabregat, s.d.).

Com ja s'ha mencionat, els nanohidrofugants es poden formular a partir de nanopartícules de sílice funcionalitzades. Això es duu a terme mitjançant la combinació d'un precursor de sílice, com el tetraetoxisilà (TEOS), amb agents hidrofòbics com el metiltrietoxisilà (MTES), l'octiltrietoxisilà (OTES), siloxans o fluoropolímers. Aquesta combinació permet obtenir un hidrofugant basat en sílice amb propietats millorades.

Aquest tipus de producte presenta diversos avantatges. D'una banda, la seva mida nanomètrica facilita una alta penetració en el material. D'altra banda, la seva estructura de sílice proporciona una elevada estabilitat química i una excel·lent compatibilitat amb substrats silícis, com la pedra de Montjuïc, que és rica en quars. Finalment, ofereix propietats hidrofugants eficaces sense comprometre la transpirabilitat del material (CTS Europe, 2016).

També existeixen hidrofugants a base de fluoropolímers, els quals es produeixen mitjançant el mètode sol-gel amb l'ús de precursors com:

- PTFE (politetrafluoroetilè): destaca per la seva resistència a condicions climàtiques extremes, especialment a altes temperatures, proporcionant un alt grau d'hidrofugació.
- FEP (fluorur d'etilè-propilè): presenta una gran resistència al desgast físic, químic i a l'abrasió. A més, ofereix una alta adherència al substrat, formant una capa flexible que s'adapta als moviments del material (Mexpolímeros, s.d.).

L'ús de fluoropolímers en combinació amb silans pot millorar la compatibilitat química amb el substrat, aportant propietats hidrofugants i una major resistència del producte final. Aquestes combinacions redueixen la degradació de manera similar als nanohidrofugants basats en compostos minerals (principalment òxids metàl·lics).

Malgrat la possibilitat de personalitzar el producte segons les característiques del substrat, cal considerar la compatibilitat entre components i productes a part de les modificacions estètiques que pot generar qualsevol tractament aplicat en superfície (Gómez, 2012).

5.7. Pedra de Montjuïc

El gres de Montjuïc s'extreia de pedreres situades a la muntanya de Montjuïc, a Barcelona. La muntanya data del Miocè marí superior, detectable pels fòssils trobats a les pedreres (Gran Enciclopèdia Catalana, s.d.). Aquestes es van explotar des d'època romana per construir *Barcino* (Hernández, Betevé, 2021) fins al 1952, quan les pedreres esdevenen zones protegides. Gran part de Barcelona ha estat construïda amb aquesta pedra, actualment destaquen edificacions tals com la Sagrada Família, el Palau de la Virreina o el Parlament de Catalunya.

Les propietats més destacables que van desencadenar l'ús aquesta pedra per fins constructius són:

- Resistència mecànica a la compressió 978 kg/cm^2 . Atès que els valors respecte les roques sorrenques van des dels 400 fins als 2400 kg/cm^2 (Universidad de Granada, 2020), aproximadament, es tracta d'una sorrenca resistent i compacta (amb porositat mitja-baixa depenent del tipus de fàcia). Per aquest motiu resisteix bé l'erosió i la càrrega estructural durant llargs períodes (Masriera, 2005).
- Duresa (San Miguel Arribas, Masriera, 1970).

La muntanya de Montjuïc es divideix en 4 unitats litoestratigràfiques des de la base fins al cim (Gómez-Gras, et al., 2001; Parcerisa, 1999):

- Morrot: conglomerat i sorrenca. Base a 80 m aproximadament
- Far: margues i llims. 11m aproximadament

Montserrat Burgaya. Hidrofugants en pedra de Montjuïc:
revisió crítica i avaluació experimental de la seva eficàcia i compatibilitat.
Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024/2025

- Castell: conglomerat, sorrenca i lutita. 93m aproximadament
- Miramar: margues. 15 m aproximadament
- Mirador: conglomerat, sorrenca i lutita. 20 m aproximadament

Les diverses fàcies donen com a resultat pedres amb diferents propietats físiques com porositats elevades, friabilitat, coloració ferruginosa, etc. I per aquest motiu es diferencien posteriorment les dues varietats més destacades: el “blanquet” i el “rebuig”.

5.7.1. Caracterització de la roca

La pedra de Montjuïc és sorrenca. La seva classificació genètica correspon amb la d'una roca sedimentària detrítica. Presenta una coloració general entre gris i gris groguenc, sovint amb bandes i taques ferruginoses de color vinós depenent de la composició de la fàcia (Parcerisa, 1999; Gómez-Gras, et. al, 2001).

Mineralògicament, és un gres quarsític. Hi predominen els grans de quars (32,3%). A més, conté petites quantitats de feldspats (8%), fragments de roques (11,6%) metamòrfiques i granítiques (micacites, quarsites, esquists, etc.), moscovita i minerals pesants (zircó, turmalina i magnetita). La seva textura genèrica és cementada, els grans estan units per compactació o mitjançant un ciment silici; classificant-se com a gres silici o litarenita silícia.

La seva textura bàsica és clàstica o bioclàstica, atès que en gresos intercalats amb unitats margoses o formats en ambients deposicionals marins hi ha bioclasts (0-10%). Aquests han estat dissolts i reemplaçats per sílice en la resta de gresos.

La mida dels grans o cristalls oscil·la entre els 0,06 i els 2 mm. Per tant, es considera una sorrenca heteromètrica (Gómez-Gras, et. al, 2001). S'observen grans amb vores tant subrodades com anguloses. Entre els grans s'observa matriu i ciment com a fases d'unió, amb un empaquetament condicionat per la composició i diagènesis.

Per la seva porositat es pot considerar com una roca porosa, principalment de tipus intergranular (Parcerisa, 1999). Es tracta d'una roca heterogènia amb variacions de composició, textura i coloració depenent de la varietat que s'analitzi.

5.7.2. El blanquet i el rebuig

Les diferències entre les dues varietats de pedra de Montjuïc, el blanquet i el rebuig, termes emprats per a l'explotació d'aquesta pedra, són causades per la diagènesi. En un inici, la sedimentació ja determina aquestes dues varietats, sent el blanquet una roca més homogènia, de gra fi i color clar com a resultat de dipòsits amb menys argila i més compactació. D'altra banda, el

rebuig es forma per la deposició de sediments amb material fi i argilós. Per aquest motiu es tracta d'una varietat menys compacte, més porosa i amb coloracions variables.

En processos digenètics (posteriors a la deposició del sediment, abans que es converteixi en roca sedimentària) es diferencia la cimentació de les varietats: el blanquet amb ciment compacte silícic (producte autigènic quars), és a dir, silicificat. Mentre que el rebuig presenta una cimentació més feble, amb més porositat. És a dir, microfàcies no silicificades o silicificades amb òpal. Aquest mineraloide no té una estructura cristal·lina estable, i per això les roques silicificades amb òpal són més fràgils i disgregables (Gómez-Gras, et. al, 2001; Parcerisa, 1999).

La precipitació de minerals autigènics (estructures formades en el lloc de deposició) també influeixen en les característiques formals i propietats físiques de les varietats; el rebuig presenta minerals argilosos, compromentent la seva resistència (Parcerisa, 1999; Parcerisa et al., 2010).

6. Metodologia científica

L'objectiu de l'estudi ha estat avaluar l'efecte i l'eficàcia d'un o més productes hidrofugants, comparant-ne els seus efectes en relació amb el substrat original. Per aquest motiu, s'han realitzat assajos per mesurar diversos paràmetres relacionats amb les propietats físiques del material davant dels agents hídrics. Com ho són la permeabilitat al vapor d'aigua, el grau d'hidrorrepel·lència i la capacitat d'absorció d'aigua.

L'estudi dels canvis produïts en les mostres a partir de l'aplicació dels productes hidrofugants s'ha dut a terme mitjançant, majoritàriament, tècniques instrumentals analítiques i mètodes d'assaig no destructius. Aquests anàlisis s'han fet abans d'aplicar el producte a testar i 48 hores després, un cop ha curat.

El fet d'emprar majoritàriament aquests tipus de tècniques portàtils no destructives es justifica per la problemàtica que hi ha en l'estudi de resultats *in situ*. La dificultat d'aconseguir mostres d'alguns monuments i la destrucció que suposen alguns anàlisis dificulta les investigacions respecte als efectes que causen els productes sobre el material original.

En relació a l'àmbit econòmic, s'han seleccionat tècniques analítiques de baix cost, les quals es poden dur a terme repetidament. Per tant, es podria obtenir un gran volum d'informació en relació amb els productes i el seu efecte sobre el material original en projectes de conservació-restauració amb un pressupost baix (Fort, 2012).

6.1. Mostres

Les mostres cedides¹ s'han extret d'un bloc emprat en l'estructura d'un edifici enderrocat durant l'any 2020 a Barcelona. Després de recuperar la pedra, es va tallar al servei de tall de materials petris de la Facultat de Ciències de la Terra de la Universitat de Barcelona (Annex 2). A continuació, es van acabar d'ajustar els talls per complir amb les mesures desitjades.

Profunditzant en la descripció del material exposat en l'apartat 5.7.1., el bloc de pedra inicial, després dels primers talls, presenta una estructura estratificada (Fig. 4) amb un patró lineal molt definit (laminacions). Això correspon a les diferents etapes de sedimentació i les condicions hidrodinàmiques de l'entorn que van tenir lloc durant la seva formació.

En concret, el cabal de l'aigua, la velocitat, el vent, la topografia i la variabilitat de sediments transportats, entre d'altres, determinen la distribució, compactació i altres característiques de cada

¹ El bloc original de pedra de Montjuïc va ser recuperat i cedit posteriorment per Juan Diego Martín, professor del Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada en la Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona.

Montserrat Burgaya. Hidrofugants en pedra de Montjuïc:

revisió crítica i avaluació experimental de la seva eficàcia i compatibilitat.

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,

Universitat de Barcelona, curs 2024/2025

capa (Geologyscience, 2023). Per exemple, en períodes on l'energia hidràulica és major, es sedimenten partícules més grans, formant estrats porosos. D'altra banda, quan hi ha menor dinamisme, els materials transportats són més fins i petits, donant lloc a estrats més compactes.

A causa d'aquests processos deposicionals successius es pot distingir una estructura laminada que presenta variacions en la composició mineralògica i en la granulometria dels grans, així com en la coloració i el grau de compactació del material. Això afecta al seu comportament en relació a l'aigua, fent que l'estrat sigui més o menys porós i permeable, per exemple.



Fig. 4 Bloc de pedra de Montjuïc després dels primers talls. S'observa l'estructura estratigràfica laminada.

La dificultat d'obtenir mostres d'aquest material ressalta la importància de realitzar assaigs no destructius sempre que sigui possible. Cal mencionar que les mostres emprades en aquest estudi es poden aprofitar en un futur per realitzar noves investigacions sobre el mateix material,

Montserrat Burgaya. Hidrofugants en pedra de Montjuïc:

revisió crítica i avaluació experimental de la seva eficàcia i compatibilitat.

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,

Universitat de Barcelona, curs 2024/2025

comparant l'efecte de diferents productes combinats, així com l'avaluació de l'envel·liment d'aplicacions prèvies.

Les mostres emprades en l'estudi són 9 cubs de $5 \times 5 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ cm}$ de pedra de Montjuïc. No obstant, hi ha lleugeres variacions dimensionals amb una tolerància màxima de $\pm 0,3 \text{ cm}$ provocades durant el tall dels cubs. L'alt grau de duresa d'aquesta pedra, donada sobretot per la gran quantitat de quars que la compon, ha dificultat el tall regular de totes les cares dels cubs.

La totalitat de les mostres s'ha repartir en tres grups amb 3 mostres cadascun tenint en compte les similituds de composició i compactació de les laminacions que s'observen a *visu* (Fig.5):

1. Mostres on se li aplicarà el producte hidrofugant 1; Nano Silo W®

M1.1, 4,90 x 4,80 x 5,00 cm	290,61 g
M1.2, 4,80 x 4,70 x 4,85 cm	260,39 g
M1.3, 4,85 x 4,85 x 4,75 cm	274,24 g

2. Mostres on se li aplicarà el producte hidrofugant 2; TECNADIS PRS Performance®

M2.1, 4,95 x 4,85 x 4,90 cm	271,25 g
M2.2, 5,00 x 5,00 x 5,00 cm	285,99 g
M2.3, 5,00 x 4,90 x 4,90 cm	276,26 g

3. Mostres de control

M3.1, 5,00 x 4,90 x 4,90 cm	281,71 g
M3.2, 4,09 x 5,00 x 4,90 cm	284,56 g
M3.3, 4,85 x 5,05 x 4,90 cm	280,82 g

S'ha decidit tenir 3 mostres de control degut a la variabilitat composicional de la roca. Presentant estrats molt diferents entre si amb propietats dessemblants.



Fig. 5 Imatge dels tres grups de mostres. En la primera fila, les mostres del grup Hidrofugant 1. En la segona fila, les mostres del grup Hidrofugant 2. En la tercera fila, les mostres de control.

El condicionament de les mostres ha estat el següent: després del procés de tall s'han raspallat amb aigua per eliminar les restes de material i s'han deixat eixugar a la intempèrie, exposades al sol, durant 48 h. Finalment, s'han dipositat les mostres a l'espai destinat per fer les proves per la seva aclimatació durant 48 h (Annex 3).

6.2. Productes a testar

A l'hora d'escollir el producte hidrofugant més adient en un projecte de conservació-restauració, s'han de tenir en compte diversos aspectes. Aquests han estat considerats en l'elecció dels dos productes a avaluar:

- Compatibilitat amb el substrat: establir una relació entre la composició bàsica del producte comercialitzat i els materials on el fabricant recomana l'aplicació.
- Disponibilitat: estudiar quins productes són fàcilment adquiribles a l'Estat espanyol (Bohorquez, 2018). Atès que la compra en línia millora l'accessibilitat a tot tipus de producte, s'ha concretat el temps d'entrega mig de cada producte tenint en compte els següents distribuïdors: COM-CAL, Agaragar, CTS®, Leroy Merlin®, Sika® i Restatec.
- Factor econòmic: un gran nombre de projectes de conservació-restauració es desenvolupen a partir d'un pressupost. Per tant, és fonamental ajustar els costos de tots els materials i productes necessaris en les diferents fases del procés.

Montserrat Burgaya. Hidrofugants en pedra de Montjuïc:
revisió crítica i avaluació experimental de la seva eficàcia i compatibilitat.
Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024/2025

- Ús reiterat: identificar els hidrofugants més utilitzats a Espanya mitjançant el contacte amb empreses especialitzades en la conservació i restauració de patrimoni arquitectònic.
- Vida útil: tots els productes tenen un temps d'efectivitat determinat que va disminuint segons el medi al què s'exposa i les seves sensibilitats.
- Penetració en el substrat: depenent dels materials que conformen el producte es pot definir el grau de penetració entre baixa, mitja i alta.
- Afectació estètica del substrat: evitar la modificació de l'aspecte estètic del material (González, 2012).
- Dissolvent: per facilitar la neteja i retirada parcial convé saber abans el dissolvent de l'hidrofugant.

Finalment, els productes escollits han estat Nano Silo W® de CTS i TECNADIS PRS Performance®. La selecció s'ha basat en criteris relacionats amb la composició, la capacitat de penetració, la permeabilitat al vapor d'aigua i la vida útil del tractament. Es disposa de la taula de dades considerades en l'Annex 1.

Nano Silo W® està formulat a base de nanopartícules de sílice funcionalitzades, és a dir, modificades químicament per tenir propietats hidrofugants. Aquesta formulació el fa especialment adequat per a substrats de naturalesa silícica. En conseqüència, s'obté una elevada compatibilitat amb el substrat, una penetració més profunda i una saturació menor dels porus, fet que contribueix a una millor permeabilitat al vapor d'aigua i una protecció més duradora.

Pel que fa a TECNADIS PRS Performance®, es formula a partir de nanopartícules ceràmiques (òxid de sílice) funcionalitzades disperses en isopropanol. Les relacions que estableix amb el substrat són les mateixes que en l'altre cas: forma enllaços hidroxil millorant la compatibilitat amb la pedra i afavorint a la penetració i estabilització del producte. L'isopropanol permet controlar la penetració ja que té menys tensió superficial que l'aigua i s'evapora ràpidament; el producte penetra en el sistema porós sense quedar-se en superfície i cura en l'interior.

S'han seleccionat dos productes amb graus de penetració similars amb l'objectiu de complir les necessitats del substrat, que és força compacte en la majoria de zones. Ambdós presenten una alta permeabilitat al vapor d'aigua, característica imprescindible per evitar fenòmens de deteriorament relacionats amb la condensació interna. En aquest aspecte, destaca Nano Silo W® per presentar una permeabilitat lleugerament superior, ja que TECNADIS PRS Performance® forma una pel·lícula protectora continua i lleugerament densa en superfície.

Amb relació a la vida útil, pot variar en funció de les condicions ambientals i dels agents degradants interns i externs als quals s'exposa la superfície tractada. Ambdós productes ofereixen una vida útil aproximada de vuit anys. En general, Nano Silo W® presenta una menor durabilitat en formar una pel·lícula estable i flexible. Aquest aspecte és especialment rellevant a l'hora d'elaborar un pla de manteniment i conservació preventiva del monument, i caldrà dur a terme proves que permetin valorar l'eficàcia del tractament hidrofugant i la seva possible reaplicació.

En tractar-se de dos dissolvents diferents presents en cada producte, aigua i isopropanol, es tindran en compte diversos aspectes:

- Penetració i compatibilitat amb el substrat: l'aigua ofereix una major interacció amb el material formant una pel·lícula protectora estable i flexible; mentre que l'isopropanol s'evapora més ràpidament, minimitzant la penetració en relació a l'altre producte i creant una capa superficial més densa.
- Temps de secat i curat: Nano Silo W® tardarà més en secar i curar que TECNADIS PRS Performance®. En tots dos casos, el fabricant del producte recomana no exposar a agents climàtics directes la superfície tractada mentre està curant.
- Impacte ecològic: l'ús d'aigua com a dissolvent fa que sigui un producte més ecològic i segur d'utilitzar. També és més accessible i menys tòxic, el que facilita la seva gestió i ús. L'isopropanol és més tòxic i contaminant. A més, pot presentar més dificultats a l'hora de l'eliminació de restes i neteja post-aplicació.

Comparant la informació referent a la modificació estètica dels dos productes, s'ha observat que la pel·lícula lleugerament densa que forma TECNADIS PRS Performance® pot alterar la percepció estètica de la pedra per l'aportació de brillantor i una lleugera modificació de la saturació de color. Aquest fenomen serà avaluat durant les proves, amb la finalitat de determinar si el canvi d'aspecte desapareix amb el temps o si resulta persistent.

(CTS, 2020; TECNAN, 2024)

6.3. Aplicació del producte

S'ha optat per fer les aplicacions amb brotxa, ja que permet dipositar de manera controlada el producte en les zones desitjades sense afectar a les altres cares. S'ha impregnat tota la superfície, assegurant l'entrada de producte en totes les fenedures que forma l'estructura porosa oberta i evitant la creació d'una pel·lícula superficial visible, brillant i amb relleu.

Les quantitats són determinades pel fabricant, que proposa una aproximació dels g/m² necessaris en cas d'haver-se d'aplicar sobre un suport porós o compacte.

- TECNADIS PRS Performance® 135 g/m²
- Nano Silo W® 95-210 g/m²

Tenint en compte el bon estat de conservació de la mostra i la porositat mitjana que caracteritza el gres, s'ha optat per no diluir el producte (en el cas de Nano Silo W®) i per aplicar una sola capa (en el cas de TECNADIS PRS Performance®).

L'aplicació s'ha realitzat seguint les indicacions del fabricant: una temperatura ambient entre 5°C i 30°C, HR entre el 40% i el 70%, una superfície estigui seca, lliure de brutícia, sanejada

d'eflorescències i microorganismes i sense fissures. L'espai estava ventilat, en el moment de l'aplicació hi havia 24,2°C i una HR del 44,9%. Durant les 48 hores que conformen el temps d'assecatge i curat mínim, la temperatura mitjana ha estat de 21°C, i la HR 53,4%.

6.4. Proves analítiques

Les proves han estat escollides amb l'objectiu de comprovar l'efecte hidrofugant del producte comercialitzat, la seva interacció amb el substrat i com afecta a les propietats físiques de la mostra.

6.4.1. Variacions colorimètriques

Per avaluar l'impacte estètic del tractament hidròfug es fa una observació visual directa de la superfície de les mostres. D'aquesta manera s'estableixen diferències amb relació a la coloració i la brillantor superficial comparant l'estat de les provetes abans i després de l'aplicació del producte hidrofugant un cop finalitzat el seu procés de curat.

El factor estètic té una gran rellevància en el plantejament de qualsevol intervenció de conservació i restauració. Amb relació als principis ètics i criteris fonamentals de la disciplina, s'ha de procurar que l'aplicació de tractaments no alterin l'aspecte original de l'obra.

Per avaluar els possibles canvis en l'aspecte superficial, cada mostra s'ha observat i fotografiat emprant una font de llum natural.

6.4.2. Capacitat d'hidrorepel·lència (angle de contacte estàtic) UNE-EN 15802:2010

(Aenor, 2010)

Defineix la capacitat d'hidrorepel·lència de la superfície a partir de l'efecte de perlat que produeixen les gotes d'aigua. A major angle de contacte de la gota respecte de la superfície, major hidrorepel·lència. Es considera que un material inorgànic porós aconsegueix una bona hidrorepel·lència quan l'angle de contacte supera els 90°.

L'assaig es va realitzar sobre totes les mostres seguint una mateixa metodologia. Sobre una superfície plana on es localitzava la mostra es va fixar un dispositiu per fotografiar durant la prova (iPhone 15), ubicat a la distància i alçada adequades per enregistrar l'angle de contacte de la gota sense produir distorsions.

A continuació, es va dipositar una gota d'aigua desionitzada sobre la superfície de cada mostra emprant un sistema de deposició compost per una micropipeta graduada amb agulla de punta plana col·locada perpendicularment a la superfície d'assaig. La fotografia es va fer abans que

passessin 10 segons des de la deposició de la gota. Es van realitzar 5 mesuraments per cada mostra per obtenir dades representatives.

Les imatges obtingudes es van analitzar utilitzant el programa Procreate® i un transportador d'angles vectoritzat.

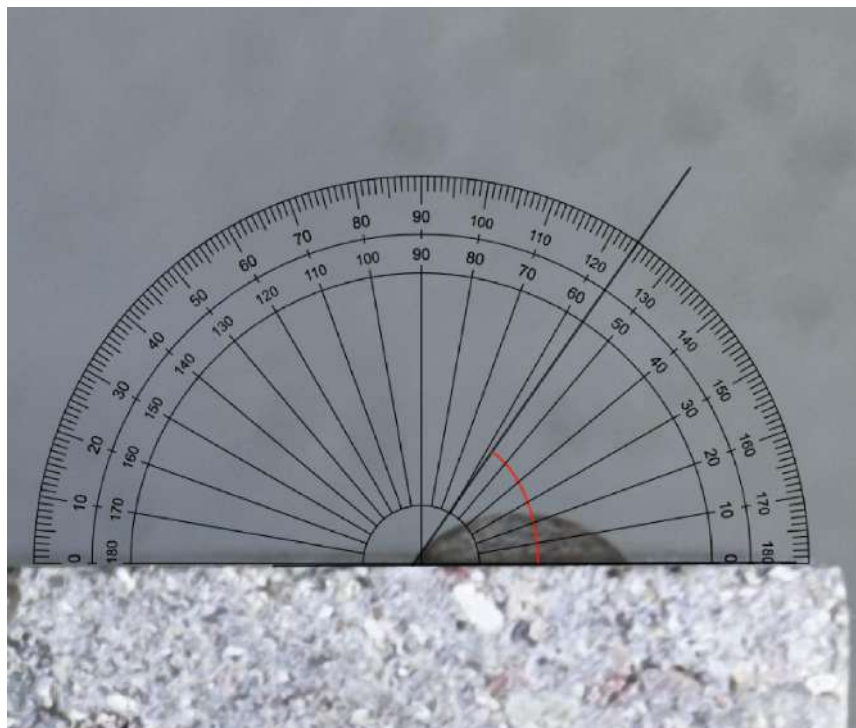


Fig. 6 Imatge que mostra la medició amb un transportador d'angles vectoritzar en el programa Procreate®.

6.4.3. Absorció d'aigua pels mètodes de la pipeta UNE-EN 16302:2013

(Aenor, 2013)

Registra l'absorció d'aigua en una àrea determinada a través del canvi de nivell del líquid en una pipeta graduada. Es mesura fins que el volum d'aigua en la pipeta s'estabilitza, és a dir, fins a saturació de la base, anotant els valors en marcs de temps determinats (Vilà Garcia, 2022).

Per aquest assaig es va adaptar una xeringa de plàstic amb un diàmetre de $15 \pm 0,01$ mm perquè fes la funció de cambra de mesura vertical. La xeringa emprada es va fixar a la superfície d'assaig amb plastilina Jovi® per evitar fuites d'aigua. A continuació, es va omplir amb 10 ml d'aigua desionitzada i es va començar a cronometrar el temps. Es van registrar els mil·lilitres absorbits per la pedra durant aquests intervals de temps: 10 primers segons; de 30 en 30 segons fins a arribar a 5 minuts; cada 5 minuts fins a arribar a estabilització del volum durant 1 hora.

Els resultats expressats (Annex 6) contemplen un marc de temps d'1 hora, sense incloure els mesuraments realitzats durant el transcurs complet de la prova per assegurar l'estabilització.



Fig. 7 Imatge del procediment de l'assaig. S'observa la xeringa a manera de pipeta fixada amb plastilina a la superfície de la proveta.

6.4.4. Tassa de transpirabilitat (permeabilitat al vapor d'aigua) UNE-EN 15803:2010

(Aenor, 2010)

Mesura de la quantitat de vapor d'aigua que pot travessar un material petri en un espai temporal determinat. Serveix per saber si el producte hidrofugant afecta la capacitat de transpiració del suport, comparant els valors abans i després de l'aplicació.

Per determinar aquest valor s'ha adaptat la norma UNE-EN 15803:2010 per complir uns objectius específics tenint en compte les condicions i materials que es disposava per fer l'estudi.

Primerament, es va mesurar el gruix mitjà de cada mostra mitjançant un peu de rei electrònic amb una precisió de $\pm 0,01$ mm. A continuació, es van preparar cubetes d'assaig amb una solució saturada de nitrat potàssic (KNO_3) en la base ocupant 15 mm i deixat 35 mm de marge entre la solució i la mostra. Aquesta solució genera un ambient amb una humitat relativa en l'interior de la cubeta del 93% si les condicions exteriors són de 23°C de temperatura i 50% d'humitat relativa. Així i tot, en aquest estudi s'ha adaptat el protocol per la impossibilitat d'ús d'una cambra d'assaig

amb valors de temperatura i HR controlats. Per aquest motiu es va destinar un espai amb les mínimes variacions d'aquests valors, registrant les dades contínuament amb un *datalogger*.

Pel que fa a la humitat relativa, es va escollir una solució salina que permetés obtenir unes condicions d'alta HR. Es va prioritzar la selecció d'una solució que proporcionés una HR el més semblant possible a les condicions mitjanes anuals de la ciutat de Barcelona, on la mitjana anual es situa entorn del 70% (Agencia Estatal de Meteorología, s.d.).

D'entre les opcions contemplades a la norma UNE, la solució amb nitrat potàssic es va considerar la més adient tant per la facilitat d'obtenció del material com pel seu elevat percentatge d'humitat generada. Per preparar la solució es va afegir 42 grams de nitrat potàssic (KNO_3) en 240 ml d'aigua destil·lada a $20,5 \pm 0,1$ °C, generant una solució salina saturada.

A continuació, es van posicionar les mostres sobre l'obertura de les cubetes, que tenien les mateixes dimensions. Per evitar fugues de vapor d'aigua es va segellar la unió entre la mostra i la cubeta emprant cinta aïllant en substitució del sistema descrit en la norma². Aquesta modificació es justifica després d'haver comprovat en assajos previs que la barreja de cera i parafina tacava la superfície de la pedra. Es van deixar descobertes les cares inferior i superior de la mostra, amb el fi de garantir que el flux de vapor d'aigua es produeixi exclusivament a través del gruix de la pedra.

Posteriorment, es va procedir al pesatge periòdic de les mostres per avaluar la seva evolució amb relació a la massa. Les pesades es van començar a fer cada 4, 8 i 12h; finalment, cada 24h per poder determinar si les mostres aconseguien un estat d'equilibri higromètric amb l'entorn. D'acord amb els criteris la norma, aquest estat es produeix quan la diferència de massa entre dos valors (pesades) consecutives no supera el 0,1% del pes total de la mostra (Samaniego & Zornoza, 2020; Sánchez et. al. 2023; Bohorquez, 2022; Vilà Garcia, 2022).



Fig. 8 Imatge de les provetes. Cada mostra està fixada a la cubeta i segellada amb cinta aïllant.

² En la norma s'indica que s'ha d'unir la mostra a la cubeta mitjançant cinta adhesiva aïllant i, posteriorment, aplicar una capa de 60% de cera microcristalina i 40% de parafina líquida sobre la mostra, la cinta i part de la cubeta.

Un cop finalitzada la prova, les mostres van passar per un procés de dessalinització (Annex 10) abans d'aplicar els productes hidrofugants i repetir els assajos.

7. Resultats

7.1. Variacions colorimètriques

No s'aprecia un canvi d'aspecte del material en la superfície tractada després de l'assecatge i el curat del producte hidrofugant. Les comparacions fetes a partir de l'observació es poden consultar en l'Annex 4.

7.2. Capacitat d'hidrorepel·lència

Tots els mesuraments s'han fet en els 10 primers segons des de la deposició de la gota, la variació entre els primers i els últims segons d'aquest període de temps pot haver donat diferències significatives en els resultats, així com la zona on es diposita la gota. Ja que l'absorció d'aigua varia segons la diferència de composició i compactació de les laminacions presents en les mostres.

Els valors mitjans obtinguts (Annex 5) abans i després de l'aplicació dels hidrofugants per cada grup són els següents:

- Grup de mostres 1. $49,3^\circ$ — $110,26^\circ$
- Grup de mostres 2. $48,5^\circ$ — $137,53^\circ$
- Grup de mostres 3. 59° — $61,53^\circ$



Fig. 9 Comparativa de dues imatges obtingudes de la mostra 2.1 abans i després del tractament hidrofugant.

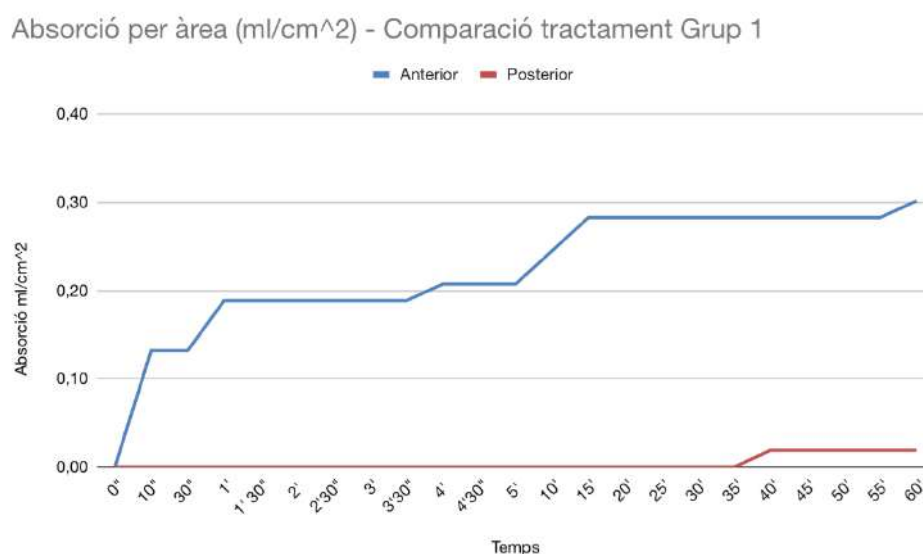
A partir d'aquesta informació es determina que totes les superfícies són hidrofíliques prèviament a l'aplicació d'un producte hidrofugant, ja que els angles de contacte de les gotes són inferiors a 90° .

Comparant els resultats entre els dos assajos, s'estableix una hidrofobicitat en les superfícies on s'ha aplicat el producte hidrofugant. En relació a les mostres de control, donen validesa als resultats aportats, ja que la mitjana dels angles de contacte és gairebé la mateixa. Un cop més, la localització exacta on es disposa la gota i el temps transcorregut entre aquesta aplicació i la fotografia, poden aportar variacions en les dades recaptades, significat una variació d'escassos graus.

7.3. Absorció d'aigua pels mètodes de la pipeta

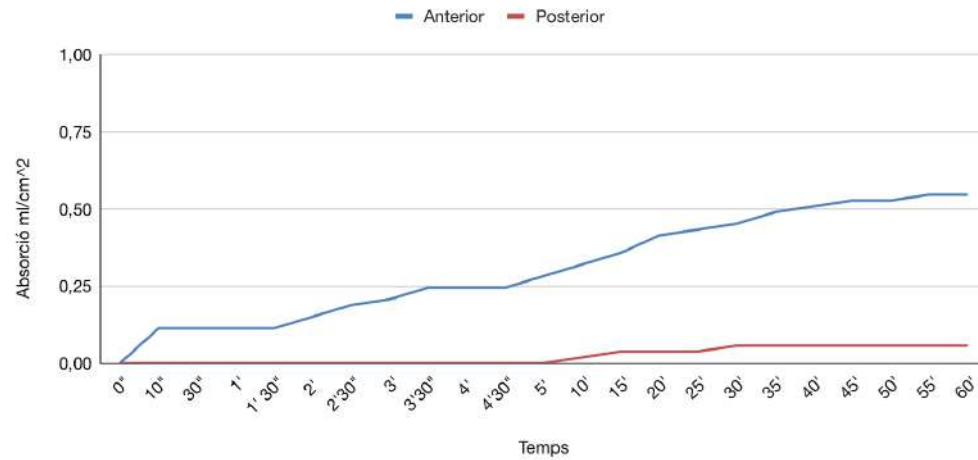
El resultat final d'absorció d'aigua abans d'aplicar els productes hidrofugants ha estat de $0,33\text{ml/cm}^2$ de mitjana. Essent similar en els grups 1 i 3, però lleugerament superior en el grup 2. L'absorció presenta un ritme inicial més ràpid, durant els primers segons. Aquest fet correspon amb un ompliment de la porositat oberta a l'exterior. Posteriorment, l'absorció es redueix fins a estabilitzar-se completament a partir dels 10-15 minuts en la majoria dels casos.

Comparant els resultats previs i posteriors al tractament, s'observa una disminució en l'absorció d'aigua en els grups amb hidrofugant 1 i 2. Les mostres de control (grup 3) mostren uns valors d'absorció per àrea molt similars en ambdós assajos.



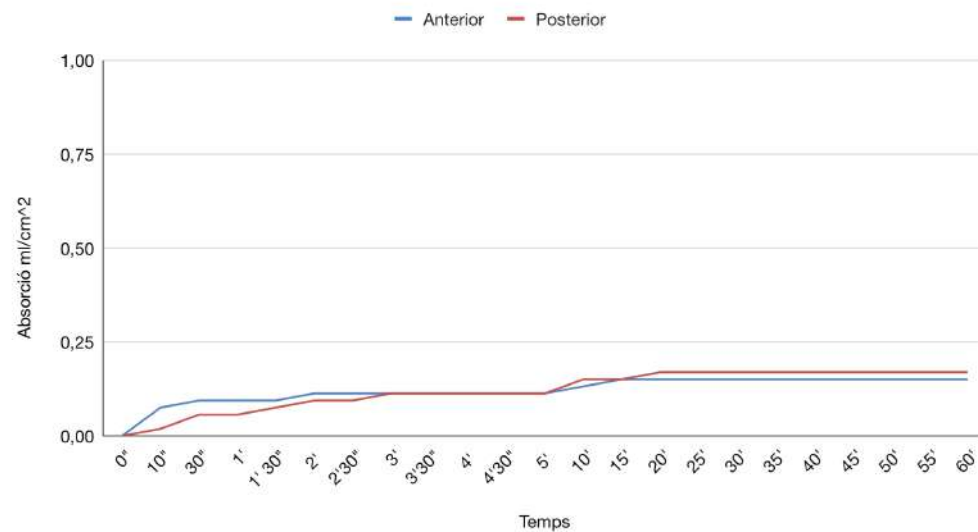
Gràfic 1. Relació entre l'absorció d'aigua (ml) per cm^2 de les mostres del grup 1 en un marc de temps determinat. Comparativa entre les dades obtingudes abans i després del tractament hidrofugant.

Absorció per àrea (ml/cm²) - Comparació Grup 2



Gràfic 2. Relació entre l'absorció d'aigua (ml) per cm² de les mostres del grup 2 en un marc de temps determinat. Comparativa entre les dades obtingudes abans i després del tractament hidrofugant.

Absorció per àrea (ml/cm²) - Comparació Grup 3



Gràfic 3. Relació entre l'absorció d'aigua (ml) per cm² de les mostres del grup 3 en un marc de temps determinat. Comparativa entre les dades obtingudes abans i després del tractament hidrofugant.

7.4. Tassa de transpirabilitat (permeabilitat al vapor d'aigua)

En totes les mostres hi ha una tendència positiva, significant que les provetes perden pes en evaporar-se l'aigua i travessar el gruix de la mostra. Tot i aquesta tendència, hi ha mesuraments on la massa de la proveta ha augmentat. Aquest factor succeeix per les fluctuacions de temperatura i HR de la cambra, facilitant la condensació tant dins de la cubeta com sobre la mostra des de

l'exterior. Les pluges i el pas de nit a dia poden haver afavorit aquests canvis. Es poden establir relacions entre aquestes suposicions i els mesuraments referents a la temperatura i HR exposades en l'Annex 8.

Referent als resultats obtinguts durant el segon assaig, s'aprecia una pèrdua de pes més ràpida i accentuada en comparació als mesuraments del primer assaig. Sobretot, durant les primeres 24h, això podria significar una estabilització amb l'entorn on s'han dipositat les provetes després de la preparació de l'assaig en un altre espai amb condicions ambientals lleugerament diferents.

Comparant els valors obtinguts durant el primer i el segon assaig, s'aprecia una disminució més accelerada en el pes de la proveta, significat un pas de vapor d'aigua a través de la mostra més ràpid després d'aplicar-hi el producte hidrofugant.

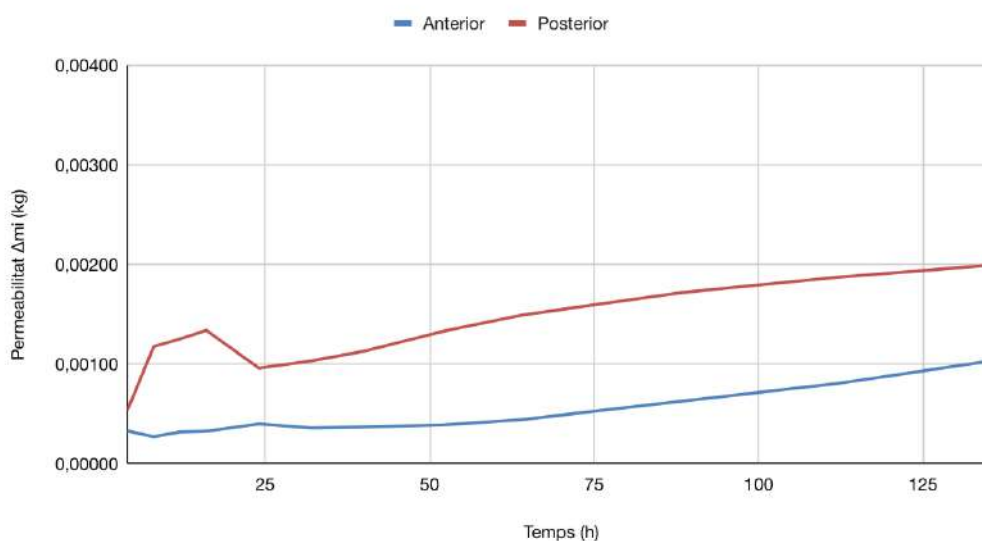
Les dades obtingudes determinen els següents valors abans i després de l'aplicació del tractament hidrofugant:

- Penetració del vapor d'aigua (quantitat de vapor d'aigua que travessa el material en un temps determinat): $1,10 \times 10^{-9}$ — $2,17 \times 10^{-9}$
- Permeabilitat al vapor d'aigua (capacitat del material per permetre el pas del vapor d'aigua): $5,57 \times 10^{-7}$ — 11×10^{-7}
- Coeficient de resistència (que oposa el material) a la difusió del vapor d'aigua (en comparació amb l'aire): $3,25 \times 10^{-2}$ — $2,91 \times 10^{-2}$

Tot i així, s'han detectat errors que comprometen la validesa dels resultats obtinguts: es van detectar fuites de vapor d'aigua en algunes mostres, les condicions ambientals no eren les mateixes que en el primer assaig, afectant la rapidesa amb què s'evaporava la solució salina i generant una HR interior diferent de la fixada durant el primer assaig. Per tant, els valors compresos entre aquest període de temps serien invàlids per a l'estudi.

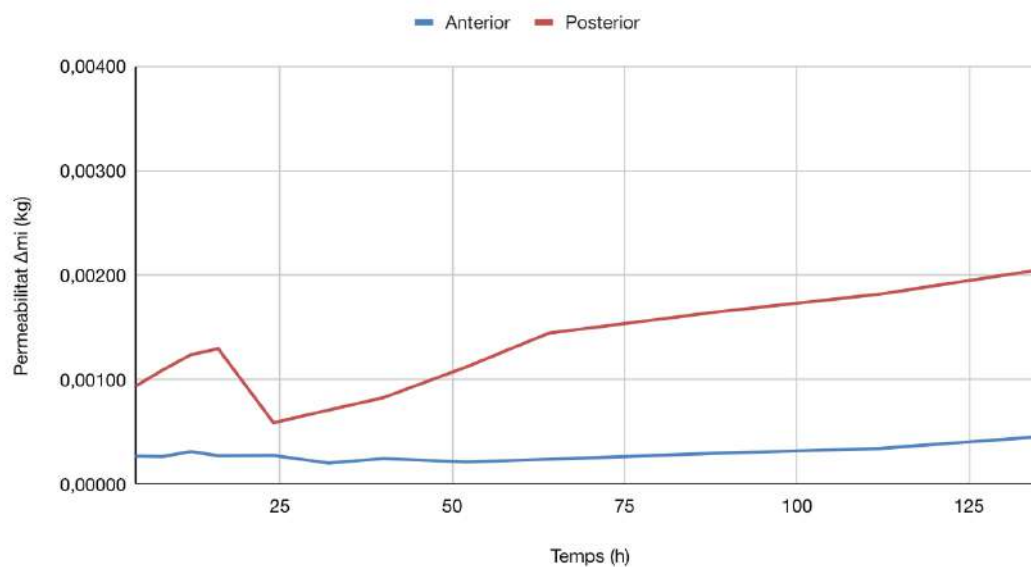
En els següents gràfics i en la informació complementària de l'Annex 7 s'exposen les dades recaptades durant els assajos així com les imatges que mostren els errors mencionats.

Permeabilitat vapor d'aigua $|\Delta m|/t$ - Comparació Grup 1



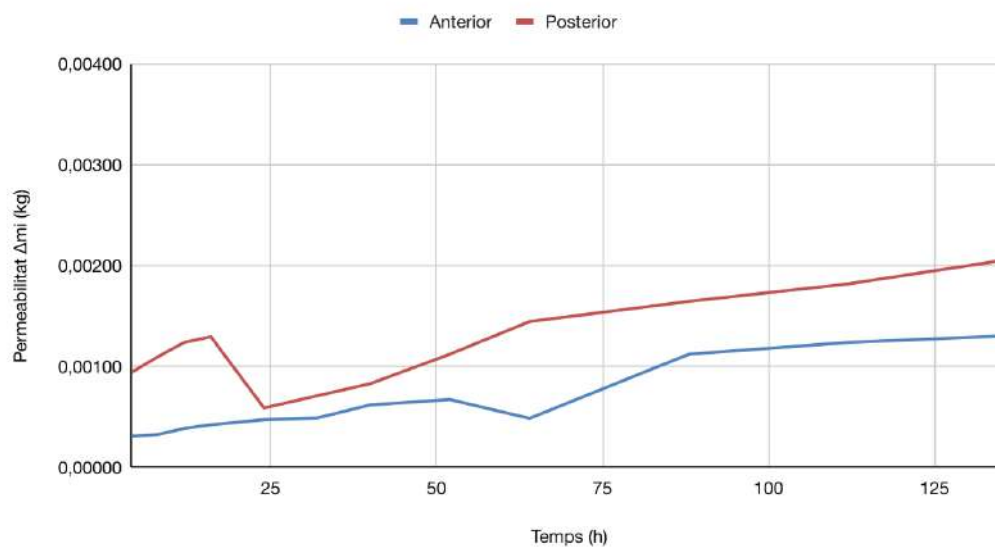
Gràfic 4. Relació entre la diferència de pes en kg de les mostres del grup 1 en un marc de temps determinat. Comparativa entre les dades obtingudes abans i després del tractament hidrofugant.

Permeabilitat vapor d'aigua $|\Delta m|/t$ - Comparació Grup 2



Gràfic 5. Relació entre la diferència de pes en kg de les mostres del grup 2 en un marc de temps determinat. Comparativa entre les dades obtingudes abans i després del tractament hidrofugant.

Permeabilitat vapor d'aigua $[\Delta m]/t$ - Comparació Grup 3



Gràfic 6. Relació entre la diferència de pes en kg de les mostres del grup 3 en un marc de temps determinat. Comparativa entre les dades obtingudes abans i després del tractament hidrofugant.

8. Conclusions

Aquest treball constitueix una font d'informació relacionada amb els hidrofugants i la pedra de Montjuïc, presentada de manera molt sintetitzada i amb un enfocament en la relació entre aquests dos materials. Tenint en compte el temps del qual s'ha disposat, ha representat un punt de partida per començar a conèixer els productes disponibles al mercat, la seva naturalesa, compatibilitat, efectivitat, etc.

Els hidrofugants presenten nombrosos avantatges, ja que proporcionen protecció enfront d'un dels agents més agressius: l'aigua. La seva capacitat hidrorepel·lent suposa un augment de la durabilitat del material en reduir els mecanismes de degradació, evitant l'aparició d'indicadors de deteriorament generats per l'aigua i els components que pot transportar o modificar a l'interior del substrat.

Tot i això, aquest tractament comporta riscos associats amb la disminució de la transpirabilitat causada per la capa superficial que formen els productes, provocant l'acumulació d'humitat a l'interior de la pedra i afavorint processos de degradació com els cicles de gel-desgel o la cristallització de sals. D'altra banda, es podrien generar diferències de resistència enfront dels efectes de l'aigua entre les zones tractades i no tractades. Aquesta falta d'homogeneïtat pot derivar en infiltracions localitzades en zones on l'aigua penetri amb més facilitat, accentuant els efectes negatius de l'agent, generant tensions internes i accelerant els processos de degradació.

A més, els hidrofugants són sensibles a agents degradants i, per tant, s'ha de considerar que la seva efectivitat és limitada en el temps i varia segons les condicions ambientals a les quals estan exposats. Per aquest motiu, cal avaluar la seva reversibilitat i la compatibilitat amb altres tractaments que puguin ser necessaris per a la conservació del material.

En relació amb els resultats obtinguts arran de les proves realitzades sobre les mostres s'han extret unes conclusions específiques:

Un cop finalitzat l'estudi de l'angle de contacte, es determina que la superfície presenta una alta energia superficial. És a dir, amb forces d'atracció considerables que afavoreixen l'expansió de l'aigua sobre l'àrea en lloc de mantenir-se en forma esfèrica. Ja que l'adhesió entre el líquid i la superfície és major que la cohesió entre les molècules de la gota.

Posterior al tractament hidrofugant, les gotes es dipositen formant un angle de més de 100° a causa de la disminució de l'energia superficial del substrat i l'adhesió entre l'aigua i la superfície. Per tant, s'aconsegueix una cara hidrofòbica.

Un factor que cal tenir en compte és la morfologia dels porus oberts a l'exterior i la formació de cambres d'aire, especialment en superfícies rugoses i tractades amb productes hidrofugants. Aquestes provoquen que, en aplicar la gota d'aigua, quedi aire atrapat entre la gota i la superfície, generant així un angle de contacte aparentment més elevat.

Respecte a l'assaig d'absorció d'aigua amb el mètode de la pipeta, s'han extret conclusions dels dos assajos per separat i en comparar-los.

Primerament, es determina que la superfície de la pedra és relativament compacta, amb una bona cimentació i una porositat oberta limitada. Ja que absorbeix poca quantitat d'aigua en l'àrea tractada. La connexió entre la porositat oberta superficial i els canals porosos interns és limitada, fent que l'aigua no entri en la pedra, sinó que només ompli els porus oberts. Això suposa una ràpida estabilització que s'aprecia en observar el nivell d'aigua en la pipeta. D'altra banda, aquesta estabilització i que no es detectin fuites confirma que el sistema de mesura ha estat ben segellat.

La diferència en la rapidesa d'absorció en alguns casos pot significar que s'ha col·locat la pipeta en una superfície menys compactada i amb una porositat oberta a l'exterior més notable que ha pogut encabir més aigua.

Després del tractament, es conclou que el producte hidrofugant dificulta l'ompliment de la xarxa porosa oberta a causa de la capa hidròfoba formada en superfície.

Referent a l'assaig de permeabilitat al vapor d'aigua, tenint en compte la invalidesa dels resultats obtinguts durant l'assaig realitzat després del tractament hidrofugant, no es pot aportar una comparació que il·lustri si els productes hidrofugants impliquen un canvi en la transpirabilitat del material. Les mostres semblen ser més permeables després del tractament, permeten un pas de major quantitat de vapor d'aigua i oposen menys resistència a la difusió del vapor. Per donar explicació a aquest comportament, s'ha de tenir en compte els valors mitjans de temperatura i HR, lleugerament més elevats, mostrats en l'Annex 9. Altres factors com les fuites detectades, una incorrecta aplicació del producte o un curat deficient podrien haver alterat els resultats. Per aquest motiu s'hauria de repetir l'aplicació del producte hidrofugant en una altra cara de la mostra i dur a terme l'assaig en un ambient que mimetitzés les condicions ambientals del primer assaig, assegurant la impermeabilitat de les altres cares.

Centrant-se en els resultats que han aportat les altres proves i establint la hipòtesis a comprovar que els productes no alteren la transpirabilitat del suport. Es podria concloure que el producte hidrofugant més idoni per a aquest tipus de pedra seria l'aplicat en el grup de mostres 1, Nano Silo W® de CTS, per la capacitat hidrofugant que confereix a la superfície i per l'elevada compatibilitat fisicoquímica amb la pedra de Montjuïc. El producte està formulat a base de nanopartícules de sílice funcionalitzades i per això presenta una gran afinitat amb el substrat silícic de la pedra. Permet una penetració lleugerament major que l'altra producte sense saturar els porus, fet que facilita una bona transpiració. A més, la seva estructura química assegura una interacció estable

amb els grups hidroxil del substrat, formant enllaços estables i una xarxa interna homogènia arrel de les reaccions de condensació, incrementant l'eficàcia i la durabilitat del producte. Finalment, la seva composició a base d'aigua el fa una opció respectuosa amb el medi ambient.

A partir del raonament derivat dels resultats dels assajos, es conclou que els productes hidrofugants afecten l'energia superficial del material, dificultant els enllaços amb les molècules d'aigua i impedit que aquesta mulli la superfície del substrat. Si a aquest factor s'hi suma un cert desnivell o verticalitat en el suport on s'aplica l'hidrofugant, es podria conferir al material propietats autonetejants. En disminuir l'energia superficial del substrat, esdevé més difícil que l'aigua humitegi la superfície del material, arribant fins i tot a quedar-se per sobre de cambres d'aire generades per la porositat oberta. Per aquest motiu, el material presenta una menor capacitat d'absorció d'aigua. Tot i que aquests efectes són garantits pels fabricants, s'ha estudiat el grau en què afecta cada producte testat en aquest gres.

Els resultats obtinguts en aquest treball suposen un punt de partida per a futures investigacions que poden derivar dels aspectes tractats durant l'estudi. A més, les mostres emprades podrien resultar útils per a altres persones interessades a donar continuïtat a aquest treball. A part de completar la informació que s'ha aconseguit amb la repetició de l'assaig de permeabilitat al vapor d'aigua, es podria aprofundir en l'estudi de les mostres emprades. Es proposa abordar aspectes com la reversibilitat del tractament davant de determinats dissolvents i accions mecàniques; així com els possibles efectes d'aquestes pràctiques sobre el substrat. A més, seria convenient tenir en compte l'estudi del comportament del tractament amb el pas del temps i la seva interacció amb altres productes. En aquests futurs estudis, es podrien incorporar tècniques complementàries com la microscòpia electrònica ambiental de rastreig o l'espectroscòpia infraroja per observar l'estructura de la xarxa porosa i els possibles canvis fisicoquímics derivats de l'aplicació dels productes.

Tenint en compte l'entorn climàtic de la ciutat de Barcelona, on es troba la major concentració de patrimoni construït amb pedra de Montjuïc, seria útil replicar aquestes proves en condicions ambientals que mimetitzessin les mitjanes d'hivern i estiu pròpies d'aquesta ciutat. D'aquesta manera, els resultats podrien oferir criteris necessaris per a professionals del sector que hagin de seleccionar productes hidrofugants compatibles amb el gres.

En definitiva, aquest estudi no només contribueix al coneixement tècnic dels hidrofugants aplicats a la pedra de Montjuïc, sinó que també obre la porta a línies d'investigació més profundes i a una aplicació més conscient i compatible amb el patrimoni arquitectònic.

9. Contribució als Objectius de Desenvolupament Sostenible

(Nacions Unides, 2015)

Durant l'elaboració d'aquest treball s'han tingut en compte els Objectius de Desenvolupament Sostenible establerts per les Nacions Unides, en concret aquells vinculats amb la conservació del patrimoni, la sostenibilitat en la recerca científica i la innovació aplicada. A través de l'estudi crític i experimental de productes hidrofugants aplicats en pedra de Montjuïc, es contribueix al coneixement en l'àmbit de la conservació-restauració i a una practica responsable, relacionada amb valors com la sostenibilitat, el respecte pel medi ambient i l'eficiència en l'ús de recursos. A continuació, es detallen els objectius que tenen més relació amb aquest treballs i les accions que ho justifiquen.

- ODS 4 Educació de qualitat

El present treball genera coneixement transferible al camp de la conservació-restauració a partir de la multidisciplinarietat. Engloba la vessant científica, filosòfica i artística, relacionant-les per abordar un tema concret. Aporta una base metodològica accessible, fomenta el pensament crític i pot ser útil per a futures investigacions i pràctiques professionals.

- ODS 9 Indústria, innovació i infraestructura

S'han posat en relleu productes innovadors com els nanohidrofugants i es proposen millores en la presa de decisions tècniques. Es contribueix i es dona visibilitat a la investigació i a la innovació dins de la indústria de la conservació i restauració de materials patrimonials.

- ODS 11 Ciutats i comunitats sostenibles

El treball aborda una temàtica relacionada amb la conservació del patrimoni arquitectònic de Barcelona. Protegir la pedra de Montjuïc ajuda a mantenir viva la identitat històrica de la ciutat i a conservar l'entorn construït per a futures generacions, sense necessitat de continuar explotant la pedrera protegida des del segle passat.

- ODS 12 Producció i consum responsable

Per a l'elaboració de la part pràctica s'han demanat només les quantitats màximes de producte per evitar malbaratament. A més, s'ha prioritzat la recollida presencial de la major part dels materials, desplaçant-me amb transport públic. S'aposta per estudiar l'eficàcia, la reversibilitat i la compatibilitat dels productes per evitar intervencions innecessàries.

10. Bibliografia

Agencia Estatal de Meteorología. (s.d.). *Datos climatológicos*. AEMET.
<https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos>

Alfieri, P. V. (2018). *Control del deterioro de la madera mediante la acción de nano-impregnantes y recubrimientos sol-gel a base de silanos* [Doctor de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata]. P. 49-57
<https://doi.org/10.35537/10915/66389>

Almendros, T. (2011). *Estudio de la piedra «Newsandstone» para su uso común como sustituta de la piedra de Montjuïc* (UPCommons) [Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya].
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/347181?show=full>

Amado, I. de R., Rivas, T., & Mosquera, M. J. (2017). *Eficacia de consolidantes e hidrofugantes de nueva síntesis en rocas graníticas optimización de métodos de evaluación* [Universidad de Vigo].
https://www.investigacion.biblioteca.uvigo.es/xmlui/bitstream/handle/11093/802/Eficacia_de_consolidantes_e_hidrofugantes.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Brinker, C. J., & Scherer, G. W. (2010). *Sol-gel science: the physics and chemistry of sol-gel processing* (Nachdr.). Academic Press. P. 2-10, 114

Bohorquez Reyes, J. M. (2018) *Desarrollo de protector hidrorrepelente para uso en piedras areniscas y mármol para la empresa Conalmin S.A.S.* (Trabajo de grado). Fundación Universidad de América. P. 34 <http://hdl.handle.net/20.500.11839/6758>

Camino Olea, M. S., León Vallejo, F. J., Llorente Álvarez, A., & Olivar Parra, J. M. (2017). *Estudio de la eficacia de la aplicación de hidrofugantes para impedir la entrada de agua de lluvia en muros de ladrillo de tejar por albardillas y remates*. *Informes de la Construcción*, 69(545), e184.
<https://doi.org/10.3989/ic.15.066>

Campos Fabregar, J. C. (s.d.). *Teoría sobre los tensioactivos*
https://www.quimicainternacional.com/pdf/biblioteca/miscelanea/Teoria_sobre_tensioactivos.pdf

Carrero, I., & Herraiz, A. (s.d.). *Surfactantes*. Biomodel.

Charola, A. E., & Price, C. A. (1998). *Stone Conservation: An Overview of Current Research*. *Journal of the American Institute for Conservation*, 37(2), 223. P. 43
<https://doi.org/10.2307/3179804>

Montserrat Burgaya. Hidrofugants en pedra de Montjuïc:
revisió crítica i avaluació experimental de la seva eficàcia i compatibilitat.
Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024/2025

Coronado Martín, J. Á. (2012). *Influencia de los Productos Hidrofugantes en las Propiedades Superficiales de las Cerámicas Porosas Utilizadas en Cerramientos Exteriores* Cara Vista [PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid].
<https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.10908>

CTS. (2020). *Nano Silo W*. CTS Europe.
<https://shop-espana.ctseurope.com/1247-nano-silo-w-hidrofugante-a-base-de-nanoparticulas-de-silice-funcionalizada-en-agua>

CTS Europe. (s.d.). *Estudio de eficacia y estabilidad - Nano Silo W*. CTS Europe.
<https://shop-espana.ctseurope.com/documentacioncts/fichastecnicasweb2018/2.2protectores2016/ESTUDIOS%20DE%20EFICACIA%20NANO%20SILO%20W%20ESP.pdf>

Leroy Merlin. (2025) *CTS Nano Silo W II*.
<https://www.leroymerlin.es/productos/cts-nano-silo-w-1-l-hidrofugante-a-base-de-nanoparticulas-de-silice-funcionalizada-en-agua-87235693.html>

Leroy Merlin (2025) *CTS Silo III 5L*.
<https://www.leroymerlin.es/productos/cts-silo-111-5-l-hidrofugante-a-base-de-organosiloxano-oligomero-en-disolvente-87235694.html>

Fort González, R. Tratamientos de conservación y restauración de geomateriales: tratamientos de consolidación e hidrofugación. (2012) *La conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio*. Madrid : Programa Geomateriales, 2012. p. 125-132..

Gómez De Terreros Guardiola, M. G., & Enríquez Díaz, C. (2009). *El comportamiento de la piedra de las fachadas del ángulo suroeste de la catedral de Sevilla tras su restauración*. Revista PH, 112. <https://doi.org/10.33349/2009.71.2803>

Gómez-Gras, D. Parcerisa, D., Calvet, F., Porta, J., Solé de Porta, N. & Civís, J. (2001) *Stratigraphy and petrology of the Miocene Montjuïc delta* (Barcelona, Spain). Acta Geol. Hispànica, 36 (1-2): P. 78, 125, 126, 133

Gómez Villalba, L. S. (2012) *Nanopartículas para la conservación del patrimonio. A: La conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio*. Madrid : Programa Geomateriales. . p. 125-132. p. 171-180.

González, M., Adolfo, I., Garcia, A., Talegon, J., Molina, E., & Santiago, V. (2005). *Caracterización y estudios de deterioro/conservación de materiales pétreos en monumentos históricos. Caracterización y estudios de deterioro/conservación de materiales pétreos en monumentos históricos*, 269-275.
<https://digital.csic.es/handle/10261/13157>

Montserrat Burgaya. Hidrofugants en pedra de Montjuïc:
revisió crítica i avaluació experimental de la seva eficàcia i compatibilitat.
Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024/2025

Gran Enciclopèdia Catalana. (s.d.). *Montjuïc*.
<https://www.enciclopedia.cat/gran-enciclopedia-catalana/montjuic-5>

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. <https://doi.org/10.6028/jres.081A.011>

Hernández, S. Betevé. (2021). *La Pedrera, Montjuïc i la Barcino: tres espais amb molta història*. <https://beteve.cat/va-passar-aqui/pedrera-montjuic-barcino/>

Horie, C. V. (1990). *Materials for conservation: organic consolidants, adhesives and coatings* (Repr. (with corr.)). Butterworths. P.9

Illescas, J. F., & Mosquera, M. J. (2012). *Nuevos nanomateriales para la conservación del patrimonio monumental andaluz* [Universidad de Cádiz]. P. 314 <http://hdl.handle.net/10498/14896>
Juan Baldó, J. M. (2016). REINTEGRACIÓN DE PINTURAS MURALES EXTERIORES: ESTUDIO Y VALORACIÓN DE SISTEMAS Y MATERIALES [Universitat Politècnica de València]. P. 124, 125, 130 <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/61474>

Laborde Marqueze, A., & Coremans, P. (Ed.). (2013). *Proyecto Coremans: Criterios de intervención en materiales pétreos: Criteria for working in stone materials*. Coremans Project. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, Subdirección General de Documentación y Publicaciones. P. 143

Le Corbusier. (1999). *Principios de Urbanismo: La carta de Atenas* (1. Neuaufl). Ariel.

Marcos Martínez, M. D. C. (2001). *Fundición a la cera perdida: Técnica de la Cascarilla Cerámica* [Universitat Politècnica de València]. P. 45
<https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/157239>

Masriera, A. et al. (2005) “*Les roques del Temple de la Sagrada Família. Un itinerari petrogràfic a través dels seus elements arquitectònics i ornamentals*”. Treballs del Museu de Geologia de Barcelona, vol. 13, Pp. 83-113
<https://raco.cat/index.php/TreballsMGB/article/view/72460>.

Medeiros, M., Gomes, T., & Helene, P. (2006). *Hidrofugantes de superfície: Estudo da capacidades de barrar o ingresso de água no concreto*. Teoria e Prática na Engenharia Civil, 6, 21-28. <https://portal.issn.org/resource/ISSN/1677-3047>

Mexopolímeros. (s.d.). *Fluoropolímeros. Mexopolímeros*.
<https://www.mexpolimeros.com/fluoropolimeros.html>

Montserrat Burgaya. Hidrofugants en pedra de Montjuïc:
revisió crítica i avaluació experimental de la seva eficàcia i compatibilitat.
Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024/2025

Nacions Unides (2015) *Objectius de desenvolupament sostenible*
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Ordaz, J., & Esbert, R. M. (1988). *Glosario de términos relacionados con el deterioro de las piedras de construcción. Materiales de Construcción*, 38(209), 39-45.
<https://doi.org/10.3989/mc.1988.v38.i209.847>

Parcerisa, D. (1999). *El miocè de la muntanya de Montjuïc: estratigrafia, sedimentologia, petrologia i diagènesis* [Universitat Autònoma de Barcelona]. P. 2, 36, 66-81
https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/1999/60186/Tesina_Parcerisa.pdf

Parcerisa, D., Gómez-Gras, D. M., Alfonso, M. P., & Mata, J. M. (2010). Divulgación del patrimonio geológico y minero en áreas urbanas: el mioceno de la montaña de Montjuïc. *Divulgación del patrimonio geológico y minero en áreas urbanas: el mioceno de la montaña de Montjuïc*, 865-873. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/10310>
Pérez-Monserrat, E. M., Gómez-Heras, M., Álvarez de Buergo Ballester, M., & Fort

Gonzalez, R. (Ed.). (2007). *Ciencia, tecnología y sociedad: para una conservación sostenible del patrimonio pétreo* (Primera edición). Restauradores sin Fronteras.

Samaniego Jiménez, I., & Zornoza Indart, A. (2020). Influencia del método de aplicación en la consolidación con nanopartículas de sílice (SiO₂): arenisca del claustro de la Catedral de Pamplona. *Ge-conservacion*, 17, 100-113. <https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.698>

Salager, J. L., & Antón, R. (2005). *Métodos de medición de la tensión superficial o interfacial*. Universidad de los Andes. Facultad de Ing. química. FIRP S205-B Módulo de enseñanza en fenómenos interfaciales en español. Mérida-Venezuela.

Sánchez Fernández, A. J., Guitián Garre, F., Mateos Redondo, F., & Álvarez Rodríguez, J. A. (2023). Metodología de evaluación de tratamientos de conservación de la fuente escultórica de la plaza Weyler (Santa Cruz de Tenerife, España). *Ge-conservacion*, 24(1), 7-20.
<https://doi.org/10.37558/gec.v24i1.1183>

San Miguel Arribas, A. & Masriera González, A. (1970). Contribución al estudio petrológico de los niveles de areniscas de Montjuic (Barcelona). *Publicaciones del Instituto de Investigaciones Geológicas de la Diputación Provincial de Barcelona*, 24: P. 11-34.

SIKA- Sikagard 711 ES 25L. (2024). Restatec MC.
https://www.restatec.com/es/articulo/sika--sikagard-711-es-25l-id-84?srsId=AfmBOooR011Bep3t2jHOTvmas0FGYY4cgCrImzXYXIbE_nb8S4f2GiIs

TECNADIS PRS PERFOPORE. (2025). Agaragar.

Montserrat Burgaya. Hidrofugants en pedra de Montjuïc:
revisió crítica i avaluació experimental de la seva eficàcia i compatibilitat.
Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024/2025

<https://agaragar.net/products/tecnadis-prs-perfopore>

TECNAN Aquashield Ultimate. (2024). COM-CAL.
https://com-cal.com/product-tag/hidrofugante-altas-prestaciones/?srsltid=AfmBOorZY9bNeXUimTjElnewFDBx3ys3NMnzQz-zGnAzQ37lf0DQ4_9u

TECNAN-Tecnadis PRS Performance. (2024). COM-CAL.
https://com-cal.com/tienda-profesional-de-la-construccion-para-la-bioconstruccion/protecciones-hidrofugantes/tecnadis-prs-performance/?srsltid=AfmBOorqZT_zJwZVKAJC-yfkCb7lKynw5UoSw6XY7Y8t9YDX-Qf8T5eY

Torraca, G. (1988). Porous materials building: materials science for architectural conservation (3rd ed). ICCROM. P. 6 i 73

Torraca, G. (2005). Solubility and solvents for conservation problems (4th ed). ICCROM.

Universidad de Granada. (2020). Propiedades de las Rocas de Construcción y Ornamentación. Universidad de Granada. P. 1-2
<https://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA05.htm>

Vilà Garcia, M. I. (2022). Estudi del comportament hídic i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics. Màster Oficial - Direcció de Projectes de Conservació-Restauració. P. 54
<https://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/193801>

Villegas, R., & Castrillo, C. (2014). Comportamiento de productos hidrófugos aplicados en piedras de diferente naturaleza. Cambios en las propiedades hídricas y respuesta a los factores de deterioro [Universidad de Sevilla].
https://fama.us.es/discovery/fulldisplay/alma991011761739704987/34CUBA_US:VU1

Vitruvio, siglo I a.C./2011) (Vitruvio, 2011). Los diez libros de arquitectura (J. C. Igarza, Trad.). Iberia. (Obra original del siglo I a.C. Llibre II cap. 4 i 6. Llibre VI cap 3; llibre VII Cap 4 i 5)

Waked, A. M. (2011). Nano materials applications for conservation of cultural heritage. 577-588. <https://doi.org/10.2495/STR110481>

11. Annexos

Annex 1

Taula de recopilació de dades de possibles productes a testar durant la part experimental

Producte	Composició	Aplicació	Disponibilitat	Preu/L	Penetració	Permeabilitat al vapor d'aigua	Vida útil	Modificació estètica	Dissolvent	Observacions
TECNADIS PRS Performance	Nanopartícules ceràmiques (oxid de silice) disperses en medi orgànic (isopropanol)	Pedra natural	24-72h	27,82€	Miija-alta	Alta	10 anys	Pot deixar una petita llocula	Isopropanol	Permet reapplicació sense eliminació prèvia
TECNADIS PRS Paropore	Nanopartícules ceràmiques (oxid de silice) en base aigua	Pedra natural i artificial, maó, fusta	24h	35,40€	Miija	Alta	10 anys	Lleuger canvi de tonalitat	Aigua	
TECNAN Aquashield Ultimate	Nanopartícules ceràmiques (oxid de silice) disperses en medi orgànic (isopropanol)	Pedra natural i artificial, ceràmica, formigó	24h	21,00€	Miija-alta	Miija-alta	10 anys	No	Isopropanol	Permet reapplicació sense eliminació prèvia
Nano Silice W CTS	Nano silice funcionalitzada en dispersió aquosa	Pedra natural de base silice	24h	22,33€	Molt alta	Molt alta	5-10 anys	No	Aigua	
Sika Sikagard - 71IES	Silans i siloxans	Pedra, formigó, morter, maó	24h	8€	Alta	Alta	10 anys	Enfosquiment temporal en superfícies molt poroses	Aguarres mineral	
Silo 111 CTS	Organosiloxans oligomèrics dissolts en agarres frescos	Pedra natural carbonatada i silicàtica, pedra artificial, ceràmica, estucs, frescos, fusta i materials altament alcalins (ciment, morters de calç)	24h	10,13€	Molt alta	Alta	8-10 anys	No	Aguarres mineral desaminatitzat	Recomanat en materials molt compactes (marbre)
Silo 112 CTS	Organosiloxans oligomèrics reactius dissolts en aigua		24h	10,13€	Alta, excepte en superfícies altament alcalines	Alta	5-7 anys	No	Aigua desmineralitzada	Es pot emprar en processos d'injecció

Montserrat Burgaya. Hidrofugants en pedra de Montjuïc:
revisió crítica i avaluació experimental de la seva eficàcia i compatibilitat.
Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024/2025

Annex 2

Documentació gràfica del procés de tall de les mostres

El procés es va realitzar al Servei de Tall de la Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona. Així com amb l'aparatólogia de tall disponible al laboratori de la Facultat.

A partir del bloc de pedra inicial, recuperat d'un enderroc a Barcelona, es va fer un primer tall per obtenir fragments de mida més manejable, amb dues cares llises. Sobre els fragments es van delimitar les línies de tall corresponents a les mostres experimentals. Seguint aquestes marques es van tallar els blocs per obtenir mostres de forma quadrada. Finalment, es van eliminar els relleus sobrants amb l'objectiu d'aconseguir cares llises.



Montserrat Burgaya. Hidrofugants en pedra de Montjuïc:
revisió crítica i avaluació experimental de la seva eficàcia i compatibilitat.
Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024/2025

Fig. 1 i 2 Procés de tall del bloc de pedra inicial.



Fig. 3 Procés de tall del bloc de pedra inicial. Primer tall.



Fig. 4 Bloc inicial tallat en 5 parts.



Fig. 5 Procés de medició i marcatge dels blocs de pedra per procedir amb la segona fase del tall.



Fig. 6 Detall del procés de medició i marcatge dels blocs de pedra per procedir amb la segona fase del tall.



Fig. 7 Bloc de pedra mesurat i marcat per procedir amb el tall.



Fig. 8 Tall dels blocs definitius que s'empraran com a mostres.

Annex 3

Dades recaptades durant l'acondicionament de les mostres

DATA LOG

File Created At: 2025/04/22 14:44:49

Device Information

Device Code : RC-51H
Serial Number : EL2404005412
Probe Type : Temperature & Humidity(internal)
Firmware Version : V2.3

Trip Information

Trip Id : 0000001
Description : Temperature recording.

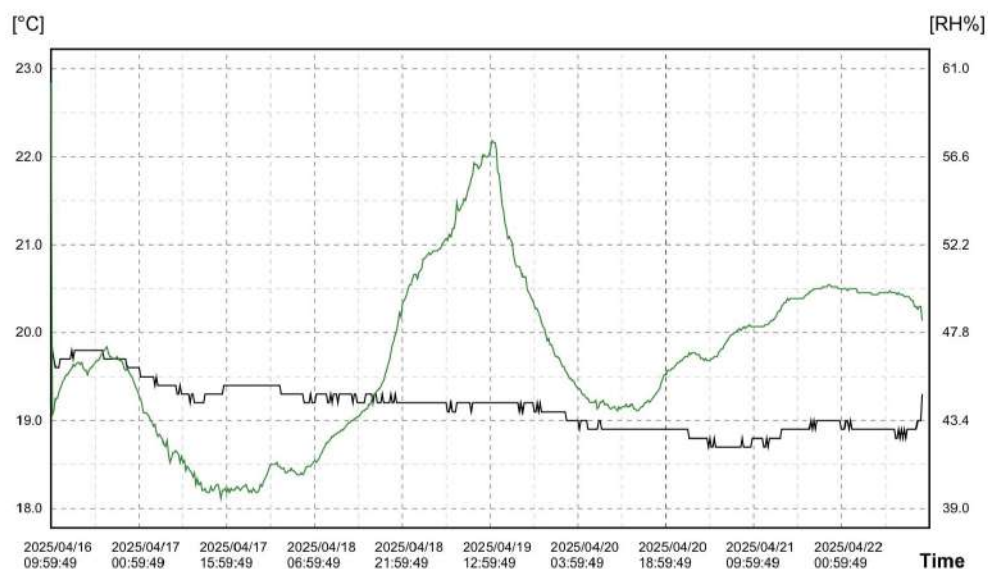
Configuration Information

Start Mode : Manual
Start Delay : 0s
Time Base : UTC +00:00
Log Interval : 15m
Ring Buffer : Disable
Stop Mode : Manual + Software

Alarm Zone	Allow Time	Alarm Type	Total Time	Violations	Status
No Alarm Set.					

Logging Summary

Highest :	20.0 °C / 60.3 %	Start Time :	2025/04/16 09:59:49
Lowest :	18.7 °C / 39.5 %	Stop Time :	2025/04/22 14:44:49(temporary)
Average :	19.1 °C / 46.5 %	Elapsed Time :	6d 4h 45m
MKT :	19.1 °C	Data Points :	596
Alarm At(Te):	N/A	Alarm At(Hu):	N/A





2025/04/16 20.0 °C 60.3 %	10:59:49 19.2 °C 40.5 %	11:59:49 19.3 °C 43.0 %	12:59:49 19.2 °C 57.0 %	13:59:49 18.9 °C 43.9 %	14:59:49 18.9 °C 49.2 %
10:14:49 19.8 °C 43.7 %	11:14:49 19.2 °C 40.2 %	12:14:49 19.3 °C 43.1 %	13:14:49 19.2 °C 57.4 %	14:14:49 18.9 °C 43.9 %	15:14:49 18.9 °C 49.3 %
10:29:49 19.7 °C 43.9 %	11:29:49 19.2 °C 40.3 %	12:29:49 19.3 °C 43.2 %	13:29:49 19.2 °C 57.3 %	14:29:49 18.9 °C 44.0 %	15:29:49 18.9 °C 49.3 %
10:44:49 19.6 °C 44.5 %	11:44:49 19.2 °C 39.9 %	12:44:49 19.3 °C 43.3 %	13:44:49 19.2 °C 57.3 %	14:44:49 18.9 °C 44.1 %	15:44:49 18.9 °C 49.5 %
10:59:49 19.6 °C 44.5 %	11:59:49 19.2 °C 39.9 %	12:59:49 19.3 °C 43.3 %	13:59:49 19.2 °C 57.0 %	14:59:49 18.9 °C 44.1 %	15:59:49 18.9 °C 49.4 %
11:14:49 19.6 °C 44.8 %	12:14:49 19.3 °C 40.0 %	13:14:49 19.3 °C 43.4 %	14:14:49 19.2 °C 55.8 %	15:14:49 18.9 °C 44.2 %	16:14:49 18.9 °C 49.5 %
11:29:49 19.7 °C 45.0 %	12:29:49 19.3 °C 39.8 %	13:29:49 19.2 °C 43.4 %	14:29:49 19.2 °C 55.7 %	15:29:49 18.9 °C 44.3 %	16:29:49 18.9 °C 49.5 %
11:44:49 19.7 °C 45.2 %	12:44:49 19.3 °C 39.8 %	13:44:49 19.3 °C 43.5 %	14:44:49 19.2 °C 55.0 %	15:44:49 18.9 °C 44.3 %	16:44:49 18.9 °C 49.5 %
11:59:49 19.7 °C 45.4 %	12:59:49 19.3 °C 39.8 %	13:59:49 19.3 °C 43.5 %	14:59:49 19.2 °C 54.2 %	15:59:49 18.9 °C 44.4 %	16:59:49 18.9 °C 49.5 %
12:14:49 19.7 °C 45.5 %	13:14:49 19.3 °C 40.1 %	14:14:49 19.2 °C 43.6 %	15:14:49 19.2 °C 53.9 %	16:14:49 18.9 °C 44.3 %	17:14:49 18.9 °C 49.5 %
12:29:49 19.7 °C 45.7 %	13:29:49 19.3 °C 39.9 %	14:29:49 19.2 °C 43.6 %	15:29:49 19.2 °C 53.3 %	16:29:49 18.9 °C 44.4 %	17:29:49 18.9 °C 49.5 %
12:44:49 19.7 °C 45.7 %	13:44:49 19.3 °C 39.9 %	14:44:49 19.2 °C 43.7 %	15:44:49 19.2 °C 53.0 %	16:44:49 18.9 °C 44.5 %	17:44:49 18.9 °C 49.5 %
12:59:49 19.7 °C 45.8 %	13:59:49 19.3 °C 40.1 %	14:59:49 19.2 °C 43.8 %	15:59:49 19.2 °C 52.5 %	16:59:49 18.9 °C 44.6 %	17:59:49 18.9 °C 49.5 %
13:14:49 19.7 °C 45.9 %	14:14:49 19.3 °C 40.2 %	15:14:49 19.2 °C 43.9 %	16:14:49 19.2 °C 52.6 %	17:14:49 18.9 °C 44.7 %	18:14:49 18.9 °C 49.5 %
13:29:49 19.8 °C 46.0 %	14:29:49 19.3 °C 40.2 %	15:29:49 19.2 °C 43.9 %	16:29:49 19.2 °C 52.4 %	17:29:49 18.9 °C 44.8 %	18:29:49 18.9 °C 49.5 %
13:44:49 19.7 °C 46.2 %	14:44:49 19.3 °C 39.9 %	15:44:49 19.3 °C 44.0 %	16:44:49 19.2 °C 52.3 %	17:44:49 18.9 °C 44.9 %	18:44:49 18.9 °C 49.6 %
13:59:49 19.8 °C 46.1 %	14:59:49 19.3 °C 39.5 %	15:59:49 19.3 °C 44.0 %	16:59:49 19.2 °C 51.7 %	17:59:49 18.9 °C 45.0 %	18:59:49 18.9 °C 49.7 %
14:14:49 19.8 °C 46.2 %	15:14:49 19.3 °C 39.9 %	16:14:49 19.3 °C 44.2 %	17:14:49 19.2 °C 51.3 %	18:14:49 18.9 °C 45.3 %	19:14:49 18.9 °C 49.7 %
14:29:49 19.8 °C 46.3 %	15:29:49 19.4 °C 39.9 %	16:29:49 19.3 °C 44.2 %	17:29:49 19.2 °C 51.1 %	18:29:49 18.9 °C 45.5 %	19:29:49 18.9 °C 49.8 %
14:44:49 19.8 °C 46.3 %	15:44:49 19.4 °C 40.0 %	16:44:49 19.3 °C 44.4 %	17:44:49 19.2 °C 51.1 %	18:44:49 18.9 °C 45.7 %	19:44:49 19.0 °C 49.9 %
14:59:49 19.8 °C 46.2 %	15:59:49 19.4 °C 39.8 %	16:59:49 19.2 °C 44.6 %	17:59:49 19.1 °C 51.1 %	18:59:49 18.9 °C 45.7 %	19:59:49 18.9 °C 49.9 %
15:14:49 19.8 °C 46.3 %	16:14:49 19.4 °C 40.0 %	17:14:49 19.3 °C 44.7 %	18:14:49 19.2 °C 50.9 %	19:14:49 18.9 °C 45.9 %	20:14:49 19.0 °C 50.0 %
15:29:49 19.8 °C 46.0 %	16:29:49 19.4 °C 39.8 %	17:29:49 19.3 °C 44.8 %	18:29:49 19.1 °C 50.6 %	19:29:49 18.9 °C 45.9 %	20:29:49 18.9 °C 50.0 %
15:44:49 19.8 °C 45.9 %	16:44:49 19.4 °C 40.0 %	17:44:49 19.2 °C 44.9 %	18:44:49 19.2 °C 50.6 %	19:44:49 18.9 °C 45.9 %	20:44:49 19.0 °C 50.0 %
15:59:49 19.8 °C 45.9 %	16:59:49 19.4 °C 39.9 %	17:59:49 19.2 °C 45.0 %	18:59:49 19.1 °C 50.6 %	19:59:49 18.9 °C 46.0 %	20:59:49 19.0 °C 50.0 %
16:14:49 19.8 °C 45.7 %	17:14:49 19.4 °C 39.9 %	18:14:49 19.2 °C 45.1 %	19:14:49 19.2 °C 50.0 %	20:14:49 18.9 °C 46.0 %	21:14:49 19.0 °C 50.0 %
16:29:49 19.8 °C 45.9 %	17:29:49 19.4 °C 40.0 %	18:29:49 19.3 °C 45.3 %	19:29:49 19.2 °C 49.8 %	20:29:49 18.9 °C 46.1 %	21:29:49 19.0 °C 50.0 %
16:44:49 19.8 °C 46.0 %	17:44:49 19.4 °C 40.1 %	18:44:49 19.2 °C 45.4 %	19:44:49 19.2 °C 49.7 %	20:44:49 18.9 °C 46.2 %	21:44:49 19.0 °C 50.1 %
16:59:49 19.8 °C 46.1 %	17:59:49 19.4 °C 40.0 %	18:59:49 19.2 °C 45.7 %	19:59:49 19.2 °C 49.5 %	20:59:49 18.9 °C 46.3 %	21:59:49 19.0 °C 50.1 %
17:14:49 19.8 °C 46.2 %	18:14:49 19.4 °C 39.9 %	19:14:49 19.2 °C 45.9 %	20:14:49 19.2 °C 49.4 %	21:14:49 18.9 °C 46.3 %	22:14:49 19.0 °C 50.1 %
17:29:49 19.8 °C 46.3 %	18:29:49 19.4 °C 40.0 %	19:29:49 19.2 °C 46.2 %	20:29:49 19.1 °C 49.1 %	21:29:49 18.9 °C 46.4 %	22:29:49 19.0 °C 50.1 %
17:44:49 19.8 °C 46.4 %	18:44:49 19.4 °C 40.1 %	19:44:49 19.2 °C 46.4 %	20:44:49 19.1 °C 49.0 %	21:44:49 18.9 °C 46.4 %	22:44:49 19.0 °C 50.2 %
17:59:49 19.8 °C 46.4 %	18:59:49 19.4 °C 40.1 %	19:59:49 19.3 °C 46.8 %	20:59:49 19.2 °C 49.0 %	21:59:49 18.9 °C 46.5 %	22:59:49 19.0 °C 50.2 %
18:14:49 19.8 °C 46.5 %	19:14:49 19.4 °C 40.2 %	20:14:49 19.2 °C 47.2 %	21:14:49 19.1 °C 48.8 %	22:14:49 18.9 °C 46.6 %	23:14:49 19.0 °C 50.1 %
18:29:49 19.8 °C 46.7 %	19:29:49 19.4 °C 40.0 %	20:29:49 19.2 °C 47.4 %	21:29:49 19.1 °C 48.6 %	22:29:49 18.9 °C 46.6 %	23:29:49 19.0 °C 50.1 %
18:44:49 19.8 °C 46.8 %	19:44:49 19.4 °C 39.8 %	20:44:49 19.3 °C 47.7 %	21:44:49 19.1 °C 48.3 %	22:44:49 18.9 °C 46.6 %	23:44:49 19.0 °C 50.1 %
18:59:49 19.7 °C 46.9 %	19:59:49 19.4 °C 39.9 %	20:59:49 19.2 °C 47.9 %	21:59:49 19.1 °C 48.1 %	22:59:49 18.8 °C 46.8 %	23:59:49 19.0 °C 50.1 %
19:14:49 19.7 °C 47.0 %	20:14:49 19.4 °C 39.8 %	21:14:49 19.2 °C 48.3 %	22:14:49 19.1 °C 48.0 %	23:14:49 18.8 °C 46.7 %	2025/04/22 19.0 °C 50.1 %
19:29:49 19.7 °C 47.1 %	20:29:49 19.4 °C 40.0 %	21:29:49 19.2 °C 48.8 %	22:29:49 19.1 °C 47.7 %	23:29:49 18.8 °C 46.8 %	00:29:49 19.0 °C 50.0 %
19:44:49 19.7 °C 46.8 %	20:44:49 19.4 °C 39.9 %	21:44:49 19.2 °C 48.6 %	22:44:49 19.1 °C 47.4 %	23:44:49 18.8 °C 46.8 %	00:44:49 19.0 °C 50.0 %
19:59:49 19.7 °C 46.6 %	20:59:49 19.4 °C 39.8 %	21:59:49 19.2 °C 49.2 %	22:59:49 19.1 °C 47.5 %	23:59:49 18.8 °C 46.8 %	00:59:49 19.0 °C 50.0 %
20:14:49 19.7 °C 46.6 %	21:14:49 19.4 °C 39.8 %	22:14:49 19.2 °C 49.4 %	23:14:49 19.1 °C 47.2 %	2025/04/21 18.8 °C 46.7 %	01:14:49 18.9 °C 50.0 %
20:29:49 19.7 °C 46.5 %	21:29:49 19.4 °C 39.9 %	22:29:49 19.2 °C 49.5 %	23:29:49 19.1 °C 47.2 %	00:29:49 18.8 °C 46.7 %	01:29:49 18.9 °C 50.0 %
20:44:49 19.7 °C 46.5 %	21:44:49 19.4 °C 40.2 %	22:44:49 19.2 °C 49.7 %	23:44:49 19.1 °C 47.0 %	00:44:49 18.8 °C 46.7 %	01:44:49 19.0 °C 50.0 %
20:59:49 19.7 °C 46.5 %	21:59:49 19.4 °C 40.1 %	22:59:49 19.2 °C 50.0 %	23:59:49 19.1 °C 46.7 %	00:59:49 18.8 °C 46.5 %	01:59:49 19.0 °C 50.0 %
21:14:49 19.7 °C 46.6 %	22:14:49 19.4 °C 40.3 %	23:14:49 19.2 °C 50.2 %	2025/04/20 19.1 °C 46.6 %	01:14:49 18.8 °C 46.5 %	02:14:49 18.9 °C 50.0 %
21:29:49 19.7 °C 46.5 %	22:29:49 19.4 °C 40.5 %	23:29:49 19.2 °C 50.2 %	00:29:49 19.1 °C 46.6 %	01:29:49 18.8 °C 46.4 %	02:29:49 19.0 °C 50.0 %
21:44:49 19.7 °C 46.4 %	22:44:49 19.4 °C 40.6 %	23:44:49 19.2 °C 50.5 %	00:44:49 19.1 °C 46.5 %	01:44:49 18.8 °C 46.5 %	02:44:49 18.9 °C 50.0 %
21:59:49 19.7 °C 46.4 %	22:59:49 19.4 °C 40.8 %	23:59:49 19.2 °C 50.7 %	00:59:49 19.1 °C 46.3 %	01:59:49 18.8 °C 46.4 %	02:59:49 18.9 °C 50.0 %
22:14:49 19.7 °C 46.3 %	23:14:49 19.4 °C 41.0 %	2025/04/19 19.2 °C 50.7 %	01:14:49 19.1 °C 46.1 %	02:14:49 18.7 °C 46.4 %	03:14:49 18.9 °C 50.0 %
22:29:49 19.7 °C 46.0 %	23:29:49 19.4 °C 41.2 %	00:29:49 19.2 °C 50.5 %	01:29:49 19.1 °C 46.1 %	02:29:49 18.8 °C 46.4 %	03:29:49 18.9 °C 50.0 %
22:44:49 19.7 °C 45.9 %	23:44:49 19.4 °C 41.2 %	00:44:49 19.2 °C 50.8 %	01:44:49 19.1 °C 45.9 %	02:44:49 18.7 °C 46.5 %	03:44:49 18.9 °C 49.8 %
22:59:49 19.6 °C 46.0 %	23:59:49 19.4 °C 41.2 %	00:59:49 19.2 °C 50.9 %	01:59:49 19.0 °C 45.8 %	02:59:49 18.7 °C 46.5 %	03:59:49 18.9 °C 49.8 %
23:14:49 19.6 °C 45.8 %	2025/04/18 19.4 °C 41.2 %	01:14:49 19.2 °C 51.0 %	02:14:49 19.0 °C 45.7 %	03:14:49 18.8 °C 46.6 %	04:14:49 18.9 °C 49.8 %
23:29:49 19.6 °C 45.7 %	00:29:49 19.4 °C 41.3 %	01:29:49 19.2 °C 51.5 %	02:29:49 19.0 °C 45.5 %	03:29:49 18.7 °C 46.6 %	04:29:49 18.9 °C 49.8 %
23:44:49 19.6 °C 45.6 %	00:44:49 19.4 °C 41.1 %	01:44:49 19.2 °C 51.5 %	02:44:49 19.0 °C 45.5 %	03:44:49 18.7 °C 46.6 %	04:44:49 18.9 °C 49.8 %
23:59:49 19.6 °C 45.4 %	00:59:49 19.4 °C 41.1 %	01:59:49 19.2 °C 51.6 %	02:59:49 19.0 °C 45.4 %	03:59:49 18.7 °C 46.6 %	04:59:49 18.9 °C 49.8 %
2025/04/17 19.6 °C 45.2 %	01:14:49 19.3 °C 41.0 %	02:14:49 19.2 °C 51.7 %	03:14:49 19.0 °C 45.4 %	04:14:49 18.7 °C 46.9 %	05:14:49 18.9 °C 49.8 %
00:29:49 19.6 °C 45.0 %	01:29:49 19.3 °C 41.0 %	02:29:49 19.2 °C 51.8 %	03:29:49 19.0 °C 45.2 %	04:29:49 18.7 °C 47.0 %	05:29:49 18.9 °C 49.8 %
00:44:49 19.6 °C 44.9 %	01:44:49 19.3 °C 41.0 %	02:44:49 19.2 °C 51.7 %	03:44:49 19.0 °C 45.1 %	04:44:49 18.7 °C 47.0 %	05:44:49 18.9 °C 49.8 %
00:59:49 19.6 °C 44.6 %	01:59:49 19.3 °C 40.8 %	02:59:49 19.2 °C 51.8 %	03:59:49 19.0 °C 45.0 %	04:59:49 18.7 °C 47.2 %	05:59:49 18.9 °C 49.8 %
01:14:49 19.5 °C 44.5 %	02:14:49 19.3 °C 40.8 %	03:14:49 19.2 °C 51.9 %	04:14:49 18.9 °C 45.0 %	05:14:49 18.7 °C 47.3 %	06:14:49 18.9 °C 49.7 %
01:29:49 19.5 °C 44.2 %	02:29:49 19.3 °C 40.9 %	03:29:49 19.2 °C 51.9 %	04:29:49 18.9 °C 47.4 %	05:29:49 18.7 °C 47.3 %	06:29:49 18.9 °C 49.7 %
01:44:49 19.5 °C 43.8 %	02:44:49 19.3 °C 40.9 %	03:44:49 19.2 °C 51.9 %	04:44:49 19.0 °C 44.7 %	05:44:49 18.7 °C 47.5 %	06:44:49 18.9 °C 49.7 %
01:59:49 19.5 °C 43.8 %	02:59:49 19.3 °C 41.0 %	03:59:49 19.2 °C 51.9 %	04:59:49 19.0 °C 44.7 %	05:59:49 18.7 °C 47.6 %	06:59:49 18.9 °C 49.7 %
02:14:49 19.5 °C 43.8 %	03:14:49 19.3 °C 40.9 %	04:14:49 19.2 °C 52.0 %	05:14:49 19.0 °C 44.6 %	06:14:49 18.7 °C 47.7 %	07:14:49 18.9 °C 49.7 %
02:29:49 19.5 °C 43.7 %	03:29:49 19.3 °C 40.9 %	04:29:49 19.2 °C 52.0 %	05:29:49 19.0 °C 44.5 %	06:29:49 18.7 °C 47.7 %	07:29:49 18.9 °C 49.8 %
02:44:49 19.5 °C 43.6 %	03:44:49 19.3 °C 40.8 %	04:44:49 19.2 °C 52.2 %	05:44:49 18.9 °C 44.5 %	06:44:49 18.7 °C 47.8 %	07:44:49 18.9 °C 49.8 %
02:59:49 19.5 °C 43.4 %	03:59:49 19.3 °C 40.7 %	04:59:49 19.2 °C 52.3 %	05:59:49 18.9 °C 44.3 %	06:59:49 18.7 °C 47.8 %	07:59:49 18.9 °C 49.8 %
03:14:49 19.5 °C 43.3 %	04:14:49 19.3 °C 40.7 %	05:14:49 19.2 °C 52.4 %	06:14:49 18.9 °C 44.3 %	07:14:49 18.7 °C 47.9 %	08:14:49 18.9 °C 49.8 %
03:29:49 19.5 °C 43.1 %	04:29:49 19.3 °C 40.7 %	05:29:49 19.2 °C 52.5 %	06:29:49 18.9 °C 44.3 %	07:29:49 18.7 °C 48.0 %	08:29:49 18.9 °C 49.8 %
03:44:49 19.4 °C 43.2 %	04:44:49 19.3 °C 40.8 %	05:44:49 19.1 °C 52.4 %	06:44:49 18.9 °C 44.3 %	07:44:49 18.7 °C 47.9 %	08:44:49 18.9 °C 49.8 %
03:59:49 19.5 °C 42.8 %	04:59:49 19.3 °C 40.7 %	05:59:49 19.1 °C 52.7 %	06:59:49 18.9 °C 44.4 %	07:59:49 18.8 °C 48.0 %	08:59:49 18.9 °C 49.8 %
04:14:49 19.4 °C 42.6 %	05:14:49 19.2 °C 40.8 %	06:14:49 19.2 °C 52.6 %	07:14:49 18.9 °C 44.0 %	08:14:49 18.7 °C 48.1 %	09:14:49 18.9 °C 49.9 %
04:29:49 19.4 °C 42.7 %	05:29:49 19.2 °C 41.0 %	06:29:49 19.1 °C 53.0 %	07:29:49 19.0 °C 44.1 %	08:29:49 18.7 °C 48.1 %	09:29:49 18.9 °C 49.8 %
04:44:49 19.4 °C 42.6 %	05:44:49 19.2 °C 41.1 %	06:44:49 19.1 °C 53.0 %	07:44:49 19.0 °C 44.3 %	08:44:49 18.7 °C 48.	

Annex 4

Informe de l'observació de canvi d'aspecte de la mostra

En el moment de l'aplicació, la superfície es torna més fosca, ressaltant els components de color clar pel contrast ocasionat. Tanmateix, no s'observa una modificació de l'aspecte estètic del material un cop el producte ha curat.

Dades obtingudes del dispositiu en el moment de la fotografia prèvia a l'aplicació del producte hidrofugant:

- ISO 50 (sensibilitat de la càmera a la llum)
- 0 ev (Exposure Value)
- f 1.6 (obertura de la lent)
- 1/3272 s (segons necessaris per fer la fotografia)

Dades obtingudes del dispositiu en el moment de la fotografia prèvia a l'aplicació del producte hidrofugant:

- ISO 50 (sensibilitat de la càmera a la llum)
- 0 ev (Exposure Value)
- f 1.6 (obertura de la lent)
- 1/12759 s (segons necessaris per fer la fotografia)

A continuació, s'exposen les imatges captades dels tres grups de mostres abans i després de l'aplicació del producte hidrofugant. Les fotografies s'han pres en la mateixa localització i hora amb una font d'il·luminació natural.



Fig. 9 Comparació mostres grup 1.



Fig. 10 Comparació mostres grup 2.



Fig. 11 *Comparació mostres grup 3.*

Annex 5

Informe de l'assaig Capacitat d'hidrorepel·lència (angle de contacte estàtic) UNE-EN 15802:2010

Localització: Carrer de la Mare de Déu del Mar, 42. Terrassa.

Dades i preconditionament de les mostres: veure apartats 5.7 *Pedra de Montjuïc* i 6.1 *Mostres*

Instruments: micropipeta de polietilè graduada de punta plana amb capacitat per a 15 ml

Volum de la gota: 10 µ

Nombre de mesuraments per mostra: 5

Angle de contacte de cada mesuratge simple:

- Mesuraments realitzats abans d'aplicar el producte hidrofuscant

Data de realització de l'assaig: 22/04/2025

Condicions ambientals: 19,3°C i 48,5% HR

	Mostra 1.1	Mostra 1.2	Mostra 1.3
	45°	57°	53°
	40°	54°	38°
	42°	49°	61°
	48°	53°	55°
	49°	41°	55°
Mitjana	44,8°	50,8°	52,4°

	Mostra 2.1	Mostra 2.2	Mostra 2.3
	49°	40°	43°
	61°	46°	54°
	58°	42°	43°
	55°	53°	41°
	59°	48°	35°
Mitjana	56,4°	45,8°	43,2°



	Mostra de control 3.1	Mostra de control 3.2	Mostra de control 3.3
	57º	47º	52º
	52º	44º	47º
	53º	49º	54º
	55º	45º	40º
	64º	57º	56º
Mitjana	56,2º	48,4º	49,8º

- Mesuraments realitzats després d'aplicar el producte hidrofugant.

Data de realització de l'assaig: 14/04/2025

Condicions ambientals: 22ºC i 60,2% HR

	Mostra 1.1	Mostra 1.2	Mostra 1.3
	99º	115º	120º
	87º	123º	114º
	90º	99º	121º
	118º	92º	129º
	123º	101º	123º
Mitjana	103,4º	106º	121,4º

	Mostra 2.1	Mostra 2.2	Mostra 2.3
	130º	135º	129º
	127º	136º	127º
	126º	129º	131º
	122º	133º	122º
	121º	131º	129º
Mitjan	125,2º	132,8º	127,6º

Montserrat Burgaya. Hidrofugants en pedra de Montjuïc:

revisió crítica i avaluació experimental de la seva eficàcia i compatibilitat.

Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,

Universitat de Barcelona, curs 2024/2025



a			
---	--	--	--

	Mostra de control 3.1	Mostra de control 3.2	Mostra de control 3.3
	58º	76º	82º
	32º	43º	65º
	75º	70º	70º
	53º	86º	66º
	79º	83º	38º
Mitjana	48,8º	71,6º	64,2º

Annex 6

Informe de l'assaig Absorció d'aigua pels mètodes de la pipeta UNE-EN 16302:2013

Localització: Carrer de la Mare de Déu del Mar, 42. Terrassa.

Dades i preconditionament de les mostres: veure apartats 5.7. *Pedra de Montjuïc* i 6.1. *Mostres*.

Instruments: xeringa de plàstic amb capacitat per a 12 ml, plastilina blanca Jovi®, 90 ml d'aigua desionitzada.

Intervals de temps: 10 primers segons; de 30 en 30 segons fins a arribar a 5 minuts; cada 5 minuts fins a arribar a estabilització del volum durant 1 hora.

Duració total de l'assaig: 4h i 45 minuts.

Els resultats expressats en els gràfics mostren l'absorció d'aigua progressiva. Per obtenir els valors concrets en expressió numèrica, així com W_i (absorció per àrea) accedir al següent document.

https://docs.google.com/spreadsheets/d/16RcrQ3wespgfxd7_3zJLPaxO60XkG8TL/edit?usp=drivesdk&ouid=106373298058670349059&rtpof=true&sd=true

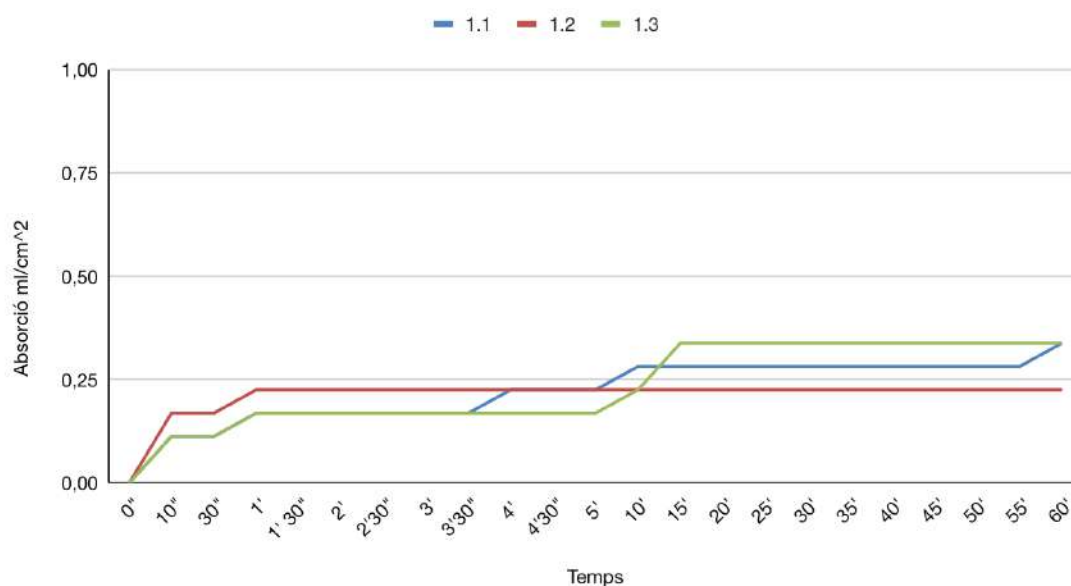
- Mesuraments realitzats abans d'aplicar el producte hidrofuscant.

Data de realització de l'assaig: 22/04/2025

Condicions ambientals: 19,3°C i 48,5% HR

En el grup 1, que comprèn les mostres 1.1, 1.2 i 1.3, hi ha una taxa d'absorció de 0,26 ml/cm² de mitjana.

Absorció per àrea (ml/cm²) - Grup 1



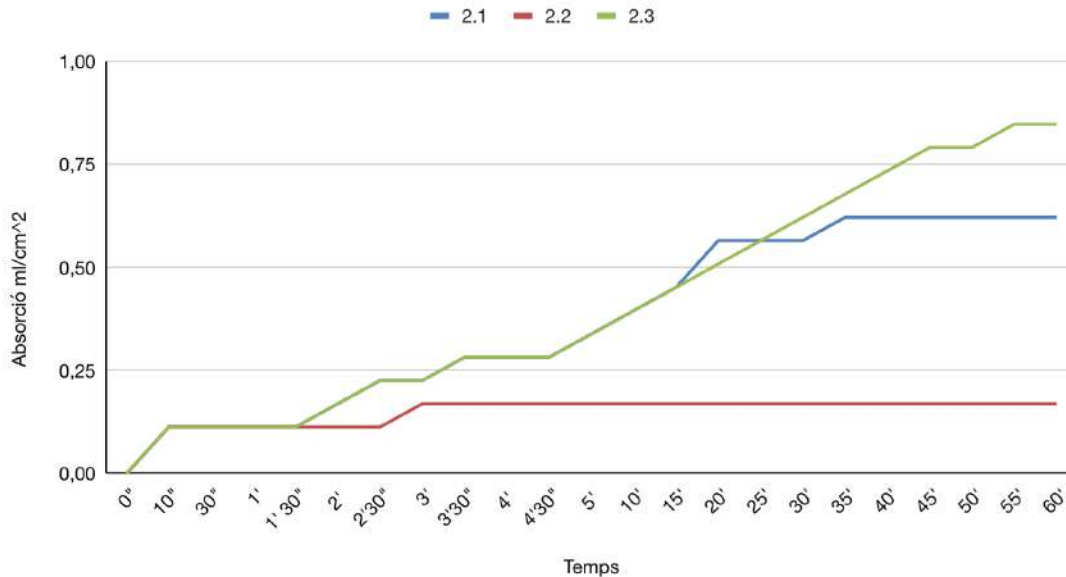
Montserrat Burgaya. Hidrofugants en pedra de Montjuïc:
revisió crítica i avaluació experimental de la seva eficàcia i compatibilitat.
Treball Final de Grau, Grau de Conservació-Restauració de Béns Culturals, Facultat de Belles Arts,
Universitat de Barcelona, curs 2024/2025



Gràfic 1. Relació entre l'absorció d'aigua (ml) per cm^2 de les mostres del grup 1 en un marc de temps determinat. Mesures obtingudes abans del tractament hidrofugant.

En el grup 2, que comprén les mostres 2.1, 2.2 i 2.3, hi ha una taxa d'absorció de $0,55 \text{ ml/cm}^2$ de mitjana.

Absorció per àrea (ml/cm^2) - Grup 2

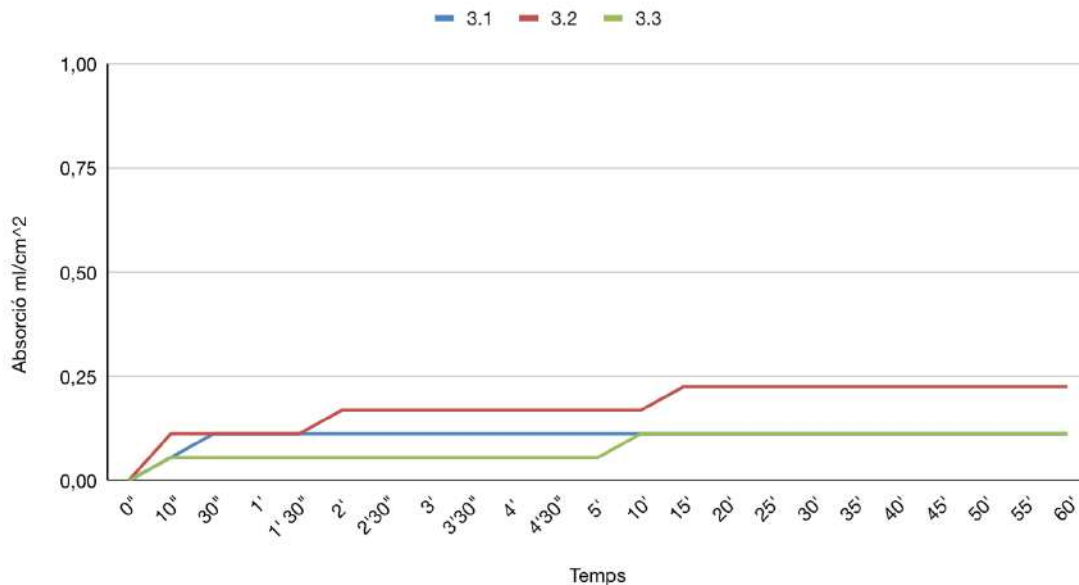


Gràfic 2. Relació entre l'absorció d'aigua (ml) per cm^2 de les mostres del grup 2 en un marc de temps determinat. Mesures obtingudes abans del tractament hidrofugant.

En el grup 3, que comprén les mostres 3.1, 3.2 i 3.3, hi ha una taxa d'absorció de $0,15 \text{ ml/cm}^2$ de mitjana.



Absorció per àrea (ml/cm²) - Grup 3



Gràfic 3. Relació entre l'absorció d'aigua (ml) per cm² de les mostres del grup 3 en un marc de temps determinat. Mesures obtingudes abans del tractament hidrofugant.

- Mesuraments realitzats després d'aplicar el producte hidrofugant.

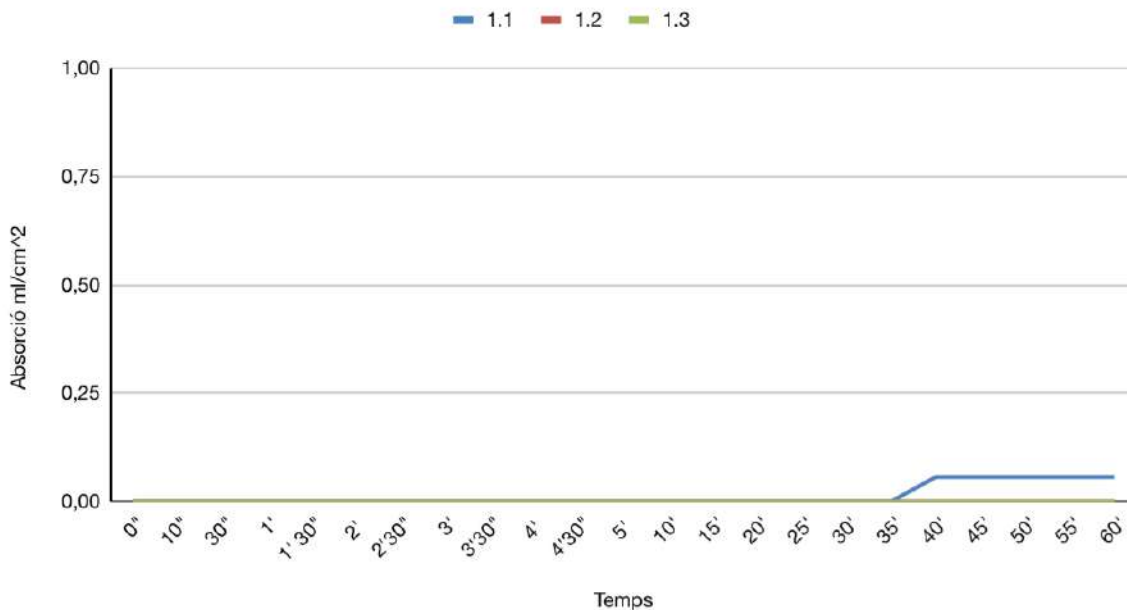
Data de realització de l'assaig: 14/04/2025

Condicions ambientals: 22°C i 60,2% HR

En el grup 1, que comprén les mostres 1.1, 1.2 i 1.3, hi ha una tasa d'absorció de 0,02 ml/cm² de mitjana.



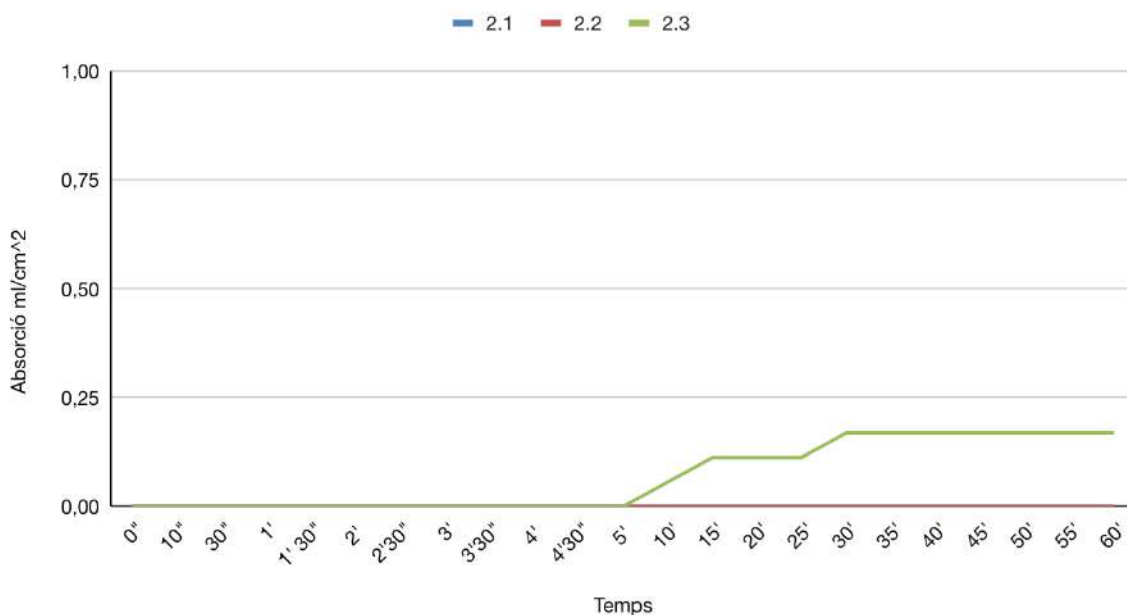
Absorció per àrea (ml/cm²) - Grup 1 Post Tractament



Gràfic 4. Relació entre l'absorció d'aigua (ml) per cm² de les mostres del grup 1 en un marc de temps determinat. Mesures obtingudes després del tractament hidrofugant.

En el grup 2, que comprén les mostres 2.1, 2.2 i 2.3, hi ha una taxa d'absorció de 0,05 ml/cm² de mitjana.

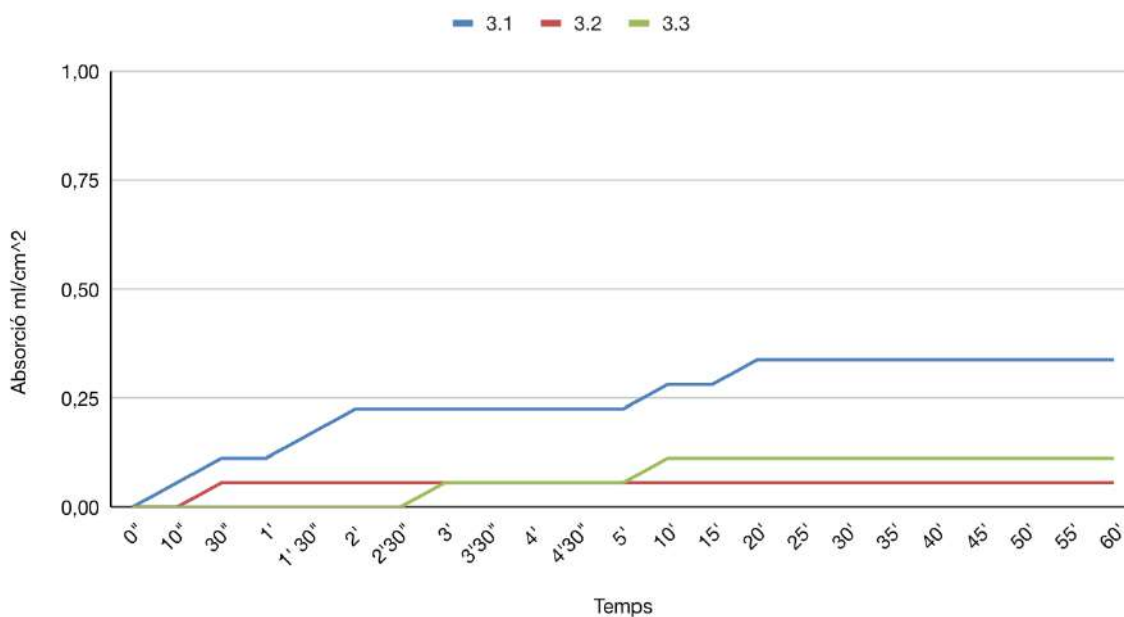
Absorció per àrea (ml/cm²) - Grup 2 Post Tractament



Gràfic 5. Relació entre l'absorció d'aigua (ml) per cm^2 de les mostres del grup 2 en un marc de temps determinat. Mesures obtingudes després del tractament hidrofugant.

En el grup 3, que comprén les mostres 3.1, 3.2 i 3.3, hi ha una taxa d'absorció de 0,170 ml/cm² de mitjana.

Absorció per àrea (ml/cm²) - Grup 3 Post Tractament



Gràfic 6. Relació entre l'absorció d'aigua (ml) per cm^2 de les mostres del grup 3 en un marc de temps determinat. Mesures obtingudes després del tractament hidrofugant.

Annex 7

Informe de l'assaig Tassa de transpirabilitat (permeabilitat al vapor d'aigua) UNE-EN 15803:2010

Localització: Carrer de la Mare de Déu del Mar, 42. Terrassa.

Dades i preconditionament de les mostres: veure apartats 5.7. *Pedra de Montjuïc* i 6.1. *Mostres*.

Instruments: cubetes de vidre, cinta aïllant, 480 ml d'aigua destil·lada, 42 grams de nitrat potàssic (KNO_3), bàscula de precisió.

Per obtenir els valors concrets en expressió numèrica referents al canvi de massa de cada proveta, així com:

- Caudal del vapor d'aigua G
- Penetració del vapor d'aigua W_p ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$)
- Permeabilitat del vapor d'aigua δ_p ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$)

Accedir al següent document:

https://docs.google.com/spreadsheets/d/16RcrQ3wespqfxd7_3zJLPaxO60XkG8TL/edit?usp=drivesdk&oid=106373298058670349059&rtpof=true&sd=true

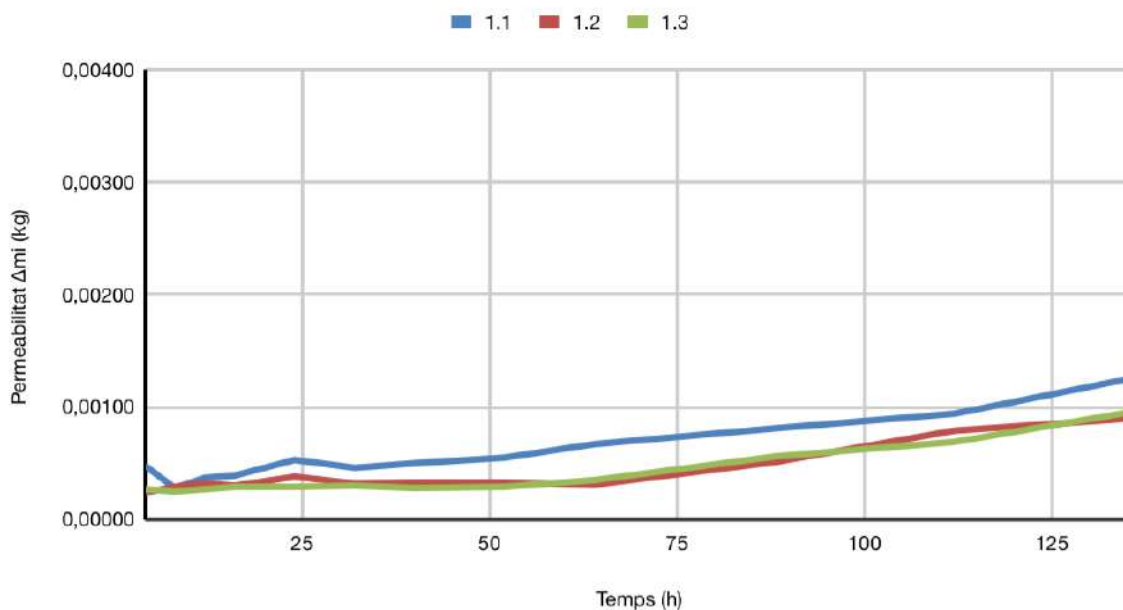
- Mesuraments realitzats abans d'aplicar el producte hidrofugant.

Data de realització de l'assaig: 01/05/2025 - 06/05/2025

Condicions ambientals (mitjana): $20,5 \pm 0,1$ °C i $52,5 \pm 0,1\%$ HR. En aquestes condicions, aquesta solució genera una humitat relativa del 91,4% en l'interior de la cubeta (Greenspan, 1977).

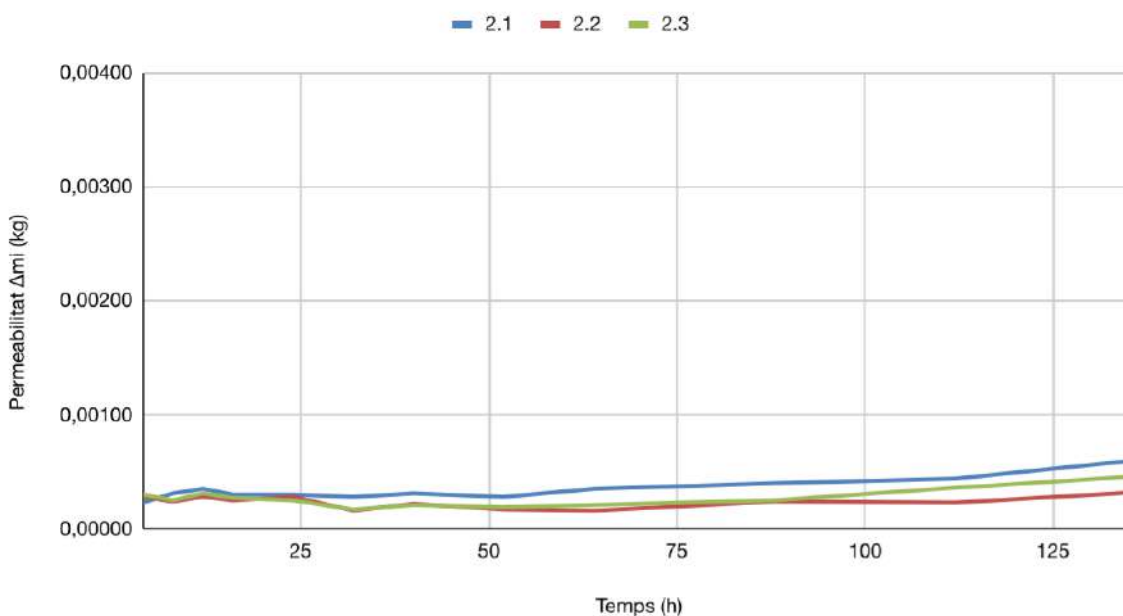
Coefficient de correlació de cada línia de regressió és de 0,56 de mitjana. Suposant una disminució del pes lineal i constant a mesura que el vapor d'aigua travessa la mostra.

Permeabilitat vapor d'aigua $\Delta m/t$ - Grup 1



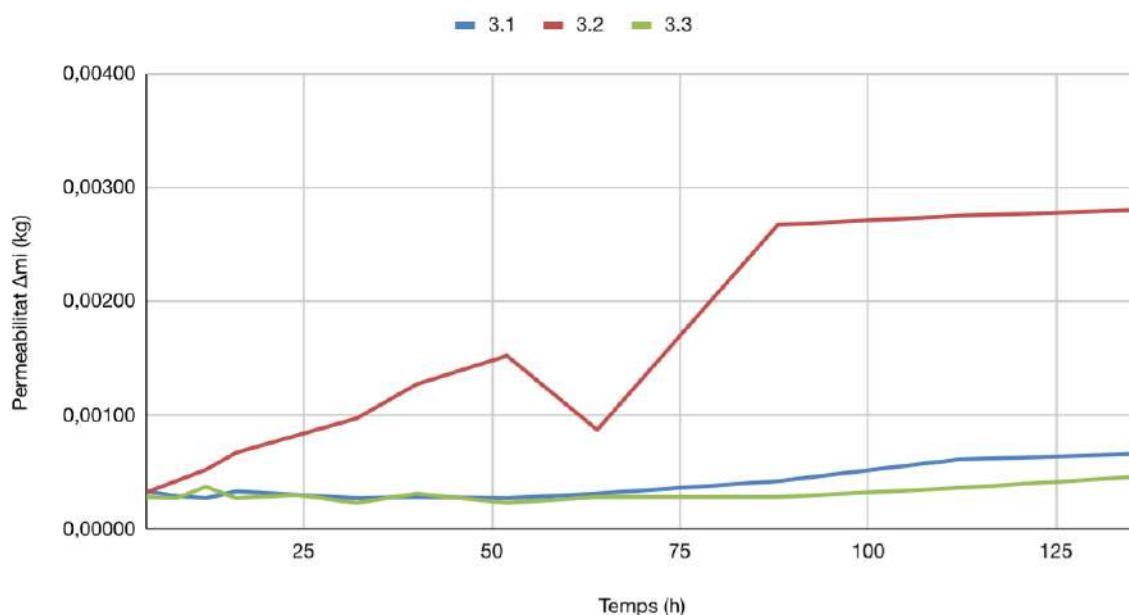
Gràfic 7. Relació entre la diferència de pes en kg de les mostres del grup 1 en un marc de temps determinat. Mesures obtingudes abans del tractament hidrofugant.

Permeabilitat vapor d'aigua $\Delta m/t$ - Grup 2



Gràfic 8. Relació entre la diferència de pes en kg de les mostres del grup 2 en un marc de temps determinat. Mesures obtingudes abans del tractament hidrofugant.

Permeabilitat vapor d'aigua $\Delta m/t$ - Grup 3



Gràfic 9. Relació entre la diferència de pes en kg de les mostres del grup 3 en un marc de temps determinat. Mesures obtingudes abans del tractament hidrofugant.

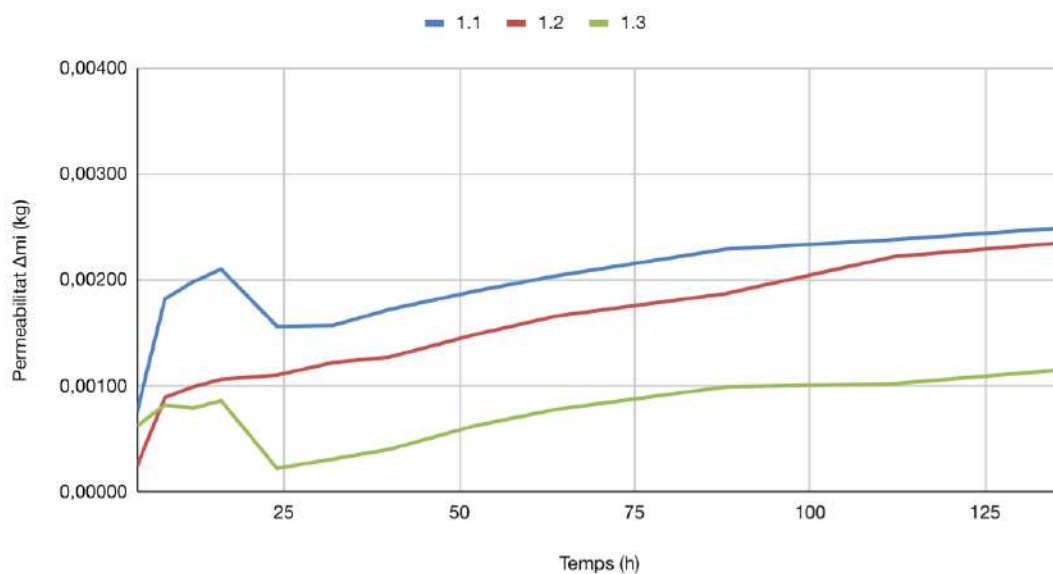
- Mesuraments realitzats després d'aplicar el producte hidrofugant.

Data de realització de l'assaig: 16/05/2025 - 21/05/2025

Condicions ambientals (mitjana): $22,8 \pm 0,1$ °C i $56,9 \pm 0,1\%$ HR. En aquestes condicions, aquesta solució genera una humitat relativa del 92,7% en l'interior de la cubeta (Greenspan, 1977).

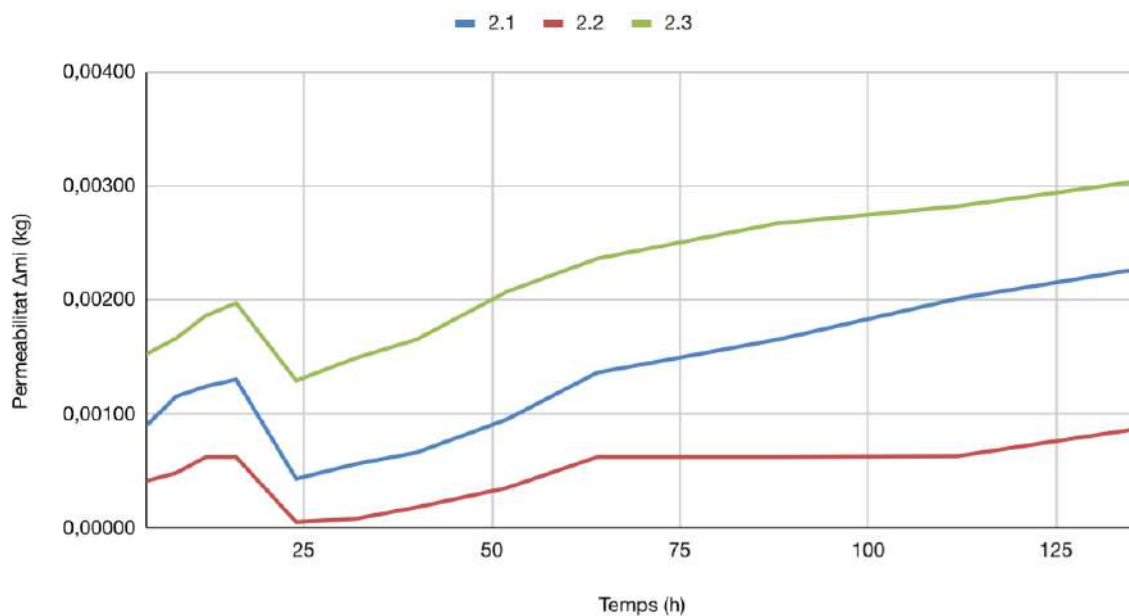
Coefficient de correlació de cada línia de regressió és de 0,42 de mitja. Suposant una disminució del pes lineal i constant a mesura que el vapor d'aigua travessa la mostra.

Permeabilitat vapor d'aigua $|\Delta m|/t$ - Grup 1



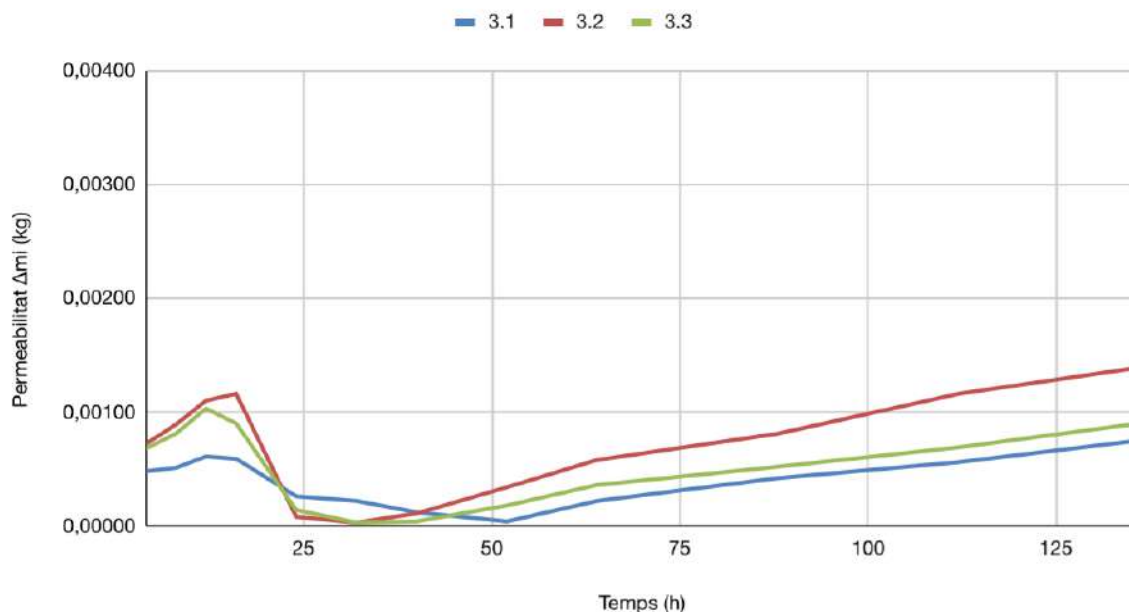
Gràfic 10. Relació entre la diferència de pes en kg de les mostres del grup 1 en un marc de temps determinat. Mesures obtingudes després del tractament hidrofugant.

Permeabilitat vapor d'aigua $|\Delta m|/t$ - Grup 2



Gràfic 11. Relació entre la diferència de pes en kg de les mostres del grup 2 en un marc de temps determinat. Mesures obtingudes després del tractament hidrofugant.

Permeabilitat vapor d'aigua $\Delta m/t$ - Grup 3



Gràfic 12. Relació entre la diferència de pes en kg de les mostres del grup 3 en un marc de temps determinat. Mesures obtingudes després del tractament hidrofugant.

Errors detectats durant l'assaig que suposen la invalidació dels resultats:



Fig. 12 Fuites de vapor d'aigua (solució salina) que deixa rastres de sals cristalitzades sobre el material que feia la funció d'aïllant.

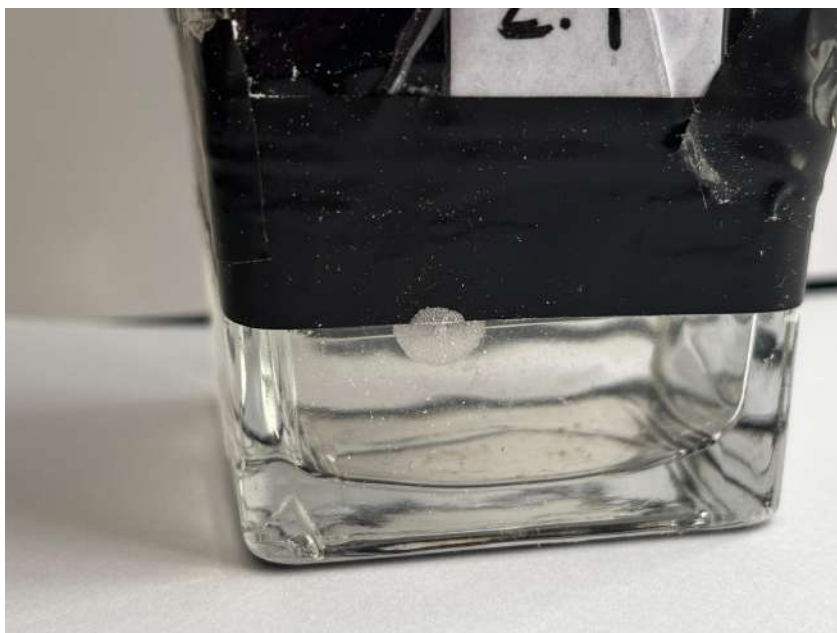


Fig. 13 *Fuites de vapor d'aigua (solució salina) que deixa rastres de sals cristalitzades sobre la cubeta de vidre.*



Annex 8

Dades ambientals recaptades durant el primer assaig Tassa de transpirabilitat

DATA LOG

File Created At: 2025/05/08 13:07:45

Device Information

Device Code : RC-51H
Serial Number : EL2404005412
Probe Type : Temperature & Humidity(internal)
Firmware Version : V2.3

Trip Information

Trip Id : 0000001
Description : Temperature recording.

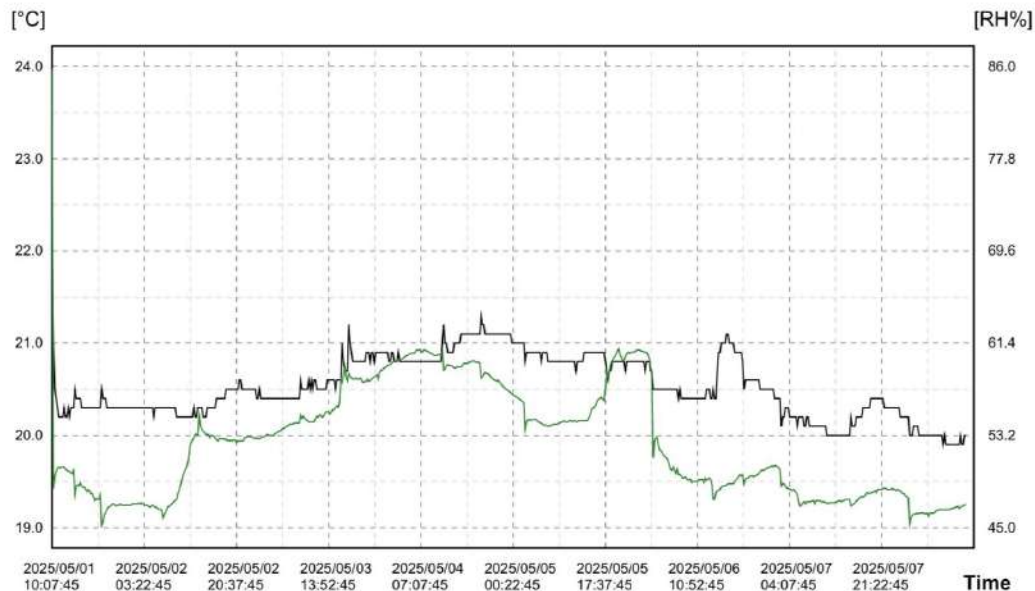
Configuration Information

Start Mode : Manual
Start Delay : 0s
Time Base : UTC +00:00
Log Interval : 15m
Ring Buffer: Disable
Stop Mode : Manual + Software

Alarm Zone	Allow Time	Alarm Type	Total Time	Violations	Status
No Alarm Set.					

Logging Summary

Highest : 22.1 °C / 85.8 %
Lowest : 19.9 °C / 45.2 %
Average : 20.5 °C / 52.5 %
MKT : 20.5 °C
Alarm At(Te): N/A
Start Time : 2025/05/01 10:07:45
Stop Time : 2025/05/08 13:07:45(manual)
Elapsed Time : 7d 3h
Data Points : 685
Alarm At(Hu): N/A





2025/05/01	22.1 °C	85.8 %	11:07:45	20.2 °C	50.2 %	12:07:45	20.5 °C	55.0 %	13:07:45	20.9 °C	59.3 %	14:07:45	20.9 °C	54.5 %	15:07:45	20.9 °C	48.4 %
10:22:45	21.0 °C	48.5 %	11:22:45	20.2 °C	50.5 %	12:22:45	20.5 °C	55.0 %	13:22:45	21.0 °C	59.2 %	14:22:45	20.9 °C	54.6 %	15:22:45	21.0 °C	48.6 %
10:37:45	20.5 °C	49.6 %	11:37:45	20.2 °C	51.0 %	12:37:45	20.5 °C	54.8 %	13:37:45	21.0 °C	59.2 %	14:37:45	20.9 °C	54.9 %	15:37:45	21.0 °C	48.7 %
10:52:45	20.4 °C	50.0 %	11:52:45	20.2 °C	52.2 %	12:52:45	20.5 °C	54.9 %	13:52:45	21.0 °C	59.3 %	14:52:45	20.9 °C	55.2 %	15:52:45	21.0 °C	48.7 %
11:07:45	20.3 °C	50.3 %	12:07:45	20.2 °C	52.5 %	13:07:45	20.5 °C	55.1 %	14:07:45	21.0 °C	59.3 %	15:07:45	20.9 °C	55.6 %	16:07:45	21.0 °C	48.7 %
11:22:45	20.2 °C	50.4 %	12:22:45	20.2 °C	52.8 %	13:22:45	20.5 °C	55.3 %	14:22:45	21.0 °C	59.3 %	15:22:45	20.9 °C	55.6 %	16:22:45	21.1 °C	48.8 %
11:37:45	20.2 °C	50.3 %	12:37:45	20.3 °C	53.0 %	13:37:45	20.6 °C	55.3 %	14:37:45	21.1 °C	59.3 %	15:37:45	20.9 °C	55.8 %	16:37:45	21.1 °C	48.9 %
11:52:45	20.2 °C	50.4 %	12:52:45	20.2 °C	53.3 %	13:52:45	20.6 °C	55.3 %	14:52:45	21.1 °C	59.4 %	15:52:45	20.9 °C	55.9 %	16:52:45	21.0 °C	48.9 %
12:07:45	20.2 °C	50.4 %	13:07:45	20.2 °C	53.3 %	14:07:45	20.6 °C	55.1 %	15:07:45	21.1 °C	59.6 %	16:07:45	20.9 °C	56.3 %	17:07:45	21.0 °C	48.9 %
12:22:45	20.3 °C	50.4 %	13:22:45	20.3 °C	53.2 %	14:22:45	20.6 °C	55.3 %	15:22:45	21.1 °C	59.6 %	16:22:45	20.9 °C	56.4 %	17:22:45	21.0 °C	48.9 %
12:37:45	20.2 °C	50.2 %	13:37:45	20.3 °C	54.9 %	14:37:45	20.6 °C	55.5 %	15:37:45	21.1 °C	59.6 %	16:37:45	20.9 °C	56.5 %	17:37:45	21.0 °C	48.9 %
12:52:45	20.2 °C	50.1 %	13:52:45	20.3 °C	54.0 %	14:52:45	20.6 °C	55.5 %	15:52:45	21.1 °C	59.6 %	16:52:45	20.9 °C	56.6 %	17:52:45	20.9 °C	49.1 %
13:07:45	20.3 °C	50.0 %	14:07:45	20.3 °C	53.7 %	15:07:45	20.5 °C	55.7 %	16:07:45	21.1 °C	59.7 %	17:07:45	20.9 °C	56.4 %	18:07:45	20.9 °C	49.2 %
13:22:45	20.2 °C	50.0 %	14:22:45	20.2 °C	53.6 %	15:22:45	20.6 °C	55.8 %	16:22:45	21.1 °C	59.7 %	17:22:45	20.9 °C	56.3 %	18:22:45	20.9 °C	49.4 %
13:37:45	20.3 °C	49.9 %	14:37:45	20.2 °C	53.5 %	15:37:45	20.6 °C	55.7 %	16:37:45	21.1 °C	59.8 %	17:37:45	20.8 °C	57.4 %	18:37:45	20.9 °C	49.5 %
13:52:45	20.3 °C	49.8 %	14:52:45	20.2 °C	53.3 %	15:52:45	20.6 °C	56.1 %	16:52:45	21.1 °C	59.8 %	17:52:45	20.7 °C	58.9 %	18:52:45	20.9 °C	49.7 %
14:07:45	20.3 °C	50.1 %	15:07:45	20.3 °C	53.2 %	16:07:45	20.6 °C	58.2 %	17:07:45	21.1 °C	59.8 %	18:07:45	20.6 °C	58.4 %	19:07:45	20.9 °C	49.8 %
14:22:45	20.5 °C	47.9 %	15:22:45	20.3 °C	53.3 %	16:22:45	21.0 °C	57.9 %	17:22:45	21.1 °C	59.7 %	18:22:45	20.7 °C	58.8 %	19:22:45	20.8 °C	49.7 %
14:37:45	20.4 °C	48.7 %	15:37:45	20.3 °C	53.0 %	16:37:45	20.8 °C	58.5 %	17:37:45	21.1 °C	59.7 %	18:37:45	20.7 °C	59.5 %	19:37:45	20.5 °C	49.9 %
14:52:45	20.4 °C	48.8 %	15:52:45	20.3 °C	53.2 %	16:52:45	20.7 °C	59.3 %	17:52:45	21.1 °C	59.7 %	18:52:45	20.8 °C	59.8 %	19:52:45	20.6 °C	49.3 %
15:07:45	20.4 °C	48.7 %	16:07:45	20.3 °C	53.2 %	17:07:45	20.7 °C	58.3 %	18:07:45	21.1 °C	59.6 %	19:07:45	20.8 °C	60.1 %	20:07:45	20.8 °C	49.4 %
15:22:45	20.4 °C	49.0 %	16:22:45	20.3 °C	53.1 %	17:22:45	20.7 °C	58.0 %	18:22:45	21.3 °C	58.3 %	19:22:45	20.8 °C	60.2 %	20:22:45	20.6 °C	49.4 %
15:37:45	20.3 °C	48.7 %	16:37:45	20.3 °C	53.0 %	17:37:45	21.2 °C	58.7 %	18:37:45	21.2 °C	58.4 %	19:37:45	20.8 °C	60.4 %	20:37:45	20.8 °C	49.5 %
15:52:45	20.3 °C	48.6 %	16:52:45	20.4 °C	52.8 %	17:52:45	21.0 °C	58.5 %	18:52:45	21.2 °C	58.6 %	19:52:45	20.8 °C	60.7 %	20:52:45	20.8 °C	49.6 %
16:07:45	20.3 °C	48.6 %	17:07:45	20.4 °C	52.7 %	18:07:45	20.9 °C	58.3 %	19:07:45	21.1 °C	58.8 %	20:07:45	20.8 °C	60.9 %	21:07:45	20.8 °C	49.6 %
16:22:45	20.3 °C	48.4 %	17:22:45	20.4 °C	52.9 %	18:22:45	20.8 °C	58.2 %	19:22:45	21.1 °C	58.7 %	20:22:45	20.8 °C	60.3 %	21:22:45	20.8 °C	49.5 %
16:37:45	20.3 °C	48.2 %	17:37:45	20.4 °C	52.9 %	18:37:45	20.8 °C	58.2 %	19:37:45	21.1 °C	58.7 %	20:37:45	20.8 °C	60.2 %	21:37:45	20.6 °C	49.6 %
16:52:45	20.3 °C	48.4 %	17:52:45	20.4 °C	52.9 %	18:52:45	20.8 °C	58.3 %	19:52:45	21.1 °C	58.6 %	20:52:45	20.8 °C	59.8 %	21:52:45	20.6 °C	49.6 %
17:07:45	20.3 °C	48.3 %	18:07:45	20.4 °C	52.9 %	19:07:45	20.8 °C	58.2 %	20:07:45	21.1 °C	58.4 %	21:07:45	20.8 °C	59.9 %	22:07:45	20.6 °C	49.7 %
17:22:45	20.3 °C	48.0 %	18:22:45	20.4 °C	52.8 %	19:22:45	20.8 °C	58.2 %	20:22:45	21.1 °C	58.3 %	21:22:45	20.7 °C	60.2 %	22:22:45	20.6 °C	49.8 %
17:37:45	20.3 °C	48.0 %	18:37:45	20.5 °C	52.9 %	19:37:45	20.8 °C	58.2 %	20:37:45	21.1 °C	58.2 %	21:37:45	20.8 °C	60.5 %	22:37:45	20.5 °C	50.0 %
17:52:45	20.3 °C	47.7 %	18:52:45	20.5 °C	52.7 %	19:52:45	20.8 °C	58.3 %	20:52:45	21.1 °C	58.1 %	21:52:45	20.8 °C	60.6 %	22:52:45	20.5 °C	50.1 %
18:07:45	20.3 °C	47.4 %	19:07:45	20.5 °C	52.8 %	20:07:45	20.8 °C	58.0 %	21:07:45	21.1 °C	58.1 %	22:07:45	20.8 °C	60.5 %	23:07:45	20.5 °C	50.1 %
18:22:45	20.3 °C	47.6 %	19:22:45	20.5 °C	52.7 %	20:22:45	20.8 °C	57.9 %	21:22:45	21.1 °C	58.0 %	22:22:45	20.8 °C	60.6 %	23:22:45	20.5 °C	50.1 %
18:37:45	20.3 °C	47.5 %	19:37:45	20.5 °C	52.8 %	20:37:45	20.8 °C	58.0 %	21:37:45	21.1 °C	58.1 %	22:37:45	20.8 °C	60.6 %	23:37:45	20.5 °C	50.2 %
18:52:45	20.3 °C	47.5 %	19:52:45	20.5 °C	52.7 %	20:52:45	20.9 °C	58.0 %	21:52:45	21.1 °C	57.9 %	22:52:45	20.8 °C	60.6 %	23:52:45	20.5 °C	50.3 %
19:07:45	20.3 °C	47.9 %	20:07:45	20.5 °C	52.8 %	21:07:45	20.9 °C	58.2 %	22:07:45	21.1 °C	57.8 %	23:07:45	20.8 °C	60.6 %	2025/05/07	20.5 °C	50.3 %
19:22:45	20.5 °C	45.2 %	20:22:45	20.5 °C	52.8 %	21:22:45	20.9 °C	58.0 %	22:22:45	21.1 °C	57.6 %	23:22:45	20.8 °C	60.7 %	00:22:45	20.5 °C	50.4 %
19:37:45	20.4 °C	45.5 %	20:37:45	20.5 °C	52.6 %	21:37:45	20.8 °C	58.1 %	22:37:45	21.1 °C	57.5 %	23:37:45	20.8 °C	60.8 %	00:37:45	20.5 °C	50.4 %
19:52:45	20.4 °C	46.2 %	20:52:45	20.5 °C	52.7 %	21:52:45	20.9 °C	58.2 %	22:52:45	21.1 °C	57.4 %	23:52:45	20.8 °C	60.8 %	00:52:45	20.5 °C	50.5 %
20:07:45	20.4 °C	46.3 %	21:07:45	20.6 °C	52.7 %	22:07:45	20.9 °C	58.3 %	23:07:45	21.1 °C	57.3 %	2025/05/06	20.8 °C	60.8 %	01:07:45	20.5 °C	50.4 %
20:22:45	20.3 °C	46.6 %	21:22:45	20.6 °C	52.7 %	22:22:45	20.8 °C	58.4 %	23:22:45	21.1 °C	57.2 %	00:22:45	20.8 °C	60.7 %	01:22:45	20.4 °C	50.5 %
20:37:45	20.3 °C	46.8 %	21:37:45	20.5 °C	52.7 %	22:37:45	20.9 °C	58.5 %	23:37:45	21.1 °C	57.1 %	00:37:45	20.8 °C	60.7 %	01:37:45	20.4 °C	50.5 %
20:52:45	20.3 °C	46.9 %	21:52:45	20.5 °C	52.7 %	22:52:45	20.9 °C	58.6 %	23:52:45	21.1 °C	57.0 %	00:52:45	20.8 °C	60.6 %	01:52:45	20.4 °C	50.4 %
21:07:45	20.3 °C	46.9 %	22:07:45	20.5 °C	53.0 %	23:07:45	20.9 °C	58.2 %	2025/05/05	21.0 °C	56.9 %	01:07:45	20.7 °C	60.6 %	02:07:45	20.4 °C	50.3 %
21:22:45	20.3 °C	47.1 %	22:22:45	20.5 °C	53.1 %	23:22:45	20.9 °C	58.8 %	00:22:45	21.0 °C	56.8 %	01:22:45	20.8 °C	60.6 %	02:22:45	20.4 °C	50.2 %
21:37:45	20.3 °C	47.1 %	22:37:45	20.5 °C	53.1 %	23:37:45	20.9 °C	59.0 %	00:37:45	21.0 °C	56.7 %	01:37:45	20.8 °C	60.4 %	02:37:45	20.1 °C	48.7 %
21:52:45	20.3 °C	47.0 %	22:52:45	20.5 °C	53.1 %	23:52:45	20.9 °C	59.0 %	00:52:45	21.0 °C	56.6 %	01:52:45	20.8 °C	60.1 %	02:52:45	20.2 °C	48.9 %
22:07:45	20.3 °C	46.9 %	23:07:45	20.5 °C	53.1 %	2025/05/04	20.9 °C	59.2 %	01:07:45	21.0 °C	56.6 %	02:07:45	20.7 °C	59.3 %	03:07:45	20.2 °C	48.9 %
22:22:45	20.3 °C	47.0 %	23:22:45	20.5 °C	53.1 %	00:22:45	20.9 °C	59.2 %	01:22:45	21.0 °C	56.5 %	02:22:45	20.8 °C	59.9 %	03:22:45	20.3 °C	48.7 %
22:37:45	20.3 °C	47.0 %	23:37:45	20.5 °C	53.0 %	00:37:45	20.8 °C	59.3 %	01:37:45	21.0 °C	56.4 %	02:37:45	20.5 °C	51.2 %	03:37:45	20.3 °C	48.5 %
22:52:45	20.3 °C	47.1 %	20:52:45	20.5 °C	53.0 %	00:52:45	20.9 °C	59.4 %	01:52:45	21.0 °C	56.3 %	02:52:45	20.5 °C	52.7 %	03:52:45	20.3 °C	48.5 %
23:07:45	20.3 °C	47.0 %	2025/05/03	20.5 °C	52.9 %	01:07:45	20.8 °C	59.5 %	02:07:45	21.0 °C	56.2 %	03:07:45	20.5 °C	53.0 %	04:07:45	20.2 °C	48.4 %
23:22:45	20.3 °C	47.0 %	00:22:45	20.4 °C	53.0 %	01:22:45	20.8 °C	59.5 %	02:22:45	21.0 °C	56.1 %	03:22:45	20.5 °C	53.0 %	04:22:45	20.2 °C	48.4 %
23:37:45	20.3 °C	47.0 %	00:37:45	20.4 °C	52.9 %	01:37:45	20.9 °C	59.6 %	02:37:45	20.8 °C	53.7 %	03:37:45	20.5 °C	53.3 %	04:37:45	20.2 °C	48.3 %
23:52:45	20.3 °C	47.0 %	00:52:45	20.5 °C	52.9 %	01:52:45	20.9 °C	59.7 %	02:52:45	20.9 °C	54.4 %	03:52:45	20.5 °C	51.9 %	04:52:45	20.2 °C	48.4 %
2025/05/02	20.3 °C	47.0 %	01:07:45	20.4 °C	53.0 %	02:07:45	20.8 °C	59.8 %	03:07:45	20.9 °C	54.6 %	04:07:45	20.8 °C	51.8 %	05:07:45	20.2 °C	48.4 %
00:22:45	20.3 °C	47.0 %	01:22:45	20.4 °C	53.0 %	02:22:45	20.8 °C	59.8 %	03:22:45	20.9 °C	54.6 %	04:22:45	20.5 °C	51.6 %	05:22:45	20.2 °C	48.1 %
00:37:45	20.3 °C	47.0 %	01:37:45	20.4 °C	53.												



Annex 9

Dades ambientals recaptades durant el segon assaig Tassa de transpirabilitat

DATA LOG

File Created At: 2025/05/30 11:26:08

Device Information

Device Code : RC-51H
Serial Number : EL2404005412
Probe Type : Temperature & Humidity(internal)
Firmware Version : V2.3

Trip Information

Trip Id : 0000001
Description : Temperature recording.

Configuration Information

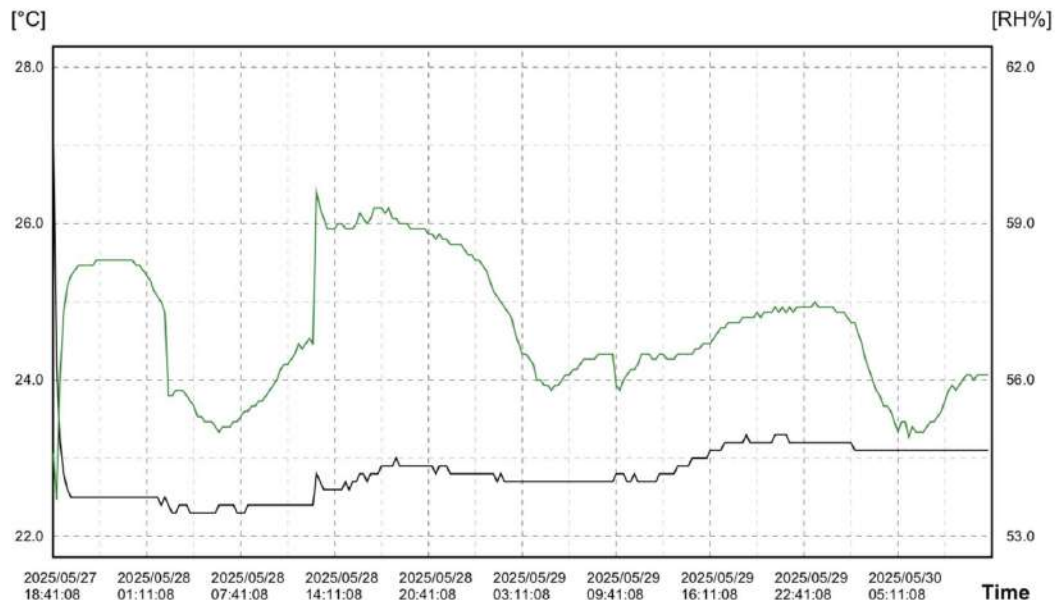
Start Mode : Manual
Start Delay : 0s
Time Base : UTC +00:00
Log Interval : 15m
Ring Buffer: Disable
Stop Mode : Manual + Software

Alarm Zone	Allow Time	Alarm Type	Total Time	Violations	Status
------------	------------	------------	------------	------------	--------

No Alarm Set.

Logging Summary

Highest :	27.3 °C / 59.6 %	Start Time :	2025/05/27 18:41:08
Lowest :	22.3 °C / 53.7 %	Stop Time :	2025/05/30 11:26:08(manual)
Average :	22.8 °C / 56.9 %	Elapsed Time :	2d 16h 45m
MKT :	22.8 °C	Data Points :	260
Alarm At(Te):	N/A	Alarm At(Hu):	N/A





From 2025/05/27 18:41:08 To 2025/05/30 11:26:08

File Created At: 2025/05/30 11:26:08

2025/05/27 27.3 °C 54.6 %	19:41:08 22.9 °C 58.9 %	20:41:08 23.3 °C 57.4 %			
18:56:08 24.2 °C 53.7 %	19:56:08 22.9 °C 58.9 %	20:56:08 23.3 °C 57.3 %			
19:11:08 23.2 °C 56.1 %	20:11:08 22.9 °C 58.9 %	21:11:08 23.3 °C 57.4 %			
19:26:08 22.8 °C 57.3 %	20:26:08 22.9 °C 58.9 %	21:26:08 23.3 °C 57.3 %			
19:41:08 22.6 °C 57.8 %	20:41:08 22.9 °C 58.8 %	21:41:08 23.2 °C 57.4 %			
19:56:08 22.5 °C 58.0 %	20:56:08 22.9 °C 58.8 %	21:56:08 23.2 °C 57.3 %			
20:11:08 22.5 °C 58.1 %	21:11:08 22.8 °C 58.7 %	22:11:08 23.2 °C 57.4 %			
20:26:08 22.5 °C 58.2 %	21:26:08 22.9 °C 58.8 %	22:26:08 23.2 °C 57.4 %			
20:41:08 22.5 °C 58.2 %	21:41:08 22.9 °C 58.7 %	22:41:08 23.2 °C 57.4 %			
20:56:08 22.5 °C 58.2 %	21:56:08 22.9 °C 58.7 %	22:56:08 23.2 °C 57.4 %			
21:11:08 22.5 °C 58.2 %	22:11:08 22.8 °C 58.6 %	23:11:08 23.2 °C 57.4 %			
21:26:08 22.5 °C 58.2 %	22:26:08 22.8 °C 58.6 %	23:26:08 23.2 °C 57.5 %			
21:41:08 22.5 °C 58.3 %	22:41:08 22.8 °C 58.6 %	23:41:08 23.2 °C 57.4 %			
21:56:08 22.5 °C 58.3 %	22:56:08 22.8 °C 58.6 %	23:56:08 23.2 °C 57.4 %			
22:11:08 22.5 °C 58.3 %	23:11:08 22.8 °C 58.5 %	2025/05/30 23.2 °C 57.4 %			
22:26:08 22.5 °C 58.3 %	23:26:08 22.8 °C 58.4 %	00:26:08 23.2 °C 57.4 %			
22:41:08 22.5 °C 58.3 %	23:41:08 22.8 °C 58.4 %	00:41:08 23.2 °C 57.4 %			
22:56:08 22.5 °C 58.3 %	23:56:08 22.8 °C 58.3 %	00:56:08 23.2 °C 57.3 %			
23:11:08 22.5 °C 58.3 %	2025/05/29 22.8 °C 58.3 %	01:11:08 23.2 °C 57.3 %			
23:26:08 22.5 °C 58.3 %	00:26:08 22.8 °C 58.2 %	01:26:08 23.2 °C 57.3 %			
23:41:08 22.5 °C 58.3 %	00:41:08 22.8 °C 58.1 %	01:41:08 23.2 °C 57.2 %			
23:56:08 22.5 °C 58.3 %	00:56:08 22.8 °C 57.9 %	01:56:08 23.2 °C 57.1 %			
2025/05/28 22.5 °C 58.3 %	01:11:08 22.8 °C 57.7 %	02:11:08 23.1 °C 57.1 %			
00:26:08 22.5 °C 58.2 %	01:26:08 22.7 °C 57.6 %	02:26:08 23.1 °C 56.9 %			
00:41:08 22.5 °C 58.2 %	01:41:08 22.8 °C 57.5 %	02:41:08 23.1 °C 56.7 %			
00:56:08 22.5 °C 58.1 %	01:56:08 22.7 °C 57.4 %	02:56:08 23.1 °C 56.4 %			
01:11:08 22.5 °C 58.0 %	02:11:08 22.7 °C 57.3 %	03:11:08 23.1 °C 56.2 %			
01:26:08 22.5 °C 57.9 %	02:26:08 22.7 °C 57.2 %	03:26:08 23.1 °C 56.0 %			
01:41:08 22.5 °C 57.7 %	02:41:08 22.7 °C 56.9 %	03:41:08 23.1 °C 55.8 %			
01:56:08 22.5 °C 57.6 %	02:56:08 22.7 °C 56.7 %	03:56:08 23.1 °C 55.7 %			
02:11:08 22.4 °C 57.5 %	03:11:08 22.7 °C 56.5 %	04:11:08 23.1 °C 55.5 %			
02:26:08 22.5 °C 57.3 %	03:26:08 22.7 °C 56.5 %	04:26:08 23.1 °C 55.5 %			
02:41:08 22.4 °C 55.7 %	03:41:08 22.7 °C 56.4 %	04:41:08 23.1 °C 55.4 %			
02:56:08 22.3 °C 55.7 %	03:56:08 22.7 °C 56.3 %	04:56:08 23.1 °C 55.2 %			
03:11:08 22.3 °C 55.8 %	04:11:08 22.7 °C 56.0 %	05:11:08 23.1 °C 55.0 %			
03:26:08 22.4 °C 55.8 %	04:26:08 22.7 °C 56.0 %	05:26:08 23.1 °C 55.2 %			
03:41:08 22.4 °C 55.8 %	04:41:08 22.7 °C 55.9 %	05:41:08 23.1 °C 55.2 %			
03:56:08 22.4 °C 55.7 %	04:56:08 22.7 °C 55.9 %	05:56:08 23.1 °C 54.9 %			
04:11:08 22.3 °C 55.6 %	05:11:08 22.7 °C 55.8 %	06:11:08 23.1 °C 55.1 %			
04:26:08 22.3 °C 55.5 %	05:26:08 22.7 °C 55.9 %	06:26:08 23.1 °C 55.0 %			
04:41:08 22.3 °C 55.3 %	05:41:08 22.7 °C 55.9 %	06:41:08 23.1 °C 55.0 %			
04:56:08 22.3 °C 55.3 %	05:56:08 22.7 °C 56.0 %	06:56:08 23.1 °C 55.0 %			
05:11:08 22.3 °C 55.2 %	06:11:08 22.7 °C 56.1 %	07:11:08 23.1 °C 55.1 %			
05:26:08 22.3 °C 55.2 %	06:26:08 22.7 °C 56.1 %	07:26:08 23.1 °C 55.2 %			
05:41:08 22.3 °C 55.2 %	06:41:08 22.7 °C 56.2 %	07:41:08 23.1 °C 55.2 %			
05:56:08 22.3 °C 55.1 %	06:56:08 22.7 °C 56.2 %	07:56:08 23.1 °C 55.3 %			
06:11:08 22.4 °C 55.0 %	07:11:08 22.7 °C 56.3 %	08:11:08 23.1 °C 55.4 %			
06:26:08 22.4 °C 55.1 %	07:26:08 22.7 °C 56.4 %	08:26:08 23.1 °C 55.6 %			
06:41:08 22.4 °C 55.1 %	07:41:08 22.7 °C 56.4 %	08:41:08 23.1 °C 55.8 %			
06:56:08 22.4 °C 55.1 %	07:56:08 22.7 °C 56.4 %	08:56:08 23.1 °C 55.9 %			
07:11:08 22.4 °C 55.2 %	08:11:08 22.7 °C 56.4 %	09:11:08 23.1 °C 55.8 %			
07:26:08 22.3 °C 55.2 %	08:26:08 22.7 °C 56.5 %	09:26:08 23.1 °C 55.9 %			
07:41:08 22.3 °C 55.3 %	08:41:08 22.7 °C 56.5 %	09:41:08 23.1 °C 56.0 %			
07:56:08 22.3 °C 55.4 %	08:56:08 22.7 °C 56.5 %	09:56:08 23.1 °C 56.1 %			
08:11:08 22.4 °C 55.4 %	09:11:08 22.7 °C 56.5 %	10:11:08 23.1 °C 56.1 %			
08:26:08 22.4 °C 55.5 %	09:26:08 22.7 °C 56.5 %	10:26:08 23.1 °C 56.0 %			
08:41:08 22.4 °C 55.5 %	09:41:08 22.8 °C 55.9 %	10:41:08 23.1 °C 56.1 %			
08:56:08 22.4 °C 55.6 %	09:56:08 22.8 °C 55.8 %	10:56:08 23.1 °C 56.1 %			
09:11:08 22.4 °C 55.6 %	10:11:08 22.8 °C 56.0 %	11:11:08 23.1 °C 56.1 %			
09:26:08 22.4 °C 55.7 %	10:26:08 22.7 °C 56.1 %	11:26:08 23.1 °C 56.1 %			
09:41:08 22.4 °C 55.8 %	10:41:08 22.7 °C 56.2 %				
09:56:08 22.4 °C 55.9 %	10:56:08 22.8 °C 56.2 %				
10:11:08 22.4 °C 56.0 %	11:11:08 22.7 °C 56.3 %				
10:26:08 22.4 °C 56.2 %	11:26:08 22.7 °C 56.5 %				
10:41:08 22.4 °C 56.3 %	11:41:08 22.7 °C 56.5 %				
10:56:08 22.4 °C 56.3 %	11:56:08 22.7 °C 56.5 %				
11:11:08 22.4 °C 56.4 %	12:11:08 22.7 °C 56.4 %				
11:26:08 22.4 °C 56.5 %	12:26:08 22.7 °C 56.4 %				
11:41:08 22.4 °C 56.7 %	12:41:08 22.8 °C 56.5 %				
11:56:08 22.4 °C 56.6 %	12:56:08 22.8 °C 56.5 %				
12:11:08 22.4 °C 56.7 %	13:11:08 22.8 °C 56.4 %				
12:26:08 22.4 °C 56.8 %	13:26:08 22.8 °C 56.4 %				
12:41:08 22.4 °C 56.7 %	13:41:08 22.8 °C 56.4 %				
12:56:08 22.8 °C 59.6 %	13:56:08 22.9 °C 56.5 %				
13:11:08 22.7 °C 59.3 %	14:11:08 22.9 °C 56.5 %				
13:26:08 22.6 °C 59.1 %	14:26:08 22.9 °C 56.5 %				
13:41:08 22.6 °C 58.9 %	14:41:08 22.9 °C 56.5 %				
13:56:08 22.6 °C 58.9 %	14:56:08 23.0 °C 56.5 %				
14:11:08 22.6 °C 58.9 %	15:11:08 23.0 °C 56.6 %				
14:26:08 22.6 °C 59.0 %	15:26:08 23.0 °C 56.6 %				
14:41:08 22.6 °C 59.0 %	15:41:08 23.0 °C 56.7 %				
14:56:08 22.7 °C 58.9 %	15:56:08 23.0 °C 56.7 %				
15:11:08 22.6 °C 58.9 %	16:11:08 23.1 °C 56.7 %				
15:26:08 22.7 °C 58.9 %	16:26:08 23.1 °C 56.8 %				
15:41:08 22.7 °C 59.0 %	16:41:08 23.1 °C 56.9 %				
15:56:08 22.8 °C 59.2 %	16:56:08 23.1 °C 57.0 %				
16:11:08 22.8 °C 59.1 %	17:11:08 23.2 °C 57.0 %				
16:26:08 22.7 °C 59.0 %	17:26:08 23.2 °C 57.1 %				
16:41:08 22.8 °C 59.1 %	17:41:08 23.2 °C 57.1 %				
16:56:08 22.8 °C 59.3 %	17:56:08 23.2 °C 57.1 %				
17:11:08 22.8 °C 59.3 %	18:11:08 23.2 °C 57.1 %				
17:26:08 22.9 °C 59.3 %	18:26:08 23.2 °C 57.2 %				
17:41:08 22.9 °C 59.2 %	18:41:08 23.3 °C 57.2 %				
17:56:08 22.9 °C 59.3 %	18:56:08 23.2 °C 57.2 %				
18:11:08 22.9 °C 59.1 %	19:11:08 23.2 °C 57.2 %				
18:26:08 23.0 °C 59.1 %	19:26:08 23.2 °C 57.3 %				
18:41:08 22.9 °C 59.0 %	19:41:08 23.2 °C 57.2 %				
18:56:08 22.9 °C 59.0 %	19:56:08 23.2 °C 57.3 %				
19:11:08 22.9 °C 59.0 %	20:11:08 23.2 °C 57.3 %				
19:26:08 22.9 °C 58.9 %	20:26:08 23.2 °C 57.3 %				

Annex 10

Dessalinització

Després de l'assaig per estudiar la taxa de transpirabilitat al vapor d'aigua es va procedir amb la dessalinització de les mostres. Es van dipositar les mostres en una cubeta amb aigua desionitzada, que es va anar canviant cada 8-12 hores aproximadament. Abans de cada canvi d'aigua, se'n va deixar unes gotes en un recipient de vidre transparent per comprovar si hi restaven sals un cop l'aigua s'evaporava.

En el setè bany les restes eren tan escasses que es va optar per deixar eixugar les mostres després del vuitè bany, tot i així, van aparèixer lleugeres eflorescències i es va necessitar un novè bany per eliminar completament les sals de les mostres.

Bany	Dia	Hora	Mostra/recipient amb residus (sals) després de l'evaporació
1	1	15:00	Si
2	1	23:00	Si
3	2	7:00	Si
4	2	19:00	Si
5	4	1:00	Si
6	4	19:00	Si
7	5	15:00	Si, escassos residus de sals en el recipient de vidre.
8	6	15:00	Eflorescències salines en les cantonades d'algunes mostres després de l'evaporació de l'aigua
9	7	23:00	No

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