



UNIVERSITAT DE  
BARCELONA

# **Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics**

**Treball Final de Màster**

**Autora: Maria Isabel Garcia Vilà**

**NIUB: 18102195**

**Tutora: Cristina Ruiz Recasens**

**Curs: 2021-2022**

**Màster en Direcció de Projectes de Conservació-Restauració  
Facultat de Belles Arts**





UNIVERSITAT DE  
BARCELONA

Copyright © Maria Isabel Garcia Vilà, 2021

© Universitat de Barcelona.  
Tots els drets reservats.

Copyright © d'aquesta publicació:

Maria Isabel Garcia Vilà  
Universitat de Barcelona

Sense perjudici de les exempcions legals existents, queda prohibida la reproducció, distribució, comunicació pública o transformació d'aquest a obra sense l'autorització del titular dels drets, i qualsevol altre acte que en contravingui els drets de propietat intel·lectual i industrial.

Per a qualsevol ús que se'n vulgui fer no previst a la llei, dirigiu-vos a:  
[isabelgv5@hotmail.com](mailto:isabelgv5@hotmail.com)

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022





L'alumna Maria Isabel Garcia Vilà, amb número de NIUB. 18102195, estudiant del Màster Oficial en Direcció de Projectes de Conservació-Restauració desenvolupat per la Facultat de Belles Arts (Campus Sud) de la Universitat de Barcelona, presenta el seu Treball de Fi de Màster, titulat:

**“Estudi del comportament hídric i grau d’eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics.”**

El present Treball de Fi de Màster ha estat supervisat i revisat per la Dra. Cristina Ruiz Recasens. La qual acredita, a través d’aquest document, la idoneïtat del present treball d’investigació i otorga l’aprovació al seu contingut per portar a terme la defensa pública davant del tribunal.

**Perquè així consti, es firma la present a Barcelona, a 11 de juny del 2022**

**sign. Maria Isabel Garcia Vilà**

**sign. Cristina Ruiz Recasens**





## Agraïments

Aquest treball no hagués estat possible sense l'ajuda i el suport incondicional de diferents agents i institucions. En primer lloc, mostrar el nostre més sincer agraïment a Cristina Ruiz Recasens, doctora en Conservació-Restauració de Béns culturals i professora de grau i de màster Conservació-Restauració de Béns Culturals, per la seva tasca com a tutora del Treball de Final de Màster del Màster en Direcció de Projectes de Conservació-Restauració (curs 2021-2022).

Agrair també a tots els professors del Departament de Conservació-Restauració de Béns Culturals de la Facultat de Belles Arts i en especial, al coordinador de màster Manuel Ángel Iglesias Campos i a les professores de grau i de màster M<sup>a</sup>Gemma Campo Francés, Ana Nualart Torroja, Marta Oriola Folch i Margarita Maria Goretti Alcobe Dominguez, per compartir els seus coneixements amb nosaltres i guiar-nos en tot moment durant tot el procés de formació acadèmica.

Ens veiem amb deute amb la Facultat de Belles Arts de la Universitat de Barcelona pel seu compromís ètic, per contribuir en la millora de l'educació artística i fer tot el possible per facilitar la inclusió de tots els estudiants, creant noves vies per a la capacitació professional.

També voldria fer extensiu aquest agraïment al programa de *Beques i ajudes a alumnes de nivells postobligatoris universitaris* del Ministeri d'Educació i Formació Professional del Govern d'Espanya pel suport econòmic i finançament dels estudis de màster. A la meva família, les meves amistats i tots aquells que m'han recolzat i han confiat en les meves capacitats, la seva disposició i seu suport han resultat molt importants.

Finalment, dedicar aquest treball a la figura de Jordi Cuyàs i Gibert, artista, dissenyador gràfic i honorable professor de l'Escola Superior de Disseny i Art Pau Gargallo, per la seva gran contribució al món de les arts i el disseny, la seva passió resulta una gran font d'inspiració.





## Resum

Els materials constructius es troben exposats a l'acció continua de l'aigua i dels agents climàtics. Amb el pas del temps es produeixen alteracions del tipus mecànic, químic i biològic, afectant a l'estat de conservació dels materials. La presència de l'aigua de la pluja debilita els materials de façana, fins el punt que s'acaben produint danys estructurals que requeriran a la llarga d'intervencions més costoses. D'aquí sorgeix la necessitat de protegir la superfície amb un tractament protector, que té com a base la hidrofugació per impedir l'absorció de l'aigua i segellar aquelles superfícies poroses que es veuen afectades per la humitat.

Mitjançant l'aplicació d'hidrofugants, es podrà garantir una bona conservació dels materials, augmentar la resistència als agents climàtics i evitar l'aparició de noves lesions. En aquest treball, es pretén avaluar el comportament hídric i grau d'eficàcia de tres productes hidrofugants de diferent composició i naturalesa (Nano Silo W®, Aquashield Ultimate® i Tkrom®) quan són aplicats sobre revestiments de calç d'ús comú (Saint-Aistier®, Comcal® i El Tigre®).

A aquest efecte, s'han realitzat assajos experimentals en el laboratori per determinar l'angle de contacte estàtic i mesurar l'absorció de l'aigua de la superfície de les provetes de calç tractades. Els criteris i la metodologia emprada s'adapta en gran mesura a les Normes UNE-EN 15802 i UNE-EN 16302 recollides en CTN 41/SC 8 - *Conservació, restauració i rehabilitació d'edificis*.

A partir dels resultats obtinguts, s'ha pogut determinar que el producte hidrofugant que presenta major grau d'hidrorrepel·lència i una taxa d'absorció més baixa en la majoria de suports analitzats és Aquashield Ultimate®, superhidrofugant formulat a base de nano-òxids. Dels estudis realitzats podem concloure que, els protectors nanotecnològics sotmesos a assaig presenten major capacitat hidròfuga que el producte hidrofugant de naturalesa silicoorgànica analitzat. No hem d'oblidar que alguns hidrofugants poden modificar l'aspecte, densitat aparent o rugositat superficial de la superfície tractada.

**Paraules clau:** humitat meteòrica, hidrofugació, calç hidràulica, tensió superficial, absorció de l'aigua, rehabilitació i restauració d'edificis històrics.





## Abstract

The building materials are exposed to the continuous action of water and climatic agents. Over time, mechanical, chemical and biological alterations occur, affecting the state of conservation of the materials. The presence of rainwater weakens the façade materials, to the point that they end up causing structural damage that will require more costly interventions in the long run. Hence the need to protect the surface with a protective treatment, which is based on water repellent to prevent the absorption of water and seal those porous surfaces that are affected by moisture.

By applying water repellents, it will be possible to guarantee the good conservation of the materials, increase the resistance to climatic agents and prevent the appearance of new injuries. This work aims to evaluate the water behavior and degree of effectiveness of three water-repellent products of different composition and nature (Nano Silo W®, Aquashield Ultimate® and Tkrom®) when applied on commonly used lime coatings (Saint -Aistier®, Comcal® and El Tigre®).

To this end, experimental tests have been performed in the laboratory to determine the static contact angle and to measure the water absorption of the surface of the lime test tubes treated. The criteria and methodology used are largely adapted to the UNE-EN 15802 and UNE-EN 16302 Standards contained in CTN 41 / SC 8 - *Conservation, restoration and rehabilitation of buildings*.

Based on the results obtained, it has been determined that the water-repellent product with the highest degree of water repellency and a lower absorption rate in most of the media analyzed is Aquashield Ultimate®, a super-water-repellent formulated based on nano- oxides. From the studies carried out, we can conclude that the nanotechnological protectors under test have a higher water-repellent capacity than the water-repellent product of a silicoorganic nature analyzed. We must not forget that some water repellents can change the appearance, bulk density or surface roughness of the treated surface.

**Keywords:** weather humidity, water repellent, hydraulic lime, surface tension, water absorption, rehabilitation and restoration of historic buildings.





## Índex de continguts

Índex de figures .....	16
Abreviatures .....	23

### Capítol I. Introducció

<b>1.1. Presentació i delimitació del tema .....</b>	<b>25</b>
<b>1.2. Objectius de l'estudi .....</b>	<b>27</b>
1.2.1. Objectiu general .....	27
1.2.2. Objectius específics .....	27
<b>1.3. Metodologia .....</b>	<b>28</b>
1.3.1. Estat de la qüestió .....	30
1.3.2. Hipòtesis .....	31
<b>1.4. Justificació del projecte .....</b>	<b>32</b>

### Capítol II. Marc teòric

<b>2.1. Els efectes de la humitat .....</b>	<b>34</b>
2.1.1. Factors d'alteració principals .....	40
2.1.2. Alteracions causades per la humitat .....	42
<b>2.2. Tractaments de protecció i hidrofugació.....</b>	<b>44</b>
2.2.1. Requisits o exigències mínimes de la hidrofugació .....	46
<b>2.3. Diferències entre hidrofugació i impermeabilització.....</b>	<b>47</b>
2.3.1. Impermeabilitzants utilitzats com a falsos hidrofugants .....	48
<b>2.4. Classificació dels productes hidrofugants .....</b>	<b>49</b>
2.4.1. Hidrofugants organosilícis .....	50
2.4.1.1. Silicones.....	50
2.4.1.2. Siliconats .....	51
2.4.2. Hidrofugants orgànics .....	52
2.4.2.1. Resines termoplàstiques .....	52
2.4.2.2. Resines termoestables .....	53
2.4.2.3. Ceres .....	54
2.4.3. Superhidrofugants .....	54

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022



2.4.3.1. Nano òxids .....	56
<b>2.5. Tècniques d'aplicació dels productes hidrofugants .....</b>	<b>57</b>

### Capítol III. Materials i mètodes

<b>3.1. Provetes d'assaig .....</b>	<b>60</b>
3.1.1. Nombre i dimensions de les provetes d'assaig .....	67
3.1.2. Selecció dels materials i dossificacions .....	68
3.1.3. Precondicionament de les provetes d'assaig .....	71
<b>3.2. Tractaments hidrofugants .....</b>	<b>73</b>
3.2.1. Hidrofugants seleccionats .....	75
3.2.2. Procediment .....	76
<b>3.3. Determinació de l'angle de contacte estàtic .....</b>	<b>78</b>
3.3.1. Equip d'assaig .....	78
3.3.2. Procediment d'assaig .....	79
3.3.3. Informe de l'assaig .....	83
<b>3.4. Mesurament de l'absorció d'aigua pel mètode de la pipeta .....</b>	<b>84</b>
3.4.1. Equip d'assaig .....	85
3.4.2. Procediment de l'assaig .....	85
3.4.3. Informe de l'assaig .....	87

### Capítol IV. Resultats i conclusions

<b>4.1. Expressió dels resultats .....</b>	<b>89</b>
4.1.1. Angle de contacte .....	89
4.1.2. Absorció de l'aigua .....	92
4.1.3. Observacions .....	97
<b>4.2. Conclusions .....</b>	<b>98</b>
4.2.1. Valoració dels resultats obtinguts .....	100
4.2.2. Futura recerca .....	101
<b>Bibliografia .....</b>	<b>103</b>
<b>Annexos. Mesuraments .....</b>	<b>109</b>
Annex 1. Mesuraments - Angle de contacte.....	109
Annex 2. Mesuraments - Absorció de l'aigua .....	110
Annex 3. Gràfiques - Absorció de l'aigua .....	111

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022



## Índex de figures

Figures	Pàg.
<b>Figura 1</b> - Efectes de la humitat en pintures i revestiments de calç d'una façana qualsevol. © Victoria Herrero .....	34
<b>Figura 2</b> - Presència d'humitats en una façana a causa de l'acció de l'aigua de la pluja i altres factors climatològics. © Hogar Seco .....	36
<b>Figura 3</b> - L'aigua provinent del terreny ascendeix creant taques d'humitat horitzontals i afavorint l'aparició de biodeteriorament en la part baixa del mur de maçoneria. © Centre Tecnològic del Granit .....	37
<b>Figura 4</b> - Fongs i floridures en parets i sostres que han aparegut amb el temps a causa de la humitat condensada. © TSA Conservación de Patrimonio .....	37
<b>Figura 5</b> - Butllofes, despreniments i pèrdues de pintura i revestiment causades per les filtracions d'aigua. © OK Humedades .....	38
<b>Figura 6</b> - Les humitats accidentals es manifesten habitualment a través de diferents patologies constructives, en aquest cas, té lloc l'aparició d'esquerdes, fissures i taques localitzades. © Revetón .....	39
<b>Figura 7</b> - Un dels principals problemes de no respectar els temps d'assecatge és l'aparició prematura de butllofes que provoquen el despreniment i pèrdua de les pintures i els revestiments. © Sergio Sánchez .....	39
<b>Figura 8</b> - Esquerdes i fissures causades per la sobrecàrrega de forces, els moviments de l'edifici i la mala qualitat dels materials. © Joan Tarifa .....	42
<b>Figura 9</b> - ( <i>a l'esquerra</i> ) Alteracions causades per la humitat i la formació de sals en el mur. © Arquitectura sana .....	43
<b>Figura 10</b> - ( <i>a la dreta</i> ) Aparició de floridures, algues, líquens i plantes superiors en la part baixa d'un pilar de pedra. © La restauradora de la Laguna .....	43
<b>Figura 11</b> - Superfície pètria tractada amb un producte hidrofugant que repel·leix i redueix l'absorció de l'aigua. © Soprobél .....	45
<b>Figura 12</b> - Diferència entre els hidrofugants i impermeabilitzants. © Jesús Ángel Coronado. © Alfonso García-Santos .....	48
<b>Figura 13</b> - Classificació dels productes hidrofugants o hidropel·lents més emprats en l'actualitat. © Jesús Ángel Coronado. © Alfonso García-Santos. Actualització (2022): © Maria Isabel Garcia Vilà .....	49
<b>Figura 14</b> - Efectes autonetejants dels superhidrofugants. © Agustín Fernández Cañete .....	54
<b>Figura 15</b> - Estats d'humectació. (A) Efecte d'atrapament de l'aire efecte Cassie. (B) Estat de Wenzel. (C) Estat parcial de Cassie. © Junwei Su. © Majid Charmchi. © Hongwei Sun .....	55
<b>Figura 16</b> - Llistons de fusta de pi que serviran per a la fabricació dels motlles. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	60

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022



<b>Figura 17</b> - La fusta es protegeix amb cinta d'emalatge, perquè no es podrà utilitzar un desemmotllant. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	60
<b>Figura 18</b> - Es mesura la llargada per calcular que tots els espais interiors siguin iguals. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	60
<b>Figura 19</b> - S'utilitzen grapes per facilitar el desemmotllament. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	60
<b>Figures 20 i 21</b> - Motlles que serviran per a la fabricació de les provetes. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	61
<b>Figura 22</b> - Les rajoles s'hidraten durant un mínim de 24 hores. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	62
<b>Figura 23</b> - Es tamisa la sorra per distribuir la mida dels àrids en funció de la mida d'obertura de la malla. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	62
<b>Figura 24</b> - S'utilitza una balança i un vas dosificador per calcular el pes i el volum dels àrids i la calç. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	62
<b>Figura 25</b> - Es barregen els àrids i la calç amb una paleta Norte. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	62
<b>Figura 26</b> - S'aplica el morter a la rajola amb una paleta madrilenya. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	62
<b>Figura 27</b> - S'aplana i allisa la superfície amb una espàtula ample. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	62
<b>Figura 28</b> - Lliscat abans d'endurir. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	63
<b>Figura 29</b> - Procés d'assecatge de les mostres. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	63
<b>Figura 30</b> - Rajoles amb mostres. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	63
<b>Figura 31</b> - (a l'esquerra) Rajola amb mostres. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	63
<b>Figura 32</b> - (a la dreta) Textura de la mostra escollida (Mostra AA-01). © Maria Isabel Garcia Vilà .....	63
<b>Figura 33</b> - Materials emprats per a la fabricació de les provetes. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	64
<b>Figura 34</b> - Tamisat dels àrids de platja o riu. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	64
<b>Figura 35</b> - Es pesen les quantitats necessàries amb una balança de precisió. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	64
<b>Figura 36</b> - Igual que en el procediment anterior, es barregen en sec els àrids i la calç. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	64
<b>Figura 37</b> - Es barregen els àrids, el lligant i l'aigua fent servir una paleta. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	65
<b>Figures 38 i 39</b> - Per obtenir una pasta homogènia ens podem ajudar d'una vareta mescladora acoblada a un trepant. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	65
<b>Figura 40</b> - El morter ha de tenir una consistència òptima per la colada. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	65
<b>Figura 41</b> - S'omplen els motlles fins a la meitat amb la pasta preparada. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	66
<b>Figura 42</b> - S'elimina l'excés d'aigua acumulada sobre la superfície. © Maria Isabel Garcia Vilà.....	66
<b>Figura 43</b> - Provetes durant el procés de carbonatació inicial. © Maria Isabel Garcia Vilà.....	66
<b>Figura 44</b> - (A l'esquerra) Provetes el primer dia d'assecatge. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	66
<b>Figura 45</b> - (A la dreta) Provetes després de 28 dies d'assecatge. A simple vista, es poden observar els canvis de coloració experimentats durant el procés de carbonatació de les provetes. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	66

<b>Figura 46</b> - Provetes o espècimens de laboratori que serviran posteriorment per a la realització dels assajos. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	67
<b>Figura 47</b> - Dosificació de la mostra AA-01. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	68
<b>Figura 48</b> - Dosificacions emprades en les proves realitzades per seleccionar la granulometria més adequada per la preparació de les provetes o espècimens de laboratori. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	69
<b>Figura 49</b> - Amb unes alicates de punta plana i corbada s'enretiren les grapes. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	70
<b>Figura 50</b> - Es siglen les mostres per poder diferenciar-les. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	70
<b>Figura 51</b> - Es poleix en humit la superfície utilitzant un paper de vidre. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	71
<b>Figura 52</b> - Es deixa assecar a temperatura ambient fins que la superfície estigui totalment seca. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	71
<b>Figura 53</b> - Anàlisi granulomètric de sorra de riu o de platja per tamisat. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	71
<b>Figura 54</b> - Granulometria de la sorra de riu o de platja. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	71
<b>Figura 55</b> - A la fotografia es pot veure la diferència existent entre les provetes sense tractar i les provetes preacondicionades. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	72
<b>Figura 56</b> - Detall de la textura superficial de les provetes preacondicionades. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	72
<b>Figura 57</b> - Provetes o espècimens de laboratori preacondicionats. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	72
<b>Figura 58</b> - Classificació i característiques principals dels productes hidrofugants testats sobre revestiments de calç. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	73
<b>Figura 59</b> - Superhidrofugant de sílice funcionalitzada Nano Silo W®. © CTS Espanya .....	74
<b>Figura 60</b> - Superhidrofugant a base de partícules ceràmiques Aquashield Ultimate. © Comcal .....	74
<b>Figura 61</b> - Hidrofugant de la casa comercial Tkrom®. © Tkrom .....	74
<b>Figura 62</b> - Provetes abans d'aplicar el producte hidrofugant. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	76
<b>Figura 63</b> - Aplicar el producte hidrofugant sobre la superfície mitjançant una paletina de cerdes naturals. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	76
<b>Figura 64</b> - El producte s'ha d'aplicar fins que la superfície el refusi. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	76
<b>Figura 65</b> - Provetes després de l'aplicació del tractament. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	76
<b>Figura 66</b> - Taula on s'indiquen les mostres que han estat tractades amb els diferents productes hidrofugants utilitzats com a tractament de protecció superficial. © Maria Isabel Garcia Vilà.....	77
<b>Figura 67</b> - (A l'esquerra) Aplicació i avaluació de les mostres tractades amb els diferents productes hidrofugants. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	77
<b>Figura 68</b> - (A la dreta) Provetes després del procés d'assecatge. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	77
<b>Figura 69</b> - Angle de contacte estàtic en el temps t. © AENOR .....	78
<b>Figura 70</b> - Macrofotografia de gotes dipositades sobre la superfície d'una proveta. Segons la Norma, la distància entre les gotes ha de ser de més de 3 mm. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	79

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022



<b>Figura 71</b> - Assignació d'una escala a partir de la distància focal de la imatge mitjançant l'eina Adobe Photoshop. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	80
<b>Figura 72</b> - L'eina 'regla' permet mesurar la distància entre dos punts. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	81
<b>Figura 73</b> - Per calcular $\theta$ , s'introdueix $=\text{GRADOS}(2*\text{ATAN}(2*h/d))$ en una cel·la. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	82
<b>Figura 74</b> - Per calcular la mitjana, s'introdueix $=\text{PROMEDIO}(\theta_1; \theta_2; \theta_3)$ en una cel·la. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	82
<b>Figura 75</b> - (A l'esquerra) S'introdueixen 4 ml d'aigua a l'interior de la pipeta fent servir una xeringa. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	85
<b>Figura 76</b> - (A la dreta) Procediment d'assaig per determinar l'absorció de l'aigua. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	85
<b>Figura 77</b> - Per obtenir la mitjana, s'introdueix $=\text{PROMEDIO}(5 [\text{min}] +10 [\text{min}] +15 [\text{min}])$ en una cel·la. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	86
<b>Figura 78</b> - Per calcular l'absorció total, s'introdueix $=\text{SUMA}(5 [\text{min}] +10 [\text{min}] +15 [\text{min}])$ en una cel·la. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	86
<b>Figura 79</b> - Valors de l'angle de contacte en les provetes de morter de calç Saint-Astier® després de ser sotmeses a diversos tractaments. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	89
<b>Figura 80</b> - Valors de l'angle de contacte en les provetes de morter de calç Comcal® després de ser sotmeses a diversos tractaments. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	90
<b>Figura 81</b> - Valors de l'angle de contacte en les provetes de morter de calç El Tigre® després de ser sotmeses a diversos tractaments. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	90
<b>Figura 82</b> - Valors mitjans de l'angle de contacte obtinguts per cada material i tractament. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	91
<b>Figura 83</b> - Valors d'absorció de l'aigua en les provetes de morter de calç Saint-Aistier® després de ser sotmesos a diferents tractaments hidrofugants. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	92
<b>Figura 84</b> - Valors d'absorció de l'aigua en les provetes de morter de calç Comcal® després de ser sotmesos a diferents tractaments hidrofugants. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	93
<b>Figura 85</b> - Valors d'absorció de l'aigua en les provetes de morter de calç El Tigre® després de ser sotmesos a diferents tractaments hidrofugants. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	93
<b>Figura 86</b> - Valors mitjans d'absorció de l'aigua obtinguts per cada material i tractament. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	94
<b>Figura 87</b> - Corba d'absorbància de les provetes de morter de calç Saint-Aistier® tractades amb diferents productes hidrofugants. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	95
<b>Figura 88</b> - Corba d'absorbància de les provetes de morter de calç Comcal® tractades amb diferents productes hidrofugants. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	95

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022



<b>Figura 89</b> - Corba d'absorbància de les provetes de morter de calç El Tigre® tractades amb diferents productes hidrofugants. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	96
<b>Figura 90</b> - (A l'esquerra) Aspecte de la proveta després del tractament amb Aquashield Ultimate®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	97
<b>Figura 91</b> - (A la dreta) Aspecte de la mostra després del tractament amb Tkrom®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	97
<b>Figura 92</b> - Aspecte de la mostra després del tractament amb Nano Silo W®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	97
<b>Figura 93</b> - Valors d'angle de contacte i mitjanes de les provetes tractades amb diferents productes hidrofugants. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	109
<b>Figura 94</b> - Valors d'absorció de l'aigua i mitjanes de les provetes tractades amb els diferents productes hidrofugants. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	110
<b>Figura 95</b> - Corba d'absorbància de la mostra SA-01 sense tractar i tractada amb Nano Silo W®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	111
<b>Figura 96</b> - Corba d'absorbància de la mostra SA-02 sense tractar i tractada amb Nano Silo W®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	112
<b>Figura 97</b> - Corba d'absorbància de la mostra SA-03 sense tractar i tractada amb Nano Silo W®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	112
<b>Figura 98</b> - Corba d'absorbància de la mostra SA-04 sense tractar i tractada amb Aquashield Ultimate®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	113
<b>Figura 99</b> - Corba d'absorbància de la mostra SA-05 sense tractar i tractada amb Aquashield Ultimate®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	113
<b>Figura 100</b> - Corba d'absorbància de la mostra SA-06 sense tractar i tractada amb Aquashield Ultimate®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	114
<b>Figura 101</b> - Corba d'absorbància de la mostra SA-07 sense tractar i tractada amb Tkrom®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	114
<b>Figura 102</b> - Corba d'absorbància de la mostra SA-08 sense tractar i tractada amb Tkrom®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	115
<b>Figura 103</b> - Corba d'absorbància de la mostra SA-09 sense tractar i tractada amb Tkrom®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	115
<b>Figura 104</b> - Corba d'absorbància de la mostra CC-01 sense tractar i tractada amb Nano Silo W®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	116
<b>Figura 105</b> - Corba d'absorbància de la mostra CC-02 sense tractar i tractada amb Nano Silo W®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	116

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022



<b>Figura 106</b> - Corba d'absorbència de la mostra CC-03 sense tractar i tractada amb Nano Silo W®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	117
<b>Figura 107</b> - Corba d'absorbència de la mostra CC-04 sense tractar i tractada amb Aquashield Ultimate®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	117
<b>Figura 108</b> - Corba d'absorbència de la mostra CC-05 sense tractar i tractada amb Aquashield Ultimate®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	118
<b>Figura 109</b> - Corba d'absorbència de la mostra CC-06 sense tractar i tractada amb Aquashield Ultimate®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	118
<b>Figura 110</b> - Corba d'absorbència de la mostra CC-07 sense tractar i tractada amb Tkrom®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	119
<b>Figura 111</b> - Corba d'absorbència de la mostra CC-08 sense tractar i tractada amb Tkrom®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	119
<b>Figura 112</b> - Corba d'absorbència de la mostra CC-09 sense tractar i tractada amb Tkrom®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	120
<b>Figura 113</b> - Corba d'absorbència de la mostra TI-01 sense tractar i tractada amb Nano Silo W®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	120
<b>Figura 114</b> - Corba d'absorbència de la mostra TI-02 sense tractar i tractada amb Nano Silo W®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	121
<b>Figura 115</b> - Corba d'absorbència de la mostra TI-03 sense tractar i tractada amb Nano Silo W®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	121
<b>Figura 116</b> - Corba d'absorbència de la mostra TI-04 sense tractar i tractada amb Aquashield Ultimate®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	122
<b>Figura 117</b> - Corba d'absorbència de la mostra TI-05 sense tractar i tractada amb Aquashield Ultimate®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	122
<b>Figura 118</b> - Corba d'absorbència de la mostra TI-06 sense tractar i tractada amb Aquashield Ultimate®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	123
<b>Figura 119</b> - Corba d'absorbència de la mostra TI-07 sense tractar i tractada amb Tkrom®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	123
<b>Figura 120</b> - Corba d'absorbència de la mostra TI-08 sense tractar i tractada amb Tkrom®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	124
<b>Figura 121</b> - Corba d'absorbència de la mostra TI-09 sense tractar i tractada amb Tkrom®. © Maria Isabel Garcia Vilà .....	124





## Abreviatures

$h$	és l'altura de la gota dipositada sobre la superfície de contacte (en mm)
$d$	és el diàmetre de la superfície de contacte (en mm)
$\theta$	és l'angle de contacte estàtic expressat en radiants, graus o radiants
arctng	és la funció inversa a la tangent d'un angle expressada en radiants
tan/tg	és la tangent d'un angle (relació trigonomètrica)
$\tan^{-1}$	és el càlcul de la tangent expressada en radiants, graus o gradiants
$t_i$	és el temps d'un mesurament intermedi (en min)
$t_f$	és el temps d'un mesurament final (en min)
$W_i$	és la quantitat d'aigua absorbida en el temps del mesurament final (en ml/cm <sup>2</sup> )
$W_f$	és la quantitat d'aigua absorbida en el temps del mesurament final (en ml/cm <sup>2</sup> )
$Q_i$	és la quantitat d'aigua absorbida en el temps de mesurament intermedi (en ml)
$Q_f$	és la quantitat d'aigua absorbida en el temps final (en ml)
$A$	és la superfície d'assaig (en cm <sup>3</sup> )
SA	és la calç de la casa comercial Saint-Astier®
CC	és la calç de la casa comercial Comcal®
TI	és la calç de la casa comercial El Tigre®
NSW	és el producte hidrofugant Nano Silo W®
AU	és el producte hidrofugant Aquashield Ultimate®
TK	és el producte hidrofugant Tkrom®

# **Capítol I. Introducció**



## 1.1. Presentació i delimitació del tema

La humitat és un dels factors o causes d'alteració i deteriorament principals en edificis i construccions d'interès historico-artístic. A la llarga, els problemes d'humitat poden arribar a constituir un risc a nivell estructural en edificis i habitatges malalts, afectant inevitablement a la seva conservació, lectura estètica i habitabilitat. En aquest treball, s'estudien els efectes de la humitat en materials petris, els factors de degradació principals i les alteracions més habituals. La façana és una de les parts més importants de l'edifici, tenint en compte que la façana és la seva protecció principal, si no es troba en bon estat, la situació pot derivar en problemes estructurals més grans.

Amb el pas del temps és habitual que els materials constructius que es troben a la intempèrie presentin un grau de deteriorament avançat, sovint es troben exposats a aquests tipus de problemàtiques. En restauració, sorgeix la necessitat de protegir les façanes de les construccions, que acostumen a estar revestides, de l'acció continua de l'aigua. Entenent que els tractaments d'hidrofugació són una bona solució en exteriors i en interiors per resoldre els problemes derivats de la humitat meteòrica i capil·lar. La hidrofugació és un tractament incolor que habitualment s'utilitza per protegir la superfície de la pedra o base mineral i evitar l'entrada de l'aigua i la humitat a l'interior.

Els productes hidrofugants o hidròfugs que actualment es comercialitzen en el mercat són diversos, la gran majoria presenten una composició i capacitat d'hidrofugació diferent, no obstant, la seva eficàcia i fiabilitat quan són utilitzats com a tractaments de protecció també dependrà del tipus de substrat i compatibilitat dels materials. Paral·lelament, la indústria química ha realitzat grans avanços tecnològics i ha contribuït a la millora dels productes hidrofugants dins del camp de la restauració i rehabilitació integral d'edificis, construccions i monuments històrics i patrimonials, amb la introducció de noves matèries primeres basades en la ciència dels nanomaterials.

Existeixen un gran nombre de tècniques i materials per aconseguir la hidrofugació dels materials inorgànics porosos, és per això que cal avaluar la seva eficàcia mitjançant la mesura del grau d'hidrorepel·lència i absorció de l'aigua de la superfície tractada. Qualsevol tractament de protecció o hidrofugació ha de ser testat en mesura del que sigui possible abans de ser aplicat sobre un bé a restaurar per obtenir dades fiables sobre el comportament, durabilitat i resistència davant els agents climàtics i diferències petrofísiques i petroquímiques existents. Les quals serviran per poder determinar el grau d'eficàcia i idoneïtat dels tractaments i establir els avantatges específiques que comporta la seva utilització sobre revestiments de calç.

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022



Per seleccionar el tractament de protecció més adequat en cada cas, és necessari fer proves que ens proporcionin informació real sobre els productes hidrofugants emprats i els materials que ens disposem a tractar per garantir la conservació dels materials de construcció amb el temps. Per tot això que acabem d'exposar, el present estudi té com a finalitat avaluar el comportament hídric i grau d'eficàcia de 3 productes hidrofugants de diferent naturalesa (Nano Silo W®, Aquashield Ultimate® i Tkrom®) sobre morters de calç i pols de marbre utilitzats com a revestiments d'edificis històrics.

La metodologia emprada es pot dividir en tres etapes diferenciades: marc teòric, procediment experimental i anàlisi o valoració dels resultats obtinguts. El marc teòric se centra en la recerca i revisió bibliogràfica dels diferents estudis existents sobre els efectes de la humitat en els béns culturals, l'eficàcia de la hidrofugació com a tractament de protecció superficial tenint en compte la gran varietat de composicions i sostrats petris, les diferents tipologies existents d'hidròfugs, els productes hidrofugants més usats en l'actualitat i les seves aplicacions principals. El més important, és que les dades obtingudes serviran de base per a la realització de futures investigacions.

En el procediment experimental, s'ha dut a terme la fabricació de les provetes o espècimens de laboratori que serviran posteriorment per a la realització dels assajos en el laboratori. Per a la investigació, s'han dissenyat morters de calç hidràulica, àrids de diferent composició i granulometria amb una dosificació 1:5 per aconseguir una porositat mitjana. Pel que fa a la realització dels assajos, les tècniques i mètodes emprats per a l'avaluació dels productes hidrofugants són el mesurament de l'angle de contacte estàtic i de l'absorbència dels materials.



## 1.2. Objectius de l'estudi

### 1.2.1. Objectiu general

Avaluar el comportament hídic i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç, comparar els resultats obtinguts i determinar la seva viabilitat per a ser utilitzats com a tractaments de protecció superficial contra la humitat en intervencions de restauració i rehabilitació integral d'edificis històrics o de caràcter patrimonial.

### 1.2.2. Objectius específics

- Reunir informació a partir de diferents estudis que fonamenti les nostres investigacions i ens permeti establir una metodologia adequada de cara a la realització dels assajos que serviran per determinar les propietats seleccionades (angle de contacte i absorció de l'aigua) i estudiar la seva relació amb el comportament hidrofòbic dels diferents suports.
- Documentar de manera ordenada i sistemàtica tots els processos realitzats i difondre els resultats obtinguts en els assajos duts a terme en el laboratori, fent una contribució al coneixement que es té actualment dins de l'àmbit de la conservació-restauració sobre l'aplicació d'hidròfugs en els materials de construcció habituals, centrant-nos en els revestiments de calç.
- Comparar els protectors nanotecnològics amb els productes hidrofugants convencionals formulats a base de compostos organosilícis, realitzant proves amb diferents materials i tractaments i seleccionar el més adequat per al tractament de superfícies exposades contínuament a la pluja o que presenten problemes d'humitat en funció de la tipologia dels materials.
- Comprovar que els productes hidrofugants de base nanotecnològica compleixen amb les prestacions que anuncia el fabricant i verificar si realment tenen una acció superhidrofugant sobre els substrats porosos estudiats.
- Observar si es produeixen diferències significatives sobre la superfície de les provetes després de l'aplicació del producte i determinar possibles efectes adversos derivats de la seva aplicació, p. e. formació de "pel·lícula", variacions de color, modificació de la rugositat superficial.



## 1.3. Metodologia

En aquest apartat s'especifica la metodologia emprada per a l'avaluació de diferents productes hidrofugants sobre revestiments de calç. Per determinar diferents propietats com la mullabilitat i l'absorbència dels materials estudiats serà necessari realitzar d'assajos experimentals en el laboratori. Els criteris i metodologia seguida se centra en la caracterització de les tècniques analítiques més adequades. El present estudi ha estat confeccionat per a ser emprat en l'àmbit de la conservació i restauració i del patrimoni arquitectònic, podent ampliar-se el seu ús en altres disciplines tècniques relacionades.

A partir de les investigacions realitzades, la informació recopilada servirà com a base per estudiar el comportament i les propietats hídriques de cadascun dels productes hidrofugants (Nano Silo W®, Aquashield Ultimate® i Tkrom®), que seran aplicats en estat pur sobre les provetes de morter fabricades. Pel que fa a la fabricació de les provetes, s'ha dissenyat un morter amb tres tipus de calç hidràulica diferents (NHL 3,5) amb un patró de dosificació 1/5 (porositat mitjana), utilitzant NLT-104/91 per assegurar que es compleixen els requisits generals de granulometria en els àrids incorporats al morter.

Per tant, es faran 3 colades i es realitzaran els assajos per determinar les propietats dels morters de calç hidrofugats. Els passos a seguir durant el desenvolupament de la investigació són:

- Recerca i revisió bibliogràfica dels estudis existents sobre els efectes de la humitat, els factors d'alteració i les alteracions principals associades a la humitat en materials inorgànics porosos.
- Recerca i revisió bibliogràfica per recopilar tota la informació possible sobre els tractaments de protecció i hidrofugació i sobre els productes hidrofugants que es comercialitzen en el mercat.
- Recerca i selecció dels materials necessaris per a la fabricació de mostres que serviran per als assajos experimentals en el laboratori.
- Fabricació i condicionament de les provetes de morter per dur a terme la investigació.
- Definició de les condicions experimentals i realització dels assajos en el laboratori per determinar el grau d'eficàcia dels morters hidrofugats i sense hidrofugar. Es duran a terme assajos d'absorció de la gota i mesurament de l'absorbència pel mètode de la pipeta seguint les normes EN 16302:2013 i EN 15802:2009.
- Valoració dels resultats obtinguts durant la realització dels assajos en el laboratori.

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022



D'acord amb el Reglament Interior de CEN/CENELEC, ens veiem obligats a seguir les normes nacionals UNE-EN, promulgades pel Comitè Tècnic AEN/CTN Construcció, de la qual exerceix la secreteria AENOR (Associació Espanyola de Normalització y Certificació), «sempre que no es modifiqui el valor del patrimoni cultural i es mantinguin els corresponents codis ètics de la pràctica conservativa» (AENOR, 2009, p.6).<sup>1</sup>

A continuació, s'exposen les diferents normatives que s'han seguit durant la realització dels assajos experimentals en el laboratori per avaluar el comportament i les propietats dels productes hidrofugants emprats com a tractament de protecció de materials petris inorgànics:

- AENOR. UNE-EN 15802:2009. *Conservación del patrimonio cultural. Métodos de ensayo. Determinación del ángulo de contacto estático*. Madrid: AENOR.
- AENOR. UNE-EN 16302:2013. *Conservación del patrimonio cultural. Métodos de ensayo. Medición de la absorción de agua por el método de la pipeta*. Madrid: AENOR.
- AENOR. UNE-EN 16581:2014. *Conservación del patrimonio cultural. Protección superficial para materiales inorgánicos porosos. Métodos de ensayo de laboratorio para la evaluación de las prestaciones de los productos hidrófugos*. Madrid: AENOR.
- AENOR. UNE-EN 16572:2015. *Conservación del patrimonio cultural. Glosario de términos técnicos relativos a morteros para albañilería, revocos y enlucidos empleados en el patrimonio cultural*. Madrid: AENOR.
- AENOR. UNE-EN 17187:2020. *Conservación del patrimonio cultural. Caracterización de morteros utilizados en el patrimonio cultural*. Madrid: AENOR.
- NLT-104/91. *Ensayos de suelos. Granulometría de suelos por tamizado*. Normas NLT. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.

---

<sup>1</sup>AENOR. UNE 15802:2009. (2010). *Conservación del patrimonio cultural. Métodos de ensayo. Determinación del ángulo de contacto estático*. Madrid: AENOR.



### 1.3.1. Estat de la qüestió

En conservació-restauració dels béns culturals, no existeix una recepta o fórmula que pugui ser aplicada en tots els casos. Per solucionar el mal estat de conservació i els problemes d'humitat que presenta un edifici, s'ha d'estudiar l'opció més correcta per a cada cas. En l'àmbit general, és molt important l'aplicació d'un tractament hidròfug per protegir la superfície i impedir la filtració de l'aigua a l'interior del nucli de la pedra, que garanteix la seva conservació durant el temps més gran possible. Sense pretendre tractar el tema de forma exhaustiva, s'utilitzen diferents mètodes d'assaig per tractar d'aconseguir informació fiable al respecte.

Els productes hidrofugants emprats per a la protecció i hidrofugació de façanes són altament efectius, el que acostuma a passar en la majoria dels casos és que, per una banda, els productes hidrofugants emprats no són compatibles amb el suport que es vol tractar, per exemple: teòricament els hidròfugs de base dissolvent presenten una major durabilitat, no obstant, en una pedra calcària és preferible emprar un hidròfug a base d'aigua perquè són pedres que presenten una alta sensibilitat química.

Per l'altra banda, és possible que l'hidròfug utilitzat sigui l'adequat i a més, de bona qualitat, però que el procés d'aplicació no sigui l'adequat, p. e. la majoria d'hidròfugs no són aplicables sobre superfícies humides. Per aquest motiu, es cometen tants errors en l'aplicació de tractaments protecció i hidrofugació, podent agreujar els problemes d'humitat que presentava inicialment la façana i empitjorar el seu estat de conservació. El procés d'hidrofugació no és un tractament complex, però s'han de tenir en compte una sèrie d'aspectes per no actuar de forma imprudent o des del desconeixement. D'altra banda, és ben sabut que existeix un buit de coneixement respecte a l'efectivitat dels productes hidròfugs.

En l'actualitat, hi ha certa confusió entre els conceptes hidrofugació i impermeabilització, es podria dir que són procediments similars pel que fa a funcionalitat, el seu objectiu és impedir l'entrada d'aigua en una superfície porosa; però no actuen de la mateixa manera i presenten diferències significatives, ja que les condicions que s'han de produir perquè tingui lloc la hidrofugació són més rigoroses i estrictes. En molts casos, s'apliquen vernissos o pintures que acaben degradant la pedra i provocant alteracions de tota mena que només poden resoldre's efectuant intervencions extremadament costoses.



### 1.3.2. Hipòtesis

En aquest apartat s'exposen les hipòtesis principals i possibles variables del treball, que serviran de base per a iniciar la investigació. A partir de les investigacions realitzades, tractarem de confirmar, refutar o establir més endavant si les hipòtesis plantejades tenen una significació real que posi en evidència la perspectiva adoptada en el tema tractat o al contrari, si les afirmacions presentades es contraposen amb la idea que teníem inicialment. Durant la investigació prèvia, algunes de les hipòtesis plantejades són les següents:

“La hidrofugació permet millorar el comportament hídric i les propietats de revestiments de calç tractats. Els productes hidrofugants, ben entesos, reporten beneficis quan són utilitzats correctament en intervencions de rehabilitació i restauració d'edificis d'interés historico-artístic. A diferència dels impermeabilitzants, els hidrofugants no modifiquen l'aspecte, densitat aparent i altres propietats com la permeabilitat i la transpirabilitat del suport.”

“La qualitat dels productes hidrofugants també pot influir en els resultats. Els hidròfugs basats en nanopartícules, protegeixen les estructures pètries des de l'interior i presenten més compatibilitat química amb els suports inorgànics porosos tractats que la resta de productes hidrofugants. Per aquest motiu, és preferible el seu ús davant dels productes hidrofugants de naturalesa organosilici, que són els més utilitzats actualment.”



## 1.4. Justificació del projecte

En aquest treball, s'estudia el comportament de tres productes hidrofugants per valorar la seva futura utilització en la protecció de les estructures i béns del patrimoni cultural que intervenim. L'estudi de les propietats hídriques dels materials petris hidrofugats és fonamental per assegurar que s'apliquen els productes hidrofugants convenients i s'assegura la conservació del Patrimoni arquitectònic. En el camp de la conservació-restauració de béns culturals, existeix un buit de coneixement sobre com abordar els tractaments d'hidrofugació i seleccionar els hidrofugants adequats tenint en compte la riquesa i diversitat dels materials a restaurar.

Per avaluar el comportament hídric d'un hidrofugant, primer hem de saber què és un hidrofugant, que es pot aplicar tant en parets sanes com amb problemes d'humitat, quins són els errors més freqüents derivats de la seva utilització, la seva forma d'aplicació específica, entre d'altres. També és important mencionar que existeix poca bibliografia especialitzada al respecte i que la majoria d'estudis existents provenen del sector de la construcció. A més, en el mercat existeixen una gran quantitat de productes hidrofugants i materials que encara no s'han estudiat en profunditat, com per exemple els hidrofugants organosilícis o els superhidrofugants basats en nano-òxids.

Per aquest motiu, la finalitat del present estudi és aportar solucions que puguin ser utilitzades en intervencions reals i establir les pautes bàsiques per la selecció dels mètodes més adequats en funció de la composició i característiques mineralògiques dels substrats que han de ser tractats. Entenem que avaluar l'estat de conservació dels morters històrics i seleccionar un tractament específic per a cada cas és tot un repte. Per a la investigació dels nous materials, es considera necessari desenvolupar una proposta que serveixi per estudiar i valorar el comportament i efectivitat dels productes hidrofugants organosilícis i superhidrofugants basats en nanopartícules, per a la seva aplicació sobre morters de revestiment que es troben exposats a la intempèrie.

Aquest treball ha estat dissenyat per a la seva utilització exclusiva en el camp del Patrimoni arquitectònic. No obstant, els assajos de la tensió superficial i absorbència dels productes hidrofugants poden ser susceptibles a ser aplicats en altres camps de coneixement. Actualment, s'estan fent proves per determinar el comportament dels productes hidrofugants en la protecció de morters, però encara queda molt terreny per investigar en el camp de la hidrofugació i dels nanomaterials. L'aportació específica d'aquest estudi és identificar aquests buits de coneixement i aportar solucions que suposin un avanç per al coneixement dels materials hidrofugants.

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022

## **Capítol II. Marc teòric**

## 2.1. Els efectes de la humitat

«La humitat és una de les causes més importants d'alteració, donat que pot intervenir en múltiples processos de degradació» (San Andrés & de la Viña, 2009, p.367).<sup>2</sup> Com ja sabem, els materials orgànics són higroscòpics i, per tant, es considera que són altament vulnerables a determinades condicions ambientals. De manera paral·lela, els materials inorgànics també es poden veure alterats en menor o major grau per la humitat i l'acció corrosiva dels àcids, sutge i altres contaminants que podem trobar tant en ambients rurals i urbans.

Al llarg d'aquest apartat, s'estudien els factors d'alteració principals i algunes de les alteracions provocades per la humitat i altres factors físics i químics que poden tenir relació i a efectes pràctics, com aquests poden transcendir afectant la conservació dels materials petris que podem trobar en gran part del patrimoni cultural i arquitectònic. A la vegada, per valorar els riscos potencials de dany i els efectes que té la humitat sobre els materials pretis, s'han de conèixer els factors responsables de la seva degradació, que a la llarga causaran l'aparició d'alteracions de químic, mecànic o biològic que afectaran a la seva conservació.

«En qualsevol cas, aquestes alteracions donen lloc a un canvi important en les propietats originals del material, que poden repercutir en la seva funcionalitat, lectura estètica i durabilitat» (Ídem, 2009, p.364).<sup>3</sup> En treballs de rehabilitació i restauració d'edificis històrics, és habitual trobar edificis amb problemes de conservació o un estat de deteriorament avançat a causa dels efectes de la humitat [Figura 1].

No hem d'oblidar que les humitats poden generar conseqüències greus i influir negativament en els índex d'habitabilitat, salubritat i seguretat de l'edifici, posant en perill la integritat estructural de l'edifici, en la mateixa mesura que disminueix la resistència i capacitat de càrrega dels materials constructius, podent-se produir a la llarga desprendiments parcials o esfondraments.



**Figura 1** - Efectes de la humitat en pintures i revestiments de calç d'una façana qualsevol. © Victoria Herrero

<sup>2</sup> San Andrés, M. M., & de la Viña, S. F. (2009). *Fundamentos de química y física para la conservación y restauración*. Editorial Síntesis.

<sup>3</sup> Ídem, 2009, p.364.



La presència d'humitats en un edifici també s'ha de tractar perquè pot ser perjudicial per a la salut dels habitants i incrementar el consum energètic dels habitatges. Les alteracions derivades de la humitat i altres factors associats han de ser tractades necessàriament per professionals especialitzats en conservació i restauració arquitectònica, ja que requereixen una metodologia específica, planificant sempre totes les fases de la intervenció i emprant els tractaments i els materials adequats per a la seva intervenció en funció de la composició intrínseca dels materials, la funcionalitat i usabilitat que tenen, les condicions ambientals a les quals es trobarà exposat, etc.

«Una de les fases d'aquest procés de restauració és la protecció de la pedra amb l'aplicació de productes hidròfugs» (Villegas, Vale i Alcalde, 1991, p. 19).<sup>4</sup> En l'àmbit general, els problemes d'humitat apareixen en diferents zones en edificis d'habitatges per diversos motius, habitualment acostumen a estar relacionats amb la qualitat dels materials d'obra, una conservació deficient o l'activitat dels habitants i l'ús que fan dels espais interiors i de la calefacció.

És important que una façana o terrassa d'obra tingui una adequada qualitat. En primer lloc, perquè no hi hagi filtracions que permetin que l'aigua de pluja arribi als habitatges i, en segon lloc, per assegurar-nos que un canvi brusca de temperatura no va a fer que els seus elements es separin, creant-se esquerdes, fissures i fins i tot l'aixecament del recobriments. Pot passar que la qualitat dels materials sigui bona, però per la seva naturalesa o conservació acabi donant problemes (TRC, 2016).<sup>5</sup>

En un altre ordre de funcions, les conseqüències de l'aparició d'humitats com a fenomen que evidencia un problema de conservació rellevant són principalment el deteriorament dels materials, les filtracions que provoquen danys estètics i estructurals en l'edifici, l'aparició d'eflorescències i altres alteracions que *a priori* considerem més greus. Els danys estructurals causats per la humitat més habituals en els murs de les façanes d'edificis d'habitatges històrics i de caràcter patrimonial són els següents que s'exposen a continuació.

- **Humitat meteòrica:** La humitat meteòrica [Figura 2] és el tipus d'humitat més habitual, es produeix a causa de l'acumulació de les aigües de la pluja a l'exterior per una impermeabilització

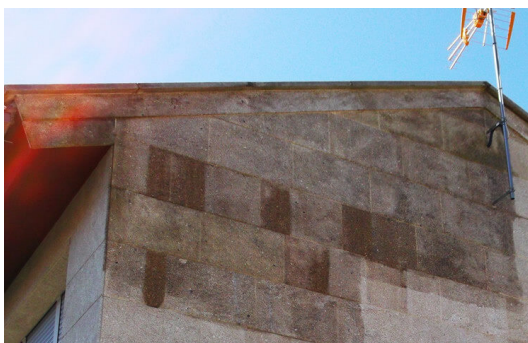
---

<sup>4</sup> Villegas, R., Vale, J. F., & Alcalde, M. (1991). *Evaluación de tratamientos de hidrofugación aplicados a piedras calizas de Catedrales Andaluzas*. *Materiales de la Construcción*, 41(223), 19–27. Recuperat el 9 d'abril del 2022, de <https://idus.us.es/handle/11441/17640>

<sup>5</sup> *Humitats i impermeabilitzacions en comunitats de propietaris*. (2016, 27 maig). TRC pintura. Impermeabilizaciones Pavimentación y Revestimientos. Recuperat el 9 d'abril del 2022, de <https://trcpaint.com/humedades-impermeabilizaciones-comunidades-propietarios/?lang=ca>

deficient de la façana o de la coberta de l'edifici. A grans trets, l'aigua s'acumula sobre la superfície dels materials petris i és absorbida a causa de la baixa tensió superficial fins que el nucli de la pedra se satura i queda debilitada. La humitat retinguda al interior pot accelerar les reaccions químiques que es produeixen, influir en el comportament mecànic dels materials i afavorir la degradació biològica dels materials constructius.

Aquells edificis que no disposin d'un revestiment de façanes convenientment impermeabilitzant tendiran a absorbir l'aigua de pluja, així com la mateixa humitat de l'ambient exterior. Aquesta situació sol donar lloc al deteriorament de la façana, filtracions a l'interior i la consegüent aparició d'humitats a l'habitable intern (Revetón, 2021).<sup>6</sup>



**Figura 2** - Presència d'humitats en una façana a causa de l'acció de l'aigua de la pluja i altres factors climatològics. © Hogar Seco

- **Humitat per capil·laritat:** La humitat d'ascensió capil·lar [Figura 3] es produeix en les zones baixes de murs i envans de la planta baixa dels edificis. Aquest tipus d'humitat es deu a l'acumulació de l'aigua del subsol que acaba travessant els fonaments i ascendint per l'estructura interior de l'edifici. «La humitat per capil·laritat pot tenir lloc temporal o permanentment, depenent de si està relacionada amb la meteorologia estacional o la presència d'un nivell freàtic molt proper a la superfície» (*Íbidem*, 2021).<sup>7</sup>

Segons diversos autors (2020),<sup>8</sup> l'aigua del terreny que s'absorbeix per capil·laritat no és pura, sinó que incorpora sals dissoltes del mateix terreny. Les característiques d'aquest tipus de danys són: 1)

---

<sup>6</sup> *Guía rápida: Tipología y diagnóstico de humedades y consecuencias derivadas de su aparición.* (2021, 18 d'octubre). Pinturas Revetón. Recuperat el 11 d'abril del 2022, de <https://reveton.com/guia-rapida-tipologia-y-diagnostico-de-humedades-y-consecuencias-derivadas-de-su-aparicion/>

<sup>7</sup> *Íbidem*, 2021.

<sup>8</sup> *Los daños estructurales por humedades más frecuentes.* (2020, 10 de juny). Ingenieros Asesores. Recuperat el 11 d'abril del 2022, de <https://ingenierosasesores.com/actualidad/danos-estructurales-por-humedades/>



**Figura 3** - L'aigua provinent del terreny ascendeix creant taques d'humitat horitzontals i afavorint l'aparició de biodeteriorament en la part baixa del mur de maçoneria. © Centre Tecnològic del Granit

bombaments, butllofes i aixecaments de pintures i revestiments en parets i sostres; 2) aparició de taques de salnitre o eflorescències salines; i 3) despreniment dels materials constructius i els revestiments aplicats sobre la superfície dels murs i envans de la façana. La humitat que queda retinuda a les parets també pot afectar a la qualitat de l'aire interior i afavorir la proliferació de fongs.

- **Humitat per condensació:** Aquest tipus d'humitat es vincula, en general, amb la humitat relativa de l'aire i la seva relació amb la temperatura. «Com a norma general i per aire a una certa temperatura, el punt de rosada augmenta a mesura que augmenta el nivell d'humitat de l'aire, això implica que en superfícies menys fredes es produirà la condensació» (S&P, 2019).<sup>9</sup>

La humitat de saturació o condensació es produeix quan el vapor d'aigua de l'interior dels habitatges entra en contacte amb superfícies fredes -com ara parets o vidres- formant petites gotes d'aigua. La seva progressiva acumulació dona lloc a l'aparició d'humitats visibles a parets i sostres» (*Íbidem*, 2020).<sup>10</sup>



**Figura 4** - Fongs i floridures en parets i sostres que han aparegut amb el temps a causa de la humitat condensada. © TSA Conservación de Patrimonio

<sup>9</sup> *Las falsas soluciones a la humedad por condensación*. (2019, 15 d'abril). S&P Sistemas de Ventilación. Recuperat el 10 d'abril del 2022, de <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/humedades-por-condensacion/>

<sup>10</sup> *Íbidem*, 2020.

Les causes més comuns de la seva aparició són: 1) una mala ventilació, que evita la renovació natural de l'aire a l'interior de l'habitable; 2) la falta d'aïllament exterior, que produeix l'existència de ponts tèrmics entre els materials i el degoteig continu de marcs en portes, finestres, etc.; i 3) l'ús abusiu de la calefacció, que crea diferències importants de temperatura entre les parts fredes i un ambient càlid. Els danys produïts per la condensació de l'aigua més habituals són l'aparició de fongs i floridures en parets i sostres [Figura 4] i la condensació de l'aigua en els perímetres de portes i finestres, afavorint també l'aparició de taques de salnitre, eflorescències i biodeteriorament.

- **Humitat per filtració:** La humitat per filtració [Figura 5] deriva d'una impermeabilització de cobertes, terrasses, juntes i zones d'unió dels murs deficient. L'aigua de la pluja acumulada penetra des de l'exterior de la façana, causant «taques molt localitzades i la presència d'esquerdes són els símptomes clàssics de les filtracions des de l'exterior» (*Íbidem*, 2020).<sup>11</sup>

Els danys més habituals produïts per filtració són: 1) butllofes o caiguda de materials a cobertes, per infiltració d'aigua a terrasses i teulades; 2) esquerdes i fissures a cobertes, teulades o murs de soterranis; i 3) trencaments de canonades i descalç de la fonamentació que donen pas a fissures i esquerdes a la mateixa (*Íbidem*, 2021).<sup>12</sup>



**Figura 5** - Butllofes, desprendiments i pèrdues de pintura i revestiment causades per les filtracions d'aigua. © OK Humedades

- **Humitat accidental:** La humitat accidental no es pot vincular amb una impermeabilització o aïllament exterior deficient, a causes accidentals, com per exemple, les filtracions, vessaments o les inundacions d'aigua produïdes per fuites, avaries o trencaments de canonades i baixants o similar generades per la tensió o l'acció mecànica a causa d'un mal ús o deficiència de la construcció. D'altra banda, «si es tracta de petites ruptures o fissures, l'aigua està més concentrada i, per tant, les taques són puntuals i aïllades [Figura 6]. Solen ser humitats de formació molt accelerada, i si es produeixen, al sostre poden formar goteres» (Tomé, 2021).<sup>13</sup>

<sup>11</sup> *Íbidem*, 2020.

<sup>12</sup> *Íbidem*, 2021.

<sup>13</sup> Tomé, J. S. (2021, 5 abril). *Tipos de humedades, cómo identificarlas y solucionarlas*. Arrevol. Recuperat el 12 d'abril del 2022, de <https://www.arrevol.com/blog/tipos-de-humedades-como-identificarlas-y-solucionarlas>



**Figura 6** - Les humitats accidentals es manifesten habitualment a través de diferents patologies constructives, en aquest cas, té lloc l'aparició d'esquerdes, fissures i taques localitzades. © Revetón

- **Humitat d'obra:** La humitat d'obra deriva principalment d'un procés d'assecatge deficient dels materials constructius durant el procés d'edificació. S'ha de tenir en compte que el procés d'assecatge pot durar dies, setmanes o mesos, depèn de la composició intrínseca dels materials, de la proporció d'aigua utilitzada i de les condicions ambientals. «Si l'assecat no és suficient o està impedita l'evaporació normal, l'aigua residual és retinguda en els materials i després apareix en forma de diferents patologies com ara eflorescències o aixecaments [Figura 7]» (Construmatica, 2010).<sup>14</sup> Un altre punt important és que la humitat d'obra és més habitual en edificis de nova construcció.



**Figura 7** - Un dels principals problemes de no respectar els temps d'assecatge és l'aparició prematura de butllofes que provoquen el despeniment i pèrdua de les pintures i els revestiments. © Sergio Sánchez

---

<sup>14</sup> *Humedad de Obra*. (2010, 17 noviembre). Construmatica. Metaportal de Arquitectura, Ingeniería y Construcción. Recuperat el 12 d'abril del 2022, de [https://www.construmatica.com/construpedia/Humedad\\_de\\_Obra](https://www.construmatica.com/construpedia/Humedad_de_Obra)



### 2.1.1. Factors d'alteració principals

Els factors d'alteració són els principals responsables de la degradació dels materials orgànics i inorgànics, en certs casos, aquests poden derivar en fenòmens físics i químics causant alteracions de tota mena. Pel que fa a les degradacions, es poden classificar en tres blocs: alteracions mecàniques, alteracions químiques i alteracions biològiques. Amb l'objectiu, d'assegurar una adequada conservació del patrimoni i dels edificis d'interès històricoartístic, s'estudien de forma breu les formes d'alteració que afecten a tots els materials i en concret, es reflexiona sobre els processos de degradació externs que actuen sobre els materials petris.

«L'actuació de cadascun d'aquests factors no és totalment independent de la resta; en molts casos, el procés complet de degradació està determinat per l'acció combinada d'alguns» (*Íbidem*, 2009).<sup>15</sup> A efectes pràctics, el procés d'alteració d'un material petri depèn fonamentalment de tres factors: 1) de la composició i característiques intrínseques del material (naturalesa mineralògica, incompatibilitat de materials, defectes de fabricació o procés d'assecatge inadequat); 2) de les condicions ambientals (temperatura, HR, llum, vent i contaminants); i 3) de l'activitat humana (funcionalitat i usabilitat en la construcció, transport i manipulació i altres causes accidentals).

Diversos autors (s.f.)<sup>16</sup> assenyalen que en un edifici d'interès històricoartístic, els factors de degradació intervenen conjuntament en els processos de degradació dels materials petris. Els principals són:

- **Vent:** El vent que transporta partícules i micropartícules genera una acció erosiva sobre la superfície dels revestiments.
- **Temperatura:** Els canvis de temperatura generen un gradient tèrmic entre les parts que es troben exposades i les que no ho estan, poden donar lloc a la producció de tensions internes i la consegüent aparició de microfissures en els materials petris.
- **Aigua:** L'aigua és el principal agent de degradació, aquesta s'acumula sobre la superfície, servint de suport o medi per als contaminants existents. L'aigua és absorbida pels materials porosos i penetra des de l'exterior de la façana fins al nucli de la pedra, on es desenvolupen la major part de les

---

<sup>15</sup> *Íbidem*, 2009.

<sup>16</sup> V.V.A.A. (s.f.). *Caracterización y estudios de deterioro/conservación de materiales pétreos en monumentos históricos*. IRNASA (CSIC). Universidad de Salamanca. Recuperat el 13 d'abril del 2022, de [https://ge-iic.com/files/2congresoGE/Caracterizacion\\_y\\_estudios\\_de\\_deterioro.pdf](https://ge-iic.com/files/2congresoGE/Caracterizacion_y_estudios_de_deterioro.pdf)



les reaccions químiques i processos fisicoquímics, podent donar lloc a substàncies de caràcter àcid o oxidatiu que alteren la composició original i les propietats dels materials.

- **Contaminació ambiental:** La contaminació ambiental deriva de l'acció antròpica de l'activitat humana, es localitza principalment en grans concentracions urbanes o zones industrialitzades, a conseqüència de les combustions de màquines, vehicles, etc., es manifesten presentant alts nivells de diòxid de carboni i diòxid de sofre en l'atmosfera. Per una banda, el diòxid de carboni en combinació amb l'aigua augmenta el seu poder dissolvent en roques carbonatades. Per l'altra banda, el diòxid de sofre es transforma en sulfat càlcic, que acaba precipitant i taponant els porus de la pedra.
- **Biodeteriorament:** Els agents biològics, les plantes i altres microorganismes influeixen en la degradació de les pedres, o bé per l'acció mecànica i pressió que exerceixen les arrels o bé per l'acció química de les substàncies que segreguen els diferents éssers vius.
- **Cristal·lització de sals:** La cristal·lització de sals és un dels fenòmens d'alteració i degradació més habituals en materials petris i porosos pel caràcter iònic de les substàncies amb les quals entren en contacte. Els ions que poden precipitar com a sals són: 1) els clorurs són ions que presenten una gran higroscopicitat i mobilitat, penetren en la pedra i acaben precipitant a l'interior; 2) els sulfats s'acostumen a relacionar o bé a la contaminació ambiental o bé a la dissolució de substàncies per aigües superficials o d'escorrentia; i 3) els fosfats que són causats pels excrements de les aus, generen un pH bàsic en medis aquosos que té una acció àcida i degradant sobre la pedra (p.1-2).

## 2.1.2. Alteracions causades per la humitat

Segons San Andrés Moya i de la Viña Ferrer (2009), l'acció de la humitat pot ocasionar tres tipus d'alteracions: 1) modificació de la mida i forma del material; 2) reaccions químiques; i 3) degradació biològica. (p.366).<sup>17</sup> Quan un material és modificat químicament per l'acció de la humitat, es poden produir tensions internes que generin un seguit d'alteracions mecàniques, com esquerdes i fissures. D'altra banda, el material serà biològicament més susceptible de ser atacat si la seva composició i característiques originals es troben alterades o degradades.

«La presència d'aigua a l'interior de la roca condicionarà fortament la degradació química (dissolució, precipitació, hidròlisi, oxidació, etc.), física (pressió de cristallització de sals i del gel, etc.) i biològica, i fins i tot disminueix les propietats mecàniques de la roca» (Benavente, 2006, p.132).<sup>18</sup> En edificis d'interès històricoartístic, les alteracions que pateixen els materials petris de façana es poden dividir en tres grans grups:

- **Alteracions mecàniques:** «Les alteracions mecàniques són lesions produïdes per algun tipus de sobrecàrrega en algun element de l'edificació o pugui tenir-ne l'origen en forces externes o internes que puguin ser estructurals, constructives o d'utilització» (2006, p.132).<sup>19</sup>

Convé destacar que a tensió interna derivada de forces externes o internes pot influir en el comportament elàstic i resistència dels materials petris, provocant ruptures, erosió, desprendiments, deformacions, fragmentacions, clivellats, esquerdes, fissures [Figura 8].



**Figura 8** - Esquerdes i fissures causades per la sobrecàrrega de forces, els moviments de l'edifici i la mala qualitat dels materials. © Joan Tarifa

<sup>17</sup> Ídem, 2009., p.366.

<sup>18</sup> Benavente, D. (2006). *Propiedades físicas y utilización de rocas ornamentales*. En: *Utilización de rocas y minerales industriales* / ed. Ma Ángeles García del Cura y Juan Carlos Cañaveras. Universidad de Alicante. (Seminarios de la Sociedad Española de Mineralogía; 2). Recuperat el 13 d'abril del 2022, de <http://hdl.handle.net/10045/25571>

<sup>19</sup> *Patologías en edificaciones: cuáles son las más frecuentes y cómo se originan*. (2019b, maig). S&P Sistemas de Ventilación. Recuperat el 13 d'abril del 2022, de <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/patologias-edificaciones/>

- **Alteracions químiques:** «Des del punt de vista químic, l'aigua no és un agent especialment agressiu, no obstant, en combinació amb altres substàncies o causes d'alteració afavoreix multitud de processos de degradació» (*Ídem*, 2009, p.376).<sup>20</sup> L'aigua influeix en els processos de degradació dels materials, en la mateixa mesura que facilita les reaccions químiques, intervé de forma directa en les reaccions (dissolució, hidratació i hidròlisi) i actua com a vehicle o medi dels productes contaminants. En algunes ocasions, l'aigua també pot actuar com a catalitzador.

Les alteracions que es veuen afavorides per la presència d'humitat depenen exclusivament de la composició i característiques intrínseques dels materials petris originals i dels factors ambientals que deriven de fonts externes (vent, llum, oxigen i contaminants). Les alteracions més freqüents estan directament relacionades amb l'aparició d'eflorescències, alteracions cromàtiques, oxidació i corrosió de les estructures metàl·liques de l'edifici, entre d'altres. Convé recordar que les alteracions químiques estan lligades a les alteracions mecàniques [Figura 9], p.e. la cristallització de sals pot causar l'aparició d'esquerdes, fissures, aixecaments, fragmentació, etc.



**Figura 9 - (a l'esquerra)** Alteracions causades per la humitat i la formació de sals en el mur. © Arquitectura sana **Figura 10 - (a la dreta)** Aparició de floridures, algues, líquens i plantes superiors en la part baixa d'un pilar de pedra. © La restauradora de la Laguna

- **Alteracions biològiques:** Les alteracions de tipus biològic estan relacionades amb l'aparició de microorganismes (fongs i bacteris), floridures, algues, líquens, plantes superiors [Figura 10] i amb l'acció animal, són els principals responsables de l'inici d'un conjunt de processos físicoquímics que provoquen la degradació i pèrdua de consistència dels materials petris, l'aparició de taques, etc. En el cas d'alteracions químiques causades per organismes vius podem trobar des d'assentaments que provoquen excés de pes, agressió química per excrements i fins i tot la destrucció de materials en el cas de plagues d'insectes o rosegadors» (*Íbidem*, 2019b).<sup>21</sup>

<sup>20</sup> *Ídem*, 2009, p.376.

<sup>21</sup> *Íbidem*, 2019b.



## 2.2. Tractaments de protecció i hidrofugació

Amb el pas del temps i sobretot amb la incidència principalment de l'aigua de la pluja es produeixen una sèrie de reaccions químiques a l'interior de les bases minerals, que juntament amb l'efecte del sol, vent, amb els canvis de temperatura, etc. produeix constantment eflorescències de sals higroscòpiques que emergeixen a la superfície de la base mineral i es dissolen en aigua. Quan l'aigua s'evapora per efecte del sol, les sals cristal·litzen cap a la superfície, el que comporta greus perjudicis principalment en la part més superficial de l'estructura mineral (Paviprint, 2014, p.4).<sup>22</sup>

L'acció reactiva de l'aigua degrada progressivament l'estructura interna i externa de la base mineral, de manera que la porositat augmenta i cada cop absorbeix més aigua, així es va debilitant la pedra fins que s'acaben produint danys estructurals irreparables. «En la part superficial dels paviments, edificis i construccions en general per restaurar, ens trobem amb un embrutament continuat, pol·lució i contaminació abundant i diversa, creixement de microorganismes, formació de capes fòssils, etc.» (Ídem, 2014, p.5).<sup>23</sup>

Amb tot això, sorgeix la necessitat d'aplicar una protecció adequada a la base mineral, que té com a base la hidrofugació, per evitar l'entrada de l'aigua de la pluja i que aquesta no quedi desprotegida i continuï degradant-se de forma accelerada. En edificis i construccions a restaurar, la base mineral desprotegida de l'aigua es va debilitant i pot presentar diverses alteracions, com les que acabem de mencionar amb anterioritat. En aquests casos, netejar i recobrir la superfície amb una capa de pintura o amb un recrescut de morter no serà suficient per assegurar una bona conservació dels substrats.

De manera que si no es tracten internament els revestiments minerals amb un tractament de consolidació i hidrofugació, la pedra es tornarà vulnerable als factors de degradació, continuarà degradant-se amb facilitat afavorint l'aparició de noves lesions. D'aquí que, des de sempre ha existit preocupació per conservar i protegir de l'acció de l'aigua la pedra i les bases minerals de paviments, edificis i construccions. En restauració, antigament s'empraven ceres, greixos i altres matèries proteiques per protegir la superfície i augmentar la resistència dels materials a la degradació i el deteriorament.

---

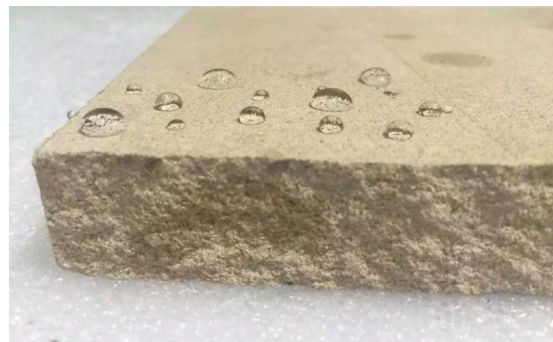
<sup>22</sup> Paviprint. (2014, juny). *La hidrofugación: La verdadera protección para las superficies minerales*. Productos Paviprint S.L. Recuperat el 16 d'abril del 2022, de <https://www.paviprint.com/descargas/catalogos/HIDROFUGACION.pdf>

<sup>23</sup> Ídem, 2014, p.5.

Tal com explica Fort (2012):

Els productes hidrofugants tenen com a finalitat protegir a la pedra de l'entrada d'aigua cap al seu interior i de l'acció agressiva de la contaminació atmosfèrica. Igual que en el cas dels consolidants, aquests tractaments poden actuar emplenant els porus capil·lars de la roca i, per tant, disminuint la seva capacitat de succió de l'aigua capil·lar. Sobretot quan actuen recobrint la superfície dels porus i aïllant a la pedra del medi ambient agressiu (p.127).<sup>24</sup>

La hidrofugació consisteix en una impregnació que s'aplica sobre la superfície augmentant la tensió superficial i la resistència a la penetració o absorció de l'aigua de la pedra o base mineral tractada, l'alt grau de repel·lència i impermeabilitat de la superfície s'aconsegueix a través de l'aplicació de productes químics que no generin noves capes. «Per aconseguir aquest alt nivell d'impermeabilitat a l'aigua, i per això d'hidrofugació, és necessari que la tensió superficial del substrat sigui menor que la tensió superficial de l'aigua» [Figura 11] (Campos, s.f., p.3).<sup>25</sup>



**Figura 11** - Superfície pètria tractada amb un producte hidrofugant que repel·leix i redueix l'absorció de l'aigua. ©Soprobrel

Els principals avantatges de la hidrofugació amb agents hidrofugants són: 1) impedeixen la penetració o filtració d'aigua; 2) permeten la sortida de vapor d'aigua de les superfícies; 3) no alteren l'aspecte ni l'estructura química dels materials originals; 4) no deixen residus; 5) mantenen equilibri alcalí; 6) no formen una pel·lícula a les superfícies, com és el cas dels impermeabilitzants; i 6) són resistents a la radiació ultraviolada (Quiminet, 2022).<sup>26</sup> D'altra banda, la hidrofugació és un dels mètodes més eficaços per tractar els problemes d'humitat que habitualment es relacionen amb el moviment i transport de l'aigua que és absorbida pels substrats porosos i la seva velocitat d'assecatge.

<sup>24</sup> Fort, R. G. (2012). *Tratamientos de conservación y restauración de geomateriales: tratamientos de consolidación e hidrofugación*. La conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio. Programa geomateriales, 125–132. Recuperat el 17 d'abril del 2022, de [https://digital.csic.es/bitstream/10261/46806/1/Curso\\_Geomateriales\\_125\\_132.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/46806/1/Curso_Geomateriales_125_132.pdf)

<sup>25</sup> Campos, J. C. F. (s.f.). *Teoría sobre la hidrofugación*. Química Internacional. Recuperat el 18 d'abril del 2022, de [https://www.quimicainternacional.com/pdf/biblioteca/miscelanea/Teoria\\_sobre\\_la\\_hidrofugacion.pdf](https://www.quimicainternacional.com/pdf/biblioteca/miscelanea/Teoria_sobre_la_hidrofugacion.pdf)

<sup>26</sup> *Conozca el proceso de hidrofugación y sus ventajas*. (2022, 17 maig). QuimiNet.com. Recuperat el 17 d'abril del 2022, de <https://www.quiminet.com/articulos/conozca-el-proceso-de-hidrofugacion-y-sus-ventajas-2717348.htm>



### 2.2.1. Requisits o exigències mínimes de la hidrofugació

Com ja hem explicat amb anterioritat, la funció principal d'un agent hidrofugant és disminuir l'absorció i evitar l'entrada d'aigua a través de la superfície dels materials petris que es troben exposats a la intempèrie i tendeixen a absorbir l'aigua. En restauració, abans de plantejar-nos un tractament per protegir i hidrofugar la superfície de parets exteriors exposades contínuament a l'aigua de la pluja, contaminants, etc. i altres alteracions, i les parets interiors que presenten problemes d'humitat, hem de tenir en compte una sèrie de qüestions que resulten fonamentals i poden determinar l'èxit d'una intervenció.

«La selecció d'un tractament de conservació s'ha de definir atenent la seva eficàcia, idoneïtat i compatibilitat amb els materials existents, així com la seva durabilitat o resistència als processos de deteriorament» (*Ídem*, 2012, p.127).<sup>27</sup> En la hidrofugació intervenen diferents factors, com poden ser les condicions ambientals, la composició i propietats petrofísiques del bé que ha de ser intervingut, la qualitat dels productes hidrofugants emprats i el procés d'aplicació sobre les superfícies. En relació amb això, convé destacar que els productes hidrofugants que es comercialitzen actualment en el mercat han de complir estrictes de requisits tècnics, mediambientals i per a la salut de les persones.

Diversos autors (2014),<sup>28</sup> asseguren que les exigències mínimes que han de complir els productes hidrofugants són les següents:

- Alta capacitat de penetració en els substrats.
- Estabilitat alcalina o resistència a l'alcalinitat de les bases.
- Alta estabilitat enfront els agents atmosfèrics.
- Reducció de l'absorció d'aigua mínim d'un 70%.
- Reducció de la difusió del vapor d'aigua en tan sols <0,05%.
- Resistència a l'esgrogueïment i a l'acció dels raigs ultraviolats.
- Gran poder dessecant per transpiració.
- Reversibilitat, durabilitat i compatibilitat amb altres materials.
- Absència d'alteracions òptiques significatives.
- Absència de superfícies enganxoses o brillants.
- La protecció no ha d'alterar l'aspecte òptic de la superfície.

---

<sup>27</sup> *Ídem*, 2012, p.127.

<sup>28</sup> *Ídem*, 2014, p.7.



## 2.3. Diferències entre hidrofugació i impermeabilització

Existeix una confusió general creada entre els conceptes hidrofugació i impermeabilització, és habitual confondre un producte impermeabilitzant amb un hidrofugant i, fins i tot, «en moltes ocasions es ven una mescla d'ambdós. Qui no ha sentit parlar a hores d'ara d'impossibles tècnics com a pintures hidròfugues impermeabilitzants?» (Fakolith, 2017, p.2).<sup>29</sup> Hem d'entendre que són productes diferents i serveixen per tractar problemes diferents. A continuació, es defineixen correctament els conceptes sobre els quals ens estem referint:

- **Hidrofugació:** La impregnació hidròfuga o hidrofugant és un tractament de protecció que no crea pel·lícules sobre la superfície tractada, els productes emprats penetren en els porus iniciant una sèrie de reaccions químiques que produeixen la cristallització de les substàncies, convertint la pedra o base mineral en hidròfoba, sense taponar els porus ni reduir la transpirabilitat dels substrats, a diferència dels impermeabilitzants.

És per això que els sistemes hidrofugants s'utilitzen i treballen millor on no hi ha pressions contínues d'aigua, en construccions amb pendents i en casos on es vulgui impermeabilitzar zones que existeixin humitats, ja que permet la difusió del vapor d'aigua i no altera més el problema (Correa, 2022).<sup>30</sup>

- **Impermeabilització:** La impermeabilització consisteix en la formació d'una membrana o pel·lícula protectora que evita completament l'entrada de l'aigua i la difusió del vapor d'aigua, per tant, afecta la transpirabilitat dels substrats. Els impermeabilitzants no són aptes per tractar zones que presenten humitats, perquè impedeixen el pas de l'aigua en ambdós sentits. Entre els impermeabilitzats més utilitzats com a barrera trobem teles asfàltiques, revestiments elastomèrics, pintures epoxi, plastificants, etc.

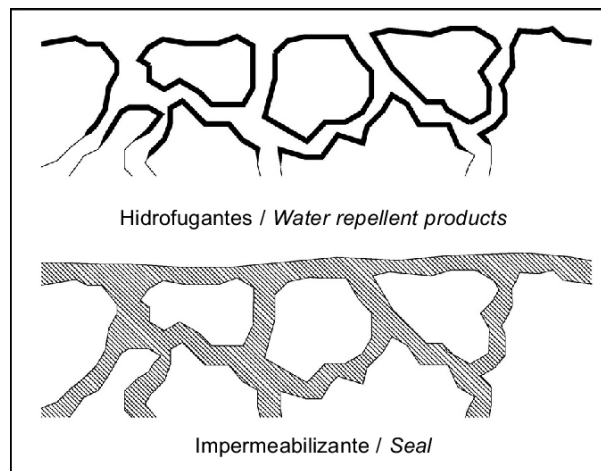
Evidentment, aquestes capes no pretenen respectar la visió de la base, ni la seva transpiració, ja que el seu objectiu és tot al contrari, actuar de “paraigües impermeable de l'edifici” a

---

<sup>29</sup> Fakolith. (2017, novembre). *La hidrofugación. Protección transpirable sin capa, contra el agua y sus consecuencias, para bases minerales*. Fakolith Chemical Systems, S.L.U. Recuperat el 18 d'abril del 2022, de <https://www.fakolith.es/docs/la-hidrofugacion-fakolith-hidrofugantes-micro-y-nano.pdf>

<sup>30</sup> Correa, M. (2022, 17 maig). *Diferencia entre un hidrofugante e impermeabilizantes acrílicos*. Equipo AP. Recuperat el 18 d'abril del 2022, de <http://apexperteam.blogspot.com/2014/12/HidrofugantesVSImpermeabilizantes.htm>

d'aïllant davant la pressió d'aigua. S'utilitza la tècnica de la impermeabilització, a piscines, dipòsits, soterranis, cobertes o qualsevol altre tipus de situació, on amb l'ajuda d'una barrera, sigui amb pintures o altres sistemes, es tracta d'impedir el pas de l'aigua a ambdós sentits (*Íbidem*, 2017).<sup>31</sup>



**Figura 12** - Diferència entre els hidrofugants i impermeabilitzants. © Jesús Ángel Coronado. © Alfonso García-Santos

### 2.3.1. Impermeabilitzants utilitzats com a falsos hidrofugants

A tall de resum, una impregnació hidròfuga o hidrofugant és una protecció transpirable que permet la difusió del vapor d'aigua, a diferència dels impermeabilitzants. Aquests últims creen una pel·lícula protectora que impedeix completament l'entrada d'aigua i humitat i condicionen l'aspecte òptic dels materials de construcció. D'aquí resulta que, en moltes ocasions, s'utilitzen impermeabilitzants com a falsos hidrofugants perquè no es té en compte la diferència entre els productes hidrofugants i els impermeabilitzants.

Aquests productes, venuts com a "invisibles", si bé compleixen només a l'inici la funció d'impedir l'entrada d'aigua, ràpidament es degraden amb l'acció de la humitat i la intempèrie, i contribueixen amb la seva absència de transpiració a la degradació tant de la capa que era inicialment transparent, com de la base on han estat aplicats (*Ídem*, 2017, p.3).<sup>32</sup>

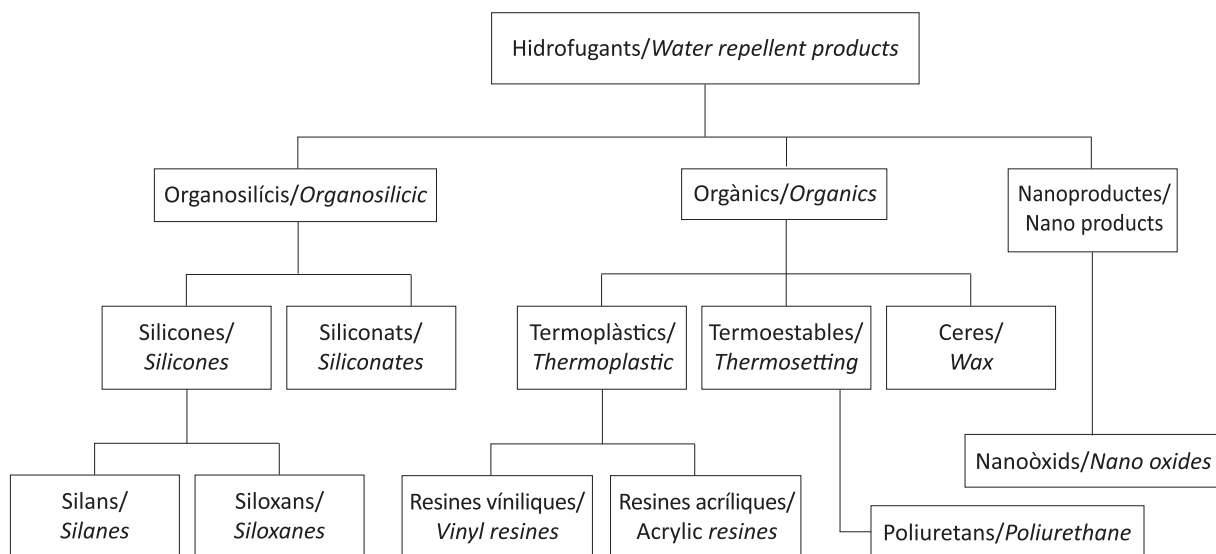
<sup>31</sup> *Íbidem*, 2017.

<sup>32</sup> *Ídem*, 2017, p.3.

## 2.4. Classificació dels productes hidrofugants

Els productes hidrofugants es poden classificar en tres grans grups en funció de la seva composició i naturalesa: els hidrofugants organosilícis, orgànics i inorgànics [Figura 13]. Actualment, els hidrofugants organosilícis són els més utilitzats per la seva durabilitat, aquests a la vegada es poden dividir en dues classes: monocomponents i bicomponents. Els hidrofugants monocomponents s'obtenen a partir d'un alquiltriclorosilà i bàsicament són les silicones, siliconats, silans, siloxans, resines, etc. Pel que fa als hidrofugants bicomponents, s'obtenen a partir de la barreja de dos hidrofugants monocomponents.

D'altra banda, els hidrofugants orgànics es poden agrupar en resines termoplàstiques, abastant principalment les resines viníliques i les resines acríliques, en resines termoestables (poliuretans) i ceres naturals o sintètiques. Finalment, trobem els hidrofugants o superhidrofugants basats en nano òxids, són productes fabricats a partir de nanomaterials que tenen propietats hidrofugants. La majoria s'obtenen per molta mecànica, descomposició tèrmica, etc. «Aquests materials han de ser avaluats a llarg plaç per determinar la seva eficàcia i estabilitat davant les diferents condicions ambientals i/o diferències petrològiques i fisicoquímiques» (Gómez, 2012, p.177).<sup>33</sup>



**Figura 13** - Classificació dels productes hidrofugants o hidrorepel·lents més emprats en l'actualitat. © Jesús Angel Coronado. © Alfonso García-Santos. Actualització (2022): © Maria Isabel Garcia Vilà

<sup>33</sup> Gómez, L. S. V. (2012). *Nanopartículas para la conservación del patrimonio. La conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio*. Instituto de Geociencias (CSIC-UCM). Recuperat el 19 d'abril del 2022, de [https://digital.csic.es/bitstream/10261/46811/1/Curso\\_Geomateriales\\_171\\_180.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/46811/1/Curso_Geomateriales_171_180.pdf)



Segons Coronado i García (2011),<sup>34</sup> existeix una diferent casuística de tipus de polímers utilitzats per les diverses ofertes comercials existents, cadascuna tindrà una tensió superficial específica que interactuarà de manera diferent amb les bases sobre les quals s'apliqui, amb fenòmens d'adherència específics, es degradarà de manera diferent, patirà diversos fenòmens d'envelliment, donant lloc a embrutaments específics per a cada tipus de polímer, i establirà modificacions en la percepció de les coloracions que posseïx cada tipus de base sobre la qual puguin aplicar-se (p.600).

### 2.4.1. Hidrofugants organosilícis

Els productes hidrofugants organosilícis són una impregnació transparent i, per tant, són elements que penetren a través de la porositat del material sobre el qual s'aplica. Aquesta penetració als porus del material i l'adherència a la seva superfície modifiquen les propietats superficials del suport, generant canvis en la percepció de les característiques del material (Horie, 1987).<sup>35</sup>

Des del punt de vista químic, els hidrofugants organosilícis «actuen com a silicats inorgànics, però sense generar subproductes nocius per a la roca, abastant gran multitud de productes derivats de l'àcid silícic (H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>) per substitució dels seus radicals (compostos basats en monòmers amb algun radical lloc)» (De Rosario, 2017, p.68).<sup>36</sup> En els últims anys, han sigut els productes hidrofugants més utilitzats, tot i que poden generar alteracions òptiques en la superfície dels materials. Els hidrofugants organosilícis, es poden classificar en el grup de les silicones i el dels siliconats.

#### 2.4.1.1. Silicones

«Les silicones o silicats orgànics són polímers que inclouen en la composició silici, carboni, hidrogen i oxigen. Aquests compostos, també anomenats alquilcoxilsilans, són derivats dels alcoxilsilans X-(CH<sub>2</sub>)<sub>n</sub>Si(OR)<sub>3</sub> caracteritzant-se per la presència de radicals X= alquil i OR= alcoxi,

---

<sup>34</sup> Coronado, J. A. M., & García, A. S. (2011). *La influencia de los productos hidrofugantes en las modificaciones cromáticas del ladrillo cerámico*. *Materiales de la Construcción*, 61(304), 597–611. Recuperat el 20 d'abril del 2022, de [https://www.researchgate.net/publication/274778829\\_La\\_influencia\\_de\\_los\\_productos\\_hidrofugantes\\_en\\_las\\_modificaciones\\_cromaticas\\_del\\_ladrillo\\_ceramico/download](https://www.researchgate.net/publication/274778829_La_influencia_de_los_productos_hidrofugantes_en_las_modificaciones_cromaticas_del_ladrillo_ceramico/download)

<sup>35</sup> Horie, C. V. (1987). *Materials for conservation: organic consolidants, adhesives and coatings*. Editorial Butterworth.

<sup>36</sup> De Rosario, I. A. (2017). *Eficacia de consolidantes e hidrofugantes de nueva síntesis en rocas graníticas: Optimización de métodos de evaluación (Tesis Doctoral)*. Universidad de Vigo. Recuperat el 20 d'abril del 2022, de [http://www.investigacion.biblioteca.uvigo.es/xmlui/bitstream/handle/11093/802/Eficacia\\_de\\_consolidantes\\_e\\_hidrofugantes.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://www.investigacion.biblioteca.uvigo.es/xmlui/bitstream/handle/11093/802/Eficacia_de_consolidantes_e_hidrofugantes.pdf?sequence=1&isAllowed=y)



R=CH<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>» (*Íbidem*, 2017).<sup>37</sup> Les silicones es poden aplicar com a: 1) silans, que són monòmers de molècula petita que reaccionen químicament i formant un polímer; 2) siloxilans, polímers parcialment polimeritzats amb l'enllaç Si – O – Si; i 3) polisiloxans, agrupen els polímers o resines silicòniques d'enllaç Si-O-Si-O-Si ; depenent del grau de polimerització dels materials dins dels porus de la roca o base mineral.

D'altra banda, els polisiloxans són polímers amb una acció hidrofugant baixa, perquè ja han polimeritzat completament i actuen per l'adherència existent entre les molècules del producte i substrat petri. A més, tenen un poc poder de penetració per l'elevat pes molecular. D'aquí que en restauració, aquests últims no siguin recomanables per a la protecció dels morters utilitzats com a revestiment en estructures i béns del patrimoni arquitectònic i cultural.

Segons Fortes Revilla i Blanco-Varela (2001),<sup>38</sup> el principal agent de deteriorament dels productes hidrofugants són les radiacions ultraviolades, que actuen sobre la zona hidròfoba de la sílica. Les silicones usades habitualment contenen cadenes alquil curtes; que actuen com a agent hidròfob a la superfície dels materials. Aquesta part de la molècula de les silicones es deteriora per l'acció de les radiacions ultraviolades. Actualment, s'estan dissenyant silicones més estables; davant de les radiacions ultraviolades (p.40).

#### 2.4.1.2. Siliconats

Els siliconats són compostos d'hidròxid de sílice basat en monòmers de tipus R-Si(OH)<sub>2</sub>-OMe, R és un radical alquil orgànic i Me un metall alcalí. La reacció que té lloc a la pedra és primer la hidròlisi i posteriorment la polimerització, quedant un radical alquil unit a cada àtom de sílice (*Ídem*, 2018, p.69).<sup>39</sup>

En un altre ordre de funcions, els siliconats tenen una estructura similar a la de la sílice i per això, tenen la capacitat de formar xarxes de sílice lineals. La caracterització del polímer format es deu als grups alquils que romanen sense reaccionar una vegada acabada la polimerització. De manera que:

---

<sup>37</sup> *Íbidem*, 2017.

<sup>38</sup> Fortes, C. R., & Blanco, M. T. V. (2001, juny). *Influencia de tratamientos de hidrofugación en las propiedades de morteros de cal y cal y puzolana*. *Materiales de Construcción*. Instituto de Ciencias de La Construcción Eduardo Torroja, 51(262). Recuperat el 21 d'abril del 2022, de <http://materconstrucc.revistas.csic.es>

<sup>39</sup> *Ídem*, 2017, p.69.



- **Si es parteix d'un tetraalcoxilà:** s'obté únicament un efecte consolidant amb una estructura semblant a la de la sílice.
- **Si es parteix d'un alquiltrialcoxilà:** s'aconsegueix un producte amb propietats consolidants i hidròfugues, atesa la seva estructura tridimensional amb grups orgànics.
- **Si es parteix d'un dialquidialcoxilà:** el resultat és un polímer lineal amb dos grups orgànics a cada àtom de silici. Proporcionarà un efecte únicament hidròfug (Villegas, Baglioni & Sameño, 2003).<sup>40</sup>

## 2.4.2. Hidrofugants orgànics

«Es tracta dels mateixos productes utilitzats com a consolidants (resines termoplàstiques, termoestables i ceres). El mer fet de ser orgànic ja li confereixen caràcter hidrofugant» (*Íbidem*, 2017).<sup>41</sup> «Els més adequats són aquells que aconseguen proporcionar més eficàcia a la superfície de la pedra» (Rivas, 2021, p.22).<sup>42</sup> Convé assenyalar que la seva utilització comporta una sèrie d'inconvenients que s'han de tenir en compte.

Els hidrofugants orgànics tenen un baix poder de penetració i poden donar lloc a la impermeabilització de la pedra o base mineral si no s'apliquen correctament. A més, són productes que presenten una baixa resistència a les radiacions UV i amb el temps pateixen foto-oxidació a causa dels fenòmens de *cross-linking* i acaben degradant-se amb facilitat.

### 2.4.2.1. Resines termoplàstiques

Les resines termoplàstiques són resines sintètiques que deriven del petroli mitjançant la polimerització. «Poden aplicar-se sobre la pedra ja en forma de polímers, o fer-ho en forma de monòmers i que es produeixi a la pròpia pedra la polimerització» (*Ídem*, 2021, p.18).<sup>43</sup> Dins del grup de les resines termoplàstiques, trobem les resines viníliques i les resines acríliques:

---

<sup>40</sup> Villegas, R., Baglioni, R., & Sameño, M. (2003). *Tipología de Materiales para Tratamiento. En Varios, Metodología de Diagnóstico y Evaluación de Tratamientos para la Conservación de los Edificios Históricos*. Comares. Recuperat el 21 d'abril del 2022, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=791127>

<sup>41</sup> *Íbidem*, 2017.

<sup>42</sup> Rivas, S. A. P. (2021). *Tratamientos de conservación de monumentos en piedra. Precipitación biológica de carbonato cálcico como método alternativo (TFG)*. Universidad de Sevilla. Recuperat el 21 d'abril del 2022, de <https://idus.us.es/handle/11441/125149>

<sup>43</sup> *Ídem*, 2021, p.18.



- **Resines viníliques:** Des del punt de vista químic, les resines viníliques són copolímers vinílics, basats en acetat de vinil, etilè-acetat de vinil (EVA) i acetat de polivinil (PVA), que «s'obtenen a partir de monòmers en els quals un o més dels àtoms d'hidrogen de l'etilè han estat reemplaçats per un altre àtom o grup atòmic» (*Polímeros vinílicos*, 2022).<sup>44</sup> Les resines viníliques tenen un baix poder de penetració i presenten poca resistència a les radiacions ultraviolades i generen alteracions òptiques sobre la superfície tractada. Tot i que el seu ús cada cop és més restringit, les resines viníliques, que tenen propietats hidròfugues i impermeabilitzants, encara es continuen utilitzant per consolidar, hidrofugar o impermeabilitzar superfícies.
- **Resines acríliques:** Els polímers acrílics més utilitzats han estat el polimetacrilat ( $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{-OOH}$ ), el polimetilmetacrilat ( $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{-COO}(\text{CH}_3)$ ) i el polibutylmetacrilat ( $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{-COO}(\text{CH}_2)_3\text{CH}_3$ ), obtinguts a partir de la polimerització dels àcids i èsters metacrílic i acrílic i els seus derivats (Fort, 2007).<sup>45</sup>

Les resines acríliques presenten una gran resistència química i mecànica, estabilitat tèrmica i una baixa emissió de VOC's. Actualment, la indústria ha millorat la formulació amb la introducció de copolímers acrílics autoreticulables. No obstant això, «les resines acríliques ocasionen canvis de color, pèrdua d'adherència al substrat i reducció de la permeabilitat al vapor d'aigua i poden impermeabilitzar la roca» (Chiantore & Lazari, 2001).<sup>46</sup>

#### 2.4.2.2. Resines termoestables

«Les resines termoestables són les que canvien irreversiblement sota la influència de la calor, la llum, els agents fotoquímics i els agents químics, passant d'un material fusible i soluble a un altre no fusible i insoluble, per la formació d'un reticle tridimensional covalent» (Ramis, s.f., p.7).<sup>47</sup> Les

---

<sup>44</sup> *Polímeros vinílicos*. (2022). Polímeros vinílicos. pslc.ws. Recuperat el 21 d'abril del 2022, de <https://www.pslc.ws/spanish/vinyl.htm>

<sup>45</sup> Fort, R. (s.f.). *Polímeros sintéticos para la conservación de materiales pétreos*. Instituto de Geología Económica (CSIC-UCM). Facultad de CCC. Geológicas. Recuperat el 21 d'abril del 2022, de [https://digital.csic.es/bitstream/10261/8340/1/Fort\\_Fort\\_Pol%C3%ADmeros.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/8340/1/Fort_Fort_Pol%C3%ADmeros.pdf)

<sup>46</sup> Chiantore, O., & Lazari, M. (2001). *Photo-oxidative stability of paraloid acrylic protective polymers*. Polymer. Recuperat el 21 d'abril del 2022, de [https://www.researchgate.net/publication/229198849\\_Photo-oxidative\\_stability\\_of\\_paraloid\\_acrylic\\_protective\\_polymers](https://www.researchgate.net/publication/229198849_Photo-oxidative_stability_of_paraloid_acrylic_protective_polymers)

<sup>47</sup> Ramis, J. (s.f.). *Características de los termoestables*. Tesis en red. Recuperat el 21 d'abril del 2022, de <https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/6686/06Txxrj6de14.pdf?sequence=6>

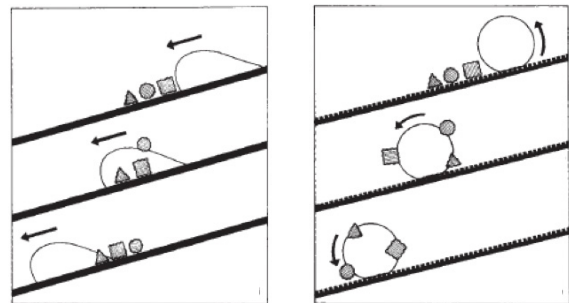
### 2.4.2.3. Ceres

La cera «suposa una de les primeres mesures utilitzades en la protecció de la pedra. Es tracta d'un derivat del petroli, que es pot aplicar dissoltes en una solució o fosa. Presenta dos desavantatges principals: l'adhesió de la pols i l'estovament a altes temperatures» (*Ídem*, 2021, p.18).<sup>48</sup> Bàsicament trobem les ceres naturals (cera d'abella, etc.), usades des de l'antiguitat. En restauració, les ceres naturals han quedat en desús, ja que les ceres sintètiques presenten un millor envelliment i no s'esgrogueixen tant. Les ceres actuen com a protector de la pedra, formen una pel·lícula estable i flexible, l'inconvenient principal és que aporten brillantor a la superfície. A més, es degraden amb facilitat per l'acció dels raigs UV.

### 2.4.4. Superhidrofugants

«Els recobriments superhidrofugants sobre substrats petris han acaparat especial atenció per part de molts restauradors, ja que presenten nombroses aplicacions a més de la mateixa hidrofugació de la roca, com a propietats autonetejants, antiadhesió, etc.» (*Ídem*, 2017, p.70).<sup>49</sup> «Les superfícies superhidròfobes són extremadament difícils d'humitejar (altament hidròfobes). En general es considera que una superfície d'aquest tipus presenta angles de contacte que excedeixen 150° i una histèresi de l'angle de contacte per sota de 10°» (Gao i McCarthy, 2009).<sup>50</sup>

«El resultat de tenir superfícies amb un angle de contacte entre gota i superfície superior a 150° i que repel·leixen totalment l'aigua és que s'obtenen superfícies autonetejants [Figura 14], antihumitat, antiadhesió, anticorrosió, resistents a les taques i la proliferació d'organismes» (Fernández, 2021, p.10).<sup>51</sup> La superhidrofobicitat s'aconsegueix modificant la rugositat de la superfície, és el que es coneix com 'efecte lotus' o 'efecte *Leidenfrost*'.



**Figura 14** - Efectes autonetejants dels superhidrofugants. © Agustín Fernández Cañete

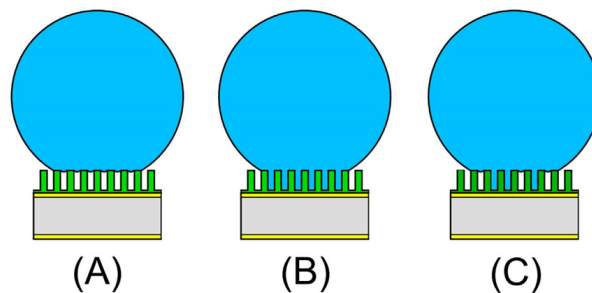
<sup>48</sup> *Ídem*, 2021, p.18.

<sup>49</sup> *Ídem*, 2017, p.70.

<sup>50</sup> Gao, L., & McCarthy, T. J. (2009, julio). *An attempt to correct the faulty intuition perpetuated by the Wenzel and Cassie "laws"*. Langmuir. <https://doi.org/10.1021/la901416m>

<sup>51</sup> Fernández, A. C. (2013, septiembre). *Estudio de la Hidrofobicidad y Autolimpieza en Materiales con Nanotratamientos Superficiales (TFG)*. Recuperat el 22 d'abril del 2022, de [https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2013/hdl\\_2072\\_234675/PFC\\_AgustinFernandezCanete.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2013/hdl_2072_234675/PFC_AgustinFernandezCanete.pdf)

«Per garantir un comportament adequat de l'aigua en una superfície d'alta o baixa energia, s'han proposat diversos estats d'humectació per explicar la humectabilitat de superfícies sòlides, considerant la química de la superfície i la topografia d'una manera senzilla, en termes d'angles de contacte i rugositat superficial» (Durán i Laroche, 2018, p.2).<sup>52</sup> Tal i com assenyala el mateix Cassie (1948),<sup>53</sup> la llei de Cassie, o l'equació de Cassie, descriu l'angle de contacte efectiu  $\theta_c$  per a un líquid en una superfície químicament heterogènia. «Els angles de contacte són importants ja que quantifiquen la humectabilitat d'una superfície, la naturalesa de les interaccions intermoleculars sòlid-fluid» (Henderson, 2000).<sup>54</sup>



**Figura 15** - Estats d'humectació. (A) Efecte d'atrapament de l'aire efecte Cassie. (B) Estat de Wenzel. (C) Estat parcial de Cassie. © Junwei Su. © Majid Charmchi. © Hongwei Sun

Quan una gota interacciona amb una superfície sòlida, es creen energies i tensions (tensió superficial, interfacial, etc.) entre el líquid existent i la superfície sòlida. Aquesta relació geomètrica és definida per l'equació de Young, de Wenzel i Cassie-Baxter. Els efectes d'humectabilitat es poden classificar en: efecte d'atrapament de l'aire o efecte Cassie, l'estat de Wenzel i l'estat d'impregnació de Cassie [Figura 15].

Un criteri alternatiu recent per a l'estat de Cassie-Baxter afirma que l'estat de Cassie-Baxter existeix quan es compleixen els 2 criteris següents: 1) Les forces de la línia de contacte superen les forces corporals del pes de la gota sense 2) Les microestructures són prou altes per evitar que el líquid que uneix les microestructures perquè no toquin la base de les microestructures (Extrand, 2004).<sup>55</sup>

<sup>52</sup> Durán, I. R., & Laroche, G. (2018). *Water drop-surface interactions as the basis for the design of anti-fogging surfaces: Theory, practice, and applications trends. Advances in colloid and interface science.* <https://doi.org/10.1016/j.cis.2018.11.005>

<sup>53</sup> Cassie, A. B. D.(1948). *Ángulos de contacto.* Discusiones de la Sociedad Faraday. <https://doi:10.1039/>

<sup>54</sup> Henderson, J. R. (2000). *Mecánica estadística de la ley de Cassie.* Física molecular. 98 (10). <https://doi:10.1080/00268970009483335>

<sup>55</sup> Extrand, C. W. (2004, juny). *Criterios para superficies ultralofóbicas.* Langmuir. <https://doi.org/10.1021/la036481s>



#### 2.4.4.1. Nano òxids

«Els superhidrofugants a base de nanopartícules de sílice o polímers compleixen una doble funció: eviten l'entrada d'aigua i modifiquen la rugositat superficial. L'acció de les nanopartícules proporciona una protecció superficial, amb el que es consegueix millorar les propietats hidrofugants dels materials» (Ídem, 2012, p.176).<sup>56</sup> Els superhidrofugants, a diferència dels hidrofugants tradicionals no creen capes, respecten la transpirabilitat dels materials i no modifiquen el seu aspecte. «La tecnologia de nanopartícules fa que els hidrofugants en ser polvoritzats penetrin en profunditat als porus dels materials permetent impermeabilitzar-los des de l'interior ja que els vidres que crearan són infinitament més petits que els tradicionals» (Antihumedades, 2021).<sup>57</sup>

Convé assenyalar que no tots els tractaments de nanopartícules han resultat exitosos en alguns materials, és ben cert que encara s'estan fent estudis en revestiments de calç i puzzolanes per aconseguir millorar les propietats dels productes hidrofugants per al tractament superficial de façanes i parets inclinades i avaluar la seva eficàcia i durabilitat a llarg plaç. Els hidrofugants basats en nano òxids presenten una alta capacitat d'hidrofugació. «A causa de la seva composició, les gotes rellisquen sobre la superfície amb molta facilitat, arrossegant a la vegada la pols o restes de brutícia que poguessin estar presents en aquesta, permetent tenir la superfície neta molt més temps» (Ídem, 2012, p.177).<sup>58</sup>

---

<sup>56</sup> Ídem, 2012, p.176.

<sup>57</sup> Humedades, A. (2021, agost). *Descubre porqué la nano-tecnología está revolucionando la construcción*. Anti-humedades.es: Soluciones para los problemas de humedad en las viviendas. Recuperat el 23 d'abril del 2022, de <https://antihumedades.es/blog/hidrofugos-nanoparticulas-revolucionan-la-impermeabilizacion-de-fachadas/>

<sup>58</sup> Ídem, 2012, p.177.



## 2.5. Tècniques d'aplicació dels productes hidrofugants

Les façanes de pedra no són uniformes, presenten irregularitats i juntes entre les diferents peces, que han estat segellades amb un morter no elàstic ni impermeable per la qual cosa, a causa dels moviments estructurals de la façana i pels canvis de temperatura, poden formar esquerdes i fissures que juntament amb la porositat de la pedra formen les vies d'entrada d'aigua principals.

És molt important, com a mesura preventiva, revisar i impermeabilitzar la façana de pedra abans que es presenti el problema de filtracions i les humitats s'hagin estès, ja que el cost i el tractament de la reparació dels danys produïts per la humitat a la pedra i a l'interior de l'habitatge sempre serà més gran que el cost de la impermeabilització inicial realitzada, si se segueix un manteniment adequat amb un hidrofugant per a pedra (Coatings, 2020).<sup>59</sup>

L'aplicació d'un tractament superficial per protegir les façanes depèn d'una sèrie de variables que garanteixen la seva eficàcia i durabilitat. En primer lloc, s'ha d'estudiar l'estat de conservació i detectar les possibles alteracions que pugui tenir la façana. Convé recordar que els estudis previs defineixen els procediments i materials a emprar per a la rehabilitació i restauració de les façanes.

«L'aplicació de l'impermeabilitzant hidrofugant per a pedra s'ha de fer sobre una superfície sanejada, ferma, neta i seca, lliure de substàncies que impedeixin que l'hidròfug penetri als porus» (*Íbidem*, 2020).<sup>60</sup> És per tot això que serà necessari sanejar la superfície, eliminar la pols i la brutícia acumulada sobre la superfície de la pedra o base mineral i extreure les sals, en cas d'existir.

En un altre ordre de casos, si la façana patís biodeteriorament, caldria aplicar un algicida. Cal tenir en compte que si s'utilitza aigua per realitzar la neteja o s'aplica qualsevol altre producte per tractar la superfície, serà necessari esperar un temps prudencial abans d'aplicar el tractament protector i no es produeixin incompatibilitats entre els materials. Per exemple, si es du a terme una neteja humida, caldria esperar una setmana per aplicar l'hidròfug. En canvi, si s'aplica un tractament consolidant, el temps d'espera seria d'un mes com a mínim.

---

<sup>59</sup> *Cómo impermeabilizar una fachada con hidrofugante para piedra, 100% eficacia.* (2020, maig). Impermeabilizantes y Pinturas. Coatings. Recuperat el 23 d'abril del 2022, de <https://fepsaimpermeabilizantes.blog/hidrofugante-para-piedra/>

<sup>60</sup> *Íbidem*, 2020.



Diversos autors (2020)<sup>61</sup> assenyalen que:

El producte s'ha de polvoritzar o impregnar sobre la superfície, amarant molt bé la paret fins a la total saturació del suport, és a dir aplicar fins que la façana de pedra no admeti més quantitat de producte. L'hidrofugant s'introdueix als porus de la pedra, sense deixar capa superficial. S'hi aplica una primera capa, es deixa assecar fins que estigui sec al tacte, aproximadament unes dues o tres hores i es pot donar una segona capa. Normalment amb l'aplicació de dues mans s'aconsegueix la hidrofugació completa i la façana de pedra quedarà totalment protegida i impermeabilitzada. Depenent de les condicions ambientals, l'assecatge total es produeix entre 8 i 24 hores.

En façana, els productes hidrofugants es poden aplicar de dues maneres: per impregnació, utilitzant una brotxa o rodet i per polverització, amb una motxilla sulfatadora o un polvoritzador. Abans d'aplicar el tractament hidròfug en façana, s'han de localitzar les zones per les quals circulen les aigües d'escorrentia i tenir clar en quines zones es genera la caiguda d'aigües, ja que s'ha de considerar que augmentar la velocitat d'escorrentia de la façana pot causar una erosió superficial pronunciada en les zones, on l'aigua de la pluja precipita i circula més ràpidament.

Així mateix, no sempre ens interessarà aplicar el producte hidrofugant pur a tota la façana. En la majoria dels casos, s'ha de valorar la possibilitat de tractar les zones sanes i les que presenten problemes d'humitat de forma diferent. Entenent que si una part no es troba exposada a l'aigua, no serà necessari hidrofugar-la o s'hidrofugarà de forma parcial. En façanes que presentin problemes d'humitat, sempre existirà l'opció de tractar algunes parts aplicant el producte diluït en diferents concentracions. Tanmateix, si s'utilitza una mínima concentració del producte hidrofugant, aquest perdrà la seva capacitat d'hidrofugar i no actuarà correctament.

Com ja hem dit, totes les façanes presenten discontinuïtats, per tant, les zones que no tenen accés al rentat de l'aigua, acumularan més brutícia a la llarga, tornant el material químicament més reactiu en funció de les substàncies que es vagin dipositant. També cal tenir en compte que si la façana és de pedra polida, les úniques vies d'aigua per on es poden produir les filtracions seran les juntes, ja que en una superfície polida no hi ha porus que permetin l'entrada d'humitat. L'hidròfug caldrà aplicar-lo només a les juntes (*Íbidem*, 2020).<sup>62</sup>

---

<sup>61</sup> *Íbidem*, 2020.

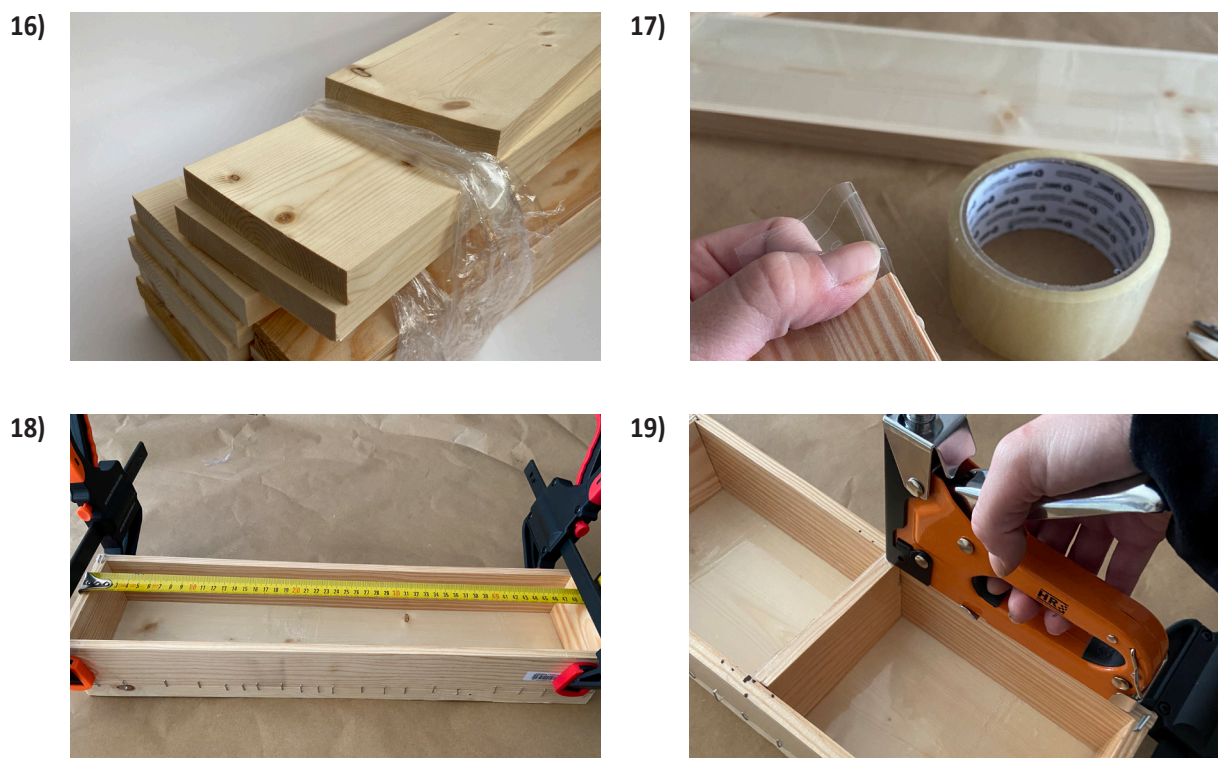
<sup>62</sup> *Íbidem*, 2020.

## **Capítol III. Materials i mètodes**

### 3.1. Provetes d'assaig

En el present apartat, s'exposen tots els aspectes relacionats amb la preparació de les provetes d'assaig, des del nombre i dimensions de les provetes d'assaig, passant per la selecció dels materials i les dosificacions fins al preconditionament de les provetes. També s'explica de forma breu el procés de fabricació dels motlles i les proves prèvies realitzades per al disseny de les dosificacions. Per a la preparació de les provetes d'assaig, s'han confeccionat vuit motlles de tres provetes (500 x 120 x 77 mm) i dos motlles petits per a dues provetes (400 x 120 x 7,7 mm).

Cada compartiment interior mesura 160 x 100 x 55 mm. De manera que la mida final de les provetes és de 150 x 100 x 20 mm. A continuació, es descriu el procediment dut a terme per a la confecció dels motlles que serviran per fabricar les provetes de morter que després seran analitzades durant la realització dels assajos per determinar l'angle de contacte i l'absorbència



**Figura 16** - Llistons de fusta de pi que serviran per a la fabricació dels motlles. **Figura 17** - La fusta es protegeix amb cinta d'embalatge, perquè no es podrà utilitzar un desemmotllant. **Figura 18** - Es mesura la llargada per calcular que tots els espais interiors siguin iguals. **Figura 19** - S'utilitzen grapes per facilitar el desemmotllament. © Maria Isabel Garcia Vilà

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022

del materials hidrofugats i sense hidrofugar sobre diferents tipus de bases minerals. En primer lloc, es tallen a mida els llistons de fusta amb l'ajuda d'una caladora o una serra de cinta o de taula [Figura 16]. Convé assenyalar que els llistons són de fusta de pi raspallada i presenten una superfície llisa i polida, no obstant, els motlles podrien haver estat construïts amb un contraxapat lacat, PVC, etc. D'altra banda, no podem oblidar que la fusta és un material porós, per tant, és necessari interposar una barrera entre el suport del motlle i la colada de morter per evitar que s'adhereixin entre ells durant el procés d'assecatge.



**Figures 20 i 21** - Motlles que serviran per a la fabricació de les provetes. © Maria Isabel Garcia Vilà

En circumstàncies normals, utilitzariem algun tipus de desemmotllant. En aquest cas, hem de tenir en compte que qualsevol producte que entri en contacte amb la superfície de les provetes podria influir en els resultats dels assajos. Per facilitar el desemmotllament, s'ha utilitzat cinta reparadora de fuites per a la protecció de la base (1500 x 100 mm) i cinta d'emalatge (2500 x 48 mm) per a les parets del motlle [Figura 17]. A continuació, es construeix l'estructura exterior i es prenen mesures per definir els espais interiors i calcular que totes les provetes tinguin la mateixa mida [Figura 18]. Un altre punt important és que el sistema d'unió dels llistons ha de ser fàcilment reversible i a la mateixa vegada, ha de ser estable perquè no es produeixin filtracions i el material s'escoli pels intersticis.

És per tot això que es va decidir utilitzar com a sistema una grapadora compacta per unir els llistons i muntar les estructures dels motlles, assegurant que es podrien enretirar fàcilment sense causar cap tipus de dany amb unes alicates de punta plana i corbada, com les que s'utilitzen per joieria. D'altra banda, es van utilitzar grapes de 22/6-24/6, si el llarg de la pota de la grapa supera els 0,9 mm



**Figura 22** - Les rajoles s'hidraten durant un mínim de 24 hores. **Figura 23** - Es tamisa la sorra per distribuir la mida dels àrids en funció de la mida d'obertura de la malla. **Figura 24** - S'utilitza una balança i un vas dosificador per calcular el pes i el volum dels àrids i la calç. **Figura 25** - Es barregen els àrids i la calç amb una paleta Norte. **Figura 26** - S'aplica el morter a la rajola amb una paleta madrilenya. **Figura 27** - S'aplana i allisa la superfície amb una espàtula ample. © Maria Isabel Garcia Vilà

s'assumeix el risc de traspasar el suport. Quan ja tenim tots els motlles confeccionats, es realitzen proves per dissenyar la dosificació i determinar la granulometria de les provetes. En total, s'han realitzat nou mostres variant les dosificacions per finalment seleccionar la mostra més adequada.



**Figura 28** - Lliscat abans d'endurir. **Figura 29** - Procés d'assecatge de les mostres. **Figura 30** - Rajoles amb mostres. © Maria Isabel Garcia Vilà

Per a la realització de les proves, primerament s'han posat a hidratar rajoles ceràmiques durant 24 hores [Figura 22] per facilitar l'adherència del morter amb el suport i que no es produïxin fissuracions durant el procés d'assecatge de la base. A continuació, s'utilitzen una sèrie de tamissos de malla quadrada (obertura 4-1 mm  $\varnothing$ ) per tamisar la sorra [Figura 23]. En aquest procediment, s'han adaptat algunes de les recomanacions proposades per la norma NLT-104/91 *Granulometria de suelos por tamizado*.

Un cop tamisada la sorra rentada i assecada al sol durant una setmana, es calculen els volums amb un vas dosificador i es pesen amb exactitud els grams de cadascun dels àrids fent servir una balança de precisió [Figura 24]. Els àrids es barregen en sec de major a menor i per últim, s'afegeix la calç hidràulica en pols [Figura 25]. Es van fer proves fent servir una dosificació 1:4 / 1:5.



**Figura 31** - (a l'esquerra) Rajola amb mostres. **Figura 32** - (a la dreta) Textura de la mostra escollida (Mostra AA-01). © Maria Isabel Garcia Vilà

Un cop s'ha afegit l'aigua i preparat la mescla de morter, s'aplica el morter sobre la rajola prèviament humectada amb l'ajuda d'una paleta madrilenya [Figura 26] i es llisca la superfície amb una plana o espàtula ampla [Figura 27]. Durant el procés d'assecatge, s'han controlat les variables de temperatura i humitat relativa. Al cap de tres dies, ja presentaven l'enduriment i carbonatació suficient per a poder valorar els resultats de les proves realitzades i escollir la dosificació i granulometria dels àrids per a la fabricació de les provetes que serviran per dur a terme els experiments.

En total, s'han fet servir tres rajoles [Figura 30] i s'han lliscat tres morters en cadascuna [Figures 28 i 31], per tant, s'han obtingut nou mostres diferents [Figura ]. En primer lloc, s'ha provat d'augmentar la quantitat de sílice (A-01, A-02, A-03), la quantitat de pols de marbre (AA-01) la sorra de platja o la fina (AA-02, AA-03, AA-01\_01 i AA-01\_03) i la graveta (AA-01\_02). Finalment, la mostra escollida és la que té més pols de marbre (mostra AA-01) [Figura 32]. Per a la fabricació de les provetes, s'ha utilitzat una dosificació 1:5 i relació aigua:calç és de 0,66.



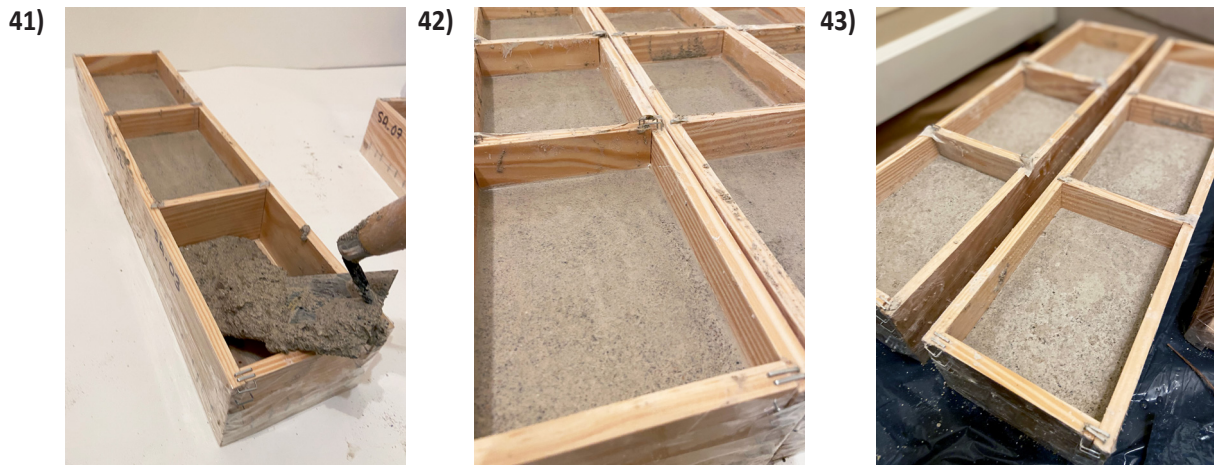
**Figura 33** - Materials emprats per a la fabricació de les provetes. **Figura 34** - Tamisat dels àrids de platja o riu. **Figura 35** - Es pesen les quantitats necessàries amb una balança de precisió. **Figura 36** - Igual que en el procediment anterior, es barregen en sec els àrids i la calç. © Maria Isabel Garcia Vilà



**Figura 37** - Es barregen els àrids, el lligant i l'aigua fent servir una paleta. **Figures 38 i 39** - Per obtenir una pasta homogènia ens podem ajudar d'una vareta mescladora acoblada a un trepant. **Figura 40** - El morter ha de tenir una consistència òptima per la colada. © Maria Isabel Garcia Vilà

El procediment és molt similar a l'anterior, l'única diferència és que es treballa amb quantitats més grans. Com hem fet abans, el primer pas és tamisar la sorra [Figura 34] per obtenir la granulometria dels diferents àrids (1-2 mm Ø). A continuació, es pesen les quantitats necessàries (ja no es fan servir volums) [Figura 35] per a confeccionar nou provetes per cada tipus de calç. El pas següent és afegir els àrids de major a menor i finalment s'incorpora la calç en pols, es barreja en sec amb l'ajuda d'una paleta *Norte* [Figura 36].

Després, s'afegeix l'aigua i es barreja amb la mateixa paleta [Figura 37], amb una batedora o una mescladora helicoidal adaptada a un trepant convencional [Figures 38 i 39] fins a aconseguir una mescla homogènia i consistent, que sigui apte per realitzar la colada, però tampoc massa líquida [Figura 40]. Aquest procés es repeteix dos cops més per obtenir les 27 provetes de calç hidràulica de duresa NHL 3,5 de tres cases comercials diferents (Saint-Aistier®, Comcal® i el Tigre®) [Figura 33]. Un cop preparada la mescla, es van omplir els motlles fins a la meitat aproximadament [Figura 41].



**Figura 41** - S'omplen els motlles fins a la meitat amb la pasta preparada. **Figura 42** - S'elimina l'excés d'aigua acumulada sobre la superfície. **Figura 43** - Provetes durant el procés de carbonatació inicial. © Maria Isabel Garcia Vilà

Per a la fabricació de les provetes es va decidir emprar calç hidràulica, perquè ja sabem que la calç amarada pot tardar fins a tres mesos en aconseguir la carbonatació completa, per tant, es pren aquesta decisió per qüestions de temps i viabilitat dels estudis realitzats. Pel que fa al procés d'assecatge, les mostres es van deixar assecar a una temperatura de  $(19 \pm 2)^\circ\text{C}$  i una humitat del 70-80% durant un període de 28 dies per a aconseguir la completa carbonatació de la calç [Figures 44 i 45]. Durant les primeres hores, es va eliminar l'excés d'aigua acumulada sobre la superfície [Figura 42].



**Figura 44** - (A l'esquerra) Provetes el primer dia d'assecatge. **Figura 45** - (A la dreta) Provetes després de 28 dies d'assecatge. A simple vista, es poden observar els canvis de coloració experimentats durant el procés de carbonatació de les provetes. © Maria Isabel Garcia Vilà

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022

### 3.1.1. Nombre i dimensions de les provetes d'assaig

En el present apartat, s'exposen algunes generalitats sobre la fabricació i preacondicionament dels espècimens de laboratori fabricats. Per a la realització dels assajos, s'han fabricat 27 provetes [Figura 46] complint amb els requisits de les Normes Europees EN 15802:2009 i EN 16302:2013. D'acord amb això, el nombre i les dimensions de les provetes depenen de l'heterogeneïtat del material. Segons la norma EN 15802:2009, el nombre mínim de provetes per testar cada producte són tres. Tenint en compte que s'han seleccionat tres tipus de calç diferents, de les cases comercials Saint-Aistier®, Comcal® i el Tigre®, de la mateixa duresa NHL 3,5 i s'han elaborat tres sèries de nou provetes per cada tipus de calç. En total, sumen 27 provetes o espècimens de laboratori.

Les dimensions de les provetes són 150 x 100 x 20 mm. Les Normes no especifiquen les dimensions que han de tenir les provetes. Només fa referència al fet que totes les dimensions, han de tenir una tolerància de 0,5 mm. Així mateix, la superfície d'assaig ha de ser plana i homogènia, sense fissures visibles, per poder realitzar les anàlisis. Per tant, les provetes han de tenir dues cares paral·leles. També es recomana que el gruix no superi els 20 mm. D'altra banda, la superfície d'assaig es divideix en quatre per poder aplicar el producte diluït en diferents concentracions i poder deixar una zona sense tractar. Per cada mostra, la superfície d'assaig és de 40 cm<sup>2</sup>, entenent que l'àrea de la superfície no és menor que l'àrea de la superfície analitzada.



**Figura 46** - Provetes o espècimens de laboratori que serviran posteriorment per a la realització dels assajos. © Maria Isabel Garcia Vilà

### 3.1.2. Selecció dels materials i dosificacions

En la mesura del que sigui possible, ens proposem d'explicar els aspectes principals dels materials emprats per a la fabricació del morter: l'aigua, la calç i els àrids. És així com també es detalla la granulometria emprada per al disseny de les dosificacions en les proves prèvies i la mostra que finalment ha estat escollida. En un altre ordre de funcions, s'ha seleccionat una dosificació 1:5 per a la fabricació de les provetes fent servir calç hidràulica, àrids i pols de marbre, amb unes mesures 100 x 160 x 20 mm per als assajos efectuats durant la investigació.

- **Aigua:** S'ha utilitzat aigua potable per hidratar la calç.
- **Àrids:** La Norma NCh 163 - *Áridos para morteros y hormigones. Requisitos generales*,<sup>63</sup> estableix que els àrids necessàriament han d'estar constituïts per partícules dures, de forma i mida estables i han d'estar netes i lliures de terrossos, partícules toves o laminades, argiles, impureses orgàniques, sals i altres substàncies que per la seva naturalesa o quantitat afecten a la resistència o la durabilitat de morters i formigons (p.3).

Els agregats incorporats al morter són: sílice, sorra de riu o de platja (1-4 mm Ø) i pols de marbre. D'acord amb el que estableix la Norma NLT-104/91, la sorra de riu o de platja s'ha tamisat per determinar la granulometria i calcular el percentatge d'àrids gruixuts i fins.

- **Granulometria:** La granulometria emprada correspon a la sorra tamisada amb amb una sèrie de tamissos. Com ja s'ha dit, es realitzen una sèrie de proves per a la caracterització dels àrids i determinació de la granulometria. Finalment, s'ha escollit la mostra AA-01 [Figura 47].

Mostra AA-01			
	Volum	Pes	x12 (9 provetes)
Calç NHL3,5	1	83	996
Marbre	2	300	3600
Sorra platja (2 mm)	1	160	1920
Sorra fina (1 mm)	1	136	1632
Sílice	0,5	70	840
Graveta 3-4	0,5	68	816
H2O		125	1500

**Figura 47** - Dosificació de la mostra AA-01. © Maria Isabel Garcia Vilà

A continuació, es mostra per ordre, les taules amb les dosificacions emprades durant les proves realitzades [Figura 48] i els assajos granulomètrics dels àrids emprats [Figures 49 i 50].

<sup>63</sup> NCh 163 (1999). *Áridos para morteros y hormigones. Requisitos generales*. Instituto Nacional de Normalización. República de Chile.



<b>Mostra A-01</b>		
	Volum (u/ml)	Pes (g)
Calç NHL3,5	1	83
Marbre	1	150
Sorra platja (2 mm)	1	121
Sorra fina (1 mm)	1	158
Sílice	0,5	84
Graveta (3-4 mm)	0,5	76
H2O	95 ml	

<b>Mostra A-02</b>		
	Volum (u/ml)	Pes (g)
Calç NHL3,5	1	86
Marbre	1	141
Sorra fina (1 mm)	1	139
Sílice	2	314
Graveta (3-4 mm)	1	144
H2O	105 ml	

<b>Mostra A-03</b>		
	Volum (u/ml)	Pes (g)
Calç NHL3,5	1	97
Marbre	1	174
Sorra fina (1 mm)	1	144
Sílice	2	328
H2O	110 ml	

<b>Mostra AA-02</b>		
	Volum (u/ml)	Pes (g)
Calç NHL3,5	1	80
Marbre	1	158
Sorra platja (2 mm)	2	220
Sorra fina (1 mm)	2	240
H2O	130	

<b>Mostra AA-03</b>		
	Volum (u/ml)	Pes (g)
Calç NHL3,5	1	90
Marbre	1	148
Sorra platja (2 mm)	2	258
Sorra fina (1 mm)	1	160
Sílice	0,5	77
Graveta (3-4 mm)	0,5	76
H2O	135	

<b>Mostra AA-01_01</b>		
	Volum (u/ml)	Pes (g)
Calç NHL3,5	1	87
Marbre	1	170
Sorra platja (2 mm)	2	236
Sorra fina (1 mm)	1	159
Sílice	0,5	77
Graveta (3-4 mm)	0,5	68
H2O	120	

<b>Mostra AA-01_02</b>		
	Volum (u/ml)	Pes (g)
Calç NHL3,5	1	99
Marbre	1	157
Sorra platja (2 mm)	1	152
Sorra fina (1 mm)	1	150
Sílice	1	122
Graveta (3-4 mm)	1	138
H2O	120	

<b>Mostra AA-01_03</b>		
	Volum (u/ml)	Pes (g)
Calç NHL3,5	1	83
Marbre	1	134
Sorra platja (2 mm)	1	101
Sorra fina (1 mm)	2	205
Sílice	0,5	129
Graveta (3-4 mm)	0,5	55
H2O	130	

**Figura 48** - Dosificacions de les proves realitzades. D'esquerra a dreta: mostra A-01, A-02, A-03, AA-02, AA-03, AA-01\_01, AA-01\_02, AA-01\_03. © Maria Isabel Garcia Vilà

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022

U.N.E.	Tamissos		Retingut entre tamissos		Passa en mostra total	
	A.S.T.M.		g part assajada	g mostra total	g	%
	Designació	Obertura mm				
4	N.º 5	4,00	51	500	449	89,8
2	N.º 10	2,00	59	500	390	78
1	N.º 18	1,00	156	500	234	46,8
0,63	N.º 30	0,59	163	500	71	14,2

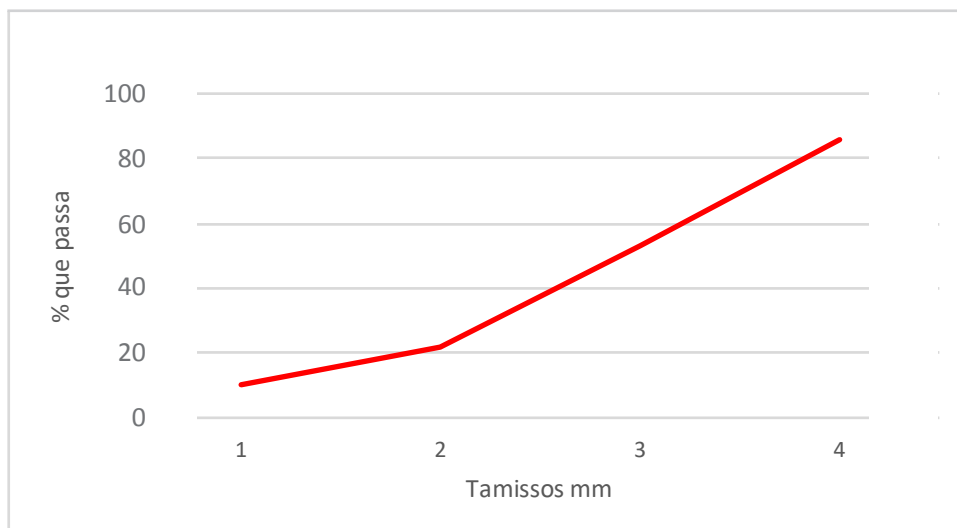
**Figura 49** - Anàlisi granulomètrica de sorra de riu o de platja per tamisat. © Maria Isabel Garcia Vilà

La granulometria emprada per a les dosificacions [Figura 49], es correspon a la sorra de riu o de platja tamisada mitjançant diferents malles: de 4/0,63 i número de tamissos respectivament 5, 10, 18 i 30. L'anàlisi granulomètrica ens ha permès determinar algunes de les característiques principals dels agregats del morter, com la distribució de la mida dels àrids. La granulometria de la sorra està molt concentrada entorn de 1 mm i 0,63 mm.

El percentatge de grava respecte del total és molt baix (10,2%). Així mateix, podem considerar que és una sorra fina amb poca variació granulomètrica i, per tant, el morter tindrà una millor treballabilitat. Convé assenyalar que per dur a terme l'anàlisi granulomètrica s'ha seguit la Norma NLT-104/91 i ASTM C 33. El model de finura obtingut és:

$$MF = 0.85$$

A continuació, es dibuixa en una gràfica la corba granulomètrica de la sorra [Figura 50] utilitzada per a la fabricació del morter de calç i pols de marbre.

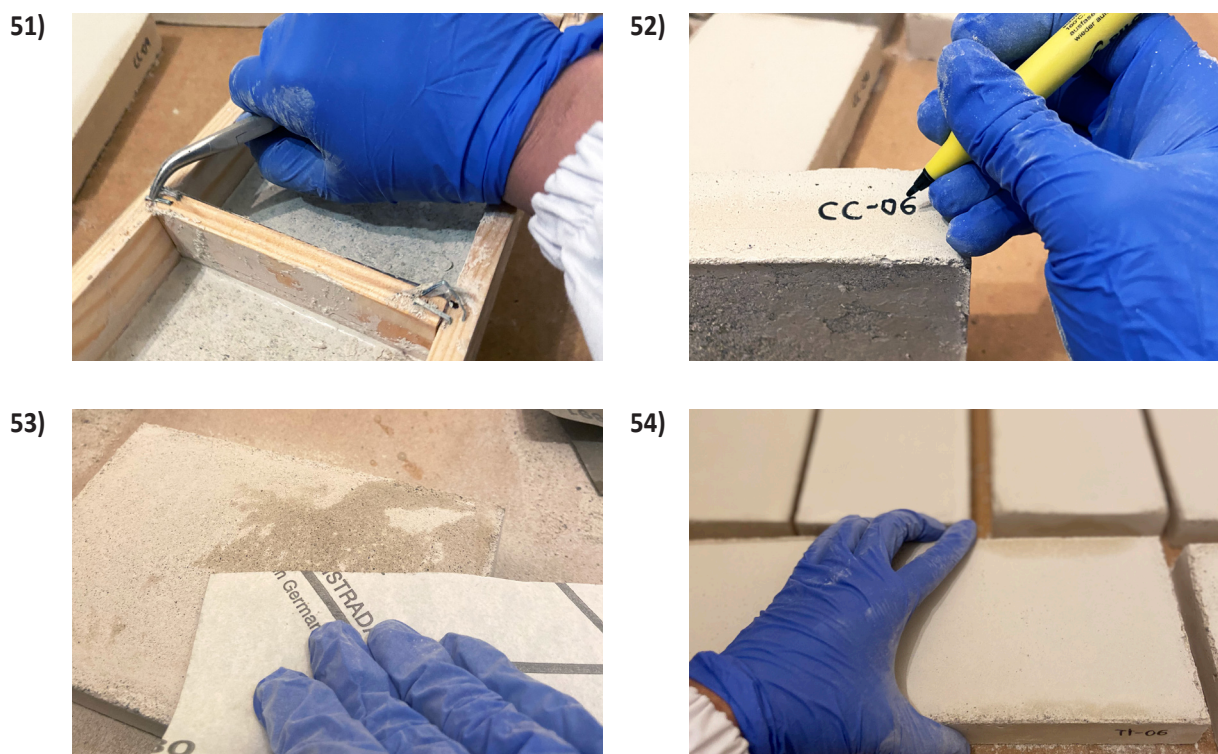


**Figura 50** - Granulometria de la sorra de riu o de platja. © Maria Isabel Garcia Vilà

### 3.1.3. Precondicionament de les provetes d'assaig

El procediment de precondicionament de les provetes consisteix a posar-les a punt les provetes per poder aplicar seguidament els tractaments de protecció superficial sobre les bases minerals. El precondicionament de les provetes d'assaig s'ha fet seguint els requisits principals de les Normes Europees EN i EN. En primer lloc, s'enretiren les grapes amb l'ajuda d'unes alicates de punta plana i corbada [Figura 51], es siglen les provetes per poder identificar-les de forma posterior durant la realització dels assajos [Figura 52].

El pas següent consisteix a polir les provetes en humit [Figura 53] i deixar-les assecar [Figura 54]. Segons les normes, la superfície escollida per a determinar l'angle de contacte i l'absorció de l'aigua ha de ser plana i estar polida en humit amb paper de vidre. Després del polit, el procés d'assecatge es fa a temperatura ambient ( $23 \pm 1$ )°C fins a obtenir un pes constant en dues pesades seguides en un interval de 24 hores.



**Figura 51** - Amb unes alicates de punta plana i corbada s'enretiren les grapes. **Figura 52** - Es siglen les mostres per poder diferenciar-les. **Figura 53** - Es poleix en humit la superfície utilitzant un paper de vidre. **Figura 54** - Es deixa assecar a temperatura ambient fins que la superfície estigui totalment seca.  
© Maria Isabel Garcia Vilà

55)



56)



**Figura 55** - A la fotografia es pot veure la diferència existent entre les provetes sense tractar i les provetes precondicionades. **Figura 56** - Detall de la textura superficial de les provetes precondicionades.  
© Maria Isabel Garcia Vilà



**Figura 57** - Provetes o espècimens de laboratori precondicionats. © Maria Isabel Garcia Vilà

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022

## 3.2. Tractaments hidrofugants

En total s'han fabricat 27 provetes de morter, és a dir, s'han realitzat tres sèries de nou provetes (tres per conglomerant utilitzat), per aplicar tres productes hidrofugants diferents que posteriorment seran analitzats mitjançant la realització d'assajos experimentals per determinar l'eficàcia en la protecció de superfícies i durabilitat. Els productes hidrofugants aplicats s'han seleccionat en base el seu component principal [Figura 58]. El principal objectiu de la investigació és comparar dos productes basats en la nanotecnologia (nanosílíce funcionalitzada i nano òxids) amb un producte protector convencional de naturalesa organosilícia (silans).

- **Nano Silo W®:** Segons la fitxa tècnica del producte (2015),<sup>64</sup> Nano Silo W® [Figura 59] és una dispersió aquosa concentrada de nanopartícules de sílice funcionalitzades, capaç de proporcionar un efecte protector i elevada hidrorepel·lència (angle de contacte major de 110°). Les nanopartícules poden penetrar a l'interior dels porus dels materials i crear enllaços estables amb els grups hidroxils presents.

Producte / Product	Abreviatura/ Classification	Component / Component	Solució / Solution	Aspecte / Appearance	Densitat (g/litre) / Density (g/liter)	Distribuïdor / Distributor
Nano Silo W	NSW	Nanopartícules de sílice / Silica nano- particles	Aquosa / Aqueous	Incolor / Colourless	1,00	CTS Espanya
Aquashield Ultimate	AU	Nano òxids / Nanooxides	Dissolvent (Isopropanol)/ Solvent (Isopropanol)	Incolor / Colourless	0,79	Tecnan
Tkrom	TK	Silans / Silanes	Dissolvent (Tkrom 345) / Solvent (Tkrom 345)	Incolor / Colourless	0,76 - 0,80	Eupinca S.A

**Figura 58** - Classificació i característiques principals dels productes hidrofugants testats sobre revestiments de calç. © Maria Isabel Garcia Vilà

<sup>64</sup> *Ficha técnica. Nano Silo W. Protector hidrorepelente al agua para materiales de construcción de interés histórico artístico.* (2015, gener). CTS España. Recuperat el 21 d'abril del 2022, de <https://shop-espana.ctseurope.com/documentacioncts/fichastecnicasweb2018/2.2protectores2016/NANO%20SILO%20W%20ESP.pdf>

59)



60)



61)



**Figura 59** - Superhidrofugant de sílice funcionalitzada Nano Silo W®. © CTS Espanya. **Figura 60** - Superhidrofugant a base de partícules ceràmiques Aquashield Ultimate®. © Comcal. **Figura 61** - Hidrofugant de la casa comercial Tkrom®. © Tkrom

Les cadenes hidròfugues unides a les nanopartícules es dirigeixen cap a l'exterior del porus i eviten l'entrada d'aigua líquida. Aquest efecte es produeix sense la formació de pel·lícules superficials, per tant, amb una reducció mínima de la permeabilitat. NSW té un elevat poder de penetració, sense generar capes fílmiques. Diversos estudis demostren que NSW presenta un bon comportament sobre tot tipus de suports i una resistència òptima als agents atmosfèrics i les eflorescències (p.1).

- **Aquashield Ultimate®:** Aquashield Ultimate® [Figura 60] és un protector transparent, no visible, transpirable, d'alt rendiment, dissenyat principalment per a la protecció davant de l'acció de l'aigua de materials porosos i poc porosos per a façanes o altres paraments verticals. El compost actiu que produeix la hidrorepel·lència són nanopartícules ceràmiques disperses en un medi orgànic (isopropanol), per la qual cosa és compatible amb qualsevol substrat porós constructiu (Tecnan, 2017, p.1).<sup>65</sup>
- **Tkrom®:** Tkrom ®[Figura 61] és un hidrofugant transparent i incolor per a la impermeabilització i protecció de façanes sense modificar el seu aspecte. Pel seu marcat efecte formador de perles repel·leix l'aigua, evitant la penetració de l'aigua de la pluja en els murs sobre els quals s'aplica, sense dificultar la transpirabilitat, ja que no influeix en la permeabilitat al vapor d'aigua del suport (Tkrom, 2019, p.1).<sup>66</sup>

<sup>65</sup> *Ficha técnica. Aquashield Ultimate. Hidrofugante en base a nanopartículas para fachadas de materiales porosos.* (2017, maig). Tecnan. Recuperat el 21 d'abril del 2022, de <https://tecnan-nanomat.es/wp-content/uploads/2018/10/Ficha-Tecnica-AQUASHIELD-ULTIMATE.pdf>

<sup>66</sup> *Ficha Técnica. Tkrom impermeabilizante fachadas hidrofugante invisible.* (2019, juny). Tkrom. Eupinca.



### 3.2.1. Hidrofugants seleccionats

En un altre ordre de casos, l'objectiu principal de la nostra investigació és avaluar el comportament hidrofòbic de les superfícies tractades amb diferents productes hidrofugants i determinar el grau d'eficàcia de cadascun dels productes assajats per a ser utilitzat com a tractament de protecció superficial contra la humitat. Com ja s'ha dit, els hidròfugs desenvolupats a partir de nanopartícules repel·leixen l'aigua de la superfície de bases minerals absorbents, presenten una alta capacitat d'hidrofugació (angle de contacte  $>150^\circ$ ), no forma pel·lícules superficials (permeten la transpirabilitat del suport), són incolors (no modifiquen el color ni l'aspecte dels materials) i resistent a la radiació solar.

En l'àmbit general, es considera que els productes hidrofugants basats en nanopartícules són una alternativa innovadora i ofereixen millores substancials enfront dels hidròfugs convencionals. De manera que es duen a terme assajos comparatius en el laboratori per poder determinar si els productes que es venen com superhidrofugants són la millor solució per a ser aplicats sobre bases minerals que contenen calç com a conglomerant. És per això que es comparen dos productes hidrofugants de base nanotecnològica (Nano Silo W® i Aquashield Ultimate®) amb un producte hidrofugant convencional de naturalesa silicoorgànica (Tkrom®).

Per a la realització dels assajos, s'han seleccionat tres productes hidrofugants de diferent formulació que creiem que podrien ser indicatius de la resta de productes de la seva categoria, atesa la seva composició i formes de degradació. Així mateix, els hidròfugs seleccionats per tractar les mostres són productes poc estudiats i poc coneguts. D'aquí la necessitat d'ampliar els coneixements que es tenen al respecte i conèixer el seu poder hidrofugant. A l'hora d'escollir els productes que es farien servir per als assajos, també s'ha tingut la relació qualitat-preu.

No hem d'oblidar que existeixen productes hidrofugants més prestigiosos i, per tant, que tenen un preu més elevat. Això no vol dir que ofereixin millors resultats que altres productes, ja que la seva eficàcia es veurà restringida pel grau de compatibilitat amb el suport, les interaccions que es produeixin a nivell físico-químic i variarà en funció de les condicions d'aplicació. D'altra banda, els tres productes hidrofugants s'han seleccionat tenint en compte els seus principis actius: 1) Nano Silo W® és una dispersió aquosa a base de nanopartícules de sílice funcionalitzada; 2) Aquashield Ultimate® és una solució hidrofugant transparent que conté nanopartícules d'òxids ceràmics; i 3) Tkrom® és un hidrofugant transparent formulat a base organosilans oligomèrics (silicones).

### 3.2.1. Procediment

En aquest treball es posen a prova tres productes hidrofugants de diferent composició sobre revestiments de calç de tres cases comercials: Saint-Aistier®, Comcal® i el Tigre®. A continuació, s'explica procediment d'aplicació dels productes hidrofugants sobre la superfície de les provetes d'assaig. De cara a la seva aplicació, convé recordar que la superfície ha d'estar neta i seca i no ha de presentar discontinuïtats ni fissures [Figura 62]. En aquest cas, els productes hidrofugants s'han aplicat per impregnació mitjançant una brotxa o una paletina de cerdes naturals [Figura 63].

En l'àmbit general, el producte hidrofugant s'ha d'aplicar en estat pur sobre la superfície, amb una capa acostuma a ser suficient, però sempre existeix la possibilitat d'aplicar una segona capa del producte en estat pur o diluït. El producte s'ha d'aplicar fins a arribar a la saturació de la base [Figura 64] i, tot seguit, s'enretiren els excessos de producte que puguin haver quedat. Cal recordar que abans d'obrir el producte, s'ha d'agitar l'envàs per aconseguir la correcta homogeneïtzació del producte.



**Figura 62** - Provetes abans d'aplicar el producte hidrofugant. **Figura 63** - Aplicar el producte hidrofugant sobre la superfície mitjançant una paletina de cerdes naturals. **Figura 64** - El producte s'ha d'aplicar fins que la superfície el refusi. **Figura 65** - Provetes després de l'aplicació del tractament. © Maria Isabel Garcia Vilà

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022

Hidrofugants	Mostres tractades		
NSW	SA-1	CC-1	TI-1
	SA-2	CC-2	TI-2
	SA-3	CC-3	TI-3
AU	SA-4	CC-4	TI-4
	SA-5	CC-5	TI-5
	SA-6	CC-6	TI-6
TK	SA-7	CC-7	TI-7
	SA-8	CC-8	TI-8
	SA-9	CC-9	TI-9

**Figura 66** - Taula on s'indiquen les mostres que han estat tractades amb els diferents productes hidrofugants utilitzats com a tractament de protecció superficial. © Maria Isabel Garcia Vilà

Les provetes s'han tractat amb tres productes diferents: Nano Silo W®, Aquashield Ultimate® i Tkrom® [Figura 65] per a ser caracteritzades d'acord amb els assajos que es realitzaran a continuació. Cada producte hidrofugant s'ha aplicat sobre tres mostres diferents per cada tipus de calç. De manera que les mostres SA-1, SA-2 i SA-3 han estat tractades amb NSW, les mostres SA-4, SA-5 i SA-6 amb AU i les mostres SA-7, SA-8 i SA-9 amb TK. Igualment, es repeteix el mateix ordre d'aplicació en les mostres que van de la 1 a la 9 en CC i TI.

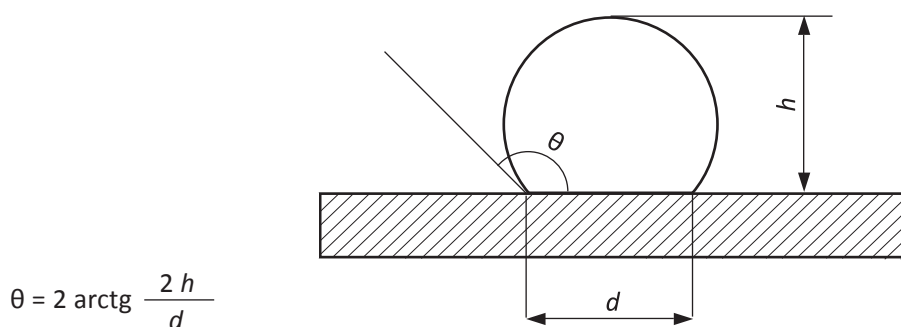
Les mostres es van dividir en dues zones i es va deixar una part sense tractar. L'aplicació dels productes hidrofugants va ser realitzada sobre tres mostres de cada material per obtenir resultats més representatius durant els assajos realitzats. Després de l'aplicació dels productes hidrofugants, es van deixar assecat les provetes en condicions de laboratori, a una temperatura de 23-25°C durant un mes. Per comprovar que els productes s'havien assecat correctament, es van pesar les provetes fins a arribar a pes constant [Figura 68].



**Figura 67** - (A l'esquerra) Aplicació i avaluació de les mostres tractades amb els diferents productes hidrofugants. **Figura 68** - (A la dreta) Provetes després del procés d'assecatge. © Maria Isabel Garcia Vilà

### 3.3. Determinació de l'angle de contacte estàtic

La Norma Europea UNE-EN 15802:2009,<sup>67</sup> especifica un mètode per mesurar l'angle de contacte estàtic d'una gota d'aigua sobre materials inorgànics porosos utilitzats habitualment com a materials de construcció. Aquest mètode es pot utilitzar tant en els materials inorgànics porosos com en els que han estat sotmesos a qualsevol tractament (p.6). L'angle de contacte estàtic [Figura 69] és una característica interfacial, és a dir, és indicatiu de les diferents tensions que es produeixen entre la interacció líquid-sòlid. De manera que si les forces d'adherència són molt altes, l'angle de contacte és necessàriament menor de 90°. Per calcular l'angle de contacte estàtic, s'utilitza la següent fórmula:



$d$  Diàmetre de la superfície de contacte (mm)

$h$  Altura (mm)

$\theta$  Angle de contacte estàtic (°)

**Figura 69** - Angle de contacte estàtic en el temps  $t$ . © AENOR

#### 3.3.1. Equip d'assaig

Els materials utilitzats per dur a terme les proves són els següents:

- Font d'il·luminació que no modifiqui la temperatura
- Càmera fotogràfica connectada a un ordinador (Canon D60 + objectiu Macro/iMac 24 polzades)
- *Software* per al processament de les imatges i les dades (Adobe Photoshop, Microsoft Excel)
- Micropipeta graduada (1-10  $\mu$ l)
- Superfície d'assaig plana (provetes)

<sup>67</sup> AENOR. UNE 15802:2009. (2010). *Conservación del patrimonio cultural. Métodos de ensayo. Determinación del ángulo de contacto estático*. Madrid: AENOR.

### 3.3.2. Procediment d'assaig

Aquest assaig permet determinar el grau d'hidrorepelència de les provetes tractades amb diferents productes hidrofugants. El nombre de mesuraments depen de l'heterogeneïtat dels materials i del nombre de provetes tractades. En aquest cas, el nombre de mesuraments realitzats per cada material i tractament és el mateix, s'han dut a terme 3 mesuraments per mostra. Si tenim en compte, que tenim 3 mostres per cada material i tractament, s'han realitzat 9 mesuraments, obtenint en total 81 resultats. Convé recordar que si la gota perd més del 50% del seu volum durant els deu primers segons, el mesurament no és possible. Si això succeís, s'haurà de deixar constància d'aquest fet en l'apartat *Resultats* i l'informe d'assaig del treball.



**Figura 70** - Macro fotografia de gotes dipositades sobre la superfície d'una proveta. Segons la Norma, la distància entre les gotes ha de ser de més de 3 mm. © Maria Isabel Garcia Vilà

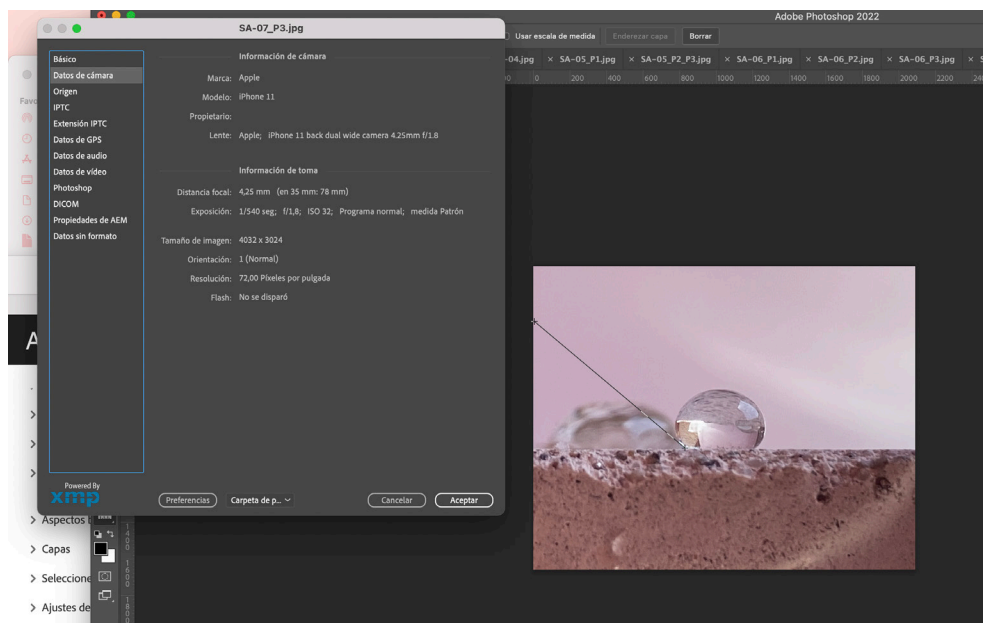
Per a la realització dels assajos s'ha utilitzat aigua desionitzada o destil·lada. El procediment d'assaig ha consistit a omplir una micropipeta amb aigua, procurant evitar la formació de bombolles d'aire. Segons la Norma EN 15802:2009, es forma una gota amb un volum comprès entre 5  $\mu\text{L}$  i 10  $\mu\text{L}$ . La gota es diposita sobre la superfície horitzontal per determinar l'angle de contacte estàtic. Així mateix, els mesuraments de  $d$ ,  $h$  i  $\theta$  s'han de realitzar durant els deu primers segons després de la deposició de la gota sobre la superfície d'assaig.

Per a la realització dels mesuraments, s'ha fet servir una càmera fotogràfica amb un objectiu macro (18-55 mm) connectada a una pantalla d'ordinador que disposi d'un *software* capaç d'enregistrar les imatges. D'altra banda, es farà servir la funció 'regla' de Photoshop com a eina d'observació i anàlisi, ja que no es disposa d'un altre sistema de mesurament que pugui ser adequat i oferir resultats prou representatius per dur a terme els assajos experimentals.

En la fotografia científica s'acostumen a utilitzar escales mètriques que serveixen de referència espacial per obtenir la mida real dels objectes. No obstant, quan es realitzen treballs de documentació no es té en compte que quan un objecte es distancia del pla d'enfocament, la nostra visió fa que les línies tendeixen a convergir. De manera que les estimacions geomètriques no seran exactes ni s'ajustaran a la realitat, encara que s'utilitzi una referència mètrica.

Si el pla d'enfocament es correspon amb la nostra referència, podem deduir amb certa precisió quina és l'escala dels motius propers al pla que ocupa aquesta referència. Però si el plànol d'enfocament o la nostra referència es troba lluny de la zona d'interès, francament, no serà possible esbrinar l'escala precisa dels objectes d'interès de la nostra fotografia (Pereira, 2013).<sup>68</sup>

Existeix un mètode que ens permet conèixer l'escala de la imatge, sense utilitzar una referència mètrica, ja que només són necessàries les metadades o EXIF de la imatge [Figura 71]. En altres paraules, si es calcula el factor de magnificació de la lent, no és necessari fer servir referències mètriques per conèixer l'escala de la zona del pla on hem col·locat el focus de la imatge.



**Figura 71** - Assignació d'una escala a partir de la distància focal de la imatge mitjançant l'eina Adobe Photoshop. © Maria Isabel Garcia Vilà

<sup>68</sup> Pereira, J. (2013, abril). *Escala y mediciones sobre fotografías*. Digital Heritage. Recuperat el 2 de juny del 2022, de <http://www.jpereira.net/gestion-de-color-articulos/mediciones-y-asignacion-de-escala-en-fotografias>

Per realitzar els càlculs, el que necessitem saber és l'ample del sensor de la lent. En aquest cas, s'ha utilitzat una Canon 60D per a enregistrar les imatges, que té un sensor de 22,3 mm. De manera que, si coneixem la distància d'enfocament (0,40 m), la longitud focal de l'òptica (35 mm) i l'ample del sensor (22,3 mm), podrem calcular la magnificació de la lent.

Per obtenir l'ample del document, es divideix l'ample del sensor pel factor de magnificació de la lent:

$$\text{ample del document (mm)} = \frac{22,3}{0,12}$$

Un cop tenim l'ample del document i amb l'opció 'remostrejar imatge' desactivada, es modifica el format de la imatge de manera que els píxels coincideixin amb la realitat. Tot seguit, s'utilitza l'eina 'regla' per mesurar la distància entre dos punts de la imatge [Figura 72]. Un altre punt important, és que Photoshop també ens permet assignar una escala i automatitzar tot el procés. Per a més informació, consultar la font original (*Íbidem*, 2013),<sup>69</sup> on també es podrà obtenir el pluguin *Image Scaling*. El plugin és un script desenvolupat per José Pereira que permet assignar una escala a les fotografies per realitzar mesuraments directament sobre aquestes.

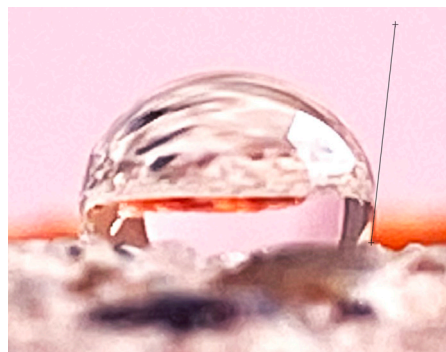
L'script accedeix a les dades de *SubjectDistance* o *ApproximateFocusDistance* i *FocalLength* de les metadades per al càlcul de la magnificació de lent. Tanmateix, cal conèixer l'amplada del nostre sensor, que ens permet conèixer el factor de retallada i per extensió l'amplada del sensor respecte a un sensor de 35 mm (*Íbidem*, 2013).<sup>70</sup>

Un cop hem redimensionat les imatges i aconseguim els valors de  $h$  i  $d$ , el següent pas és calcular l'angle de contacte de la gota. Hem de tenir en compte que s'han efectuat 3 mesures per cada proveta i, per tant, 9 mesures per cada material i tractament. Per calcular l'angle de contacte de la gota (en graus), s'introdueixen els valors mesurats de l'altura  $h$  i el diàmetre  $d$  en un full d'Excel i a continuació, apliquem la fórmula següent:

$$\theta = 2 \arctg \frac{2h}{d}$$

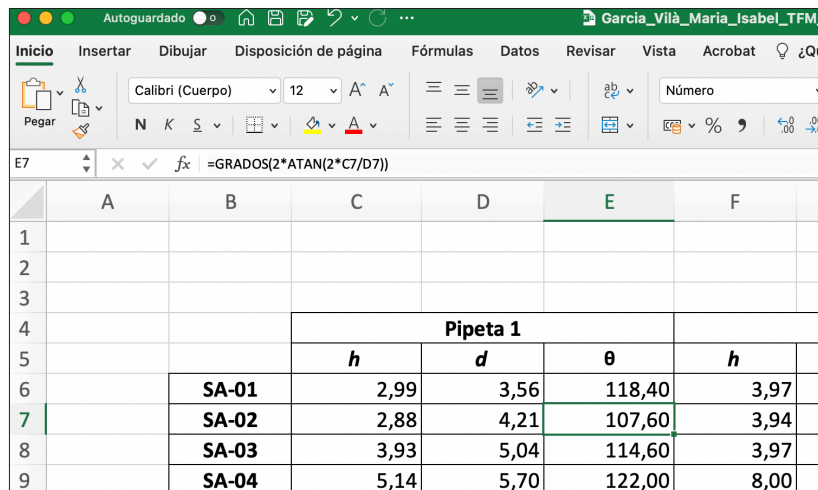
<sup>69</sup> *Íbidem*, 2013.

<sup>70</sup> *Íbidem*, 2013.



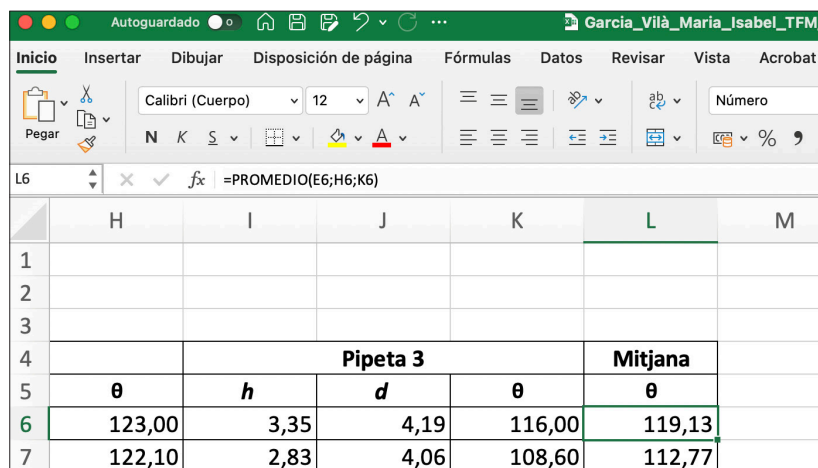
**Figura 72** - L'eina 'regla' permet mesurar la distància entre dos punts. © Maria Isabel Garcia Vilà

Els resultats obtinguts s'expressen en radiants (formes de l'angle de rotació), no obstant, per a facilitar la comprensió dels resultats ho expressarem en graus. Un cop calculats tots els valors, es fa la mitjana de les 3 mesures obtingudes de  $\theta$  per cada proveta [Figura 73] i, finalment, s'efectua una darrera mitjana que ens permetrà conèixer els valors intermedis per cada tipus de material i tractament aplicat [Figura 74]. En realitat, el que ens interessa és conèixer la mitjana per poder determinar quin dels productes hidrofugants sotmesos a assaig presenta un major grau d'hidrorrepel·lència i quin presenta menys hidrorrepel·lència.



	A	B	C	D	E	F
1						
2						
3						
4		<b>Pipeta 1</b>				
5			<i>h</i>	<i>d</i>	$\theta$	<i>h</i>
6		<b>SA-01</b>	2,99	3,56	118,40	3,97
7		<b>SA-02</b>	2,88	4,21	107,60	3,94
8		<b>SA-03</b>	3,93	5,04	114,60	3,97
9		<b>SA-04</b>	5,14	5,70	122,00	8,00

**Figura 73** - Per calcular  $\theta$ , s'introdueix  $=\text{GRADOS}(2*\text{ATAN}(2*h/d))$  en una cel·la. © Maria Isabel Garcia Vilà



	H	I	J	K	L	M
1						
2						
3						
4		<b>Pipeta 3</b>			<b>Mitjana</b>	
5		$\theta$	<i>h</i>	<i>d</i>	$\theta$	$\theta$
6		123,00	3,35	4,19	116,00	119,13
7		122,10	2,83	4,06	108,60	112,77

**Figura 74** - Per calcular la mitjana, s'introdueix  $=\text{PROMEDIO}(\theta_1; \theta_2; \theta_3)$  en una cel·la. © Maria Isabel Garcia Vilà



### 3.3.3. Informe de l'assaig

L'informe d'assaig inclou la següent informació:

- a) AENOR. UNE-EN 15802:2009. *Conservación del patrimonio cultural. Métodos de ensayo. Determinación del ángulo de contacto estático*. Madrid: AENOR;
- b) Maria Isabel Garcia Vilà;
- c) Data d'assaig: 25/05/2022;
- d) Morter de calç hidràulica i pols de marbre. Dosificació 1:5. Formulació pròpia.
- e) 27 provetes. Provetes rectangulars de 150 x 100 x 20 mm.
- f) Les provetes es desemmotllen i es poleixen en humit fent servir un paper de vidre. Les provetes es deixen assecar a temperatura ambient tres dies com a mínim.
- g) Superfície d'assaig llisa i polida. Data preparació de les provetes: 10/03/2022. Aplicació de diferents productes hidròfugs (Nano Silo W®, Aquashield Ultimate® i Tkrom®) sobre revestiments de calç. Data aplicació tractament protector: 18/04/2022.
- h) Instrumentació: Canon D60. Objectiu Macro. iMac 24 polzades. Adobe Photoshop 2022 i Microsoft Excel.
- i) Micropipeta de laboratori monocanal ajustable (1-10 µl)
- j) S'emplena la micropipeta amb aigua desionitzada tenint compte que l'agulla estigui neta per evitar la formació de bombolles. Es col·loca la pipeta sobre la superfície de la mostra, de manera que el suport quedi totalment horitzontal. Es forma una gota amb un volum de 10 µl i es diposita lentament sobre la superfície d'assaig.
- k) 3 mesuraments per mostra
- l)  $\theta$  = (mesurament simple)
- m)  $\theta$  = (valor mitjà per proveta).  $\bar{\theta}$  = (valor mitjà total provetes)
- n) Desviació típica: 0,1 mm
- o) Casos en què no ha estat possible obtenir un mesurament: Provetes sense tractar
- p) Desviacions respecte de la Norma europea: 0,2 mm
- q) Observacions: -

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022

### 3.4. Mesurament de l'absorció de l'aigua pel mètode de la pipeta

La Norma Europea UNE-EN 16302:2013,<sup>71</sup> especifica un mètode per mesurar l'absorció de l'aigua pel mètode de la pipeta de materials inorgànics porosos emprats en el patrimoni cultural i materials constitutius d'aquest. Aquest mètode pot ser utilitzat en materials porosos que no han sigut tractats o que han sigut sotmesos a algun tractament o envelliment. Així mateix, es tracta d'un mètode que pot realitzar-se al laboratori o in situ a causa de la seva naturalesa no destructiva. El requisit principal és que la superfície sigui suficient plana i homogènia, sense fissures visibles, per assegurar l'adhesió de la pipeta i que no hi hagi fugues (p.6).

El mètode de la pipeta consisteix a registrar el canvi del nivell de l'aigua en la pipeta graduada en intervals de temps, que poden variar en funció de la porositat del material analitzat. En aquest cas, s'han dut a terme lectures cada 5 minuts fins que s'ha aconseguit un volum constant (saturació de la base). D'acord amb la Norma Europea, els resultats de les lectures s'expressen en forma de gràfics de l'absorció de l'aigua on apareix representat el volum d'aigua absorbida ( $Q_i$ ) en funció de la variable temps. ( $t_i$ ). En un altre ordre de funcions, l'absorció de l'aigua es pot calcular de dues maneres diferents:

- **Càlcul de l'absorció d'aigua per unitat d'àrea de superfície  $W_f$  a temps  $t_f$ :** La quantitat d'aigua absorbida per l'àrea analitzada en el temps  $t_i$  es calcula mitjançant la fórmula següent:

$$W_f = \frac{Q_i}{A}$$

- **Càlcul de l'absorció total d'aigua per unitat d'àrea de superfície  $W_f$  a temps  $t_f$ :** La quantitat total d'aigua absorbida en el temps fins a la mesura final ( $t_f$ ) per unitat d'àrea expressada es calcula com s'indica a continuació (p.12):

$$W_f = \frac{Q_f}{A}$$

---

<sup>71</sup> AENOR. UNE-EN 16302:2013. (2016). *Conservación del patrimonio cultural. Métodos de ensayo. Medición de la absorción de agua por el método de la pipeta*. Madrid: AENOR.

### 3.4.1. Equip d'assaig

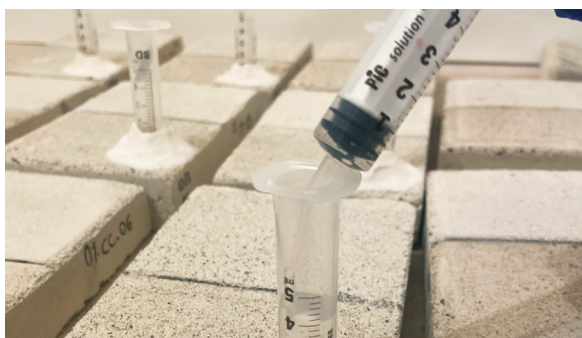
Els materials utilitzats per dur a terme les proves són els següents:

- Pipeta Karsten per superfícies horitzontals (tipus H)
- Cronòmetre amb una exactitud d'un segon
- *Software* per al processament de les dades (Microsoft Excel)
- Superfície d'assaig plana (provetes)
- Dipòsit d'aigua: ampolla
- Material de segellat: plasticina

### 3.4.2. Procediment d'assaig

El procediment d'assaig és el següent: La pipeta es fixa sobre la superfície horitzontal del suport mitjançant l'ús d'un material de segellat adequat i reversible. En aquest cas, s'han fet proves amb diferents materials, però el que millor ha funcionat és la plasticina. S'ha de tenir en compte que es un material que pot deixar taques i residus acumulats sobre la superfície i, per tant, no pot ser utilitzat directament sobre peces patrimonials. Un cop s'ha segellat l'entrada d'aigua per la base, s'introdueixen 4 ml d'aigua a l'interior de la pipeta [Figura 75] i es posa en marxa el cronòmetre.

A continuació, es registra el nivell d'aigua de la pipeta graduada en intervals de temps [Figura 76]. Per dur a terme els assajos, s'ha fet servir aigua destil·lada o desionitzada. Per determinar l'absorció d'aigua de les provetes tractades, s'han realitzat 9 lectures per cada material i tractament i es presenten els resultats en forma de gràfics d'absorció amb el volum d'aigua absorbida en funció del temps. Les lectures es prenen cada 5 minuts fins que s'aconsegueix un volum constant. Segons la Norma EN 16302, si no s'obté un volum constant, s'ha d'aturar l'experiment passada una hora.



**Figura 75** - (A l'esquerra) S'introdueixen 4 ml d'aigua a l'interior de la pipeta fent servir una xeringa. **Figura 76** - (A la dreta) Procediment d'assaig per determinar l'absorció de l'aigua. © Maria Isabel Garcia Vilà

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022

Per cada especímen de laboratori haurem d'obtenir els valors d'absorció i els intervals de temps, així com l'absorció total de l'aigua. Els intervals de temps dependran de la porositat del suport o material d'estudi. En aquest cas, s'introdueix en una taula Excel les diferents lectures obtingudes en intervals de 5, 10 i 15 minuts. Per aconseguir la mitjana, es fa doble clic en una cel·la i s'introdueix =PROMEDIO(5 [min] +10 [min] +15 [min]) [Figura 77]. De manera paral·lela, per calcular la quantitat total d'aigua absorbida en el temps fins al seu mesurament final, s'introdueix =SUMA(5 [min] +10 [min] +15 [min]) [Figura 78]. A continuació, es presenten els resultats obtinguts en forma de gràfics d'absorció de l'aigua en funció de la variable temps.

Absorbància de l'aigua					
Mostra	5 [min]	10 [min]	15 [min]	Mitjana [ml/min]	Absorció total [Wf]
SA-01	0,10	-	-	0,10	0,10
SA-02	0,13	0,08	-	0,11	0,21
SA-03	0,11	-	-	0,11	0,11
SA-04	0,10	0,10	-	0,10	0,20
SA-05	0,19	-	-	0,19	0,19
SA-06	0,13	0,11	-	0,12	0,24
SA-07	0,52	0,28	-	0,40	0,80
SA-08	0,34	0,34	-	0,34	0,68
SA-09	0,32	0,22	-	0,27	0,54

**Figura 77** - Per aconseguir la mitjana, s'introdueix =PROMEDIO(5 [min] +10 [min] +15 [min]) en una cel·la.  
© Maria Isabel Garcia Vilà

Absorbància de l'aigua					
Mostra	5 [min]	10 [min]	15 [min]	Mitjana [ml/min]	Absorció total [Wf]
SA-01	0,10	-	-	0,10	0,10
SA-02	0,13	0,08	-	0,11	0,21
SA-03	0,11	-	-	0,11	0,11
SA-04	0,10	0,10	-	0,10	0,20
SA-05	0,19	-	-	0,19	0,19
SA-06	0,13	0,11	-	0,12	0,24
SA-07	0,52	0,28	-	0,40	0,80
SA-08	0,34	0,34	-	0,34	0,68
SA-09	0,32	0,22	-	0,27	0,54

**Figura 78** - Per calcular l'absorció total, s'introdueix =SUMA(5 [min] +10 [min] +15 [min]) en una cel·la. © Maria Isabel Garcia Vilà

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022



### 3.4.3. Informe d'assaig

L'informe d'assaig inclou la següent informació:

- a) AENOR. UNE-EN 16302:2013. *Conservación del patrimonio cultural. Métodos de ensayo. Medición de la absorción de agua por el método de la pipeta*. Madrid: AENOR.
- b) Maria Isabel Garcia Vilà;
- c) Data d'assaig: 28/05/2022;
- d) Morter de calç hidràulica i marmolina. Dosificació 1:5. Formulació pròpia.
- e) 27 provetes. Provetes rectangulars de 150 x 100 x 20 mm.
- f) Les provetes es desemmotllen i es poleixen en humit fent servir un paper de vidre. Les provetes es deixen assecar a temperatura ambient tres dies com a mínim.
- g) Superfície d'assaig llisa i polida. Data preparació de les provetes: 10/03/2022. Aplicació de diferents productes hidrofugants (Nano Silo W®, Aquashield Ultimate® i Tkrom®) sobre revestiments de calç. Data aplicació tractament protector: 18/04/2022.
- h) Aigua potable
- i) Pipeta Karsten tipus H
- j) Intervals de temps: 5,10,15, 30 i 60 minuts. Duració de l'assaig: 1 hora
- k) Desviacions respecte a la Norma europea: 0,2 ml
- l) Observacions: Les superfícies d'assaig van ser escollides a l'atzar.

## **Capítol IV. Resultats**

## 4.1. Expressió dels resultats

Els resultats dels assajos de determinació de l'angle de contacte i de mesurament de l'absorció d'aigua pel mètode de la pipeta es presenten a continuació en forma de taules i gràfics. Les propietats dels materials tractats es van determinar mitjançant la realització dels assajos citats. A continuació, es discuteixen els resultats obtinguts.

### 4.1.1. Angle de contacte

Amb aquest estudi es pretén determinar el grau d'hidrorrepel·lència de la superfície tractada amb els diferents productes hidrofugants (Nano Silo W®, Aquashield Ultimate® i Tkrom®). En el cas de les superfícies poroses sense tractar, la gota va ser absorbida de manera immediata, per tant, no ha estat possible realitzar el mesurament per determinar el grau d'hidrorrepel·lència. En les provetes fabricades amb calç Saint-Aistier®, el producte hidrofugant convencional (Tkrom®) ha funcionat millor que el producte hidrofugant de base nanotecnològica (Nano Silo W®), és possible que el producte no hagi recobert correctament la porositat superficial.

Tal com es pot veure a la figura 79, el producte que ha donat millors resultats ha estat Aquashield Ultimate®, ens aproximem als 150° d'angle de contacte, obtenint un valor màxim de 145° en la mostra SA-06. D'aquí que els angles de contacte assolits es poden relacionar amb la rugositat del material. En cap de les provetes tractades s'observa l'absorció parcial de la gota i l'esfericitat es conserva després de 50 minuts. En les provetes tractades amb NSW i AU, tampoc s'aprecien modificacions en la forma de la gota traspassats els 60 segons. Les gotes dipositades sobre les provetes tractades amb AU tendeixen a relliscar, sense deixar marques sobre la superfície.

	Pipeta 1			Pipeta 2			Pipeta 3			Mitjana
	<i>h</i>	<i>d</i>	$\theta$	<i>h</i>	<i>d</i>	$\theta$	<i>h</i>	<i>d</i>	$\theta$	$\theta$
SA-01	2,99	3,56	118,40	3,97	4,31	123,00	3,35	4,19	116,00	119,13
SA-02	2,88	4,21	107,60	3,94	4,36	122,10	2,83	4,06	108,60	112,77
SA-03	3,93	5,04	114,60	3,97	4,88	116,90	3,64	4,66	114,70	115,40
SA-04	5,14	5,70	122,00	8,00	5,79	140,20	4,20	4,74	121,10	127,77
SA-05	3,87	3,53	131,00	5,41	4,48	135,00	5,65	3,56	145,00	137,00
SA-06	4,70	3,42	140,00	4,76	4,42	130,20	4,84	4,48	130,30	133,50
SA-07	3,16	3,75	118,70	3,21	4,36	111,70	5,66	4,14	139,80	123,40
SA-08	3,54	4,83	111,40	2,66	3,38	115,20	2,87	3,60	115,80	114,13
SA-09	2,63	3,48	113,10	3,34	3,17	129,20	6,20	5,35	133,30	125,20

**Figura 79** - Valors de l'angle de contacte en les provetes de morter de calç Saint-Aistier® després de ser sotmeses a diversos tractaments. © Maria Isabel Garcia Vilà

	Pipeta 1			Pipeta 2			Pipeta 3			Mitjana
	<i>h</i>	<i>d</i>	$\theta$	<i>h</i>	<i>d</i>	$\theta$	<i>h</i>	<i>d</i>	$\theta$	$\theta$
CC-01	4,45	4,86	122,70	4,71	4,77	126,30	4,93	4,83	127,80	125,60
CC-02	3,26	4,58	109,90	3,09	4,14	112,30	2,85	4,28	106,10	109,43
CC-03	4,74	5,49	119,80	3,97	4,25	123,70	4,27	4,30	126,60	123,37
CC-04	5,47	4,53	135,00	3,93	5,06	114,40	4,60	4,75	125,40	124,93
CC-05	3,21	4,07	115,20	4,55	5,04	122,00	4,72	5,09	123,30	120,17
CC-06	4,55	4,81	124,30	4,40	5,23	118,60	5,14	4,97	128,4	123,77
CC-07	4,47	6,15	111,00	3,11	4,40	109,50	2,87	4,53	103,5	108,00
CC-08	2,82	5,77	88,70	2,94	4,26	108,10	3,94	4,37	122	106,27
CC-09	3,02	3,49	120,00	2,24	3,25	108,00	3,59	4,69	113,7	113,90

**Figura 80** - Valors de l'angle de contacte en les provetes de morter de calç Comcal® després de ser sotmeses a diversos tractaments hidrofugants. © Maria Isabel Garcia Vilà

Amb referència a les proves realitzades sobre les mostres de morter de calç Comcal®, s'han obtingut resultats similars en les provetes tractades amb els dos productes hidrofugants de base nanotecnològica. Si es calcula la mitjana de les mostres tractades amb Nano Silo W® i Aquashield®, no s'observen diferències significatives entre si. D'acord amb els resultats obtinguts en la Figura 80, es determina que el grau d'hidrorrepel·lència de l'hidròfug convencional és molt inferior. De nou, el producte que ha funcionat millor és AU, ja que proporciona un recobriment homogeni de les superfícies tractades i presenta una gran capacitat d'hidrofugació.

	Pipeta 1			Pipeta 2			Pipeta 3			Mitjana
	<i>h</i>	<i>d</i>	$\theta$	<i>h</i>	<i>d</i>	$\theta$	<i>h</i>	<i>d</i>	$\theta$	$\theta$
TI-01	4,21	5,36	115,00	4,65	5,51	118,70	6,16	5,86	129,1	120,93
TI-02	5,20	5,16	127,20	4,62	4,41	129,00	5,38	4,99	130,2	128,80
TI-03	5,78	4,52	137,30	5,02	5,05	126,60	4,54	4,24	129,9	131,27
TI-04	4,50	4,87	123,20	3,69	4,47	117,60	4,33	4,07	129,7	123,50
TI-05	4,72	3,55	138,80	3,82	3,21	134,40	4,79	4,04	134,3	135,83
TI-06	6,42	4,89	138,30	4,28	4,73	122,10	5,32	4,78	131,6	130,67
TI-07	3,17	4,95	104,10	3,70	5,27	109,10	3,27	5,47	100,1	104,43
TI-08	4,80	4,60	128,80	3,94	4,55	120,00	4,53	5,99	113,1	120,63
TI-09	2,46	3,91	103,00	2,85	4,12	108,20	2,91	4,83	100,7	103,97

**Figura 81** - Valors de l'angle de contacte en les provetes de morter de calç El Tigre® després de ser sotmeses a diversos tractaments hidrofugants. © Maria Isabel Garcia Vilà

En el cas de les provetes realitzades amb calç El Tigre®, els productes hidrofugants de base nanotecnològica han oferit millors resultats en comparació amb el producte hidrofugant convencional. Si s'observen els resultats que apareixen a la taula en la Figura 81, la capacitat d'hidrofugació d'aquest últim es troba per sota de la resta. Així mateix, si s'analiza la *h* i la *d* de les provetes TI-07, TI-08 i TI-09, es podrà comprovar que amb TK no s'ha aconseguit mantenir l'esfericitat de la gota. Convé assenyalar que el grau d'hidrorrepel·lència obtingut en les provetes tractades amb Aquashield® és indicatiu de la seva eficàcia, en la lectura 1 de la mostra TI-05 el valor individual màxim és de 138,8°, s'aproxima a la superhidrofobicitat.

Mostra	Mitjana [ $\theta$ ]
SA-NSW	115,77
CC-NSW	119,47
TI-NSW	127,00

Mostra	Mitjana [ $\theta$ ]
SA-AU	117,93
CC-AU	122,96
TI-AU	130,00

Mostra	Mitjana [ $\theta$ ]
SA-TK	120,91
CC-TK	109,39
TI-TK	109,68

**Figura 82** - Valors mitjans de l'angle de contacte obtinguts per cada material i tractament. © Maria Isabel Garcia Vilà

Si s'analitzen les mitjanes obtingudes [Figura 83], el producte que millor ha funcionat en les provetes de calç Saint-Aistier®, contra tot pronòstic, ha estat l'hidrofugant convencional formulat a base d'organosilans oligomèrics. No obstant, en les provetes de calç Comcal® i El Tigre® tractades també amb TK, s'observa que l'absorció de la gota és diferent, la qual cosa indica que el producte no ha aconseguit penetrar correctament en els substrats i la seva efectivitat s'ha disminuïda de forma considerable.

En general, el producte hidrofugant que ofereix una major hidrorrepel·lència és Aquashield Ultimate®, destacant el valor mitjà màxim obtingut en les provetes de calç El Tigre®, que arriba a 130°. Un altre punt important és que els valors mitjans obtinguts amb NSW i AU s'aproximen bastant, però AU manté millor les seves propietats hidròfugues en la majoria de materials. Així mateix, convé assenyalar que cap dels recobriments sotmesos a assaig posseeix superhidrofobicitat, ja que no superen els 150°.

### 4.1.2. Absorció de l'aigua

Segons especifica la Norma Europea EN 16302, aquest assaig és necessari per dur a terme el mesurament de la penetració de l'aigua sota una pressió similar a la que exerceix l'aigua de la pluja. Convé recordar que l'absorbència ens indica la intensitat en què entra i surt una substància. Pel que fa als resultats de l'assaig, s'aprecien diferències significatives en els valors d'absorció d'aigua obtinguts per cada material i tractament. En general, la diferència d'absorció de les provetes abans i després dels tractaments hidrofugants és substancial. En el cas de les provetes sense tractar, l'aigua penetra de forma immediata i, per tant, no ha estat possible realitzar el mesurament.

Mostra	Absorbència de l'aigua				
	5 [min]	10 [min]	15 [min]	Mitjana [ml/min]	Absorció total [Wf]
SA-01	0,10	-	-	0,10	0,10
SA-02	0,13	0,08	-	0,11	0,21
SA-03	0,11	-	-	0,11	0,11
SA-04	0,10	0,10	-	0,10	0,20
SA-05	0,19	-	-	0,19	0,19
SA-06	0,13	0,11	-	0,12	0,24
SA-07	0,52	0,28	-	0,40	0,80
SA-08	0,34	0,34	-	0,34	0,68
SA-09	0,32	0,22	-	0,27	0,54

**Figura 83** - Valors d'absorció de l'aigua en les provetes de morter de calç Saint-Aistier® després de ser sotmeses a diferents tractaments hidrofugants. © Maria Isabel Garcia Vilà

En el cas de les provetes de calç Saint-Aistier® [Figura 83], el producte hidrofugant que té una taxa d'absorció total més baixa és NSW, seguit d'AU, no obstant, s'obtenen resultats similars, amb uns valors mínims de 0,10 ml i 0,11 ml respectivament. Si es comparen els valors d'absorció per cada interval de temps o la quantitat d'aigua total que ha penetrat en les provetes tractades amb protectors nanotecnològics i les provetes tractades amb l'hidrofugant convencional, podem observar un increment significatiu de la penetració de l'aigua en el substrat, amb una diferència màxima de 5 unitats fins al final del mesurament.

Les provetes tractades amb l'hidrofugant convencional formulat a base d'organosilans oligomèrics són les que han experimentat una major absorció, p. e. la mostra SA-07 presenta una taxa d'absorció total de 0,80 ml fins al mesurament final i ha absorbit 0,52 ml durant els 5 primers minuts de l'experiment. D'altra banda, totes les mostres aconseguen un valor constant traspassats els 15 minuts des de l'inici de l'assaig. Convé subratllar que les provetes tractades amb NSW, presenten una taxa d'absorció per cada interval molt baixa i adquireixen un valor constant transcorreguts els 5 primers minuts de l'experiment.

Mostra	Absorbància de l'aigua				
	5 [min]	10 [min]	15 [min]	Mitjana [ml/min]	Absorció total [Wf]
CC-01	0,06	-	-	0,06	0,06
CC-02	0,09	-	-	0,09	0,09
CC-03	0,18	0,18	-	0,18	0,36
CC-04	0,12	-	-	0,12	0,12
CC-05	0,10	-	-	0,10	0,10
CC-06	0,11	-	-	0,11	0,11
CC-07	0,23	0,21	-	0,22	0,44
CC-08	0,54	0,33	0,44	0,44	1,31
CC-09	0,51	0,32	0,48	0,44	1,31

**Figura 84** - Valors d'absorció de l'aigua en les provetes de morter de calç Comcal® després de ser sotmeses a diferents tractaments hidrofugants. © Maria Isabel Garcia Vilà

En el cas de les provetes de calç Comcal®, el producte que presenta millors qualitats hidròfobes és AU, la capacitat de NSW és lleugerament menor, però ambdós productes es troben dins d'uns límits més que acceptables. Com podem veure en la figura 84, els valors d'absorció total de les mostres CC-08 i CC-09 tractades amb TK són molt alts, arribant a una màxima d'absorció total de 1,41 ml fins al mesurament final. A més, no s'aconsegueix obtenir un volum constant en les dues provetes fins que no s'arriba als 30 minuts de l'experiment.

Això vol dir, que la superfície tractada amb el producte hidrofugant convencional posseïx capacitat hidrofòbica, no obstant, no és capaç d'evitar l'entrada d'aigua en la superfície del material i, per tant, la seva eficàcia com a hidrofugant es veu limitada per la falta de penetració del producte. Un altre punt important, és el resultat d'absorció total assolit en la mostra CC-03 tractada amb NSW, que arriba als 0,36 ml. En aquest cas, és evident que existeix diferència en les provetes fabricades amb el mateix material. S'ha de tenir en compte que la composició, heterogeneïtat, porositat i rugositat superficial afecten la capacitat hidrofugant del producte.

Mostra	Absorbància de l'aigua				
	5 [min]	10 [min]	15 [min]	Mitjana [ml/min]	Absorció total [Wf]
TI-01	0,13	0,10	-	0,12	0,23
TI-02	0,11	0,09	-	0,10	0,20
TI-03	0,23	0,12	-	0,18	0,35
TI-04	0,22	-	-	0,22	0,22
TI-05	0,19	-	-	0,19	0,19
TI-06	0,20	-	-	0,20	0,20
TI-07	0,58	0,52	-	0,55	1,10
TI-08	0,44	0,17	-	0,31	0,61
TI-09	0,53	0,52	0,38	0,48	1,43

**Figura 85** - Valors d'absorció de l'aigua en les provetes de morter de calç El Tigre® després de ser sotmeses a diferents tractaments hidrofugants. © Maria Isabel Garcia Vilà

Pel que fa als resultats obtinguts en les provetes de calç El Tigre® [Figura 85], s'obtenen valors d'absorbència similars en NSW i AU, per exemple, en TI-02 i TI-04 la taxa d'absorció total és de 0,20 ml. Novament, les superfícies tractades amb TK, són les que presenten una major absorció, si ens fixem en les mitjanes d'absorció de les mostres TI-07, TI-08 i TI-09, els valors es dupliquen, arribant en la mostra TI-07 a una mitjana de 0,55 ml absorbits en cada interval de 5 minuts.

Cal fer una menció específica a l'efectivitat d'Aquashield®, AU és totalment compatible amb les mostres de calç TI i presenta uns valors d'absorció total baixos. Una bona mostra d'això, és la mostra TI-05 amb uns valors mínims de 0,19 ml fins al mesurament final. Així mateix, les mostres tractades amb AU aconseguixen un valor constant traspassats els 5 minuts després de l'inici l'experiment. Com es pot veure a la Figura 86, la resta aconseguixen establitzar-se després de 15 minuts en endavant.

Mostra	Mitjana [ml/min]	Absorció total [Wf]
SA-NSW	0,11	0,14
CC-NSW	0,11	0,17
TI-NSW	0,13	0,26

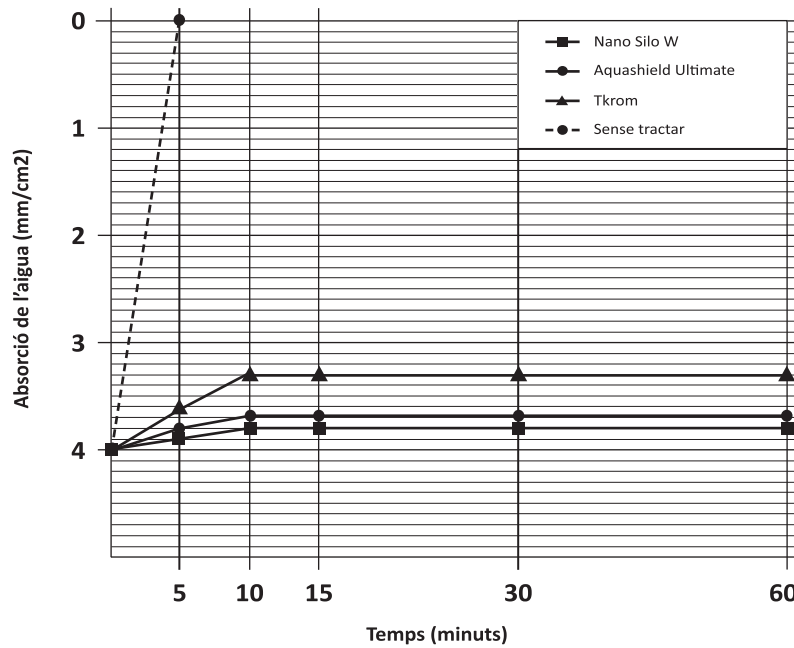
Mostra	Mitjana [ml/min]	Absorció total [Wf]
SA-AU	0,14	0,21
CC-AU	0,11	0,11
TI-AU	0,20	0,20

Mostra	Mitjana [ml/min]	Absorció total [Wf]
SA-TK	0,34	0,67
CC-TK	0,36	1,02
TI-TK	0,44	1,05

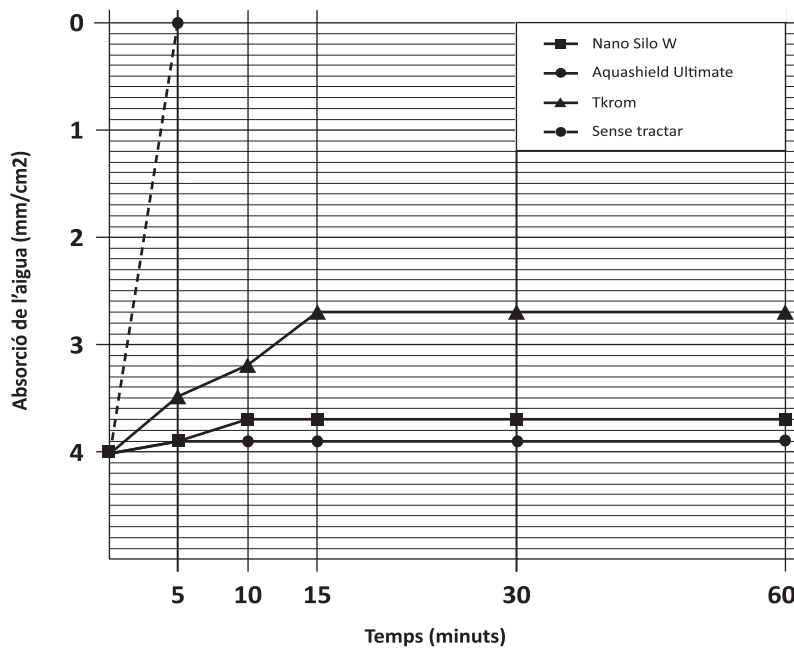
**Figura 86** - Valors mitjans d'absorció de l'aigua obtinguts per cada material i tractament. © Maria Isabel Garcia Vilà

En un altre ordre de funcions, els productes hidrogugants basats en la nanotecnologia han oferit millors resultats respecte l'hidrofugant convencional formulat a base d'organosilans oligomèrics. Si es comparen els valors mitjans de NSW i AU són molt similars i s'aproximen bastant [Figura 86], per una banda, NSW funciona millor en les provetes de fabricades amb calç SA i per l'altra, AU presenta una major efectivitat en les provetes de calç CC i TI. Entre els productes hidrofugants assajats, les provetes tractades amb TK són les que presenten una major absorció de l'aigua, amb uns valors mitjans d'absorció total d'1,05 ml en les provetes fabricades amb calç TI.

A continuació, s'exposen els resultats en forma de gràfics [Figures 87, 88 i 89], on es poden visualitzar les corbes d'absorbència dels productes aplicats en cadascun dels materials utilitzats per fabricar les provetes o espècimens de laboratori que han estat sotmesos a assaig.

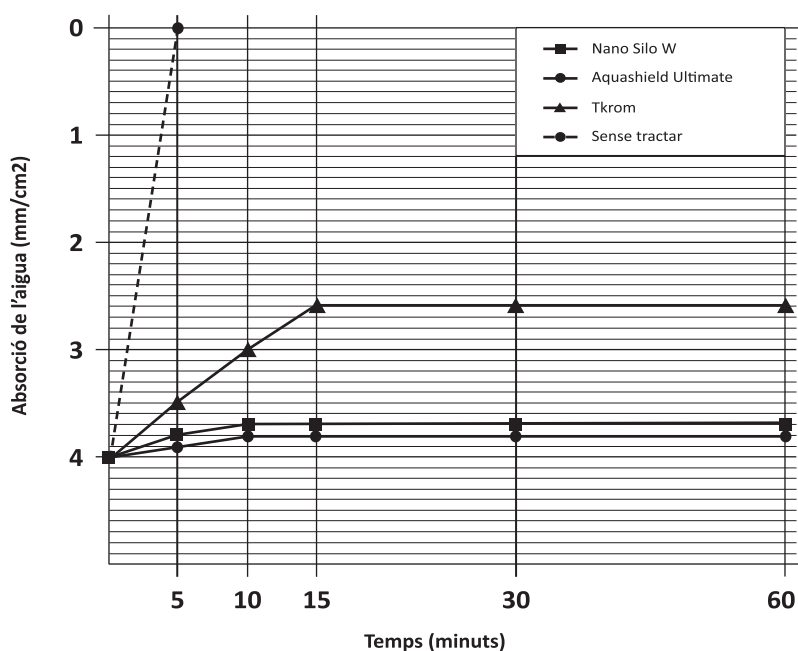


**Figura 87** - Corba d'absorbència de les provetes de morter de calç Saint-Aistier® tractades amb diferents productes hidrofugants. © Maria Isabel Garcia Vilà



**Figura 88** - Corba d'absorbència de les provetes de morter de calç Comcal® tractades amb diferents productes hidrofugants. © Maria Isabel Garcia Vilà

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022



**Figura 89** - Corba d'absorbència de les provetes de morter de calç El Tigre® tractades amb diferents productes hidrofugants. © Maria Isabel Garcia Vilà

En general, la relació proporcional entre l'absorció de l'aigua i el temps que tarda en absorbir-se és similar en cadascun dels productes hidrofugants aplicats i no s'observen variacions significatives respecte els tipus de calç utilitzades per a la fabricació de les provetes tractades i sotmeses a assaig. Si s'observen les corbes d'absorbència, es pot veure com l'absorció de l'aigua de les provetes tractades amb TK és molt superior en funció del temps, no obstant, en les provetes de calç SA el producte TK respon millor com a tractament.

Els protectors nanotecnològics no només presenten una taxa d'absorció total baixa, sinó que també aconseguen mantenir un valor constant entre els 5 i 10 minuts posteriors a l'inici de l'experiment. En canvi, les provetes tractades amb TK tenen una taxa d'absorció total molt alta i no aconseguen l'equilibri fins que no es traspassen els 15 minuts des de l'activació del cronòmetre.

En el cas de les provetes de calç SA, el producte que ha donat millors resultats ha estat NSW, la taxa d'absorbència mitjana es situa en 0,14 [ml/min]. En canvi, en les provetes de calç CC i TI ha funcionat millor AU. Les provetes tractades amb TK presenten uns valors d'absorció de l'aigua excessius, no presenten una superfície tan homogènia en comparació amb NSW i AU. Tot i que les provetes tractades amb TK, posseeixen propietats hidrofòbiques, la seva eficàcia per impermeabilitzar les superfícies i evitar l'entrada d'aigua a l'interior s'ha vist molt perjudicada.

### 4.1.3. Observacions

Amb referència a la investigació, hem pogut comprovar que els hidròfugs basats en la nanotecnologia són productes que presenten altes prestacions i una major efectivitat hidròfuga en comparació amb el producte hidrofugant de base organosilícia. No obstant, de cara a la selecció d'un producte s'han de valorar altres factors, com per exemple si després de l'aplicació del producte es generen variacions de color, pel·lícules fílmiques, incompatibilitats, etc. De manera paral·lela, el producte seleccionat ha de complir els requisits necessaris per a ser utilitzat en l'àmbit de la restauració i rehabilitació integral del Patrimoni arquitectònic.



**Figura 90** - (A l'esquerra) Aspecte de la proveta després del tractament amb Aquashield Ultimate®. **Figura 91** - (A la dreta) Aspecte de la mostra després del tractament amb Tkrom®. © Maria Isabel Garcia Vilà

A simple vista, s'observen variacions de color després de l'aplicació de NSW sobre la superfície tractada, que ha provocat el canvi cromàtic de la superfície. En canvi, després de l'aplicació d'AU i TK no s'aprecien canvis de color i transparència significatius [Figures 90 i 91]. Per aquest motiu, AU i TK són molt més estables que NSW, ja que les provetes tractades amb NSW han experimentat una major variació cromàtica [Figura 92].

L'aplicació de NSW ha produït canvis en la rugositat superficial la formació d'una pel·lícula fílmica que dona lloc a l'enfosquiment de la superfície de les provetes. Cal realitzar un estudi colorimètric per tenir evidències més riguroses al respecte, comparant els valors LAB obtinguts abans i després de tractar les provetes amb NSW i els valors de la resta de provetes tractades amb AU i TK.



**Figura 92** - Aspecte de la mostra després del tractament amb Nano Silo W®. © Maria Isabel Garcia Vilà



## 4.2. Conclusions

A partir de tota la informació recollida durant els assajos realitzats en el laboratori, arribem a les següents conclusions:

- Els tractaments d'hidrofugació sotmesos a assaig milloren el comportament hídric i les propietats de la superfície de les provetes, evitant l'entrada d'aigua a l'interior i augmentant la resistència dels materials. Els productes hidrofugants juguen un paper fonamental en la protecció dels materials de construcció i, ben aplicats, asseguren una bona conservació dels edificis.
- Es recomana l'aplicació de tractaments de protecció en treballs de restauració i rehabilitació integral. Més concretament, en superfícies exposades a l'acció continua dels agents climàtics o bé en superfícies ja deteriorades que presenten problemes d'humitat. També es pot aplicar un tractament hidrofugant de forma preventiva, després de realitzar els estudis previs pertinents.
- Alguns productes hidrofugants poden modificar l'aspecte, densitat aparent i rugositat superficial dels materials sotmesos a assaig. Els tractaments aplicats han augmentat en gran manera la hidrorrepel·lència, mullabilitat i permeabilitat de la superfície. Contràriament, no s'ha pogut determinar si la transpirabilitat dels materials ha disminuït després de l'aplicació dels productes hidrofugants.
- L'angle de contacte i l'absorció de l'aigua són propietats directament relacionades amb la capacitat hidròfuga de les superfícies tractades. En aquest sentit, entenem que quan augmenta l'angle de contacte també ho fa la hidrorrepel·lència de la superfície i de forma inversament proporcional, disminueix la capacitat de succió capil·lar.
- En general, els productes de base nanotecnològica (NSW i AU) sotmesos a assaig tenen major capacitat d'hidrofugació en comparació amb el producte hidrofugant convencional (TK) analitzat. NSW i AU realment són productes d'altres prestacions, ja que s'ha pogut comprovar que ambdós productes són capaços de reduir l'absorció d'aigua en un 95%.
- Al contrari del que anuncien els fabricants, cap dels protectors nanotecnològics sotmesos a assaig manté la superhidrofobicitat quan són aplicats sobre revestiments de calç. En aquest sentit, no s'han aconseguit obtenir valors d' $\theta$  per sobre dels  $150^\circ$  durant els assajos realitzats.
- La reducció de l'absorció d'aigua pot associar-se a l'efectivitat del tractament aplicat i no tant a les característiques del suport. Així i tot, és evident que existeix certa relació entre les caracte-

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022



ristiques del suport (composició fisicoquímica, heterogeneïtat, porositat, rugositat superficial, etc.) i les propietats seleccionades (angle de contacte i absorció de l'aigua) de la superfície tractada.

- Els tractaments hidrofugants NSW i AU actuen de forma similar i no s'aprecien diferències significatives en funció de la tipologia del material, el seu comportament és independent i no es pot vincular amb el tipus calç utilitzada (SA, CC i TI). En canvi, en TK s'han obtingut diferents resultats en SA.
- Els productes basats en nanopartícules creen un recobriment homogeni sobre la superfície, deixant de banda l'adhesió, es genera un estat de baixa energia que dona lloc a la formació de l'estat Cassie-Baxter, el qual es troba relacionat amb la rugositat superficial del suport.
- Mitjançant la realització dels assajos, hem pogut determinar que la superfície tractada amb el producte hidrofugant convencional posseïx capacitat hidrofòbica, però no és capaç d'evitar l'entrada d'aigua a l'interior. També es dedueix que TK no té la capacitat de produir un recobriment homogeni sobre la superfície de les provetes de calç CC i TI, segurament, per falta d'adherència. Creiem que és per això que ha disminuït considerablement l'efectivitat del producte.
- Després d'aplicar NSW, s'observen alteracions òptiques significatives sobre la superfície de les provetes tractades. També s'aprecien modificacions de la rugositat superficial i formació de pel·lícula fílmica que provoca l'enfosquiment de la superfície. Les provetes tractades amb NSW són les que han experimentat una major variació cromàtica. Per aquest motiu, es considera que AU i TK són productes més estables.

Els resultats dels assajos de determinació de l'angle de contacte i mesurament de l'absorció de l'aigua han resultat positius, hem pogut determinar que el producte que té un major grau d'hidrorrepel·lència i menor absorció de l'aigua i que, per tant, presenta millor comportament i eficàcia sobre tots els materials testats és Aquashield Ultimate®, seguit de molt aprop per Nano Silo W® i, el producte amb menys hidrorrepel·lència i major absorció és TKrom®.

L'efectivitat hidròfuga dels productes NSW i AU és similar, però s'ha de tenir en compte que NSW provoca alteracions òptiques, per tant, s'ha determinat que NSW és un producte que no reuneix les condicions necessàries per a ser aplicat sobre revestiments de calç i no es recomana el seu ús en aquest tipus d'intervencions de restauració i rehabilitació integral dins del camp de la conservació-restauració del Patrimoni arquitectònic. En definitiva, es recomana tractar amb AU tots els materials sotmesos a assaig, AU és 100% compatible amb tots els tipus de calç estudiats (SA, CC i TI).

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022



### 4.2.1. Valoració dels resultats obtinguts

Els resultats obtinguts en els assajos són clarament concloents, no admeten contradiccions i s'adeqüen a les necessitats de la investigació. Fins al moment, no es tenia prou informació sobre el comportament dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç. Així mateix, els productes hidrofugants seleccionats no són prou coneguts ni han estat prou estudiats. D'aquí la necessitat d'avaluar el comportament hídic i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants sotmesos a assaig quan són aplicats sobre revestiments de calç que podem trobar habitualment en edificis històrics, construccions o monuments vinculats amb el Patrimoni Arquitectònic.

Els mètodes emprats ens han permès corroborar en part les hipòtesis inicials: 1) les superfícies tractades amb productes hidrofugants presenten un millor comportament hídic i major resistència a l'acció continua dels agents climàtics, però alguns d'ells poden generar canvis en l'aparença, densitat aparent i rugositat superficial dels materials; i 2) la qualitat de producte influeix en l'eficàcia del tractament aplicat, però aquesta també dependrà de les característiques del suport. Els productes de base nanotecnològica es presenten com una millor opció en comparació amb el producte hidrofugant convencional; tanmateix no tots són compatibles amb els materials sotmesos a assaig.

No obstant això, ens han quedat qüestions per resoldre:

- No queda clar per què les provetes hidrofugades amb NSW han experimentat variacions cromàtiques que han donat lloc a l'enfosquiment de la superfície i per què s'ha format una pel·lícula fílmica, quan els fabricants ens asseguren que és un producte superhidrofugant que no crea pel·lícules superficials, tal i com ho fa un impermeabilitzant. Es podria dir que són químicament incompatibles?
- Per què els productes basats en nanopartícules (NSW i AU) funcionen de manera similar quan són aplicats sobre els diferents suports i no s'aprecien diferències significatives en els resultats. En canvi, el producte hidrofugant convencional (TK) experimenta una major variació en els resultats. No s'entén per què el tractament respon millor en les provetes de calç SA que en les CC i TI.

Els resultats obtinguts només són vàlids per a les mostres assajades, sota les condicions experimentals descrites en els informes d'assaig del *Capítol 3 - Materials i mètodes* d'aquest treball. Així mateix, no és possible fer una extrapolació dels resultats, ja que no podem assegurar que els productes hidrofugants escollits siguin prou representatius de la resta de productes de la seva categoria, s'haurien de realitzar més estudis per poder determinar el grau de representativitat dels productes analitzats. D'altra banda, s'ha de tenir en compte que els resultats poden variar en funció de l'aigua utilitzada durant la realització dels assajos experimentals.



## 4.2.2. Futura recerca

A partir dels resultats obtinguts, es fa una anàlisi o valoració, on s'estableixen les pautes per seleccionar el tractament més adequat en funció de la composició i característiques mineralògiques dels sostrats petris analitzats i que formen part dels béns a restaurar. Els estudis duts a terme resten inacabats, caldria avaluar altres propietats i estudiar l'evolució amb el temps i durabilitat dels tractaments aplicats sobre els diferents materials per dur a terme una selecció adequada en cada cas.

Els mètodes d'assaig que es valoren per avaluar el comportament i les propietats dels productes hidrofugants analitzats són: 1) assajos per determinar el grau d'eficàcia dels tractaments de protecció i hidrofugació (absorció o succió de l'aigua per capillaritat); 2) estudis del comportament i resposta dels materials hidrofugats amb l'ambient específic (permeabilitat al vapor d'aigua, estudi colorimètric, etc.); i 3) proves per comprovar la durabilitat i resistència dels productes hidrofugants als factors d'alteració (cristal·lització de sals, radiació ultraviolada, cicles de gel-desgel, cicles termohigromètrics i resistència a l'atac químic).

D'altra banda, s'haurien de fer més proves per profunditzar en el coneixement dels productes hidrofugants sotmesos a assaig i fer una valoració final del seu comportament sobre revestiments de calç que són exposats a l'acció de l'aigua de la pluja. Per determinar l'alteració, durabilitat i estabilitat dels tractaments aplicats, s'haurien de realitzar assajos de permeabilitat al vapor d'aigua, de cicles d'humitat-sequedat i d'acceleració de l'envelliment.

També es podria obtenir informació útil de cara a la investigació, fent proves amb altres materials, pedres calcàries, granits, gresos, ceràmiques, formigons, morters, fustes, etc. Per continuar amb les investigacions, creiem que el següent pas consistiria a repetir els assajos que s'han dut a terme, provant diferents concentracions (0%, 25%, 50% i 75%) dels productes hidrofugants sobre la superfície d'assaig.

L'objectiu seria tractar de comprovar si el producte diluït disminueix la seva eficàcia de forma proporcional o, al contrari, si perd completament la seva capacitat hidrofòbica, per la falta d'adherència i impossibilitat de crear les unions. Un altre punt important, seria tractar de determinar si s'observen variacions en les propietats hidrofòbiques dels materials aplicant 2 o més capes de cadascun dels productes hidrofugants assajats.

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022

## **Bibliografia**



## Bibliografia

AENOR. (2010, setembre). *UNE-EN 15802. Conservación del patrimonio cultural. Métodos de ensayo. Determinación del ángulo de contacto estático*. Asociación Española de Normalización. Recuperat el 19 de març de 2022, de <https://tienda.aenor.com/normas/buscador-de-normas>

AENOR. (2016a, juliol). *UNE-EN 16302. Conservación del patrimonio cultural. Métodos de ensayo. Medición de la absorción de agua por el método de la pipeta*. Asociación Española de Normalización. Recuperat el 19 de març de 2022, de <https://tienda.aenor.com/normas/buscador-de-normas>

AENOR. (2016b, juliol). *UNE-EN 16581. Conservación del patrimonio cultural. Protección superficial para materiales inorgánicos porosos. Métodos de ensayo de laboratorio para la evaluación de las prestaciones de los productos hidrófugos*. Asociación Española de Normalización. Recuperat el 19 de març de 2022, de <https://tienda.aenor.com/normas/buscador-de-normas>

AENOR. (2020, setembre). *UNE-EN 17187. Conservación del patrimonio cultural. Caracterización de morteros utilizados en el patrimonio cultural*. Asociación Española de Normalización. Recuperat el 19 de març de 2022, de <https://tienda.aenor.com/normas/buscador-de-normas>

AENOR. (2019, setembre). *UNE-EN 17114. Conservación del patrimonio cultural. Protección de la superficie de los materiales inorgánicos porosos. Fichas de datos técnicos y químicos de productos hidrófugos*. Asociación Española de Normalización. Recuperat el 19 de març de 2022, de <https://tienda.aenor.com/normas/buscador-de-normas>

Benavente, D. (2006). *Propiedades físicas y utilización de rocas ornamentales*. En: *Utilización de rocas y minerales industriales / ed. Ma Ángeles García del Cura y Juan Carlos Cañaveras*. Universidad de Alicante. (Seminarios de la Sociedad Española de Mineralogía; 2). Recuperat el 13 d'abril del 2022, de <http://hdl.handle.net/10045/25571>

Campos, J. C. F. (s.f.). *Teoría sobre la hidrofugación*. Química Internacional. Recuperat el 18 d'abril del 2022, de [https://www.quimicainternacional.com/pdf/biblioteca/miscelanea/Teoria\\_sobre\\_la\\_hidrofugacion.pdf](https://www.quimicainternacional.com/pdf/biblioteca/miscelanea/Teoria_sobre_la_hidrofugacion.pdf)

Cassie, A. B. D.(1948). *Ángulos de contacto*. Discusiones de la Sociedad Faraday. <https://doi:10.1039/>

Chiantore, O., & Lazzari, M. (2001). Photo-oxidative stability of paraloid acrylic protective polymers. *Polymer*. Recuperat el 21 d'abril del 2022, de [https://www.researchgate.net/publication/229198849\\_Photo-oxidative\\_stability\\_of\\_paraloid\\_acrylic\\_protective\\_polymers](https://www.researchgate.net/publication/229198849_Photo-oxidative_stability_of_paraloid_acrylic_protective_polymers)

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídic i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022



*Cómo impermeabilizar una fachada con hidrofugante para piedra, 100% eficacia.* (2020, maig). Impermeabilizantes y Pinturas. Coatings. Recuperat el 23 d'abril del 2022, de <https://fepsaimpermeabilizantes.blog/hidrofugante-para-piedra/>

*Conozca el proceso de hidrofugación y sus ventajas.* (2022, 17 maig). QuimiNet.com. Recuperat el 17 d'abril del 2022, de <https://www.quiminet.com/articulos/conozca-el-proceso-de-hidrofugacion-y-sus-ventajas-2717348.htm>

Coronado, J. A. M., & García, A. S. (2011). *La influencia de los productos hidrofugantes en las modificaciones cromáticas del ladrillo cerámico.* *Materiales de la Construcción*, 61(304), 597–611. Recuperat el 20 d'abril del 2022, de [https://www.researchgate.net/publication/274778829\\_La\\_influencia\\_de\\_los\\_productos\\_hidrofugantes\\_en\\_las\\_modificaciones\\_cromaticas\\_del\\_ladrillo\\_ceramico/download](https://www.researchgate.net/publication/274778829_La_influencia_de_los_productos_hidrofugantes_en_las_modificaciones_cromaticas_del_ladrillo_ceramico/download)

Correa, M. (2022, 17 maig). *Diferencia entre un hidrofugante e impermeabilizantes acrílicos.* Equipo AP. Recuperat el 18 d'abril del 2022, de <http://apexperteam.blogspot.com/2014/12/HidrofugantesVSImpermeabilizantes.htm>

De Rosario, I. A. (2017). *Eficacia de consolidantes e hidrofugantes de nueva síntesis en rocas graníticas: Optimización de métodos de evaluación (Tesis Doctoral).* Universidad de Vigo. Recuperat el 20 d'abril del 2022, de [http://www.investigacion.biblioteca.uvigo.es/xmlui/bitstream/handle/11093/802/Eficacia\\_de\\_consolidantes\\_e\\_hidrofugantes.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://www.investigacion.biblioteca.uvigo.es/xmlui/bitstream/handle/11093/802/Eficacia_de_consolidantes_e_hidrofugantes.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Durán, I. R., & Laroche, G. (2018). Water drop-surface interactions as the basis for the design of anti-fogging surfaces: Theory, practice, and applications trends. *Advances in colloid and interface science.* <https://doi.org/10.1016/j.cis.2018.11.005>

Extrand, C. W. (2004, juny). *Criterios para superficies ultralofóbicas.* *Langmuir.* <https://doi.org/10.1021/la036481s>

Fakolith. (2017, novembre). *La hidrofugación. Protección transpirable sin capa, contra el agua y sus consecuencias, para bases minerales.* Fakolith Chemical Systems, S.L.U. Recuperat el 18 d'abril del 2022, de <https://www.fakolith.es/docs/la-hidrofugacion-fakolith-hidrofugantes-micro-y-nano.pdf>

Fernández, A. C. (2013, setembre). *Estudio de la Hidrofobicidad y Autolimpieza en Materiales con Nanotratamientos Superficiales (TFG).* Recuperat el 22 d'abril del 2022, de [https://ddd.uab.cat/pub/trerepro/2013/hdl\\_2072\\_234675/PFC\\_AgustinFernandezCanete.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/trerepro/2013/hdl_2072_234675/PFC_AgustinFernandezCanete.pdf)

Ficha técnica. Aquashield Ultimate. *Hidrofugante en base a nanopartículas para fachadas de materiales porosos.* (2017, maig). Tecnan. Recuperat el 21 d'abril del 2022, de <https://tecnan-nanomat.es/wp-content/uploads/2018/10/Ficha-Tecnica-AQUASHIELD-ULTIMATE.pdf> 66

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídic i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics.* Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022



*Ficha técnica. Nano Silo W. Protector hidropelente al agua para materiales de construcción de interés histórico artístico.* (2015, gener). CTS España. Recuperat el 21 d'abril del 2022, de <https://shop-espana.ctseurope.com/documentacioncts/fichastecnicasweb2018/2.2protectores2016/NANO%20SILO%20W%20ESP.pdf>

*Ficha Técnica. Tkrom impermeabilizante fachadas hidrofugante invisible.* (2019, juny). Tkrom. Eupinca.

Fort, R. (s.f.). *Polímeros sintéticos para la conservación de materiales pétreos. Instituto de Geología Económica (CSIC-UCM).* Facultad de CCC. Geológicas. Recuperat el 21 d'abril del 2022, de [https://digital.csic.es/bitstream/10261/8340/1/Fort\\_Fort\\_Pol%C3%ADmeros.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/8340/1/Fort_Fort_Pol%C3%ADmeros.pdf)

Fort, R. G. (2012). *Tratamientos de conservación y restauración de geomateriales: tratamientos de consolidación e hidrofugación. La conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio.* Programa geomateriales, 125–132. Recuperat el 17 d'abril del 2022, de [https://digital.csic.es/bitstream/10261/46806/1/Curso\\_Geomateriales\\_125\\_132.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/46806/1/Curso_Geomateriales_125_132.pdf)

Fortes, C. R., & Blanco, M. T. V. (2001, juny). *Influencia de tratamientos de hidrofugación en las propiedades de morteros de cal y cal y puzolana.* Materiales de Construcción. Instituto de Ciencias de La Construcción Eduardo Torroja, 51(262). Recuperat el 21 d'abril del 2022, de <http://materconstrucc.revistas.csic.es>

Gao, L., & McCarthy, T. J. (2009, julio). *An attempt to correct the faulty intuition perpetuated by the Wenzel and Cassie "laws".* Langmuir. <https://doi.org/10.1021/la901416m>

*Guía rápida: Tipología y diagnóstico de humedades y consecuencias derivadas de su aparición.* (2021, 18 d'octubre). Pinturas Revetón. Recuperat el 11 d'abril del 2022, de <https://reveton.com/guia-rapida-tipologia-y-diagnostico-de-humedades-y-consecuencias-derivadas-de-su-aparicion/>

Gómez, L. S. V. (2012). *Nanopartículas para la conservación del patrimonio. La conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio.* Instituto de Geociencias (CSIC-UCM). Recuperat el 19 d'abril del 2022, de [https://digital.csic.es/bitstream/10261/46811/1/Curso\\_Geomateriales\\_171\\_180.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/46811/1/Curso_Geomateriales_171_180.pdf)

Horie, C. V. (1987). *Materials for conservation: organic consolidants, adhesives and coatings.* Editorial Butterworth.

Henderson, J. R. (2000). *Mecánica estadística de la ley de Cassie.* Física molecular. 98 (10). <https://doi.org/10.1080/00268970009483335>

*Humedad de Obra.* (2010, 17 noviembre). Construmatica. Metaportal de Arquitectura, Ingeniería y Construcción. Recuperat el 12 d'abril del 2022, de [https://www.construmatica.com/construpedia/Humedad\\_de\\_Obra](https://www.construmatica.com/construpedia/Humedad_de_Obra)

García Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics.* Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022



Humedades, A. (2021, agost). *Descubre porqué la nano-tecnología está revolucionando la construcción. Antihumedades.es: Soluciones para los problemas de humedad en las viviendas*. Recuperat el 23 d'abril del 2022, de <https://antihumedades.es/blog/hidrofugos-nanoparticulas-revolucionan-la-impermeabilizacion-de-fachadas/>

*Humitats i impermeabilitzacions en comunitats de propietaris*. (2016, 27 maig). TRC pintura. Impermeabilizaciones, Pavimentación y Revestimientos. Recuperat el 9 d'abril del 2022, de <https://trcpaint.com/humedades-impermeabilizaciones-comunidades-propietarios/?lang=ca>

*Las falsas soluciones a la humedad por condensación*. (2019, 15 d'abril). S&P Sistemas de Ventilación. Recuperat el 10 d'abril del 2022, de <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/humedades-por-condensacion/>

*Los daños estructurales por humedades más frecuentes*. (2020, 10 de juny). Ingenieros Asesores. Recuperat el 11 d'abril del 2022, de <https://ingenierosasesores.com/actualidad/danos-estructurales-por-humedades/>

NCh 163 (1999). *Áridos para morteros y hormigones. Requisitos generales*. Instituto Nacional de Normalización. República de Chile.

*Patologías en edificaciones: cuáles son las más frecuentes y cómo se originan*. (2019, maig). S&P Sistemas de Ventilación. Recuperat el 13 d'abril del 2022, de <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/patologias-edificaciones/>

Paviprint. (2014, juny). *La hidrofugación: La verdadera protección para las superficies minerales*. Productos Paviprint S.L. Recuperat el 16 d'abril del 2022, de <https://www.paviprint.com/descargas/catalogos/HIDROFUGACION.pdf>

Pereira, J. (2013, abril). *Escala y mediciones sobre fotografías*. Digital Heritage. Recuperat el 2 de juny del 2022, de <http://www.jpereira.net/gestion-de-color-articulos/mediciones-y-asignacion-de-escala-en-fotografias>

Polímeros vinílicos. (2022). *Polímeros vinílicos*. pslc.ws. Recuperat el 21 d'abril del 2022, de <https://www.pslc.ws/spanish/vinyl.htm>

Ramis, J. (s.f.). *Características de los termoestables*. Tesis en red. Recuperat el 21 d'abril del 2022, de <https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/6686/06Txrj6de14.pdf?sequence=6>

Rivas, S. A. P. (2021). *Tratamientos de conservación de monumentos en piedra. Precipitación biológica de carbonato cálcico como método alternativo (TFG)*. Universidad de Sevilla. Recuperat el 21 d'abril del 2022, de <https://idus.us.es/handle/11441/125149>

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022



San Andrés, M. M., & de la Viña, S. F. (2009). *Fundamentos de química y física para la conservación y restauración*. Editorial Síntesis.

Tomé, J. S. (2021, 5 abril). *Tipos de humedades, cómo identificarlas y solucionarlas*. Arrevol. Recuperat el 12 d'abril del 2022, de <https://www.arrevol.com/blog/tipos-de-humedades-como-identificar-las-y-solucionarlas>

V.V.A.A. (s.f.). *Caracterización y estudios de deterioro/conservación de materiales pétreos en monumentos históricos*. IRNASA (CSIC). Universidad de Salamanca. Recuperat el 13 d'abril del 2022, de [https://ge-iic.com/files/2congresoGE/Caracterizacion\\_y\\_estudios\\_de\\_deterioro.pdf](https://ge-iic.com/files/2congresoGE/Caracterizacion_y_estudios_de_deterioro.pdf)

Villegas, R., Baglioni, R., & Sameño, M. (2003). *Tipología de Materiales para Tratamiento*. En *Varios, Metodología de Diagnóstico y Evaluación de Tratamientos para la Conservación de los Edificios Históricos*. Comares. Recuperat el 21 d'abril del 2022, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=791127>

Villegas, R., Vale, J. F., & Alcalde, M. (1991). *Evaluación de tratamientos de hidrofugación aplicados a piedras calizas de Catedrales Andaluzas*. *Materiales de la Construcción*, 41(223), 19–27. Recuperat el 9 d'abril del 2022, de <https://idus.us.es/handle/11441/17640>

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022

## **Annexos**

## Annexos. Mesuraments

### Annex 1. Mesuraments - Angle de contacte

En aquest apartat, s'inclouen els resultats dels assajos experimentals duts a terme per determinar el grau d'hidrorrepel·lència de les superfícies tractades amb els diferents productes hidrofugants sotmesos a assaig. Com ja hem pogut veure, per conèixer la hidrorrepel·lència de les provetes, és necessari calcular l'angle de contacte de la gota a partir dels valors  $h$  i  $d$  mesurats.

	Pipeta 1			Pipeta 2			Pipeta 3			Mitjana
	$h$	$d$	$\theta$	$h$	$d$	$\theta$	$h$	$d$	$\theta$	$\theta$
SA-01	2,99	3,56	118,40	3,97	4,31	123,00	3,35	4,19	116,00	119,13
SA-02	2,88	4,21	107,60	3,94	4,36	122,10	2,83	4,06	108,60	112,77
SA-03	3,93	5,04	114,60	3,97	4,88	116,90	3,64	4,66	114,70	115,40
SA-04	5,14	5,70	122,00	8,00	5,79	140,20	4,20	4,74	121,10	127,77
SA-05	3,87	3,53	131,00	5,41	4,48	135,00	5,65	3,56	145,00	137,00
SA-06	4,70	3,42	140,00	4,76	4,42	130,20	4,84	4,48	130,30	133,50
SA-07	3,16	3,75	118,70	3,21	4,36	111,70	5,66	4,14	139,80	123,40
SA-08	3,54	4,83	111,40	2,66	3,38	115,20	2,87	3,60	115,80	114,13
SA-09	2,63	3,48	113,10	3,34	3,17	129,20	6,20	5,35	133,30	125,20
CC-01	4,45	4,86	122,70	4,71	4,77	126,30	4,93	4,83	127,80	125,60
CC-02	3,26	4,58	109,90	3,09	4,14	112,30	2,85	4,28	106,10	109,43
CC-03	4,74	5,49	119,80	3,97	4,25	123,70	4,27	4,30	126,60	123,37
CC-04	5,47	4,53	135,00	3,93	5,06	114,40	4,60	4,75	125,40	124,93
CC-05	3,21	4,07	115,20	4,55	5,04	122,00	4,72	5,09	123,30	120,17
CC-06	4,55	4,81	124,30	4,40	5,23	118,60	5,14	4,97	128,4	123,77
CC-07	4,47	6,15	111,00	3,11	4,40	109,50	2,87	4,53	103,5	108,00
CC-08	2,82	5,77	88,70	2,94	4,26	108,10	3,94	4,37	122	106,27
CC-09	3,02	3,49	120,00	2,24	3,25	108,00	3,59	4,69	113,7	113,90
TI-01	4,21	5,36	115,00	4,65	5,51	118,70	6,16	5,86	129,1	120,93
TI-02	5,20	5,16	127,20	4,62	4,41	129,00	5,38	4,99	130,2	128,80
TI-03	5,78	4,52	137,30	5,02	5,05	126,60	4,54	4,24	129,9	131,27
TI-04	4,50	4,87	123,20	3,69	4,47	117,60	4,33	4,07	129,7	123,50
TI-05	4,72	3,55	138,80	3,82	3,21	134,40	4,79	4,04	134,3	135,83
TI-06	6,42	4,89	138,30	4,28	4,73	122,10	5,32	4,78	131,6	130,67
TI-07	3,17	4,95	104,10	3,70	5,27	109,10	3,27	5,47	100,1	104,43
TI-08	4,80	4,60	128,80	3,94	4,55	120,00	4,53	5,99	113,1	120,63
TI-09	2,46	3,91	103,00	2,85	4,12	108,20	2,91	4,83	100,7	103,97

**Figura 93** - Valors d'angle de contacte i mitjanes de les provetes tractades amb diferents productes hidrofugants. © Maria Isabel Garcia Vilà

## Annex 2. Mesuraments - Absorció de l'aigua

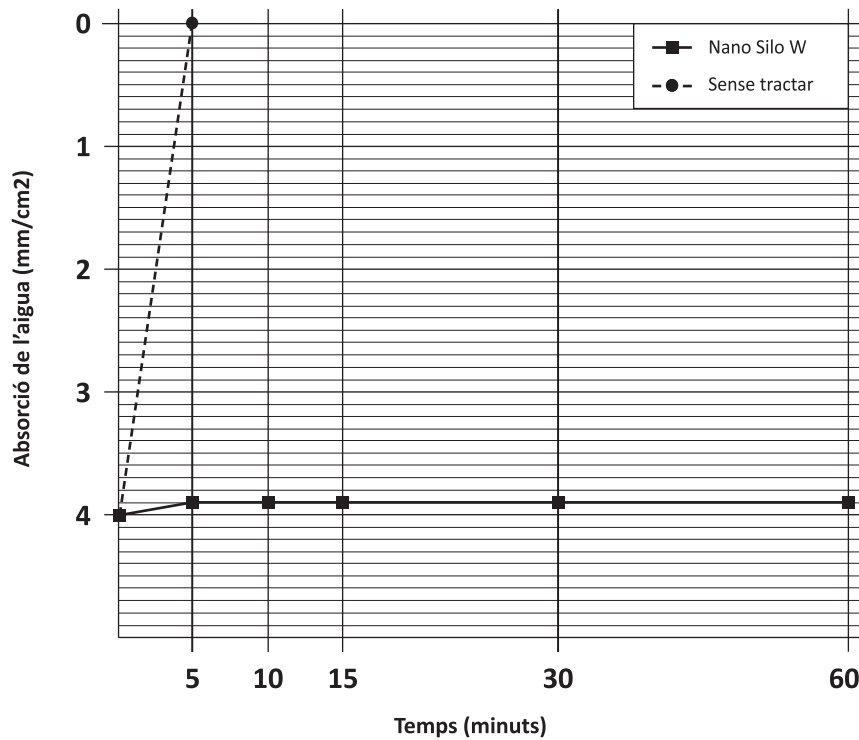
En l'annex 2, es mostren els resultats obtinguts en els assajos d'absorció de l'aigua realitzats sobre les mostres tractades amb diferents productes hidrofugants. Es pot visualitzar els valors d'absorció específics per cada interval de temps, les mitjanes obtingudes i les taxes d'absorció total enregistrades.

Mostra	Absorbància de l'aigua				
	5 [min]	10 [min]	15 [min]	Mitjana [ml/min]	Absorció total [Wf]
SA-01	0,10	-	-	0,10	0,10
SA-02	0,13	0,08	-	0,11	0,21
SA-03	0,11	-	-	0,11	0,11
SA-04	0,10	0,10	-	0,10	0,20
SA-05	0,19	-	-	0,19	0,19
SA-06	0,13	0,11	-	0,12	0,24
SA-07	0,52	0,28	-	0,40	0,80
SA-08	0,34	0,34	-	0,34	0,68
SA-09	0,32	0,22	-	0,27	0,54
CC-01	0,06	-	-	0,06	0,06
CC-02	0,09	-	-	0,09	0,09
CC-03	0,18	0,18	-	0,18	0,36
CC-04	0,12	-	-	0,12	0,12
CC-05	0,10	-	-	0,10	0,10
CC-06	0,11	-	-	0,11	0,11
CC-07	0,23	0,21	-	0,22	0,44
CC-08	0,54	0,33	0,44	0,44	1,31
CC-09	0,51	0,32	0,48	0,44	1,31
TI-01	0,13	0,10	-	0,12	0,23
TI-02	0,11	0,09	-	0,10	0,20
TI-03	0,23	0,12	-	0,18	0,35
TI-04	0,22	-	-	0,22	0,22
TI-05	0,19	-	-	0,19	0,19
TI-06	0,20	-	-	0,20	0,20
TI-07	0,58	0,52	-	0,55	1,10
TI-08	0,44	0,17	-	0,31	0,61
TI-09	0,53	0,52	0,38	0,48	1,43

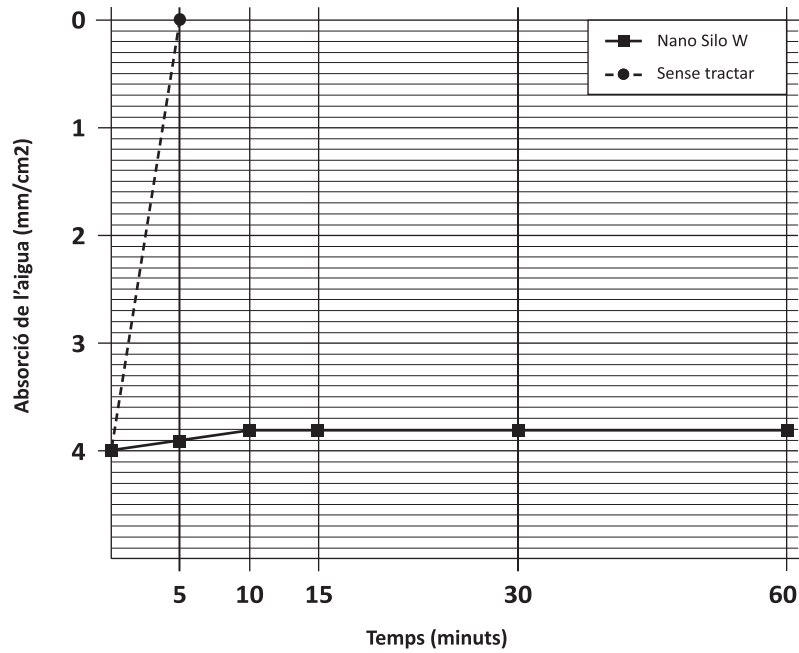
**Figura 94** - Valors d'absorció de l'aigua i mitjanes de les provetes tractades amb els diferents productes hidrofugants. © Maria Isabel Garcia Vilà

### Annex 3. Gràfiques - Absorció de l'aigua

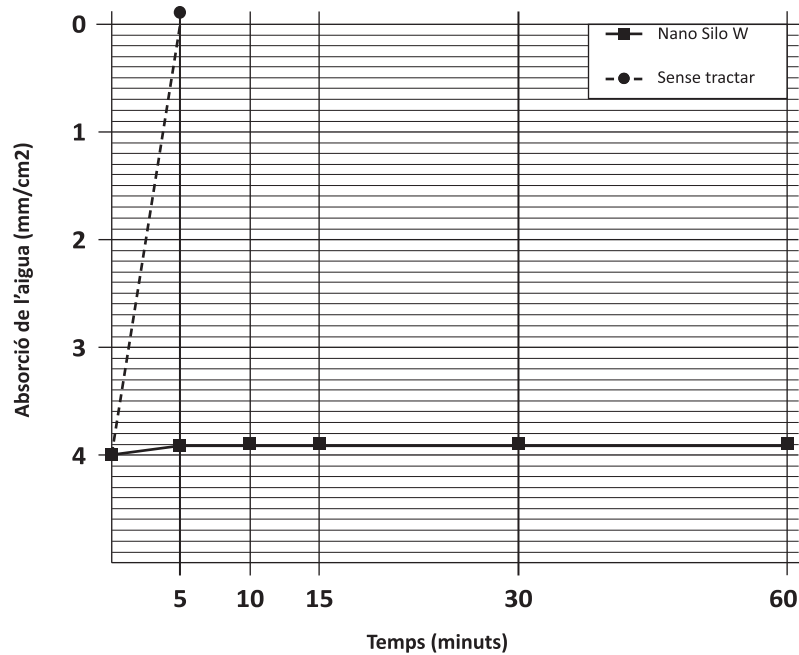
En l'annex 3, s'exposen els resultats obtinguts en forma de gràfics que recullen les corbes d'absorbència de les 27 provetes analitzades. Així mateix, es comparen els resultats de les provetes sense tractar i les provetes tractades amb els diferents productes hidrofugants.



**Figura 95** - Corba d'absorbència de la mostra SA-01 sense tractar i tractada amb Nano Silo W®. © Maria Isabel Garcia Vilà

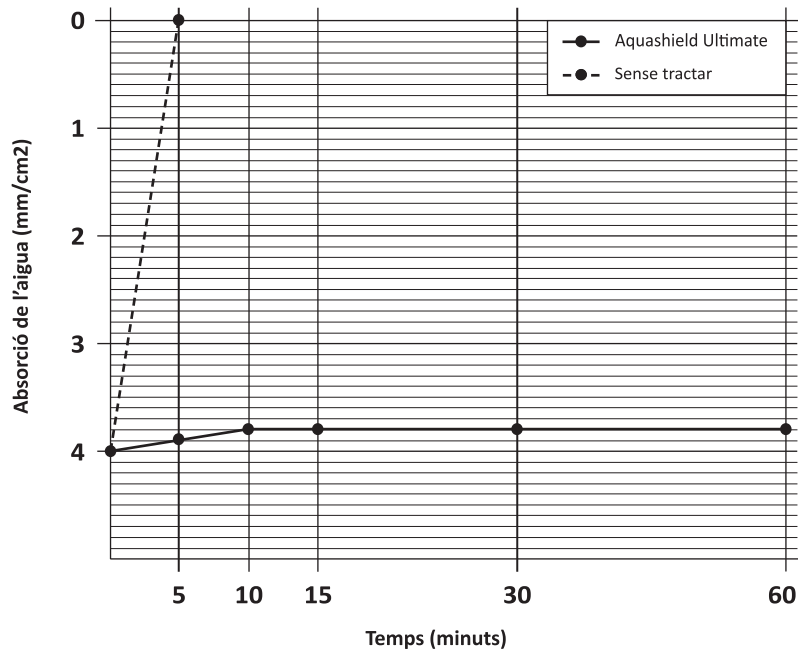


**Figura 96** - Corba d'absorbència de la mostra SA-02 sense tractar i tractada amb Nano Silo W®. © Maria Isabel Garcia Vilà



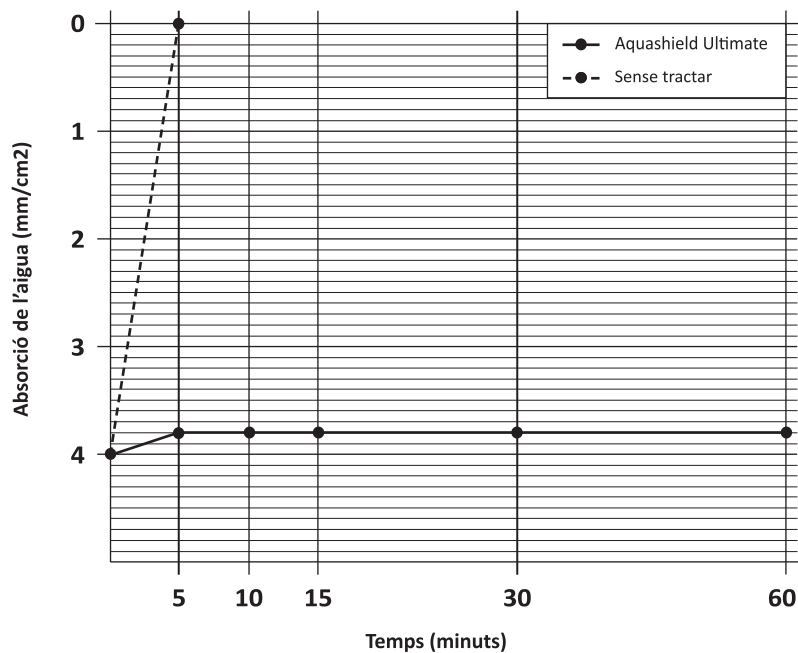
**Figura 97** - Corba d'absorbència de la mostra SA-03 sense tractar i tractada amb Nano Silo W®. © Maria Isabel Garcia Vilà

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022



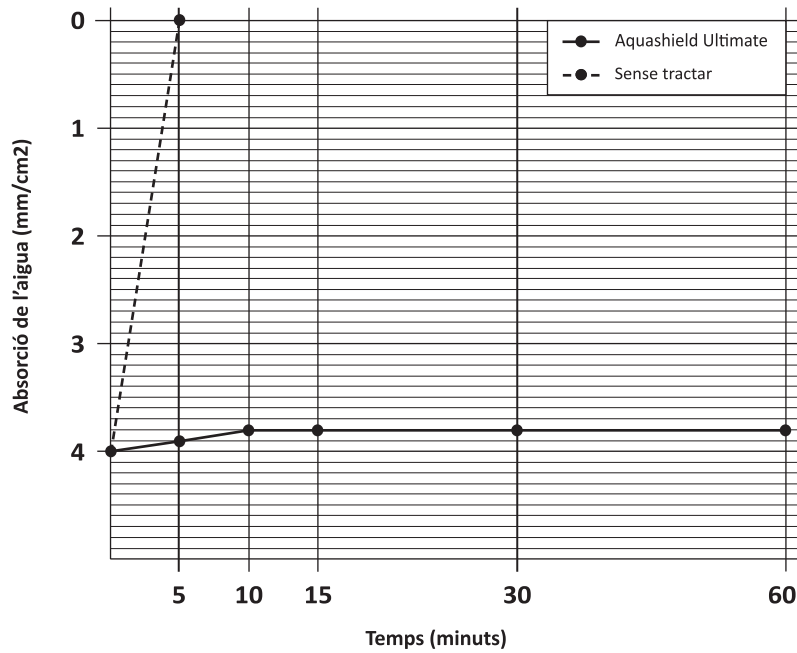
**Figura 98** - Corba d'absorbència de la mostra SA-04 sense tractar i tractada amb Aquashield Ultimate®.

© Maria Isabel Garcia Vilà



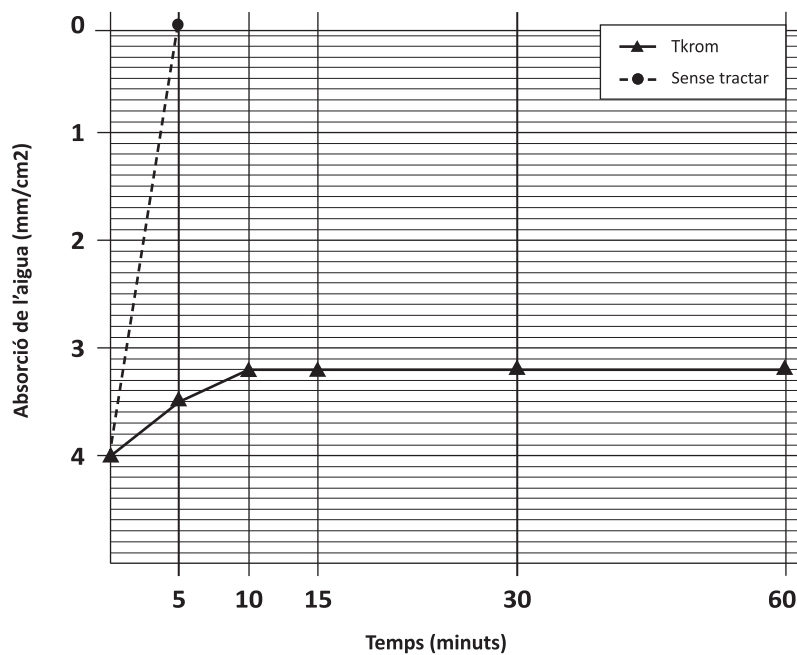
**Figura 99** - Corba d'absorbència de la mostra SA-05 sense tractar i tractada amb Aquashield Ultimate®.

© Maria Isabel Garcia Vilà



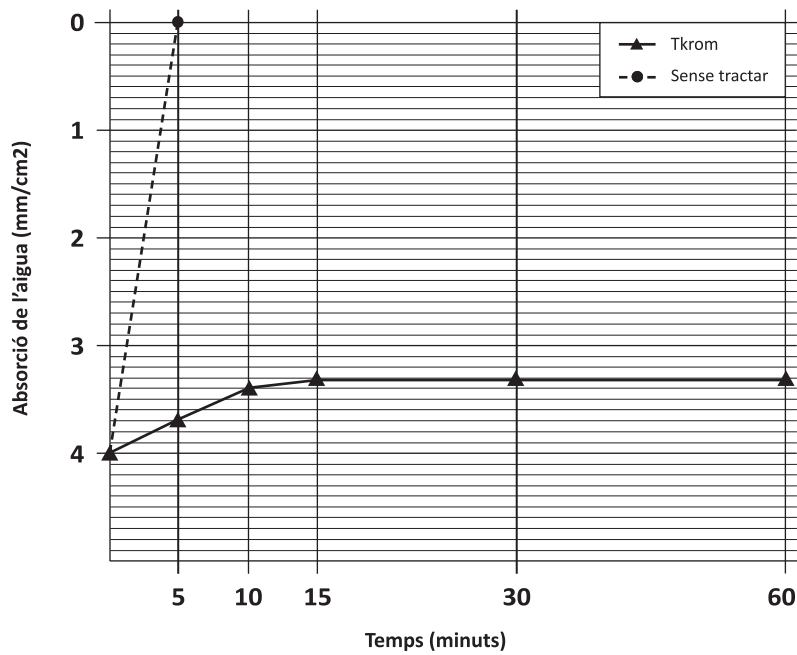
**Figura 100** - Corba d'absorbència de la mostra SA-06 sense tractar i tractada amb Aquashield Ultimate®.

© Maria Isabel Garcia Vilà

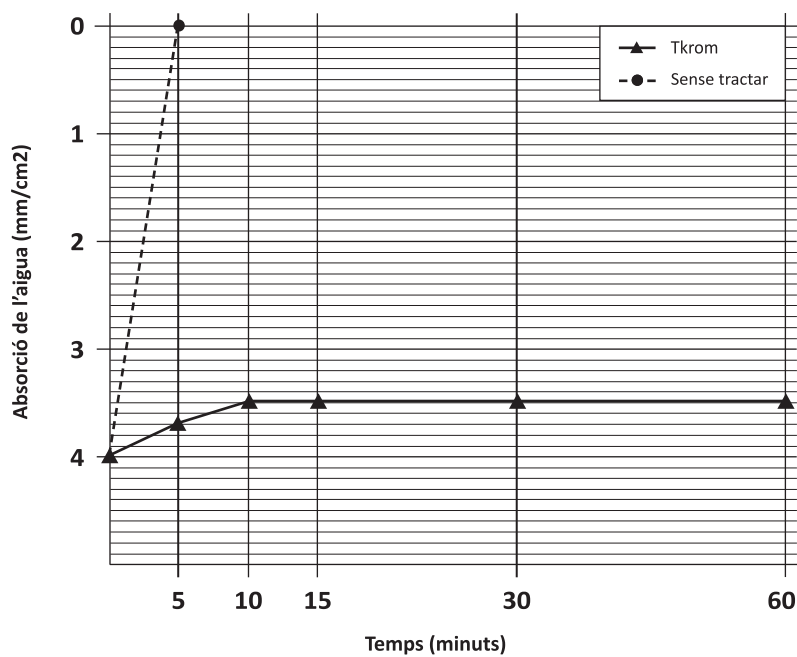


**Figura 101** - Corba d'absorbència de la mostra SA-07 sense tractar i tractada amb Tkrom®. © Maria Isabel

Garcia Vilà

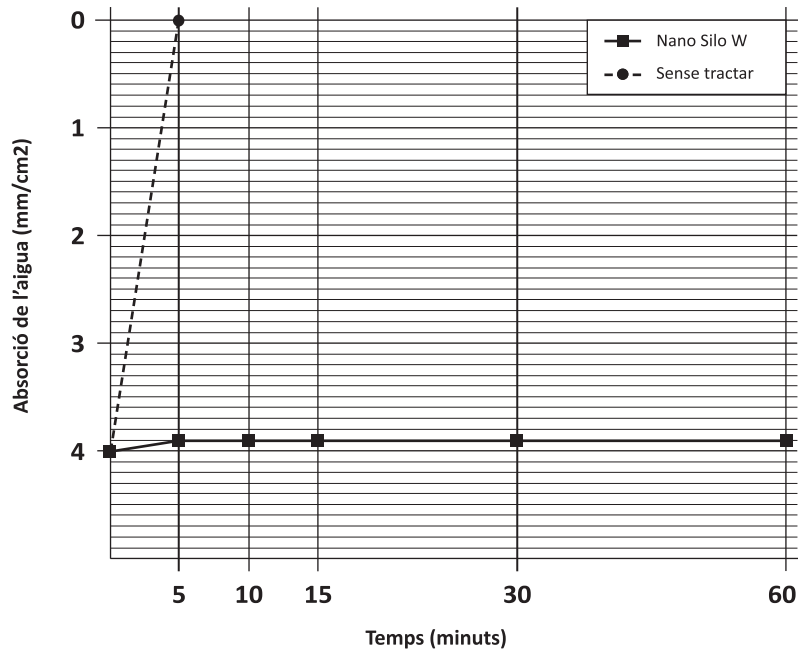


**Figura 102** - Corba d'absorbència de la mostra SA-08 sense tractar i tractada amb Tkrom®. © Maria Isabel Garcia Vilà

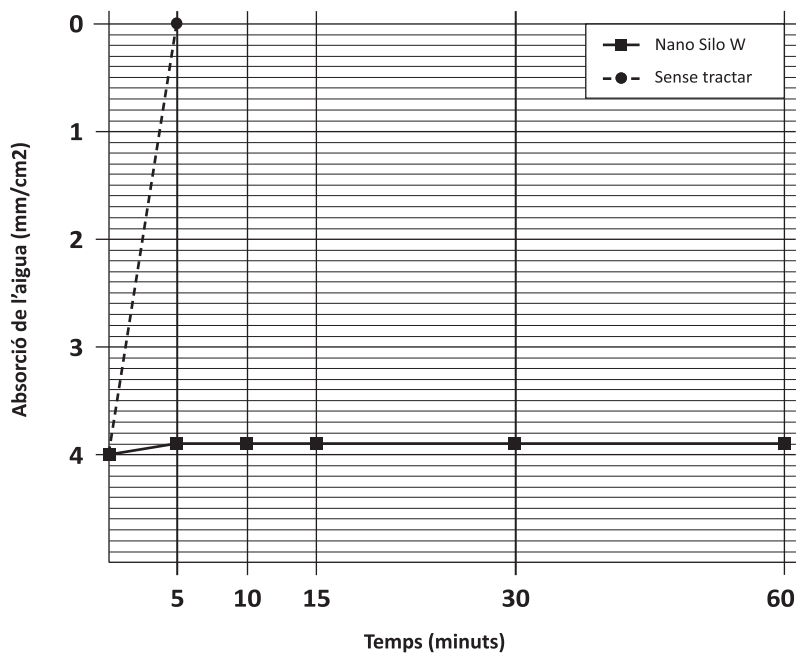


**Figura 103** - Corba d'absorbència de la mostra SA-09 sense tractar i tractada amb Tkrom®. © Maria Isabel Garcia Vilà

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022

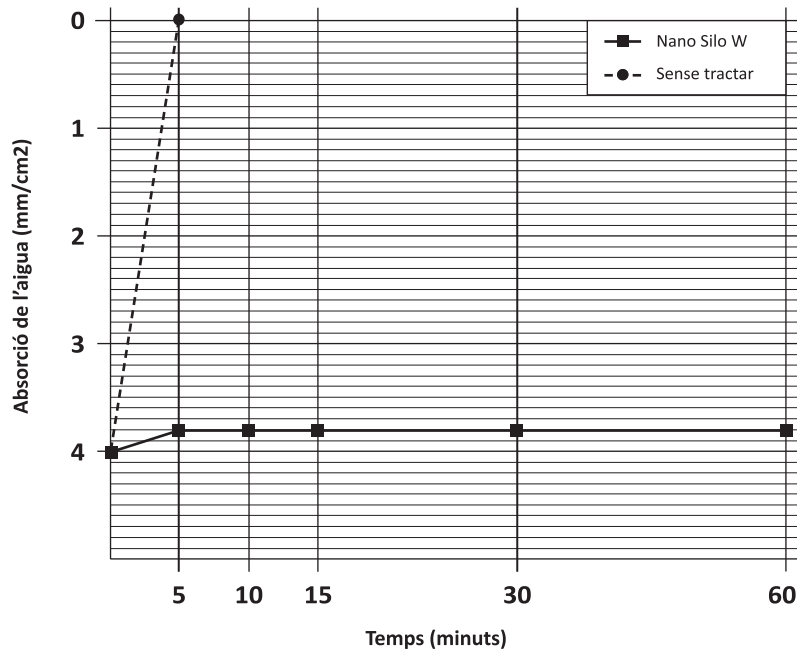


**Figura 104** - Corba d'absorbència de la mostra CC-01 sense tractar i tractada amb Nano Silo W®. © Maria Isabel Garcia Vilà

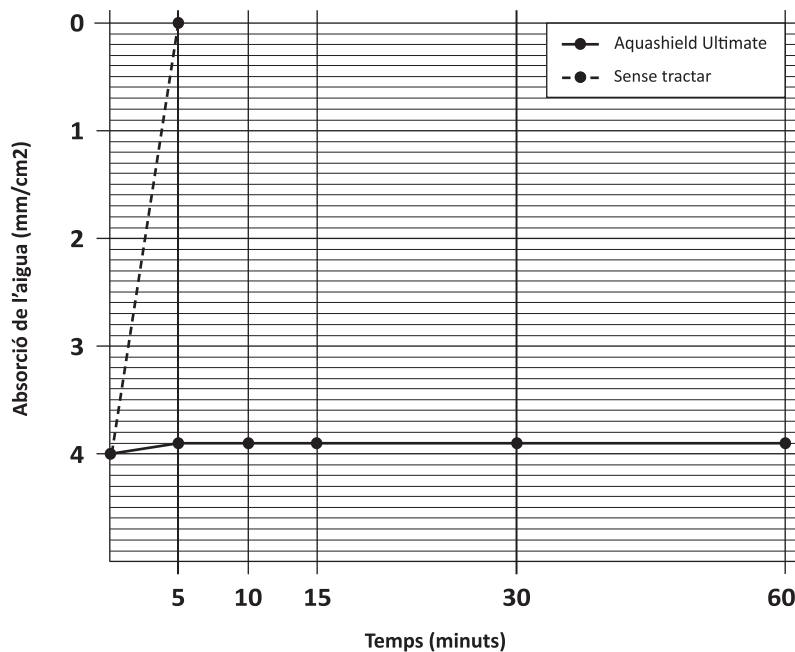


**Figura 105** - Corba d'absorbència de la mostra CC-02 sense tractar i tractada amb Nano Silo W®. © Maria Isabel Garcia Vilà

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022

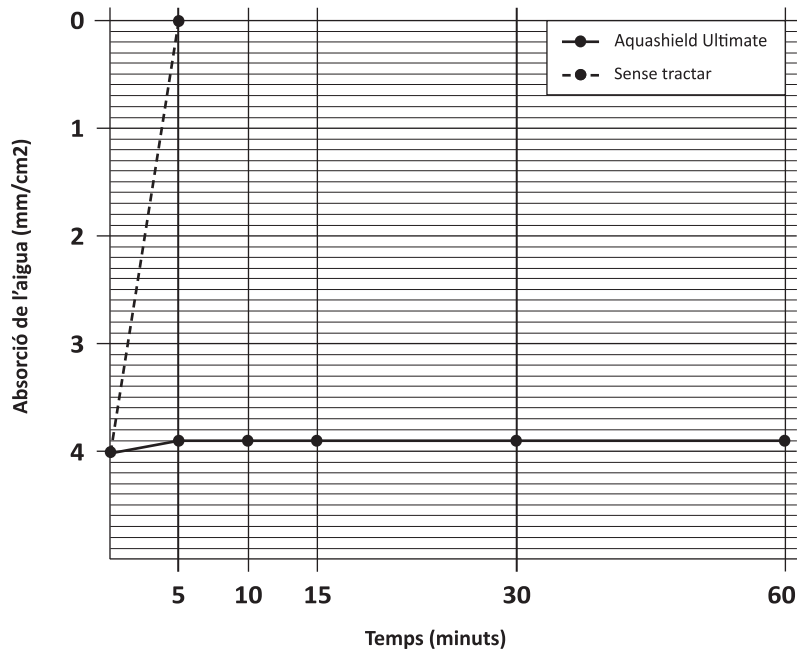


**Figura 106** - Corba d'absorbència de la mostra CC-03 sense tractar i tractada amb Nano Silo W®. © Maria Isabel Garcia Vilà



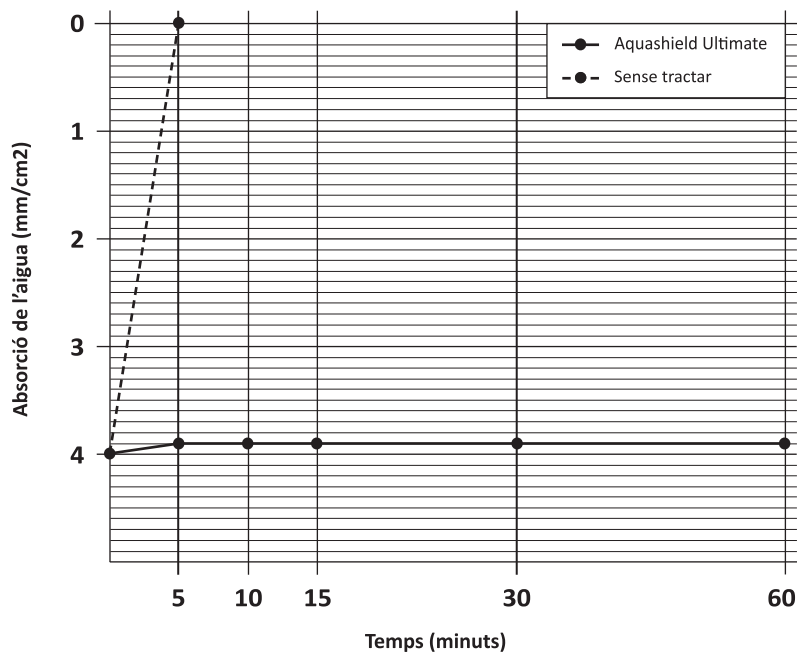
**Figura 107** - Corba d'absorbència de la mostra CC-04 sense tractar i tractada amb Aquashield Ultimate®. © Maria Isabel Garcia Vilà

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022



**Figura 108** - Corba d'absorbència de la mostra CC-05 sense tractar i tractada amb Aquashield Ultimate®.

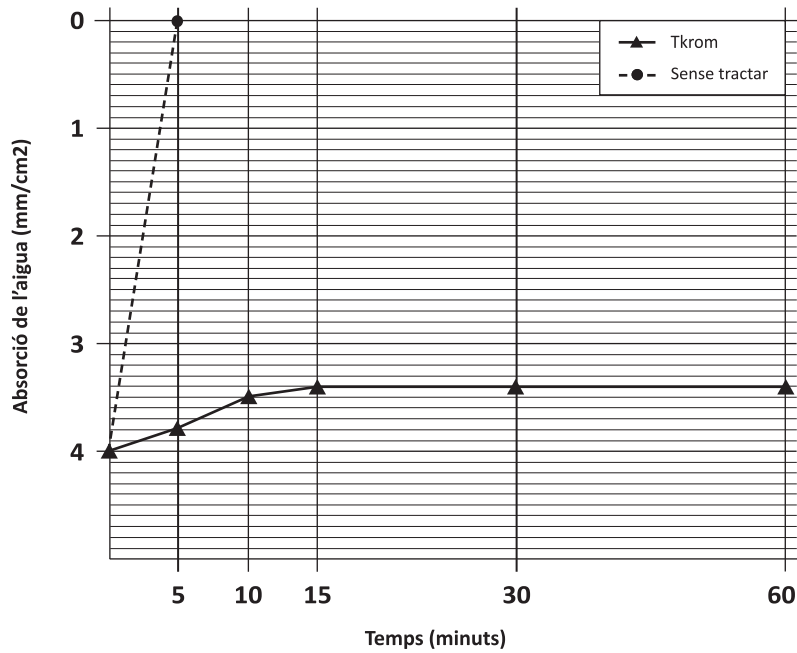
© Maria Isabel Garcia Vilà



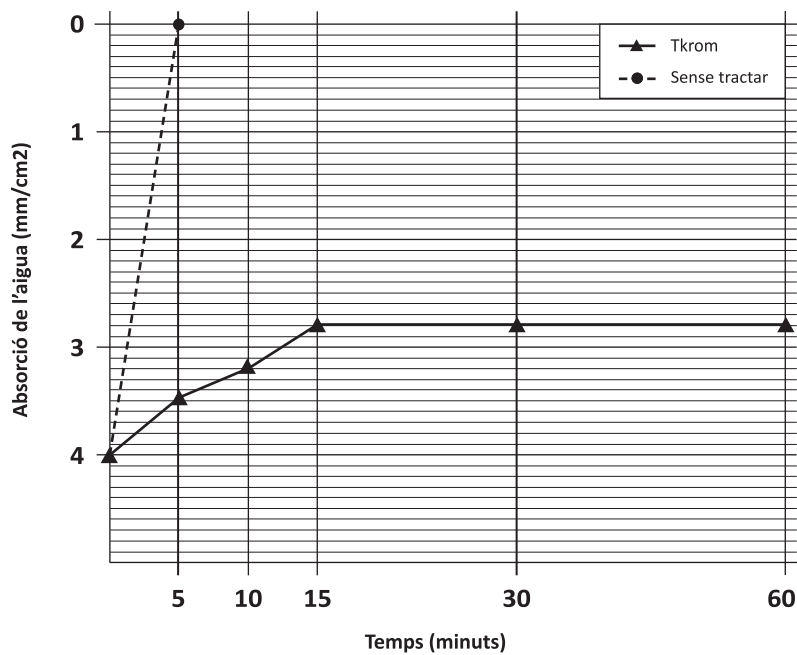
**Figura 109** - Corba d'absorbència de la mostra CC-06 sense tractar i tractada amb Aquashield Ultimate®.

© Maria Isabel Garcia Vilà

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022

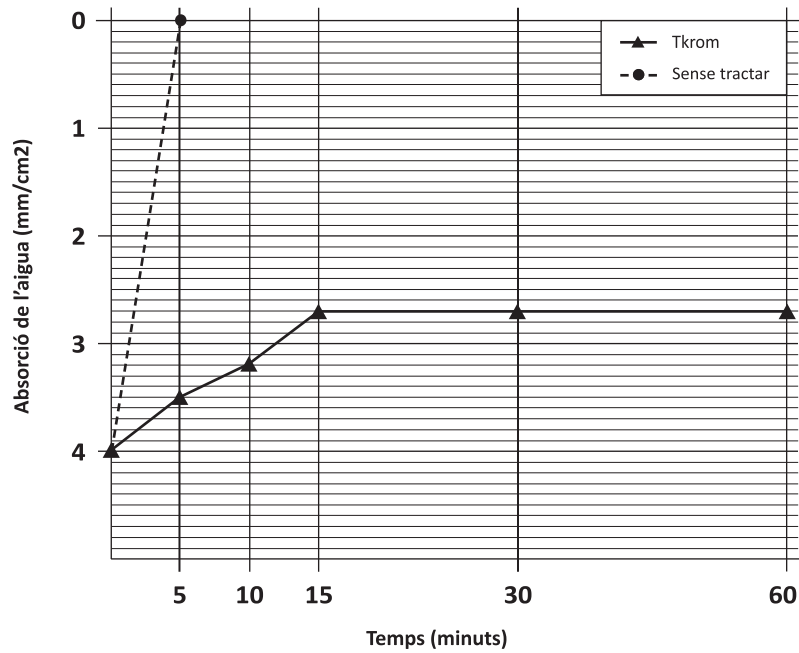


**Figura 110** - Corba d'absorbència de la mostra CC-07 sense tractar i tractada amb Tkrom®. © Maria Isabel Garcia Vilà

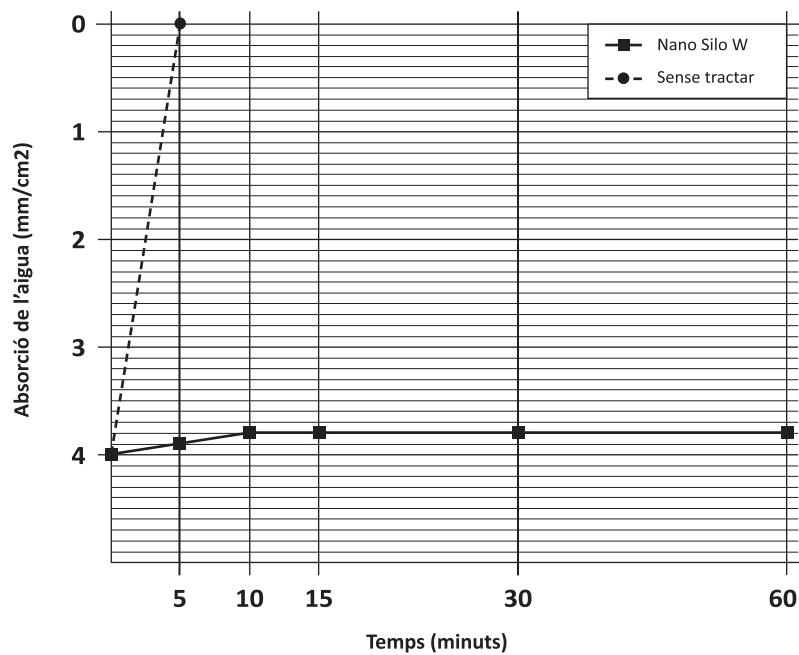


**Figura 111** - Corba d'absorbència de la mostra CC-08 sense tractar i tractada amb Tkrom®. © Maria Isabel Garcia Vilà

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022

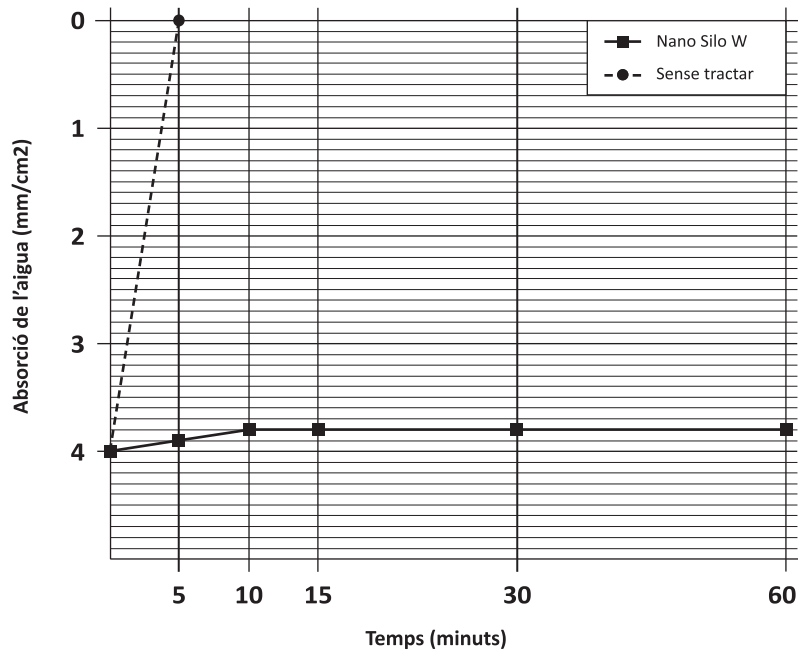


**Figura 112** - Corba d'absorbència de la mostra CC-09 sense tractar i tractada amb Tkrom®. © Maria Isabel Garcia Vilà

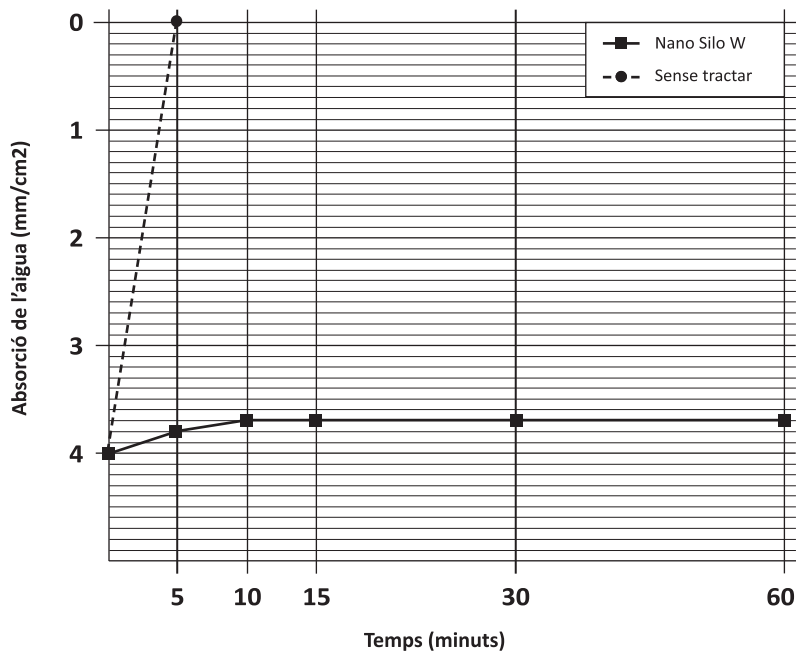


**Figura 113** - Corba d'absorbència de la mostra TI-01 sense tractar i tractada amb Nano Silo W®. © Maria Isabel Garcia Vilà

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022

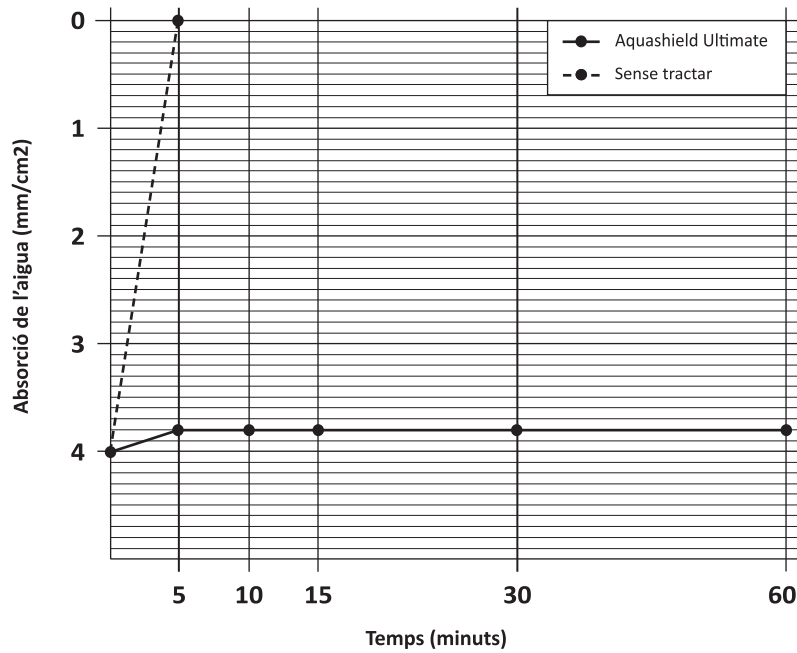


**Figura 114** - Corba d'absorbància de la mostra TI-02 sense tractar i tractada amb Nano Silo W®. © Maria Isabel Garcia Vilà



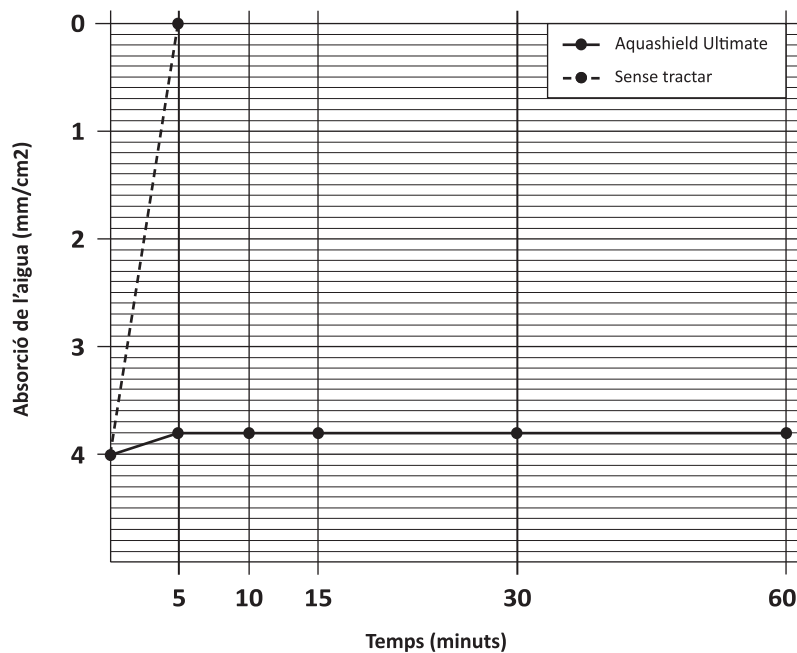
**Figura 115** - Corba d'absorbància de la mostra TI-03 sense tractar i tractada amb Nano Silo W®. © Maria Isabel Garcia Vilà

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022



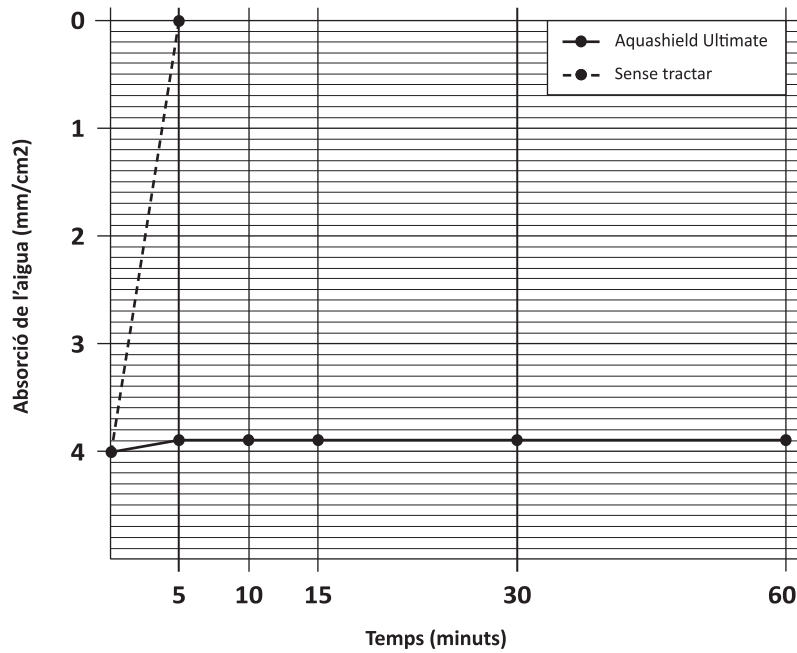
**Figura 116** - Corba d'absorbència de la mostra TI-04 sense tractar i tractada amb Aquashield Ultimate®.

© Maria Isabel Garcia Vilà



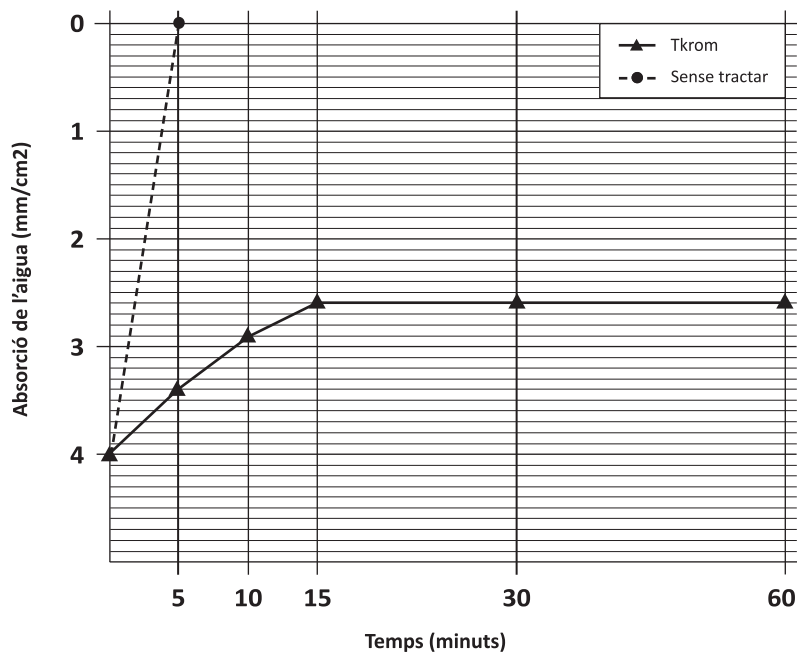
**Figura 117** - Corba d'absorbència de la mostra TI-05 sense tractar i tractada amb Aquashield Ultimate®.

© Maria Isabel Garcia Vilà



**Figura 118** - Corba d'absorbància de la mostra TI-06 sense tractar i tractada amb Aquashield Ultimate®.

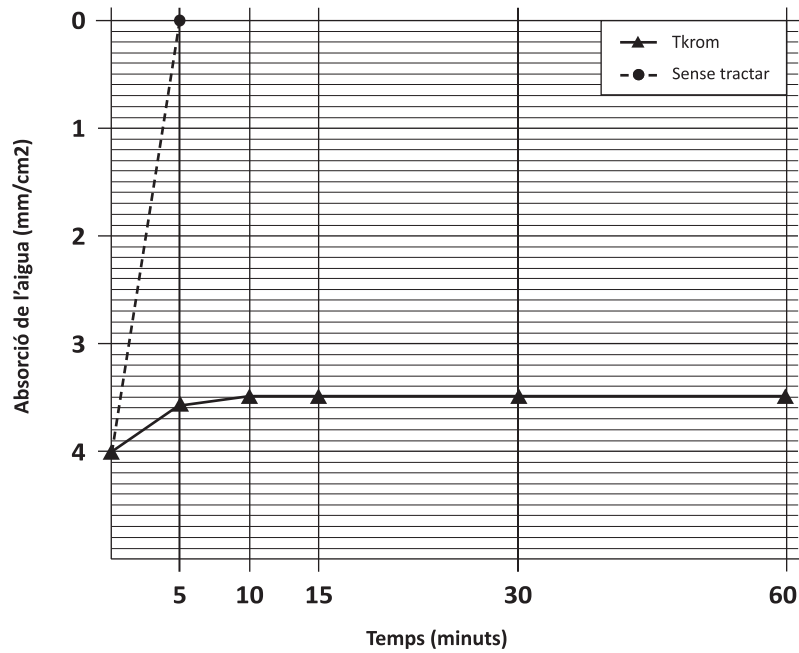
© Maria Isabel Garcia Vilà



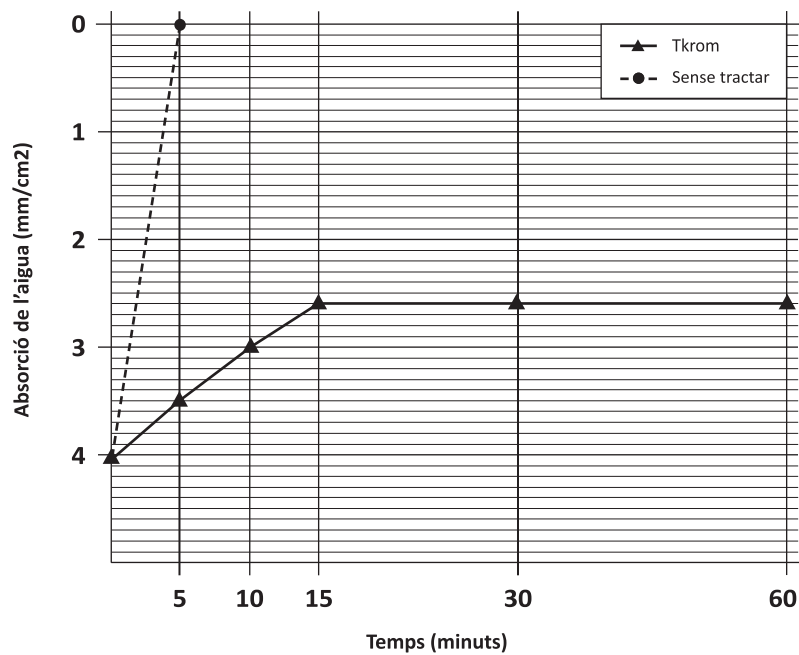
**Figura 119** - Corba d'absorbància de la mostra TI-07 sense tractar i tractada amb Tkrom®. © Maria Isabel

Garcia Vilà

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022



**Figura 120** - Corba d'absorbència de la mostra TI-08 sense tractar i tractada amb Tkrom®. © Maria Isabel Garcia Vilà



**Figura 121** - Corba d'absorbència de la mostra TI-09 sense tractar i tractada amb Tkrom®. © Maria Isabel Garcia Vilà

Garcia Vilà, M. I. (2022, juny). *Estudi del comportament hídric i grau d'eficàcia dels productes hidrofugants aplicats sobre revestiments de calç en edificis històrics*. Màster en Direcció de Projectes de Conservació - Restauració, Facultat de Belles Arts, Universitat de Barcelona, Curs 2021 - 2022