



Julio, 2015

tesis doctoral realizada por

Júlia Gómez Ramió

Los pináculos de la Sagrada Familia:
restauración y obra nueva

Universitat Politècnica de Catalunya
Departament d'Enginyeria de la Construcció

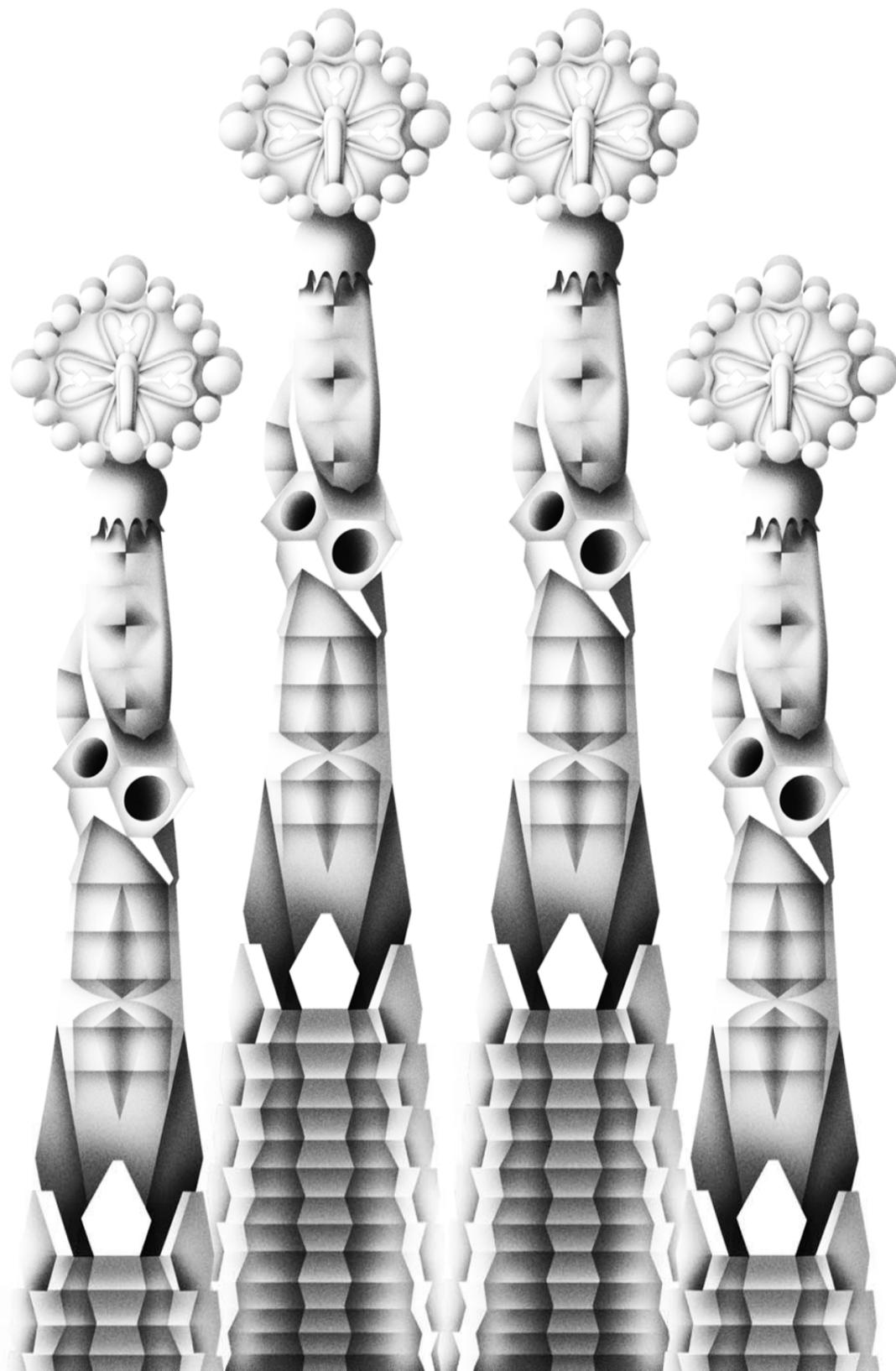
Barcelona, Julio 2015

dirigida por:
Antonio Aguado de Cea
Sergio Henrique Pialarissi Cavalaro

tesis doctoral realizada por:
Júlia Gómez Ramió

Los pináculos de la Sagrada Familia: restauración y obra nueva

TESIS DOCTORAL



Julio 2015 Tesis Doctoral realizada por Júlia Gómez Ramió Los pináculos de la Sagrada Familia: restauración y obra nueva

Los pináculos de la Sagrada Familia: restauración y obra nueva

Tesis Doctoral realizada por:

Júlia Gómez Ramió

Dirigida por:

Antonio Aguado de Cea

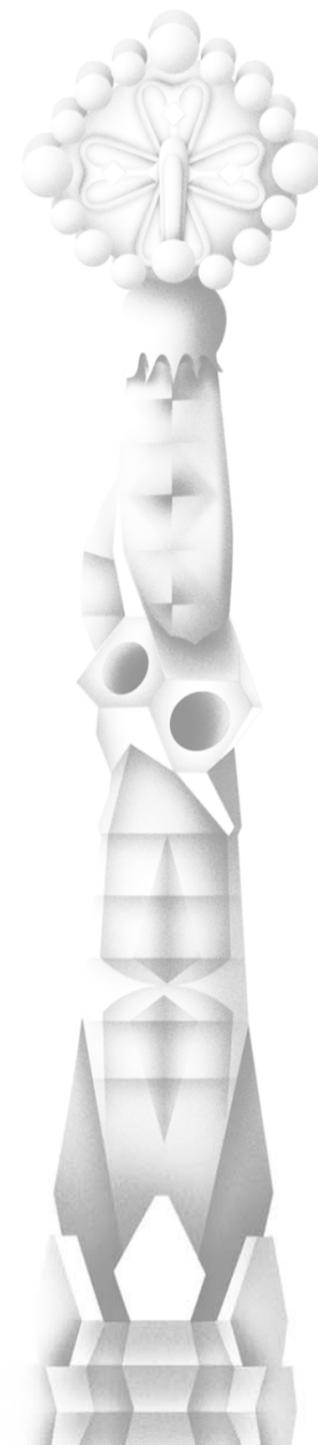
Sergio Henrique Pialarissi Cavalaro

Barcelona, julio 2015

Universitat Politècnica de Catalunya

Departament d'Enginyeria de la Construcció

TESIS DOCTORAL



A mi madre, Anna, por ser mi inspiración
y a Víctor, por acompañarme en este viaje.

AGRADECIMIENTOS

Esta Tesis Doctoral es el resultado de casi cuatro años de intenso trabajo, en el cual directa o indirectamente, han participado distintas personas transmitiéndome conocimientos, ayudándome en los diferentes estudios teóricos y experimentales, dándome ánimo y acompañándome, en los momentos buenos y no tan buenos que he vivido. En este tiempo, he crecido mucho gracias a todas ellas y deseo agradecerse en este apartado.

En primer lugar, quisiera expresar mi sincero agradecimiento a mi director de tesis Antonio Aguado, por haberme dado la oportunidad de realizar el doctorado, por su guía, enseñanzas y apoyo incondicional en cada paso que he dado. Asimismo, quiero expresar el mi sincero agradecimiento a mi co-director de tesis Sergio H.P. Cavalaro, por sus enseñanzas, su gran apoyo, su inagotable paciencia y la dedicación a este trabajo. A los dos, GRACIAS, por el inmenso cariño, las oportunidades que me habéis brindado y el gran conocimiento, tanto personal como profesional, que me habéis transmitido durante estos años. Ha sido un inmenso placer y orgullo trabajar con dos personas a las que admiras tanto.

Asimismo, me gustaría expresar mi sincero agradecimiento al profesor Ignacio Segura por su colaboración en este trabajo, sus enseñanzas, por las largas conversaciones y el apoyo incondicional que me ha dado desde que nos conocimos. También quisiera agradecer su colaboración a la profesora Berenice Toralles, por sus enseñanzas y los buenos momentos que pasamos en el laboratorio. Del mismo modo me gustaría agradecer su contribución al profesor al Josep M^a Torrents. Como también a los profesores Miguel García y Juan Antonio Chávez por su aportación en el desarrollo de los estudios de durabilidad. En la parte documental quisiera agradecer también su colaboración a la Dra. Rosa Grima.

Por otro lado, expreso mi agradecimiento al Comissionat per a Universitats del DIUE de la Generalitat de Catalunya y al Fondo Social Europeo por la beca FI. Del mismo modo, expreso mi más sincero agradecimiento a la Junta Constructora y a la Dirección Facultativa de la Sagrada Familia por el apoyo técnico aportado. De manera especial, quisiera agradecer su colaboración a Jordi Faulí, a Jordi Coll, a Ramon Espel, a Pau Agut y, sobre todo a mi padre, Josep Gómez por su valiosa contribución en la realización de la presente investigación.

También me gustaría agradecer a la empresa BASF por su colaboración y haberme permitido trabajar en sus instalaciones. De forma especial, quisiera agradecer su contribución a este estudio al Dr. Jose M^a Vaquero y a Esther Hernández. Asimismo, agradecer su colaboración al Centro de Integridad

Estructural y Fiabilidad de los materiales (CIEFMA) del Dep. de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica de la UPC, en particular, al técnico Francesc Heredero.

Igualmente me gustaría expresar mi sincero agradecimiento al director del Laboratorio de Estructuras Lluís Agulló, Tomás García y a todo su personal técnico, Robert, Jordi C., Jordi L. Carlos y especialmente, a Camilo Bernad, por el soporte técnico en la realización de las diferentes campañas experimentales. Asimismo, quisiera agradecer la ayuda del personal de administración del departamento, a Montse, a Carmeta, a Mercè, a Carme y a Eva.

A mis compañeros y amigos del doctorado (Albert de la Fuente, Ana Blanco, André Campos, Francesc Pardo, Francisco Mena, Isaac Galobardes, Jordi Cañas, Juliana Veras, Luís Segura, Martha Alejandra González, Nayara Soares, Pablo Pujadas, Ricardo Pieralisi, Sandra Manso, Liao Lin) por su apoyo y por los buenos momentos vividos en estos años. También expresar mi sincero agradecimiento a Eduardo Galeote y a Mireia Molist por su colaboración en los estudios de durabilidad.

Quisiera agradecer a todos mis amigos por su incondicional apoyo y cariño. Especialmente a Anna V., Anna R., Anna S., Berta R., Berta M, Eugenia C., Ferran M., Josep E., Laura G., Maria V., Maria B., Mariona R, Hodei E., Ramon R y Silvia C, por estar allí siempre. Agradecerles sinceramente a mis amigas Anna M. y a Marina L. sus correcciones y el a David A. "Daq" por la magnífica ilustración de los pináculos que me ha regalado para la portada. Es maravilloso y un placer crecer con todos vosotros. Dar las gracias a toda mi familia, política y no política, por estar incondicionalmente siempre a mi lado. Mi total cariño y agradecimiento a Josep C. y a mi madre Anna R., por los sabios consejos, las correcciones y el apoyo incondicional que me habéis dado en todo momento. Por último, mi sincero agradecimiento y cariño a mi pareja, Víctor, por estar a mi lado durante todos estos años. A todos vosotros os dedico este trabajo.

RESUMEN

En los pináculos de la Sagrada Família, Antoni Gaudí desarrolló una singular solución constructiva mediante prefabricados de hormigón ligeramente armados y revestidos con un *trencadís* de vidrio de Murano (Venecia). En la continuación de la obra hasta la actualidad, se mantuvo el sistema diseñado por el arquitecto para la construcción del resto de pináculos de la basílica. En los últimos años, se detectó una mayor degradación y desprendimientos de piezas del *trencadís* en los pináculos de las últimas etapas (p. ej.: Fachada de Pasión) y con una menor vida en servicio respecto a los de la época de Gaudí (1915-1930). En consecuencia, todas estas estructuras se envolvieron con una malla de seguridad para evitar riesgos derivados a los visitantes y a los trabajadores de la obra.

El principal objetivo de la tesis doctoral fue determinar el origen del problema y, con posterioridad, evitar su reaparición, mediante la revisión y optimización de los materiales y procedimientos aplicados en la restauración y en la construcción de estos elementos prefabricados. En la investigación se analizó el problema desde su globalidad, considerando causas químicas, a través del análisis de muestras por DRX, ADT-TG y MEB, como también por efectos físico-mecánicos, por incompatibilidad de deformación entre los materiales. Dada la singularidad de estos revestimientos a gran altura, se realizaron también estudios de durabilidad más extensos frente a distintos tipos de ciclos de envejecimiento acelerado (choque térmico, mojado/secado, hielo/deshielo y resistencia a la cristalización de sales) para garantizar la eficiencia de los materiales desarrollados. Para su control y seguimiento en este estudio se emplearon distintas técnicas de ensayo no destructivas (ultrasonidos, impacto acústico e imágenes termográficas), las cuales fueron también evaluadas para su posible aplicación en las futuras inspecciones en la obra. Los morteros y procedimientos propuestos, como resultados de la Tesis Doctoral, son aplicados en la actualidad en la restauración de los pináculos de la Sagrada Família. Asimismo, se están fabricando las nuevas piezas prefabricadas para los futuros pináculos de la basílica con el micro-hormigón con fibras plásticas desarrollado.

Palabras clave: *Sagrada Família, trencadís, pináculos, adherencia, morteros, restauración, durabilidad.*

ABSTRACT

Antoni Gaudí developed, for the pinnacles of the Sagrada Família, a unique constructive solution with precast concrete elements which were slightly reinforced and covered with a *trencadís* of Murano glass (Venice). In the continuation of the work until the present day, the system designed by the architect was kept for the construction of the other pinnacles of the basilica. During the last years, a greater deterioration and loosening of *trencadís* pieces at the pinnacles of the last stages was detected (e.g.: Passion Façade) and also a reduced service life compared to those of Gaudí's time (1915-1930) was observed. Therefore, all these structures were covered with a safety mesh in order to avoid resulting risks for visitors and workers.

The main purpose of the Doctoral Thesis was to determine the origin of the problem, and later to prevent recurrence, with the revision and optimization of the materials and procedures which were applied during the restoration and construction of these precast elements. During the investigation, the problem was globally analyzed and its chemical causes were considered, a process which was carried out with an analysis of samples by XRD, DTA-TGA and SEM, as well as through physical-mechanical effects, by deformation incompatibility among the materials. In addition, because of the singularity of these coatings at great height, more detailed studies about durability were carried out, and these elements underwent different types of accelerated aging cycles (thermal shock, wet/dry process, frost/thaw process and resistance to crystallization of salts) in order to ensure the efficiency of the developed materials. For the control and monitoring of the materials in this study, different non-destructive testing techniques were used (ultrasound, acoustic impact and thermo-graphic pictures), which in addition were evaluated for a possible use during future inspections in the work. The mortar pieces and procedures proposed, as a result of the Doctoral Thesis, are now used in the restoration of the pinnacles of the Sagrada Família. Additionally, the new precast pieces are being manufactured for the future pinnacles of the basilica with the micro-concrete with plastic fibers that has been developed.

Keywords: *Sagrada Família, trencadís, pinnacles, adherence, mortar, restoration, durability.*

ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Razón de ser	3
1.3	Objetivos	4
1.4	Metodología y organización de la tesis.....	5
2.	ESTADO DEL CONOCIMIENTO	9
2.1	Introducción.....	9
2.2	Evolución histórica, técnica y constructiva del mosaico	10
2.2.1	Evolución histórico/artística del mosaico	10
2.2.2	Evolución de los materiales empleados en los mosaicos	14
2.2.3	Evolución de las técnicas de aplicación	20
2.3	La Adherencia	21
2.3.1	Teorías de la adhesión.....	22
2.3.2	Causas o factores de la pérdida de adherencia	23
2.3.3	Evaluación de la adherencia	27
2.4	Conclusiones.....	32
3.	TRENCADÍS EN LA OBRA DE GAUDÍ	33
3.1	Introducción.....	33
3.2	Trencadís en la obra de Gaudí: del revestimiento al prefabricado	34
3.3	El diseño de los pináculos	41
3.4	Evolución constructiva de los pináculos de la Sagrada Familia	43
3.4.1	Primera etapa (1915-1930): Fachada del Nacimiento.....	43
3.4.2	Segunda etapa (1952-1978): Los continuadores de Gaudí	45
3.4.3	Tercera etapa (1985-2014): Actualidad.....	48
3.5	Estado actual	51
3.5.1	Descripción de los daños	54
3.5.2	Hipótesis de las causas.....	62

3.6	Conclusiones.....	63
4.	CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE MUESTRAS.....	67
4.1	Introducción.....	67
4.2	Objetivo.....	68
4.3	Descripción de las muestras.....	69
4.3.1	Localización	69
4.3.2	Inspección visual de las muestras.....	72
4.4	Campaña experimental.....	75
4.5	Resultados y análisis.....	76
4.5.1	Muestras del pináculo de la Fachada de la Pasión (T.1, T.2 y T.3)	76
4.5.2	Resumen resultados muestras pináculo Fachada de la Pasión (T.1, T.2 y T.3)	79
4.5.3	Muestra del armado del Pináculo de la Fachada de la Pasión (T.4).....	80
4.5.4	Muestras Pináculo Sotao de las almendras (S.1)	81
4.5.5	Muestras Pináculo Sotao de las espigas (S.2).....	84
4.5.6	Resumen resultados muestras pináculos Sotao S.1 y S.2.....	91
4.6	Análisis de las tensiones en el trencadís de los pináculos.....	92
4.6.1	Características del modelo numérico	92
4.6.2	Estudio paramétrico	93
4.6.3	Resultados y análisis.....	94
4.7	Conclusiones.....	96
5.	OPTIMIZACIÓN DE MUESTRAS.....	99
5.1	Introducción.....	99
5.2	Restauración de los pináculos.....	100
5.2.1	Materiales y procedimientos.....	100
5.2.2	Evaluación en obra de los morteros de restauración pre-dosificados	102
5.3	Optimización del mortero de restauración	104
5.3.1	Materiales y dosificaciones	104
5.3.2	Producción y curado.....	106
5.3.3	Ensayos	107
5.3.4	Resultados y análisis.....	108
5.4	Optimización de la dosificación para las piezas prefabricadas	110
5.4.1	Campañas experimentales del estudio	111
5.4.2	Campañas experimentales 1 y 2: Actuaciones sobre la dosificación Patrón	112
5.4.3	Campañas experimentales 3: Implantación en obra	117
5.4.4	Campaña experimental 4: Redefinición de la dosificación propuesta	123
5.4.5	Campañas experimentales 5 y 6: Redefinición final de la dosificación propuesta	125
5.4.6	Sistema de producción actual de las piezas prefabricadas de los pináculos.....	131
5.5	Conclusiones.....	133
6.	ESTUDIOS DE DURABILIDAD: campaña experimental y seguimiento visual.....	135
6.1	Introducción.....	135
6.2	Campaña experimental.....	136
6.2.1	Variabla de la campaña.....	136

6.2.2	Definición de las probetas y producción.....	138
6.2.3	Ciclos de degradación.....	140
6.2.4	Métodos de evaluación	141
6.2.5	Verificación de los métodos de evaluación	147
6.3	Evolución visual del estado de conservación de las probetas	151
6.3.1	Condición inicial	151
6.3.2	Ciclos de choque térmico.....	152
6.3.3	Ciclos de mojado / secado	156
6.3.4	Ciclos de hielo / deshielo.....	159
6.3.5	Ciclos de cristalización de sales.....	161
6.3.6	Resumen de la daños / incidencias	164
6.4	Conclusiones	165
7.	ESTUDIOS DE DURABILIDAD: evaluación mediante ensayos no destructivos.....	167
7.1	Introducción.....	167
7.2	Tratamiento de los resultados y sensibilidad de las técnicas de lectura	169
7.2.1	Ultrasonidos	169
7.2.2	Impacto acústico	171
7.2.3	Imágenes termográficas	176
7.2.4	Correlación entre las lecturas de ultrasonidos e impacto acústico con la degradación de las probetas	176
7.3	Influencia de las variables del estudio de durabilidad.....	179
7.3.1	Procesos de degradación.....	179
7.3.2	Técnicas de ejecución.....	180
7.3.3	Material del revestimiento del <i>trencadís</i>	182
7.3.4	Posición de las piezas en el <i>trencadís</i>	183
7.3.5	Tamaño y color de las piezas del <i>trencadís</i> de vidrio.....	184
7.3.6	Utilización de imprimación.....	185
7.4	Conclusiones.....	187
8.	CONCLUSIONES FINALES Y PERSPECTIVAS FUTURAS.....	189
8.1	Introducción.....	189
8.2	Conclusiones generales	190
8.3	Conclusiones específicas	191
8.4	Futuras líneas de investigación	196
	BIBLIOGRAFIA.....	189
	ANEXO A: RESULTADOS DE LAS MUESTRAS DEL PINÁCULO.....	201
	ANEXO B: PROCEDIMEINTOS Y MATERIALES	207
	ANEXO C: EVOLUCIÓN VISUAL DE LAS PROBETAS	237
	ANEXO D: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	255

ÍNDICE FIGURAS

Capítulo 1. Introducción

Figura 1.1:	Vista interior de los pináculos de la Fachada del Nacimiento (1915-1930) y b) Pináculo de la Fachada de la Pasión (1952-1978)	2
Figura 1.2:	Situación de los pináculos de la Sagrada Familia en alzado y planta	2
Figura 1.3:	Temas a ahondar en la tesis	4
Figura 1.4:	Organización de la Tesis Doctoral.....	6

Capítulo 2. Estado del conocimiento

Figura 2.1:	Diagrama cronológico y de extensión temporal de las culturas y/o estilos artísticos que influyeron en la técnica del mosaico.....	10
Figura 2.2:	a) Mosaico cónico de Uruk (<i>METMUSEUM, 2014</i>) y b) Cúpula interior de la iglesia Santa Sofía (<i>Hattstein et al, 2007</i>).....	11
Figura 2.3:	a) Revestimiento interior de la Basílica de San Marco y b) Detalle de uno de los mosaicos (<i>Vio, 2001</i>).....	12
Figura 2.4:	a) Arco del patio de la mezquita de Damasco y b) Decoración interior de la Mezquita de Córdoba (<i>Hattstein et al, 2007</i>)	12
Figura 2.5:	a) Torre Al Hambra en Kwait y b) Detalle del <i>trencadís</i> durante su colocación (<i>Trencadís inovació, 2014</i>).....	14
Figura 2.6:	Sección constructiva de un revestimiento genérico de mosaico/ <i>trencadís</i>	14
Figura 2.7:	Muestra extraída del mosaico del baptisterio de la Basílica de San Marco a) Acabado superficial y b) Parte posterior de la muestra (<i>Dal Bianco et al, 2012</i>).....	16
Figura 2.8:	Muestras de pasta de vidrio a) Policromada y b) Metalizada dorada.....	19
Figura 2.9:	a) Malla de piezas de <i>trencadís</i> de gres porcelánico (<i>Trencadís inovació, 2014</i>) y b) Colocación de la malla de <i>trencadís</i> mediante la técnica directa en el paramento (<i>BASF, 2000</i>).....	20
Figura 2.10:	Interfases presentes en un revestimiento de mosaico y/o <i>trencadís</i>	21
Figura 2.11:	a) Esquema adhesión mecánica del adhesivo – sustrato/adherente y b) Ángulo de contacto entre líquido / sólido.....	22

Figura 2.12:	a) Sección transversal de una capa de mortero cola aplicado con una llana dentada sobre un sustrato y b) Detalle de la redistribución y flujo de la película de polímeros una vez se ha colocado la pieza sobre el mortero cola (<i>Jenni et al, 2005</i>).....	25
Figura 2.13:	a) Tensiones por la retracción del rejuntado y la capa adhesiva y b) Aumento de volumen del mortero debido a la entrada de agua (<i>Wetzel et al 2012</i>).....	25
Figura 2.14:	Vías de entrada del agua hacia el interior del revestimiento a) Exterior y b) Interior	26
Figura 2.15:	a) Ensayo de adherencia o resistencia a tracción <i>UNE EN 1348</i> y b) Ensayo para determinar la deformabilidad transversal <i>UNE EN 12002</i> (<i>Porcar, 2008</i>).....	27
Figura 2.16:	Configuración del estudio de Yiu et al, 2007 a) Probetas y b) Ensayo de corte simple	30
Figura 2.17:	Configuración del estudio de Mahaboonpachai et al en el 2008.....	30
Figura 2.18:	Configuración del ensayo del estudio de Wetzel et al, 2012.....	31

Capítulo 3. *Trencadís* en la obra de Gaudí

Figura 3.1:	a) Fachada del Nacimiento el 1926 (<i>ATESF</i>) y b) obra de la Sagrada Familia (2012).....	34
Figura 3.2:	a) Fachada de la Casa Vicens (2015) y b) Chimeneas de la portería de la Finca Güell.....	35
Figura 3.3:	a) Cúpula linterna Palau Güell (2015) y b) Capitel prefabricado de los pórticos de los muros de contención del Parque Güell (2015).....	35
Figura 3.4:	a) Piezas prefabricadas de los muros laterales de la escalinata principal (2015) y b) Cubierta del Pabellón de entrada del Parque Güell (2015).....	36
Figura 3.5:	a) Detalle del revestimiento de <i>trencadís</i> de la Casa Batlló (<i>Bergós, 1999</i>) y b) Azotea en construcción de la Casa Mila o Pedrera (<i>Basegoda, 1989</i>).....	37
Figura 3.6:	a) Muestra del forjado de la Sala hipóstila (2011) y b) Interior de la Sala Hipóstila (2015) .	38
Figura 3.7:	Esquema estructural del forjado de la Sala Hipóstila	38
Figura 3.8:	a) Banco perimetral de la plaza superior del Parque Güell (2015) y b) Techo del pórtico de entrada a la cripta de la Colonia Güell (2011)	39
Figura 3.9:	a) Maqueta de la Fachada del Nacimiento presentada a París en 1910 y b) Fotografía del dormitorio de Gaudí en el estudio de l'Obrador (<i>ATESF</i>).....	41
Figura 3.10:	Pared con fotografías de mosaico veneciano del estudio de Gaudí en 1926 (<i>ATESF</i>).....	42
Figura 3.11:	Plantas, alzado y sección del pináculo de San Bernabé.....	43
Figura 3.12:	a) Elevación de las piezas de la base del pináculo y b) bastidas de madera para la construcción de los pináculos (<i>ATESF</i>).....	44
Figura 3.13:	a) Construcción de la base del pináculo y b) Inicio de la construcción del remate del pináculo (<i>ATESF</i>).....	46
Figura 3.14:	a) Piezas BEIN situadas a pie de obra y b) Construcción de la base del pináculo (<i>ATESF</i>).....	46
Figura 3.15:	a) Fabricación de las piezas prefabricadas revestidas con <i>trencadís</i> y b) Elevación de las piezas (<i>ATESF</i>)	47
Figura 3.16:	a) Colocación de la pieza del remate del pináculo y b) Anclaje de la armadura de colocación de las piezas con el núcleo resistente (<i>ATESF</i>).....	47
Figura 3.17:	a) Remate del pináculo de Santo Bartolomé y b) Construcción de los pináculos de la Fachada de la Pasión (<i>ATESF</i>).....	48
Figura 3.18:	a) Hiperboloides de las naves decorados con prefabricados revestidos con <i>trencadís</i> de vidrio de Murano, 2014 y b) Pináculos de los ventanales laterales de la nave, 2011	48
Figura 3.19:	a) Placas de pasta de vidrio de Murano y b) Corte de la pasta de vidrio en piezas de <i>trencadís</i>	49
Figura 3.20:	a) Colocación de las piezas de vidrio en los moldes b) Detalle del <i>trencadís</i> (<i>ATESF</i>).....	50

Figura 3.21:	Esquema constructivo en planta y alzado de los pináculos Sotoo de los frontones de los ventanales de la nave.....	51
Figura 3.22:	Esquema de la vida en servicio de los pináculos en función de la cronología de la obra	52
Figura 3.23:	Estado actual de la base y de la zona del anillo de uno de los pináculos de las torres a) Fachada del Nacimiento (1915-1930) y b) Fachada de la Pasión (1970-78)	53
Figura 3.24:	Estado inicial del <i>trencadís</i> del pináculo de Santo Tomás a) De los florones de la base y b) Del remate.....	55
Figura 3.25:	a) Desprendimientos de <i>trencadís</i> localizados en la parte inferior del báculo del remate del pináculo y b) Detalle del desprendimiento	55
Figura 3.26:	a) Desprendimiento de <i>trencadís</i> en la parte superior del báculo y b) Detalle del <i>trencadís</i> contiguo	56
Figura 3.27:	<i>Trencadís</i> pináculos Sotoo a) Pináculo de las Castañas (2001), 30 m de altura, orientación S-O y b) Pináculo de la Uva blanca (2002), 45 m de altura, orientación S-O	56
Figura 3.28:	Pináculos Sotoo a) Pináculo de las Almendras (previo 2000), 30 m de altura, orientación S-O y b) Pináculo de las Espigas (2006), 45 m de altura, orientación N-E	57
Figura 3.29:	Fisuras en las piezas de <i>trencadís</i> de vidrio del pináculos de Santo Tomás a) Fisura lineal y b) Agrietamiento.....	58
Figura 3.30:	a) Fisura en el <i>trencadís</i> del Pináculo de las Almendras 4PI (previo 2000) y b) Fisuras en las piezas de pasta de vidrio del Pináculo de las Castañas 1PI (2001)	58
Figura 3.31:	a) Fisura en el rejuntado del <i>trencadís</i> del Pináculo de las Espigas (2003) y b) Fisura horizontal en la junta constructiva del Pináculo de las Naranjas (previo 2000).....	50
Figura 3.32:	Fisuras en el rejuntado a) Parte superior del báculo y b) Junta de las esferas de la mitra del pináculo de Santo Tomás de la Fachada de la Pasión.....	59
Figura 3.33:	a) <i>Trencadís</i> dorado de la cruz de la mitra del pináculo y b) Detalle del revestimiento.....	60
Figura 3.34:	a) <i>Trencadís</i> dorado de la parte del anillo del pináculo y b) Detalle del revestimiento.....	60
Figura 3.35:	Detalle <i>trencadís</i> dorado a) Pináculo de las Espigas (2010) y b) P. de la Uva negra (2003)	60
Figura 3.36:	a) Manchas en el rejuntado y b) Falta de material de rejuntado en el <i>trencadís</i>	61
Figura 3.37:	<i>Trencadís</i> pináculos Sotoo a) Pináculo de las naranjas 1TPI (previo 2000) y b) Pináculo de la uva negra 2TPS (2003)	61
Figura 3.38:	Esquema de las causas de los daños localizados en el <i>trencadís</i>	62
Figura 3.39:	Posibles mecanismos de rotura a) $T_{\text{vidrio}} < T_{\text{micro-hormigón}}$ y b) $T_{\text{vidrio}} > T_{\text{micro-hormigón}}$	63

Capítulo 4. Caracterización y análisis de muestras

Figura 4.1:	Estado de los pináculos en la época de estudio: a) Fachada de la Pasión (2013) y b) Pináculos Sotoo a 45 m de altura, orientación N-E (2011)	68
Figura 4.2:	Esquema de los objetivos y de las vías de investigación expuestas en el capítulo	69
Figura 4.3:	Difractograma de la muestra T.1.A.....	77
Figura 4.4:	Termogramas (ADT-TG) muestra T.1.A.....	78
Figura 4.5:	a) Perímetro de la Muestra T.4 a 500µm; b) Perímetro de la muestra atacada por el reactivo metalográfico Nital; c) Microestructura de la T.4 a 100 µm y d) Microestructura de la T.4 a 50 µm.....	80
Figura 4.6:	Difractogramas de las muestras S.1.A y S.1.B	82
Figura 4.7:	Difractogramas de la muestras S.1.C y S.1.D.....	83
Figura 4.8:	Análisis comparativo difractogramas muestra S.1	83
Figura 4.9:	a) Superficie del vidrio de Murano (800 x) y b) Análisis mineralógico de la Muestra S.2.A..	84

Figura 4.10:	a, b, c, e) Imágenes de la Superficie del vidrio de Murano (47, 400, 1571, 3000 x, respectivamente) y d y f) Análisis mineralógico de la muestra S.2.A	85
Figura 4.11:	a, b, c y e) Imágenes de la Superficie del vidrio de Murano (47, 100, 200 y 1600 x, respectivamente) y d y f) Análisis mineralógicos de la muestra S.2.....	86
Figura 4.12:	a) Imagen de la interfaz hormigón-vidrio de Murano (800 x) y b) Análisis mineralógico de la muestra S.2.B	87
Figura 4.13:	a, b, c y e) Poro de la interfaz micro-hormigón-vidrio de Murano (50,110, 400, 3012 x, respectivamente) y d y f) Análisis mineralógico del poro de la muestra S.2.B	88
Figura 4.14:	a, c y e) Imagen del interior del hormigón (1500, 6000, 3000 x, respectivamente) y b, d y f) Análisis mineralógico de la muestra S.2.C	90
Figura 4.15:	a) Configuración del modelo numérico y b) Detalle de las tensiones generadas en la interfaz.....	92
Figura 4.16:	a) Modelo mediante elementos finitos triangulares y d) Detalle de la malla de cada material del modelo	93
Figura 4.17:	Tensiones normales obtenidas en el modelo numérico en función de las variables establecidas en el estudio paramétrico	95

Capítulo 5. Optimización de dosificaciones

Figura 5.1:	Esquema de la intervención en el <i>trencadís</i> de los pináculos	101
Figura 5.2:	Intervenciones en la restauración del pináculo de Santo Tomás a) <i>Trencadís</i> de botellas de los laterales de las piezas Bein de la base y b) Juntas constructivas del remate	102
Figura 5.3:	a) Sección constructiva del revestimiento del <i>trencadís</i> del pináculo de St. Tomás y b) Muestras realizadas en el estudio	102
Figura 5.4:	a) Muestras con las chapas metálicas adheridas b) Equipo de extracción	103
Figura 5.5:	a) Consistencia de la Patrón de 160 mm y b) Detalle de la textura de la Patrón	105
Figura 5.5:	a) Consistencia de la Patrón de 160 mm y b) Detalle de la textura de la Patrón	105
Figura 5.6:	a) Probeta para el ensayo de adherencia entre mortero y vidrio y b) Muestras de vidrio de Murano preparadas para el ensayo para determinar el coeficiente de dilatación térmica.....	106
Figura 5.7:	a) Preparación del ensayo de adherencia y b) Equipo de extracción	107
Figura 5.8:	Esquema general de las campañas realizadas en el estudio de optimización.....	111
Figura 5.9:	a) Mezcla de los componentes sólidos de las dosificaciones propuestas y b) Medición de la consistencia	114
Figura 5.10:	a) Aplicación de la imprimación en las baldosas de vidrio y gres y b) Realización de cortes para el ensayo de adherencia.....	114
Figura 5.11:	Dosificación Patrón a) Consistencia y b) Vibrado de las probetas	116
Figura 5.12:	Probetas de vidrio de Murano ensayadas a adherencia a) Sin imprimación adicional b) Con imprimación previa	117
Figura 5.13:	a) Primer tiempo del amasado de la dosificación propuesta y b) Detalle de la pasta	118
Figura 5.15:	a) Aplicación de la imprimación en el reverso de las piezas b) Probetas para evaluar la adherencia al arrancamiento de las piezas antes del vertido del hormigón	120
Figura 5.16:	a) Ensayo para determinar la resistencia residual a la tracción por flexión y b) Sección resultante de la probeta ensayada	121
Figura 5.17:	a) Probetas de ensayo para determinar la resistencia al arrancamiento y b) Ensayo en la prensa INSTRON.....	122
Figura 5.18:	Probetas ensayadas al arrancamiento a) Probeta de vidrio con imprimación y b) Probeta de gres sin imprimación.....	122

Figura 5.19: a) Probetas ensayadas de las dosificaciones con 12 kg/m³ de fibras plásticas y b) Detalle de la rotura por flexión de una de las probetas 124

Figura 5.20: Molde de las piezas prefabricadas de los pináculos Sotoo donde se realizaron los prototipos de piezas de *trencadís* y b) Detalle del revestimiento de *trencadís* de las pruebas 127

Figura 5.21: a) Vibración de una de las probetas con *trencadís* y b) Colocación del armado de manipulación 127

Figura 5.22: Detalle de una probetas después del ensayo a flexo-tracción y b) Sección de la probeta de micro-hormigón y 12kg/m³ de fibras 130

Figura 5.23: Graficas Carga-CMOD de dos de las probetas ensayadas..... 130

Figura 5.24: a) Piezas revestidas con *trencadís* fabricadas durante la 5^a campaña experimental y b) Detalle del revestimiento de *trencadís* 131

Figura 5.25: Molde y armadura de colocación de las futuras piezas prefabricadas de los pináculos antes del vertido del micro-hormigón y b) Pieza prefabricada de micro-hormigón con fibras una vez desmoldada 132

Figura 5.26: a) Detalle del nuevo revestimiento de *trencadís* durante su colocación y b) Piezas prefabricadas de micro-hormigón con fibras revestidas con *trencadís* de los nuevos pináculos 132

Capítulo 6. Estudios de durabilidad: campaña experimental y seguimiento visual

Figura 6.1: Esquema de las variables de la campaña experimental 137

Figura 6.2: a) Fabricación de las probetas de restauración y b) Detalle de las capas de las probetas 138

Figura 6.3: a) Aplicación de la imprimación en el reverso de las piezas de *trencadís* y b) Relleno y enrasado de las probetas de obra nueva con el micro-hormigón reforzado con fibras plásticas 139

Figura 6.4: Gráfico Temperaturas – Semana tipo de los ciclos de degradación 141

Figura 6.5: Procedimiento de las lecturas de seguimiento y control 141

Figura 6.6: Cronograma de los ciclos y las lecturas realizadas en el estudio 142

Figura 6.7: a) Inspección por ultrasonidos en transmisión y b) Recorridos de la onda ultrasónica en la interfase entre revestimiento y la base 143

Figura 6.8: a) Equipo de ultrasonidos empleado y b) Sistema de pinzas para los transductores 144

Figura 6.9: a) Realización de las lecturas de ultrasonidos en una de las probetas y b) Plantilla y puntos de lectura por ciclo de una de las probetas 144

Figura 6.10: Configuración del ensayo de impacto acústico: a) Alzado frontal y b) Detalle de la superficie de ensayo 145

Figura 6.11: a) Esquema del dispositivo para la toma de las imágenes termográficas de las probetas y b) Proceso para detectar la emisividad del vidrio de Murano 146

Figura 6.12: Probeta de verificación de las lecturas de seguimiento: Esquema de las medidas y características de la probeta y b) Imagen de los materiales 147

Figura 6.13: Grafico señal ultrasonidos: a) Pieza totalmente adherida y b) Pieza parcialmente adherida 148

Figura 6.14: Señales temporales de los sonidos de impacto: a) Pieza completamente adherida y b) Pieza parcialmente adherida 149

Figura 6.15: Sonogramas de los sonidos de impacto: a) Pieza completamente adherida y b) Pieza parcialmente adherida 149

Figura 6.16: a) Termografía de la probeta de prueba y b) Gráfico del proceso de enfriamiento de la probeta de prueba 150

Figura 6.17:	Estado inicial de las piezas de vidrio de Murano de color: a) Vidrio blanco; b) Rojo; c) Dorado y d) Verde	151
Figura 6.18:	Estado inicial de las probetas de obra nueva: a) Probeta NVSA; b) Probeta NGIB y c) Esquema en sección del trencadís de las probetas de obra nueva durante su fabricación	152
Figura 6.19:	Estado de conservación de la probeta RVRB: a) Inicial y b) Después de 81 ciclos de choque térmico	154
Figura 6.20:	Estado de conservación de la probeta RGMA: a) Inicial y b) Después de 81 ciclos de choque térmico	155
Figura 6.21:	Base de micro-hormigón de la probeta RVDA a los 81 ciclos: a) Reverso de la probeta y b) Lateral de la probeta	155
Figura 6.22:	Estado de conservación de la probeta NVSA: a) Inicial y b) Después de 81 ciclos de choque térmico	156
Figura 6.23:	Estado de conservación de la probeta RVDB: a) Inicial y b) Después de 81 ciclos	158
Figura 6.24:	Estado de conservación de la probeta NVIA: a) Inicial y b) Después de 80 ciclos de mojado/secado	158
Figura 6.25:	Estado de conservación de la probeta RVBB: a) Inicial y b) Después de 81 ciclos de hielo/deshielo	159
Figura 6.26:	Estado de conservación de la probeta NGSA: a) Inicial y b) Después de 80 ciclos de hielo/deshielo	161
Figura 6.27:	a) Despegue del revestimiento con la base de micro-hormigón de la probeta RVRB y b) Desprendimientos del trencadís de las probetas durante el estudio	163
Figura 6.28:	a) Fisuración de la base de la probeta RB y b) Detalle de la interfase	164

Capítulo 7. Estudios de durabilidad: evaluación mediante ensayos no destructivos

Figura 7.1:	a) Relación Amplitud – Tiempo de la señal ultrasónica inicial (0) obtenida en un punto (2) de la probeta RVDA sometida a ciclos de cristalización de sales y b) Señal ultrasónica en los ciclos 0, 12 y 30	169
Figura 7.2:	Evolución de la velocidad de ultrasonido con los ciclos: Probetas sometidas a choque térmico (a) y cristalización de sales (b)	170
Figura 7.3:	Evolución del tiempo entre los rebotes a lo largo de los ciclos de choque térmico (a) y cristalización de sales (b)	172
Figura 7.4:	FFT de los tres primeros rebotes en probeta RVDA sometida a cristalización de sales (a) y área de las funciones FFT (b)	173
Figura 7.5:	Evolución de las áreas de las funciones FFT de las frecuencias bajas-medias (0-1500 Hz) y altas (7500-9000 Hz) en función del número de ciclos: a) choque térmico y b) cristalización de sales	174
Figura 7.6:	Esquema del seguimiento del impacto acústico en las probetas analizadas a) Estado inicial; b) Ciclos 21-30; c) Ciclos 40-45 y d) Ciclos 51-80	175
Figura 7.7:	Imágenes termográficas de la probeta MB a) Estado inicial y b) Después de 40 ciclos de degradación a la cristalización de sales	176
Figura 7.8:	Correlación entre las lecturas de ultrasonidos e impacto acústico en las probetas de restauración sometidas a ciclos de choque térmico y cristalización de sales	177
Figura 7.9:	Correlación entre las lecturas de ultrasonidos (eje x) e impacto acústico (ejes y) con el estado de conservación de las probetas	179
Figura 7.10:	Resultados en función del proceso de degradación: variación de la velocidad ultrasónica (a), y del ratio de las áreas FFT (b)	180

Figura 7.11: Resultados en función del proceso de ejecución: variación de la velocidad ultrasónica (a) y del ratio de las áreas FFT (b)	181
Figura 7.12: Resultados en función del material de las piezas de <i>trencadís</i> : variación de la velocidad ultrasónica (a) y del ratio de las áreas FFT (b).....	183
Figura 7.13: Resultados en función de la posición de las piezas en el <i>trencadís</i> : variación de la velocidad ultrasónica (a) y del ratio de las áreas FFT (b).....	184
Figura 7.14: Resultados en función del tamaño y del color de las piezas: variación de la velocidad ultrasónica (a) y del ratio de las áreas FFT (b).....	185
Figura 7.15: Resultados en función de la aplicación o no aplicación de una imprimación: variación de la velocidad ultrasónica (a) y del ratio de las áreas FFT (b).....	186

Capítulo 8. Conclusiones finales y perspectivas futuras

Figura 8.1: a) Artículo publicado en el Periódico el 10 de junio de 2014 y b) Detalle del pináculo de Santo Tomás rehabilitado	191
--	-----

ÍNDICE TABLAS

Capítulo 1. Introducción

Tabla 1.1:	Objetivos específicos	5
------------	-----------------------------	---

Capítulo 2. Estado del conocimiento

Tabla 2.1:	Evolución histórica de los materiales del revestimiento de mosaico y/o <i>trencadís</i>	15
Tabla 2.2:	Dosificación de un mortero polimérico (<i>Jenni et al, 2006</i>).....	17
Tabla 2.3:	Causas o factores de la pérdida de adherencia en los revestimientos de mosaico/ <i>trencadís</i>	24
Tabla 2.4:	Ensayos de envejecimiento acelerado que contempla la normativa UNE EN 12004.....	28
Tabla 2.5:	Configuración de los estudios de durabilidad encontrados en la literatura técnica	29

Capítulo 3. *Trencadís* en la obra de Gaudí

Tabla 3.1:	Resumen de la aplicación del <i>trencadís</i> en la obra de Gaudí	40
Tabla 3.2:	Tabla comparativa de la procedencia de las imágenes del estudio de Gaudí (<i>ATESF; Velmans et al, 1999</i>)	42
Tabla 3.3:	Clasificación de los daños localizados en los pináculos de la 2ª y 3ª etapa	54
Tabla 3.4:	Propiedades mecánicas y térmicas del mortero y del vidrio (<i>Neville, 2008</i>)	63

Capítulo 4. Caracterización y análisis de muestras

Tabla 4.1:	Muestras extraídas del pináculo de Santo Tomás	70
Tabla 4.2:	Muestras extraídas de los pináculos Sotoo.....	72
Tabla 4.3:	Características de las muestras analizadas en el estudio.....	73
Tabla 4.4:	Campaña de ensayos realizada para la caracterización de las muestras.....	75
Tabla 4.5:	Resultados de Difracción y Análisis térmico de las muestras	76
Tabla 4.6:	Resultados de la caracterización mediante DRX y ADT-TG	79
Tabla 4.7:	Resumen del análisis de las muestras S.1 y S.2 de los pináculos Sotoo	91
Tabla 4.8:	Parámetros mecánicos empleados en el modelo.....	93

Tabla 4.9:	Geometrías consideradas en el modelo numérico	94
Tabla 4.10:	Escenarios de temperatura medias en verano consideradas en el modelo numérico	94

Capítulo 5. Optimización de dosificaciones

Tabla 5.1:	Objetivos del estudio	100
Tabla 5.1:	Morteros empleados en la restauración de los pináculos	101
Tabla 5.2:	Características de las muestras realizadas	103
Tabla 5.3:	Resultados del ensayo de adherencia in situ	104
Tabla 5.4:	Dosificaciones realizadas en la campaña experimental	105
Tabla 5.5:	Ensayos realizados durante la campaña	107
Tabla 5.6:	Resultados en estado endurecido	108
Tabla 5.7:	Ensayos realizados en las distintas campañas experimentales del estudio de optimización	111
Tabla 5.8:	Objetivos alcanzar en la dosificación final propuesta	112
Tabla 5.9:	Dosificaciones fabricadas en la 1ª y 2ª campaña experimental	113
Tabla 5.10:	Resultados de la 1ª y 2ª campaña experimental	115
Tabla 5.11:	Probetas fabricadas en la 3ª campaña	119
Tabla 5.12:	Resultados de la 3ª campaña experimental	120
Tabla 5.13:	Dosificaciones fabricadas en la 3ª y 4ª campaña experimental	123
Tabla 5.14:	Resultados de la 4ª campaña experimental	124
Tabla 5.15:	Dosificaciones de la 5ª y 6ª campaña experimental	125
Tabla 5.16:	Probetas fabricadas en la 5ª y 6ª campaña experimental	126
Tabla 5.17:	Resultados de la 5ª y 6ª campaña experimental	128
Tabla 5.18:	Dosificación propuesta para las futuras piezas prefabricadas de los pináculos	131

Capítulo 6. Estudios de durabilidad: campaña experimental y seguimiento visual

Tabla 6.1:	Tipo y número de probetas empleadas en el los ciclos de degradación del estudio	139
Tabla 6.2:	Procedimientos de los ciclos de degradación	140
Tabla 6.3:	Espesores y velocidades ultrasónicas de los materiales de las probetas de restauración	148
Tabla 6.4:	Estado de conservación de las probetas sometidas a ciclos de choque térmico	153
Tabla 6.5:	Estado de conservación de las probetas sometidas a ciclos de mojado / secado	157
Tabla 6.6:	Estado de conservación de las probetas sometidas a ciclos de hielo / deshielo	160
Tabla 6.7:	Estado de conservación de las probetas de restauración sometidas a ciclos de cristalización de sales	162
Tabla 6.8:	Resumen de los daños/incidencias de las probetas ensayadas	165

Capítulo 7. Estudios de durabilidad: evaluación mediante ensayos no destructivos

Tabla 7.1:	Variables analizadas en el estudio de durabilidad	168
Tabla 7.2:	Tiempos entre los rebotes de impacto acústico y coeficiente de restitución de las probetas antes (0) y después (f) de los ciclos de degradación	172
Tabla 7.3:	Comparación entre los resultados de las lecturas de ultrasonidos e impacto acústico	178

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

El Templo de la Sagrada Familia se considera una de las obras más representativas de Antoni Gaudí. Después de asumir la dirección de la obra en 1883, con 31 años de edad, el arquitecto trabajó en el desarrollo del proyecto durante toda su vida y en los últimos años, su dedicación fue en exclusiva. En la actualidad la Sagrada Familia tiene más de 130 años y se ha convertido en uno de los símbolos más relevantes de la ciudad de Barcelona. Declarada en el 2005 patrimonio de la humanidad por la UNESCO, es visitada por más de tres millones de personas al año.

En esta basílica, Gaudí plasmó toda su evolución artística y tecnológica, alcanzando un conjunto armónico donde la estética siempre iba unida a la función. Su gran conocimiento sobre los materiales y oficios le permitió reformular los sistemas constructivos más tradicionales y con ello, formalizar las geometrías de su ambicioso proyecto.

En los pináculos que rematan las torres de la basílica desarrolló una singular solución constructiva, aún nunca vista en su obra, que daba respuesta simultánea a los aspectos decorativos y a los condicionantes de una construcción en altura (ver figura 1.1). Esta solución consistió en conformar estos elementos, a partir de piezas prefabricadas de hormigón ligeramente armadas y revestidas en el mismo proceso de fabricación con un *trencadís* de pasta de vidrio, traído expresamente desde Murano, Venecia (ver figura 1.2).



Figura 1.1: Vista interior de los pináculos de la Fachada del Nacimiento (1915-1930) y b) Pináculo de la Fachada de la Pasión (1952-1978)

El *trencadís* es un tipo de mosaico, compuesto por piezas irregulares, que Gaudí empleó para revestir el exterior de muchas de sus obras y además, con gran variedad de materiales y técnicas. Ninguna de ellas alcanzó tanta altura como la Sagrada Familia, por lo que la decoración de sus pináculos planteó un reto para el arquitecto. Consciente de la degradación de los revestimientos a la intemperie y dada la dificultad de acceso a estas estructuras para una posible reparación, vio en el vidrio de Murano empleado en obras históricas de mosaico, como por ejemplo la Basílica de San Marco, un material suficientemente resistente para esta aplicación.

El 1925 se inauguró la primera y única torre del templo que el arquitecto pudo ver finalizada, alcanzando en lo alto de su pináculo casi los 100 metros de altura. Los continuadores de la obra hasta la actualidad mantuvieron el sistema desarrollado por Gaudí y la procedencia de los vidrios de Murano para la construcción del resto de los pináculos de la basílica. Estos se dividen dentro de la obra en tres etapas históricas, tal y como se muestra en la figura 1.2 en planta y alzado.

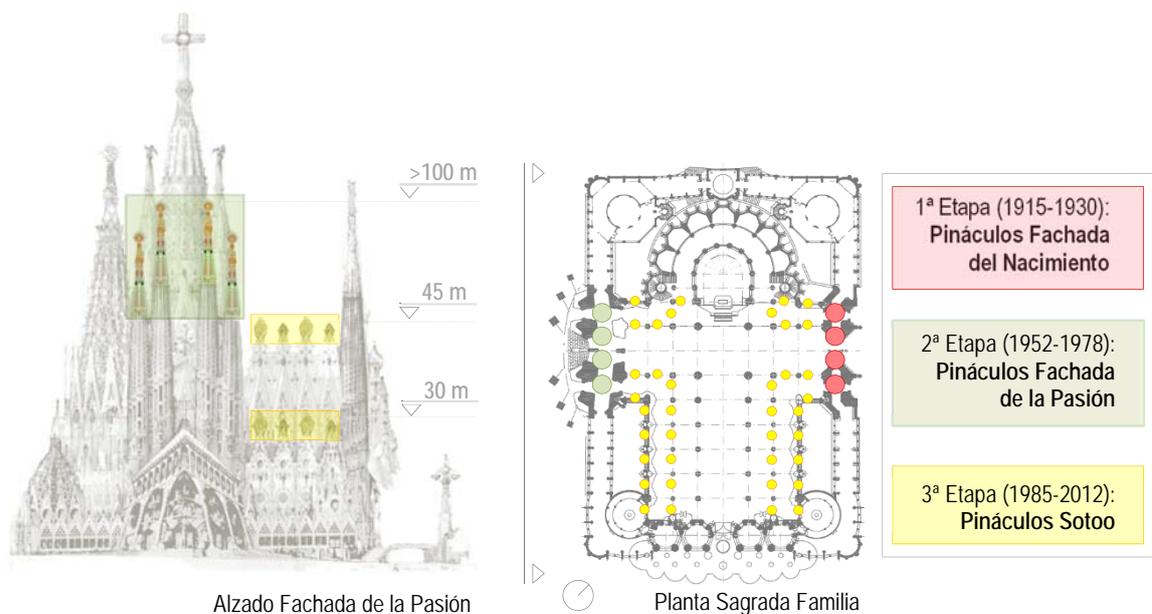


Figura 1.2: Situación de los pináculos de la Sagrada Familia en alzado y planta

La primera de ellas, después del fallecimiento del arquitecto hasta 1930, corresponde a los pináculos de las torres de la Fachada del Nacimiento. La segunda, entre los años 1952 y 1978, pertenece a la construcción de los pináculos de las torres de la Fachada de la Pasión por los discípulos directos de Gaudí (ver figura 1.2). Y, finalmente, la tercera atañe a la etapa más actual de la obra, entre los años 1985 y 2012, y corresponde a los pináculos, obras del escultor japonés Etsuro Sotoo, que rematan los ventanales de las fachadas laterales. Estos representan distintos frutos de temporada, la uva y el trigo y se sitúan alrededor de toda la basílica a distintos niveles (30 y 45 m) (ver figura 1.2).

El *trencadís* de los pináculos a lo largo de estos años se vio degradado por los efectos ambientales y climatológicos. Dicha degradación, en los últimos años se apreció distinta en los pináculos de las diferentes etapas. Mientras que, en conjunto, los pináculos de la Fachada del Nacimiento correspondiente a la época de Gaudí (1915-1930), no presentaron problemas relevantes, en el caso de los pináculos de la Fachada de la Pasión (años 1952-1978) y en pináculos Sotoo (1985-2012) se detectaron desprendimientos de piezas del revestimiento. Frente a esta situación, todos los pináculos de la basílica se cubrieron con una malla de seguridad para preservar la seguridad de los visitantes y los trabajadores de la obra (ver figura 1.2). A raíz de este hecho, se iniciaron los trabajos de inspección y restauración de estos elementos decorativos a gran altura.

1.2 RAZON DE SER

Dada la importancia de los pináculos de la Sagrada Familia es prioritario el conocimiento previo de estos elementos para poder iniciar su restauración. Su análisis en profundidad y desde una perspectiva global, permitirá conocer el origen de los daños y evitar su reaparición después de su restauración. Asimismo, el avance de la obra requiere de la construcción de nuevos pináculos, por lo que su estudio contribuirá en la adopción de medidas preventivas en los futuros elementos prefabricados.

Si bien es cierto que se ha mantenido el sistema constructivo de Gaudí y la procedencia de los vidrios de Murano, hay que tener en cuenta, que las características del cemento y el tipo de armado de estos prefabricados ha evolucionado durante la construcción de la obra, incrementando su resistencia y rigidez. Ello puede haber modificado la interacción entre los materiales del revestimiento, dado que el hormigón tiene menos capacidad de absorber las deformaciones dimensionales de las piezas de vidrio, o bien, existir alguna interacción química que haya producido fenómenos expansivos. Por ese motivo, la degradación es mayor en los pináculos de las últimas etapas de la obra, con una menor vida en servicio. Por tanto es necesario investigar el origen de esta problemática para determinar el tipo de degradación que ha experimentado el revestimiento.

Aunque la bibliografía sobre la Sagrada Familia es extensa, mayoritariamente se focaliza en los aspectos artísticos, históricos o de cálculo de la obra y existe poca documentación técnica sobre su construcción. Por otra parte, los pináculos debido su limitado acceso son elementos poco conocidos. En 1997 se analizó un grupo reducido de muestras extraídas de uno de ellos (San Bernabé), para confirmar el uso del hormigón por parte de Gaudí (*Carbonell et al, 1997*), pero desde entonces se han realizado muy pocos estudios sobre el tema (*Vicente, 2009*). Además, los estudios existentes analizan individualmente las características del hormigón de algunas muestras o bien algunas muestras de vidrio importado desde Italia, pero en ningún caso, se evaluó la interacción entre los dos materiales del *trencadís* o bien se trató el problema desde su globalidad.

La presente Tesis Doctoral se ha desarrollado en un marco sin precedentes, dado que se ha solapado con el inicio de la rehabilitación del primero de los pináculos de la Fachada de la Pasión. Ello ha constituido una oportunidad única para su investigación, puesto que se ha tenido acceso directo a estos revestimientos y se han podido extraer muestras para su análisis. La investigación se ha realizado dentro de un convenio de colaboración entre la Junta Constructora de la Basílica de la Sagrada Familia y el Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Catalunya. El cual ha contemplado el apoyo, seguimiento y desarrollo de los hormigones y morteros especiales para su futura aplicación en la obra.

1.3 OBJETIVOS

La investigación que se presenta pretende aportar una visión transversal sobre los pináculos de la Sagrada Familia, que contemple tanto la actual restauración de los pináculos existentes como la futura construcción e inspección de estas estructuras decorativas. En este sentido, se establecen 4 temáticas de investigación complementarias, tal y como se muestra en la figura 1.3. Estas son: I) El análisis histórico/constructivo de los pináculos; II) La inspección y diagnóstico de los daños; III) El desarrollo y optimización de los materiales empleados y IV) El envejecimiento del *trencadís* y los sistemas para su evaluación.



Figura 1.3: Temas a ahondar en la tesis

Objetivos generales

A partir del contexto expuesto se establecen 4 objetivos generales que corresponden a cada una de las temáticas tratadas en la presente Tesis Doctoral. Estos objetivos son:

- Realizar un análisis histórico de los materiales y sistemas constructivos empleados en los pináculos;
- Determinar el estado de conservación y las principales causas de la degradación del *trencadís* de los pináculos del Templo de la Sagrada Familia;
- Optimizar las dosificaciones de mortero/micro-hormigón empleadas en la restauración y la construcción de los pináculos para mitigar posibles problemas de durabilidad;
- Evaluar la durabilidad y la degradación de los nuevos materiales y procedimientos constructivos propuestos;

Objetivos específicos

En respuesta a las diferentes cuestiones señaladas con anterioridad, se proponen varios objetivos específicos. En la tabla 1.1 se presentan los principales objetivos específicos que se persiguen en aras a alcanzar los objetivos globales anteriormente citados.

TEMAS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS
(I) ANÁLISIS HISTÓRICO/ CONSTRUCTIVO	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Conocer cómo Gaudí concibió la solución constructiva de los pináculos; ▪ Establecer los precedentes históricos del sistema constructivo analizado; ▪ Conocer la evolución del sistema constructivo dentro de la obra de la S.F.; ▪ Determinar la composición de los materiales empleados en las diferentes etapas constructivas;
(II) INSPECCIÓN Y DIAGNOSIS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evaluar el estado de conservación y los daños surgidos en el <i>trencadís</i> de los pináculos; ▪ Determinar si existe un mismo patrón de comportamiento en el <i>trencadís</i> de las diferentes etapas constructivas; ▪ Identificar los procesos/factores de la degradación y las causas del desprendimiento de piezas del <i>trencadís</i>; ▪ Establecer si existe algún proceso de alteración de origen químico en los materiales; ▪ Analizar la capacidad de degradación debido a las incompatibilidades termo-mecánicas de los diferentes materiales del revestimiento;
(III) DESARROLLO DE MATERIALES	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evaluar las dosificaciones y materiales empleados hasta el momento en la obra para este tipo de aplicación; ▪ Optimizar las propiedades en estado fresco y endurecido de las dosificaciones de mortero y micro-hormigón destinados en la restauración y la construcción de los pináculos; ▪ Implantar las dosificaciones propuestas en la obra; ▪ Validar in situ la adherencia de los morteros empleados en la restauración del <i>trencadís</i>;
(VI) ENVEJECIMIENTO Y SISTEMAS DE EVALUACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evaluar la degradación y/o pérdida de adherencia del <i>trencadís</i> en distintas condiciones de envejecimiento acelerado; ▪ Validar la efectividad a largo plazo de los materiales propuestos en la restauración y construcción de los pináculos; ▪ Analizar sistemas de inspección de los revestimientos mediante técnicas no destructivas para su futura aplicación en obra; ▪ Establecer rangos de variación en los resultados de los ensayos no destructivos que se relacionen con la degradación y/o estado de conservación del revestimiento;

Tabla 1.1: Objetivos específicos

1.4 METODOLOGÍA Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

Los cuatro temas de investigación expuestos constituyen una parte o bloque dentro de la tesis, a los que se les han asociado los capítulos necesarios y sus correspondientes anejos. En el esquema de la figura 1.4 se muestra la estructura de la presente Tesis Doctoral compuesta por ocho capítulos. Como se puede observar, estos contemplan tanto estudios teóricos como experimentales.

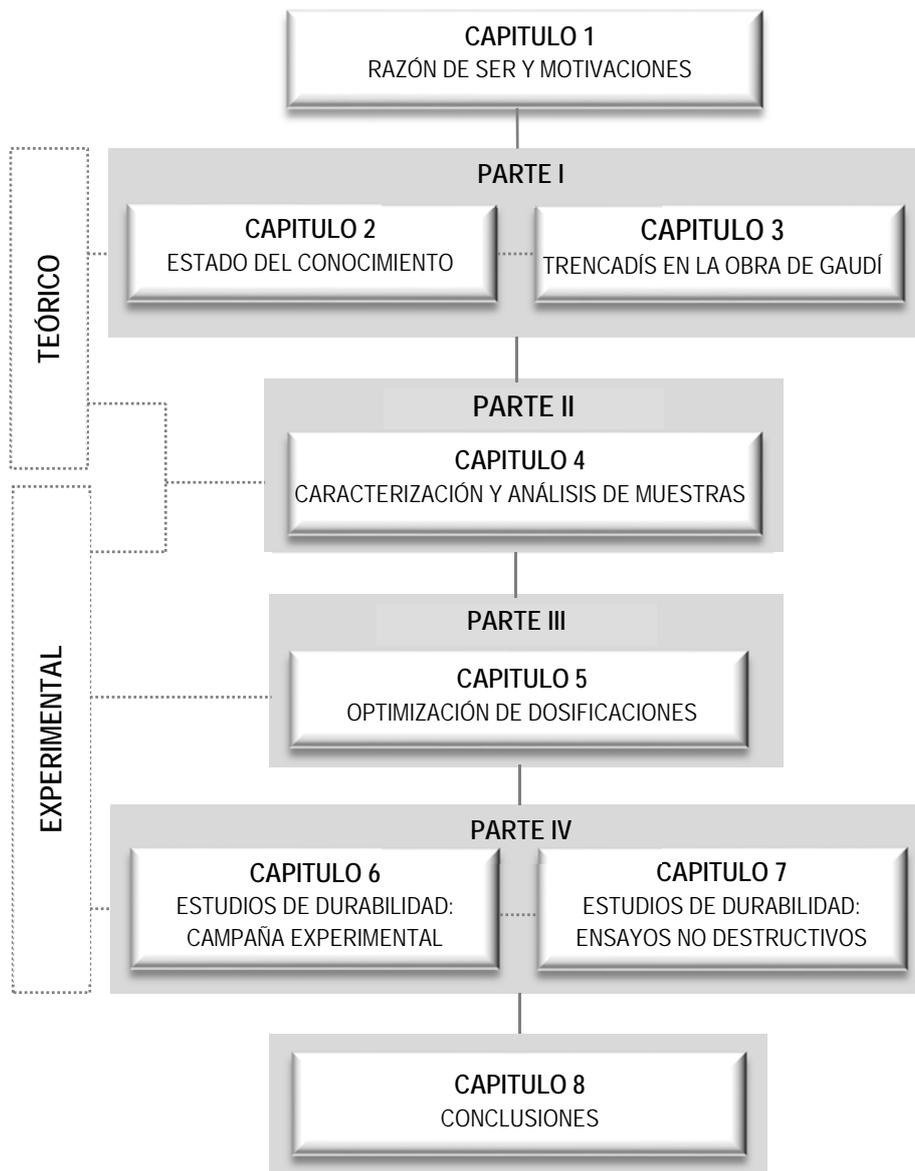


Figura 1.4: Organización de la Tesis Doctoral

En la PARTE I de la tesis se expone y analiza toda la información recopilada referente al estado del conocimiento de la presente investigación. Esta, debido a la singularidad del revestimiento de *trencadís* de los pináculos, se compone por dos grandes cuestiones: la primera, desarrollada en el *Capítulo 2*, explica la evolución histórico/constructiva de los mosaicos (precedentes del *trencadís*), las teorías de adherencia, los factores que inducen al desprendimiento de este tipo de revestimientos y por último, su evaluación experimental.

Por otro lado, en el *Capítulo 3* se analiza cómo el arquitecto Antoni Gaudí alcanza la solución constructiva de los pináculos y su desarrollo en la continuación de la obra. Asimismo, se presenta el estado de conservación actual y los principales daños surgidos en los pináculos de las últimas etapas, más deteriorados respecto a los de la época de Gaudí, dónde se logró acceder para su inspección. En consecuencia, ello permitió formular las hipótesis sobre sus procesos de degradación.

En la PARTE II de la tesis, expuesta en el Capítulo 4, se confrontan las hipótesis formuladas con anterioridad, que contemplan tanto aspectos químicos como físico-mecánicos. La validación de la 1ª hipótesis por incompatibilización química se realiza mediante el análisis y caracterización de un grupo de muestras extraídas de uno de los pináculos de la fachada de la Pasión (Sto. Tomás) y otras, procedentes de los pináculos Sotoo, de más reciente construcción, donde se produjeron desprendimientos. Ello además, de permitir la identificación de algún proceso de alteración en los materiales, facilitó determinar su composición. Información necesaria para emplear en su restauración los más similares y compatibles con los existentes, que minimizarían el riesgo de la formación de nuevo daños.

Por otra parte, la validación de la 2ª hipótesis por mecanismos físico-mecánicos se realiza a través de un modelo numérico simplificado de una de las piezas prefabricadas de los pináculos. En él se evalúan las tensiones surgidas en el revestimiento *trencadís* de estos elementos capaces de inducir los despegues, considerando distintas curvaturas y diferentes escenarios de temperaturas.

Una vez identificados los principales factores de la degradación en este tipo de revestimientos, en la PARTE III expuesta en el Capítulo 5, se desarrollan diversas campañas experimentales para la optimización de las propiedades en estado fresco y endurecido de las dosificaciones de mortero y microhormigón empleados en la restauración y la construcción de los pináculos. En ambos casos se partió de dosificaciones empeladas hasta el momento en la obra para facilitar su implantación. En ellas se estimó conveniente mejorar su flexibilidad para que tuvieran mayor adaptabilidad a las deformaciones térmicas de las piezas del *trencadís* de vidrio. Asimismo, se buscó que presentaran altas prestaciones frente ataques químicos o climáticos ya sean de origen interno o externo. Al mismo tiempo, en esta parte de la tesis, también se validaron otros morteros pre-dosificados empleados en la actual restauración de los pináculos a través de campañas realizadas en la misma obra.

En la PARTE IV de la tesis, se verificaron los sistemas propuestos en la restauración y la construcción de los pináculos a través de un estudio de durabilidad más extenso del que establece la normativa vigente para este tipo de aplicación. La campaña experimental realizada permitió evaluar la degradación y/o pérdida de adherencia del *trencadís* de los pináculos frente a diferentes ciclos de degradación (Choque térmico; Mojado/secado; Hielo/Deshielo y Resistencia a la cristalización de sales) y contemplando distintas variables. Para su control y seguimiento se emplearon distintas técnicas de ensayo no destructivas (ultrasonidos; impacto acústico e imágenes termográficas), las cuales fueron también evaluadas para su posible aplicación en las futuras inspecciones en la obra.

Este estudio de durabilidad se expone dividido en los capítulos 6 y 7. En el Capítulo 6 se describe la configuración de la campaña experimental y la evolución visual de las probetas ensayadas. Mientras que en el Capítulo 7 se presentan los resultados y análisis del seguimiento de las probetas mediante las técnicas no destructivas de ensayo.

Finalmente, en el Capítulo 8 se exponen las conclusiones más relevantes que se derivan de los distintos estudios realizados y se proponen futuras líneas de investigación con el fin de profundizar y completar el trabajo iniciado en la presente Tesis Doctoral.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1 INTRODUCCIÓN

El *trencadís* es un revestimiento que se compone de pequeñas piezas de materiales, como la cerámica esmaltada, el mármol o la pasta de vidrio entre otros, dispuestas aleatoriamente sobre una capa de mortero. El inicio de este tipo de revestimiento decorativo se sitúa en Cataluña a finales del siglo XIX durante la época del Modernismo. Arquitectos representativos de este movimiento, como Lluís Domènech o Antoni Gaudí, lo emplearon en muchas de sus obras haciéndolo mundialmente conocido. En la actualidad el *trencadís* se sigue empleando en revestimientos de construcciones emblemáticas y de gran envergadura como, por ejemplo, la torre Alhambra en Kuwait de 412 metros de altura.

Ahora bien, el origen de esta técnica de revestimiento procede de los mosaicos utilizados desde la antigüedad para decorar gran variedad de paramentos, debido su belleza de acabado y adaptabilidad de formas. Ejemplo de ello son, entre otros, los revestimientos de la Iglesia de Santa Sofía en Estambul, la Mezquita de Damasco en Siria, la Basílica de San Marco en Venecia y la Basílica de San Pedro en el Vaticano.

En el presente capítulo se realiza una revisión del estado del conocimiento sobre los revestimientos de mosaico/*trencadís* desde cuatro aspectos complementarios. Son, por tanto, objetivos de este análisis:

- Exponer la evolución histórico/constructiva de los revestimientos de mosaico/*trencadís*;
- Explicar cómo y porqué se produce la adherencia de los materiales de estos revestimientos;
- Describir las causas o factores que pueden inducir a su pérdida de adherencia;
- Explicar cómo se establece y se evalúa la adherencia y su durabilidad en el tiempo;

Para alcanzar estos objetivos el capítulo se divide en dos bloques. En el primero, se realiza una revisión de las culturas y/o estilos artísticos que influyeron en la evolución de la técnica del mosaico (apartado 2.2.1) y se describen los materiales y técnicas empleadas a lo largo de la historia (apartados 2.2.2 y 2.2.3). En el segundo, se trata el mecanismo de la adherencia de este tipo de revestimientos desde tres aspectos diferentes. En primer lugar, se describen las distintas teorías sobre la adhesión entre materiales que existen en la literatura técnica (apartado 2.3.1). A continuación, se detallan las distintas causas o factores que pueden provocar la pérdida de la adherencia, a partir de la bibliografía consultada y el análisis de algunas restauraciones de obras históricas de mosaico/*trencadís* (apartado 2.3.2). Por último, se describe la configuración de los ensayos para evaluar la adherencia y su durabilidad en el tiempo (apartado 2.3.3).

2.2 EVOLUCIÓN HISTÓRICA, TÉCNICA Y CONSTRUCTIVA DEL MOSAICO

2.2.1 Evolución histórico/artística del mosaico

En este apartado se describirán las culturas y/o estilos artísticos que influyeron en la evolución de esta técnica decorativa hasta el revestimiento actual de *trencadís*. En la figura 2.1 se presenta un esquema cronológico global de su desarrollo en el tiempo y se señalan las etapas histórico/artísticas más significativas en su evolución hasta la actualidad. Estas son: la cultura Clásica, la Bizantina, el Islam, el Renacimiento y por último, el *Art Nouveau* o Modernismo.

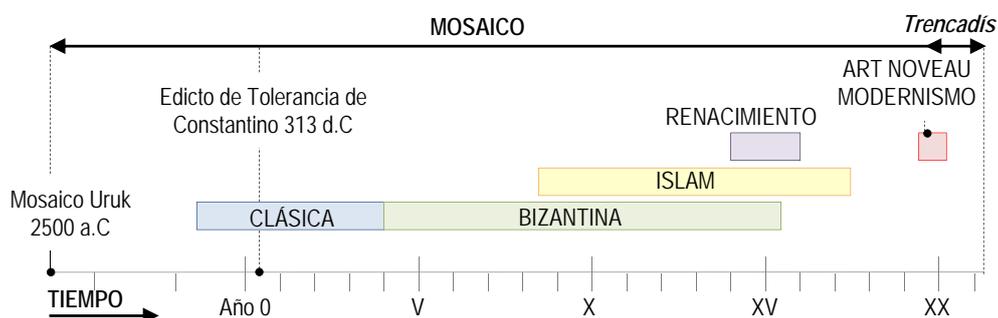


Figura 2.1: Diagrama cronológico y de extensión temporal de las culturas y/o estilos artísticos que influyeron en la técnica del mosaico

Uno de los primeros ejemplos hallados de un revestimiento de mosaico se localizó en la antigua ciudad mesopotámica de Uruk y se dató aproximadamente en el año 2500 a.C. (Carrascosa et al, 2004). El revestimiento encontrado, como se puede apreciar en la figura 2.1a, se realizó mediante pequeños

conos puntiagudos de cerámica pintada, clavados en una gruesa capa de yeso sobre una estructura de columnas de adobe (*METMUSEUM, 2014*).

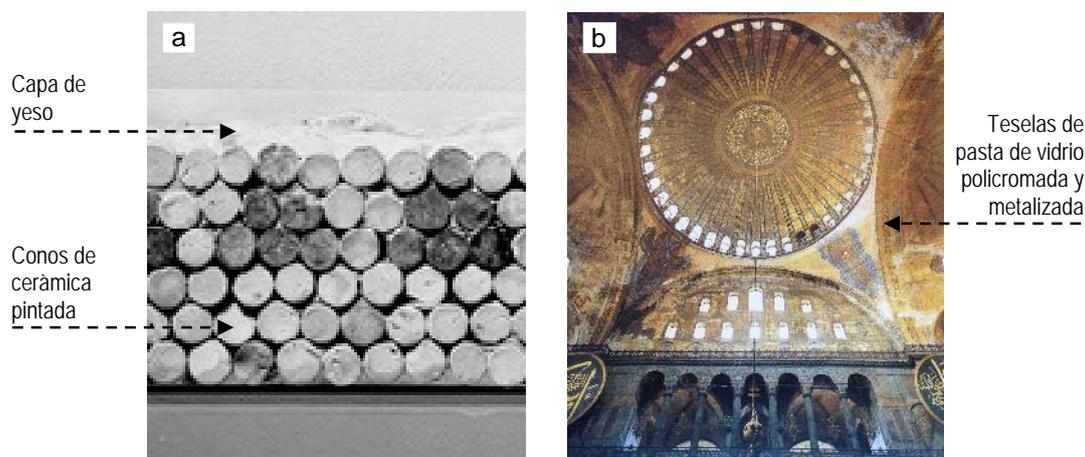


Figura 2.2: a) Mosaico cónico de Uruk (*METMUSEUM, 2014*)
y b) Cúpula interior de la iglesia Santa Sofía (*Hattstein et al, 2004*)

Durante el periodo del *Imperio Romano* (27 a.C -305 d.C) el mosaico fue una técnica decorativa comúnmente empleada y alcanzó un gran desarrollo. Su aplicación, sin embargo, se limitó únicamente a pavimentos. No fue hasta el Edicto de Tolerancia de Constantino (313 d.C), cuando se reconoció el cristianismo, que la decoración narrativa mediante mosaicos pasó aplicarse a paramentos verticales con el objetivo de mejorar la comunicación con los fieles (*Carrascosa et al, 2004*). En este sentido, las escenas representadas se dotaron cada vez de más realismo, para ello fue necesario buscar gran variedad de tonalidades de teselas.

En este contexto, debido a la escasez de las materias primas como mármoles y/o piedras semipreciosas, se empezaron a emplear teselas de pasta de vidrio (*CIDM, 2014*). Este material era de más fácil obtención, más económico y pesaba menos que las teselas de mármol, lo que facilitó su aplicación en muros y techos (*Vallespin, 2012*). Un ejemplo de estas primeras obras paleocristianas de mosaico se encuentra en el ábside de la Iglesia de Santa Prudencia (390 d.C) en la ciudad de Roma.

Tras la división del Imperio Romano (395 d.C), el imperio de Oriente o Bizancio adoptó las creencias y las costumbres cristianas y, con ello, las técnicas constructivas y decorativas como el mosaico (ver figura 2.1) (*Fernandez et al, 1996*). El *arte Bizantino* fue la época de máximo esplendor del mosaico mural y desarrolló una nueva concepción del espacio interior de las edificaciones. La introducción de teselas metálicas de oro y plata hizo una gran variedad de efectos luminicos en las superficies que desmaterializaban el espacio interior (*Chavarría, 2006*). En la figura 2.2b se presenta el interior de la iglesia de Santa Sofía en Estambul (532-562 d.C), considerada uno de los primeros ejemplos de la construcción bizantina.

La expansión del Imperio de Oriente o Bizantino también conllevó la construcción de un gran número de iglesias con estas características, especialmente en la región de Rávena (Italia). Muchas de ellas, como la iglesia de San Vitale (538-547 d.C), conservan todavía hoy sus mosaicos de teselas de pasta de vidrio y mármol. Después de la desaparición del Imperio Bizantino, la influencia de su estilo artístico y arquitectónico perduró en construcciones de las regiones de Venecia y Sicilia. Como en el caso de la Capilla Palatina de Palermo (1142 d.C) o la Basílica de San Marco en Venecia (1063-1617d.C), que poseen numerosos mosaicos de estilo bizantino, tal y como se puede apreciar en las figuras 2.3a y b.

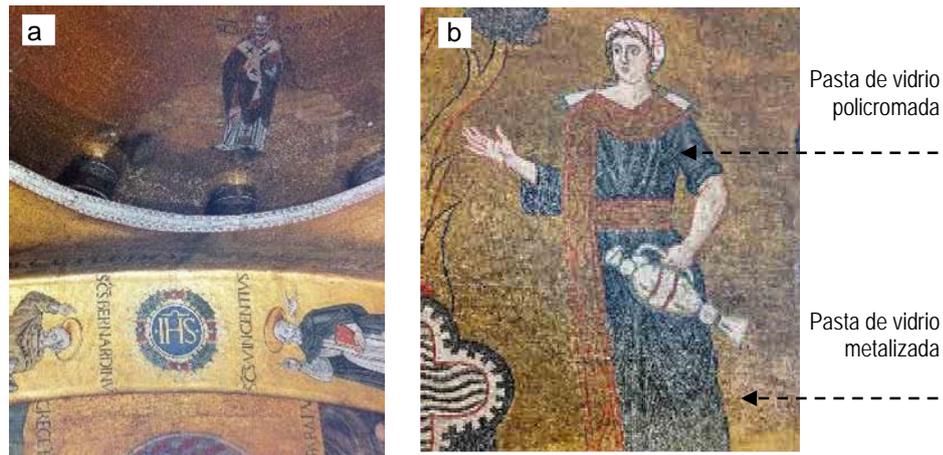


Figura 2.3: a) Revestimiento interior de la Basílica de San Marco y b) Detalle de uno de los mosaicos (Vio, 2001)

El *arte islámico*, debido a la invasión, por Bizancio, de parte de sus territorios durante del siglo VII d.C, también se vio influenciado en sus orígenes por la cultura bizantina y sus técnicas decorativas (ver figura 2.1) (González, 1995). De ahí que las principales obras religiosas islámicas de esa época, como por ejemplo la Cúpula de la Roca (697-691 d.C) en Jerusalén, incorporaron revestimientos de mosaico en el interior y el exterior de la edificación propios de este nuevo estilo adquirido (Fierro, 1991).

En la figura 2.4a se muestra el detalle de uno de los mosaicos murales que decoran el patio interior de la Mezquita de Damasco en la ciudad de Siria (705-715 d.C) construida también en esa época, estos están realizados mediante pequeñas teselas de pasta de vidrio policromado y dorado, como los antiguos mosaicos paleocristianos o bizantinos (Fierro, 1991).

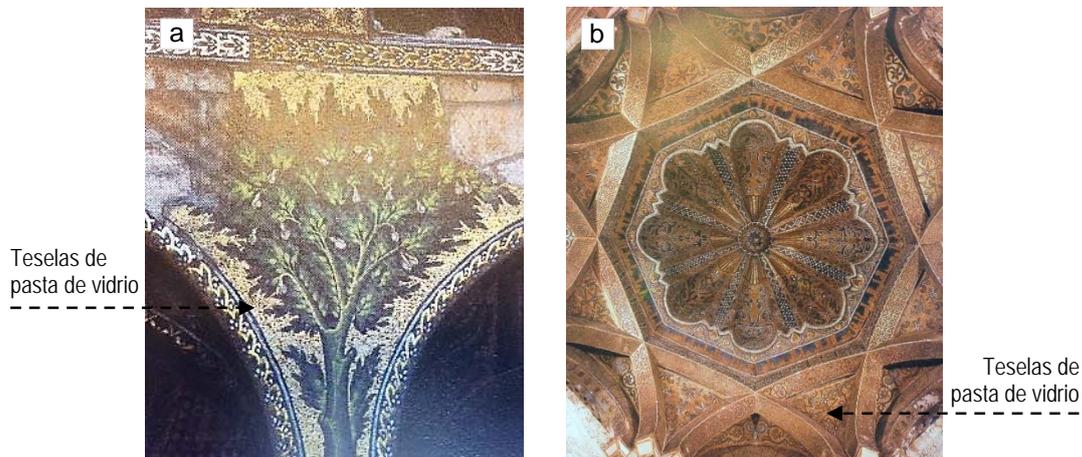


Figura 2.4: a) Arco del patio de la mezquita de Damasco y b) Decoración interior de la Mezquita de Córdoba (Hattstein et al, 2004)

La expansión del islam hacia la península ibérica conllevó la introducción de nuevas técnicas de revestimiento como el mosaico mural o la azulejería, que pronto se difundieron por todo el territorio y hacia toda Europa (Carrascosa et al, 2004). La mezquita de Córdoba, una de las primeras construcciones islámicas de esa época, fue un reflejo de esta mezcla de culturas. Como en las antiguas construcciones

bizantinas o islámicas, también se realizaron valiosos mosaicos mediante teselas vidriadas, mármoles y cerámica, tal y como se muestra en la figura 2.4b.

Durante el periodo del medioevo el mosaico decorativo fue relegado a un segundo plano por la pintura. No fue hasta el periodo del *Renacimiento*, en el siglo XVI, cuando con el movimiento de recuperación de la cultura de la antigüedad, el mosaico reapareció de nuevo artísticamente (ver figura 2.1) (Vaccoli, 2010). El Papa Gregorio XII, inmerso en la contrarreforma, promovió la decoración interior de la Basílica de San Pedro mediante mosaicos con teselas de vidrio, con el objetivo recuperar el arte paleocristiano (Belmote et al, 2008). Lo que propició la creación de uno de los principales centros artísticos de esta técnica en la capital y condujo a su difusión por todas las cortes europeas (Vaccoli, 2009).

Con posterioridad, como se muestra en el esquema de la figura 2.1, el mosaico quedó de nuevo relegado artísticamente hasta mediados del siglo XIX. En plena revolución industrial y en un contexto de progresiva evolución técnica, apareció un nuevo movimiento por toda Europa de recuperación del pasado y de las técnicas artesanales. Este pensamiento influyó en las artes plásticas y decorativas, en la arquitectura, la música y el teatro (Fontbona, 2002). Genéricamente este estilo fue denominado como *Art Nouveau*, aunque también fue conocido como Modern Style, Jugendstil, Sezession, Florale o Modernismo, en función de las particularidades adoptadas en cada territorio (Freixa et al, 2000).

En Cataluña, el *modernismo* adoptó un fuerte sentimiento de reivindicación nacionalista y destacó especialmente en el campo de las artes decorativas y en la arquitectura (De riquer et al, 2001). La técnica del mosaico, por su fuerte tradición en el territorio debido a su pasado romano e islámico, fue de nuevo utilizada como revestimiento en las edificaciones. La cerámica esmaltada fue uno de los principales materiales empleados para realizar estos revestimientos. La industrialización de este material y la utilización de formatos estándares de piezas permitieron reducir su coste y facilitar su puesta en obra. Además, las nuevas técnicas de cocción industrial mejoraron sus propiedades, lo que permitió su colocación en paramentos exteriores (Loyer, 1991).

Durante esta época en Cataluña apareció también una nueva técnica de mosaico denominada como *trencadís* (Vaccoli, 2009). A diferencia del mosaico tradicional, el *trencadís* se realizaba con piezas poligonales irregulares que se disponían en el revestimiento de manera aleatoria. Ello permitió adaptarlas a las sinuosas formas de la arquitectura modernista, emplear distintos tipos de materiales (mármol, piedras, vidrio,...) y utilizar todos los formatos de piezas e, incluso, aquellas que estuvieran rotas. Arquitectos como Lluís Domènech o Antoni Gaudí la aplicaron en muchas de sus obras. En el Capítulo 3 de la presente Tesis Doctoral se desarrolla en profundidad la aplicación de esta técnica de revestimiento en la obra de Antoni Gaudí.

En la actualidad, la técnica de revestimiento del *trencadís* es internacionalmente conocida y aplicada en gran variedad de revestimientos interiores o exteriores, incluso algunos de gran altura. Baste como muestra el revestimiento exterior de *trencadís* de piedra caliza de la torre Al Hambra (2011) en Kuwait de 412 metros de altura.

Como se puede observar en las figuras 2.5a y b, en este proyecto fue necesario emplear un revestimiento de alta adaptabilidad, como el *trencadís*, que permitiera amoldarse a las formas generadas por los giros helicoidales de la estructura.

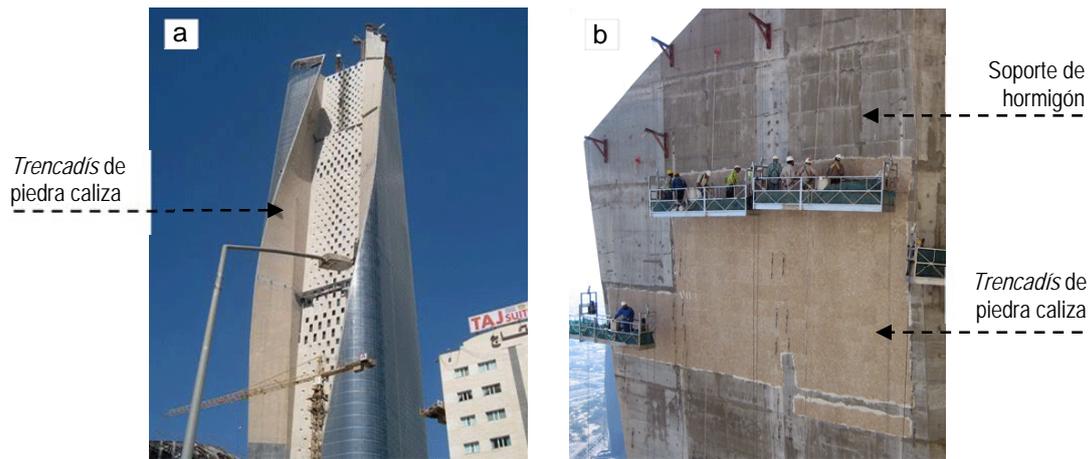


Figura 2.5: a) Torre Al Hambra en Kuwait
y b) Detalle del *trencadís* durante su colocación (*Trencadís innovació, 2014*)

2.2.2 Evolución de los materiales empleados en los mosaicos

En un paramento genérico de mosaico y/o *trencadís* se pueden distinguir 5 capas o materiales a lo largo de su sección constructiva, tal y como se muestra en la figura 2.6. En primer lugar, está la estructura de soporte (1) dónde se adhieren las distintas capas del revestimiento. A continuación, dependiendo de la planeidad de dicho soporte, se aplica una capa de regularización (2). Una vez seca esta superficie, se aplica la capa adhesiva (3) y sobre esta última, se fija la capa más superficial, compuesta por el material de rejuntado (4) y las teselas o piezas (5).

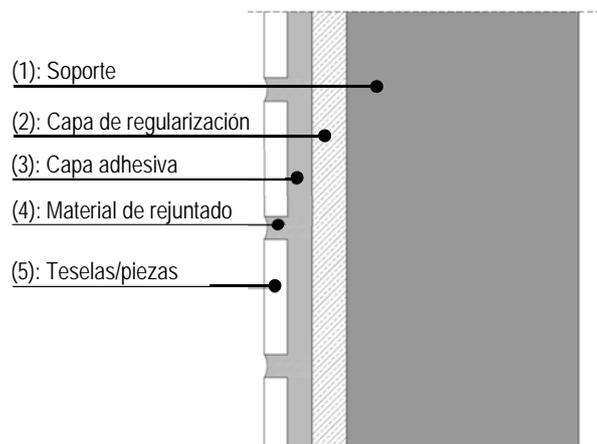


Figura 2.6: Sección constructiva de un revestimiento genérico de mosaico/ *trencadís*

En la tabla 2.1 se presenta la evolución de los materiales empleados en estas capas a lo largo de la historia y en función de las etapas histórico/artísticas descritas en el apartado anterior. A continuación se describirá en detalle la evolución de cada una de ellas.

(1) Soporte

Para realizar cualquier tipo de revestimiento es necesaria una estructura de soporte. El mosaico y/o *trencadís*, debido a su gran adaptabilidad de formas, pudo aplicarse sobre cualquier perfil de soporte (un muro, una vuelta, una bóveda, una cúpula, etc...), lo único que se le requirió es que tuviera rigidez y que fuera continuo. Como se puede apreciar en la tabla 2.1, dejando de lado las estructuras

mesopotámicas de adobe, este revestimiento fue aplicado mayoritariamente sobre soportes de sillería de piedra o mampostería de obra de fábrica. Por lo que, debido al relieve de estos, fue necesario aplicar después una capa de regularización antes de adherir el revestimiento.

En las actuales estructuras de hormigón, de acabado liso, a menudo no se requiere de la aplicación de dicha capa y se adhiere el mosaico *trencadís* directamente encima del soporte. Ejemplo de ello se puede apreciar en la figura 2.5, durante la puesta en obra del revestimiento de *trencadís* sobre la estructura de hormigón de la torre Al Hambra.

ETAPAS	CAPAS DEL MOSAICO / TRENCADÍS				
	SOPORTE	REGULARIZACIÓN	ADHESIVA	REJUNTADO	TESELAS/PIEZAS
<i>Mesopotámica</i> (XXV a.C)	Adobe		Yeso		Cerámica
<i>Bizantina</i> (V- XII)	Mampostería cerámica	Mortero de cal + Agregado de fibras vegetales o ladrillos machacados		Mortero de cal + Agregado de mármol	Pasta de vidrio; Mármol; Nácar; Piedra calcárea;
<i>Islámica</i> (VII – VIII)	-		Mortero de yeso o cal		
<i>Renacentista</i> (XII –XIX)	Sillería de piedra	Mortero de cal + Agregado de fibras vegetales		“Estuco romano”	Pasta de vidrio; Mármol; Piedra; Cerámica;
<i>Modernista</i> (XIX – XX)	Mampostería cerámica	Mortero de cal		Mortero de cal; cemento o mixto;	Vidrio; Mármol; Cerámica esmaltada;
<i>Actualidad</i> (XX – XXI)	Hormigón - Mampostería cerámica	Mortero polimérico + Adición de fibras plásticas		Mortero polimérico	Gres porcelánico; Piedra natural; (sobre malla)

Tabla 2.1: Evolución histórica de los materiales del revestimiento de mosaico y/o *trencadís*

(2) Capa de regularización

Como se puede apreciar en la tabla 2.1, en la etapa *mesopotámica*, la gruesa capa de yeso aplicado sobre el soporte de adobe tenía la función al mismo tiempo de capa de regularización, adhesiva y de rejuntado. En cambio, en la etapa *bizantina*, la capa de regularización se distinguió del resto de capas y se realizó mediante un mortero de cal apagada con un espesor entre $2 \leq e \leq 4$ cm (CIDM, 2014). En algunos puntos críticos de la estructura, como por ejemplo las cúpulas, a esta capa se añadió un agregado de paja para mejorar la adaptación del revestimiento a las deformaciones del soporte. Ejemplo de esta solución constructiva se encontró en los mosaicos del mausoleo de Gala Placidia o en la Iglesia de San Vitale en Rávena (CIDM, 2014).

Esta solución también se encontró en obras *renacentistas* posteriores y de influencia bizantina como la Basílica de San Marco en Venecia. En la figura 2.7 se presenta una muestra datada en 1340 d.C extraída de uno de los mosaicos de su baptisterio. Como se puede observar en la parte posterior de la muestra, aún quedan restos del mortero de cal de la capa de regularización con el agregado de fibras vegetales (ver figura 2.7b).

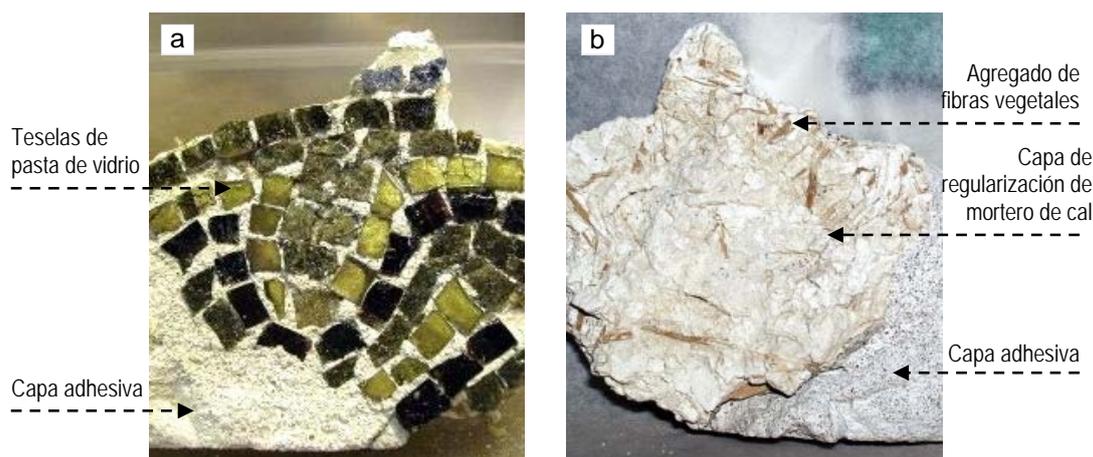


Figura 2.7: Muestra extraída del mosaico del baptisterio de la Basílica de San Marco a) Acabado superficial y b) Parte posterior de la muestra (Dal Bianco et al, 2012)

En otras obras de mosaico bizantino, como en la iglesia de Santa Sofía, se descubrió que la capa de regularización de cal tenía un agregado de ladrillos machacados (CIDM, 2014). Según la bibliografía consultada, determinados ladrillos o piezas cerámicas contienen puzolanas naturales que reaccionan con la cal durante su proceso de fraguado. Dicha reacción proporciona al mortero una mayor velocidad de fraguado y mejoras en las prestaciones mecánicas e impermeables (Rosell, 2013). Por lo que las dosificaciones aplicadas en esta capa reflejan el gran conocimiento constructivo y material de la cultura bizantina.

En los mosaicos *islámicos* la capa de regularización se realizó con mortero de yeso, dado que en estas regiones era un conglomerante más abundante que la cal, que se empleaba mayoritariamente para impermeabilizar alguna zona del paramento (Alejandre, 2002). En la etapa *modernista* la capa de regularización se realizó mediante mortero de cal aérea, como en la bizantina, o bien con un mortero de conglomerante mixto con cemento, en el caso que fuera necesario agilizar los tiempos de puesta en obra (Bassegoda, 1989). La cal aérea, a diferencia del cemento de naturaleza hidráulica, endurece lentamente debido al proceso de carbonatación por el contacto con el CO_2 de la atmosfera (Rosell, 2013). Al añadir una parte de cemento en una dosificación con un conglomerante de cal, la pasta de mortero endurece más rápidamente, pudiendo alcanzar antes la resistencia óptima para adherir la siguiente capa en el paramento.

A partir de mediados del siglo XX se generalizó el uso del cemento como único conglomerante, lo que supuso una rigidización de la capa de regularización, puesto que los morteros de cemento tienen una menor flexibilidad a las deformaciones del soporte respecto a los morteros de cal. En la *actualidad*, esta capa se realiza mediante morteros de cemento aditivados con polímeros, que aportan al mortero una mayor flexibilidad y adherencia (Jenni et al, 2006). Además, en algunos casos también incorporan filamentos o fibras plásticas que, con la misma filosofía que las fibras vegetales empleadas en la antigüedad, permiten una mayor compatibilización de las deformaciones con el soporte (ver tabla 2.1).

(3) Capa adhesiva

Como se puede apreciar en la tabla 2.1, el mortero de cal fue el principal material adhesivo empleado a lo largo de la historia. Se aplicaba al paramento en un espesor entre $1,5 \leq e \leq 2$ cm y, hasta el siglo XX, también tenía la función de rejuntado, dado que las teselas/piezas se incrustaban encima (CIDM, 2014). En algunos mosaicos *bizantinos* se encontró que en esta capa adhesiva/rejuntado

incorporaba un agregado de polvo de mármol, tal y como se indica en la tabla 2.1. Según la bibliografía consultada, la adición del polvo de mármol permitía reducir la porosidad del mortero y mejorar su impermeabilización (Alejandre, 2002). En los morteros *islámicos*, si bien se usó puntualmente el mortero de cal, la aplicación del mortero de yeso fue más habitual, igual que la capa de regularización.

En la etapa *renacentista* las dosificaciones de mortero empleadas en esta capa adhesiva y de rejuntado evolucionaron buscando una mayor adherencia. Como se puede observar en la tabla 2.1, en esta época se empleó el denominado “*Estuco romano*”, compuesto por un conglomerante de cal, un agregado de polvo de travertino y una adición con aceite de linaza (Fiori et al 2009; Belmonte et al, 2008). Existe documentación técnica que apunta que antes de aplicarlo en el paramento, este se humedecía previamente con aceite de linaza hervida para rellenar los poros de la superficie y mejorar su adherencia con el estuco (Belmonte et al, 2008). El estuco romano se localizó en los mosaicos de la Basílica de San Pedro en el Vaticano, hay autores que apuntan que la dosificación procedía de las escuelas venecianas (Fiori et al, 2009).

Con la etapa *modernista* se recupera el mosaico como revestimiento decorativo pero no su técnica de aplicación adquirida en etapas anteriores. Las teselas/piezas se adhieron mediante morteros de cal tradicionales o bien mixtos con cemento, igual que en la capa de regularización. Los morteros en los que se incorporó cemento conseguían una mayor resistencia mecánica y rigidez, por lo que presentaban una mayor incompatibilidad de deformación con las teselas o piezas del revestimiento respecto a lo morteros de cal.

En la *actualidad*, el desarrollo de los adhesivos cementicios aditivados con polímeros, conocidos popularmente también como “morteros cola”, permitió la mejora de las propiedades de los morteros de cemento empleados en esta capa adhesiva, especialmente en términos de flexibilidad y de adherencia (Jenni et al, 2006). Además, la especialización de estos materiales permitió la separación entre la capa adhesiva y de rejuntado, puesto que se buscó dar respuesta a los distintos requerimientos de cada aplicación. Por esta razón, la capa adhesiva alcanzó mínimos espesores de aplicación entre $0,3 \leq e \leq 1,5$ cm.

Los *morteros poliméricos o morteros cola* se distinguen por una alta relación Agua/Cemento próxima al 0,8, un bajo nivel de hidratación del cemento (< 30%) y un alto nivel de porosidad del 25% (Jenni et al, 2005). Generalmente se componen de un conglomerante de cemento portland, un agregado de gran finura y dos tipos de aditivos, el éter de celulosa (CE) y el polvo redispersable (RP) (Bentz et al, 2008). La formulación de este tipo de morteros habitualmente es desconocida por motivos comerciales, sin embargo, en el 2006 fue publicada una formulación genérica empleada para adherir un sistema de embaldosado cerámico. Dicha dosificación se presenta en la tabla 2.2.

COMPONENTES		PESO EN SECO (%)
Conglomerante	Cemento portland	35,0
Áridos	Arena de cuarzo (0,1-0,3 mm)	40,0
	Polvo de carbonato (57,5 micras)	22,5
Aditivos	Éter de celulosa	0,5
	Polvo redispersable (1 micra)	2,0
Agua	Agua desionizada	25,5

Tabla 2.2: Dosificación de un mortero polimérico (Jenni et al, 2006)

Como se puede observar en la tabla 2.2, gran parte del volumen de la dosificación está formado por agregados naturales especialmente seleccionados: arena de cuarzo (40,0%) y polvo de carbonato (22,5%). Existen estudios en la literatura técnica que apuntan que la composición mineralógica y el porcentaje del tipo de agregado puede influenciar en las propiedades mecánicas y la adhesión de este tipo de morteros, lo que explica su alta selección (*Ozkahrama et al, 2005*).

Los aditivos de éter de celulosa (CE) y el polvo redispersable (RP) se incorporan en la dosificación en un porcentaje en peso seco del 0,5 y del 2,0%, respectivamente (ver tabla 2.2). El éter de celulosa (CE) se añade por su capacidad de retención de agua (*Bentz et al, 2008*). El rápido secado de estos morteros no permite la completa hidratación del cemento y mediante su incorporación se completa el ciclo en una etapa posterior (*Ozkahrama et al, 2005*). Además, mejora la trabajabilidad del mortero en fresco, actuando como un agente espesante y facilitando la incorporación de burbujas de aire durante el amasado (*Bentz et al, 2008*).

El aditivo de polvo redispersable (RP) mejora las propiedades del mortero en estado fresco y en endurecido, aumentando su flexibilidad, resistencia a la tracción, deformabilidad e impermeabilidad (*Mansur et al, 2009*). Este componente se obtiene mediante el secado por pulverización de un alcohol de polivinilo (PVA) que contiene emulsión de látex (*Jenni et al, 2005*). Cuando reacciona con el agua durante el amasado se forman dispersiones estables con propiedades similares a la original y, al secarse, se crean películas en toda la estructura del mortero con alta resistencia a la tracción y de gran capacidad adherente (*Shulze et al, 2001; Ozkahrama et al, 2005; Winnefeld et al, 2012*).

En el mercado existen diversos tipos de polvos redispersables en función de la composición del látex, como son: VC (vinyl-acetate/ethylene/vinyl-chloride co-polímero); SA (estireno / acrílico co-polímero) y EVA (etileno / acetato de vinilo co-polímero) (*Jenni et al, 2005*). Dependiendo del tipo y de la concentración de este aditivo, siempre inferior al < 3% s.p.c, influye también en las características elásticas y adherentes del mortero (*Shulze et al, 2001; Maranhao et al, 2011*).

(4) Rejuntado

A lo largo de la historia del mosaico, el material empleado en el rejuntado fue el mismo que el de capa adhesiva, puesto que al incrustar las teselas encima no existía una distinción entre ambos (ver tabla 2.1). Ahora bien, en algunos casos, una vez adheridas las piezas se podía aplicar una lechada de conglomerante y agua para rellenar los espacios del rejuntado. El ancho de la junta entre las teselas fue directamente vinculado con el tamaño de estas piezas.

Hasta el modernismo se emplearon teselas rectangulares, con un arista entre 2 y 12 mm de longitud, por lo que el ancho de junta fue siempre inferior o igual a los ≤ 5 mm y casi imperceptible a los ojos del espectador, tal y como se puede observar en las figuras 2.3a y b (*CIDM, 2014*). En cambio, en el modernismo la dimensión y el formato de las teselas/piezas aumentó y con ello también el ancho de junta del rejuntado (< 5 mm), tomando protagonismo en el dibujo del revestimiento.

En la actualidad, existen morteros poliméricos específicos para el rejuntado. Estos se caracterizan por una reducida retracción (< 1,5 mm), altas propiedades mecánicas, elásticas e impermeables, con el fin de absorber las deformaciones dimensionales de las piezas del revestimiento y evitar la penetración de agua hacia el interior del mismo.

(5) Teselas / piezas

A partir del análisis histórico/constructivo del mosaico/*trencadís* se establecen 3 principales materiales empleados en las teselas o piezas: la piedra natural (caliza, calcárea, mármol, nácar,...); la pasta de vidrio (policromada y metalizada) y la cerámica (pintada, esmaltada, sin esmaltar, gres porcelánico,...). Todos ellos tienen en común que pueden ser cortados en pequeños trozos sin desmenuzarse, son impermeables, brillantes y resistentes al paso del tiempo.

De los dos materiales manufacturados, la *pasta de vidrio* mantuvo prácticamente invariable su composición y método de producción a lo largo de la historia. Este material se compone de distintos elementos (sílice, cal, sosa, potasa, alúmina, magnesia, óxido de plomo, ácido bórico, ácido fosfórico entre otros...) y, a diferencia del vidrio convencional, incorpora plomo para facilitar su corte y óxidos y sales metálicas para la obtención de una gran variedad de tonalidades (Chavarría, 2006; CIDM, 2014). El método de producción de la pasta de vidrio policromada y metalizada es similar y sigue el siguiente proceso:

- 1º) Los distintos componentes en polvo son fundidos a altas temperaturas, entre 1500-1600 °C, hasta obtener una pasta viscosa (Chavarría, 2006);
- 2º) La pasta obtenida se extiende sobre una plancha metálica horizontal conformando placas de aproximadamente 10 mm de espesor, tal y como se muestra en la figura 2.8a. En el caso del metalizado, la mezcla de vidrio fundido es transparente y se obtienen placas de menor espesor entre 5 y 10 mm (ver figura 2.8b);

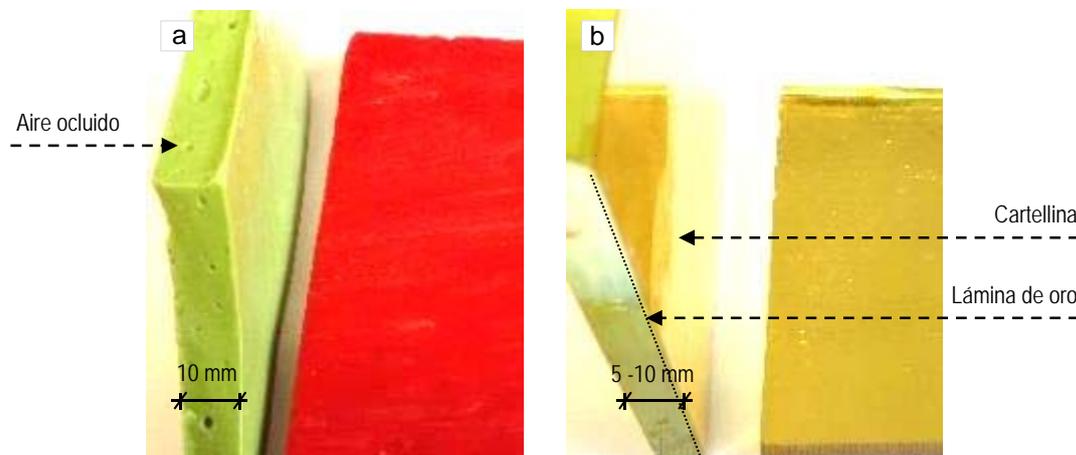


Figura 2.8: Muestras de pasta de vidrio a) Policromada y b) Metalizada dorada

- 3º) Sobre la pasta de vidrio del metalizado se extiende encima una fina lámina de oro o plata según el caso. A continuación, se aplica una fina capa de vidrio soplado llamado "Cartellina", con la función de proteger la hoja de metal (ver figura 2.8b) (Dal Bianco et al, 2012);
- 4º) En todos los casos, las planchas de vidrio se someten a un proceso lento de recocido para evitar la formación de fisuras internas. Además, en el caso del metalizado, también se realiza para asegurar la adherencia de las tres capas (CIDM, 2014);
- 5º) Para finalizar, se dejan enfriar todas las placas lentamente. Como se puede observar en la figura 2.8a, la pasta de vidrio policromada puede incorporar aire ocluido en su sección y el acabado

superficial tiene ciertos relieves. Por el contrario, el vidrio metalizado tiene un acabado más liso y brillante (ver figura 2.8b);

A diferencia de la pasta de vidrio, la cerámica sí que experimentó una evolución significativa de sus cualidades y sistemas producción a lo largo de la historia (Loyer, 1991). El avance de los sistemas de cocción fue fundamental en dicho proceso y facilitó la obtención de piezas de gran tamaño, de alta resistencia mecánica, mínima porosidad y capacidad de absorción del agua ($< 0,5$), como, por ejemplo, el gres porcelánico (Vacca, 2010). Ello permitió, también, el paso de su aplicación en interiores a revestimientos exteriores.

2.2.3 Evolución de las técnicas de aplicación

Antes de abordar el tema de las técnicas de realización del mosaico y/o *trencadís*, es necesario mencionar que existe un trabajo previo de corte de las teselas o piezas. Este procedimiento hasta la actualidad fue un procedimiento mecánico y manual, mediante la utilización principalmente de martillos, cinceles y tenazas. La evolución de la industria permitió realizar este proceso de manera totalmente automatizada, alcanzado un corte "limpio" (Pico et al, 2005). Sin embargo, este progreso fue en detrimento de la adherencia de las piezas, puesto que se redujo la rugosidad superficial de sus laterales y por consiguiente, el anclaje mecánico con el rejuntable.

Para la realización de un mosaico y/o *trencadís* existen 2 técnicas de aplicación: la directa y la indirecta (CIDM, 2014; Chavarria, 2006). La técnica directa se realiza directamente sobre el soporte cuando la capa adhesiva aún se encuentra húmeda. En ese momento, se plasma la tinta del diseño mediante un papel y a continuación se adhieren las teselas o piezas a esta superficie (CIDM, 2014). Para finalizar, se extiende por encima el material de rejuntable rellenando todos los espacios huecos.

La técnica directa es un proceso lento y totalmente artesanal. En la actualidad, para minimizar los tiempos de colocación y aumentar la adherencia del revestimiento, las teselas o piezas vienen prefijadas a una malla de fibra de vidrio de entre 30 y 60 cm de largo, tal y como se muestra en la figura 2.9a. A continuación, este conjunto de piezas se adhiere directamente a la superficie con una capa de mortero cola (ver figura 2.9b).

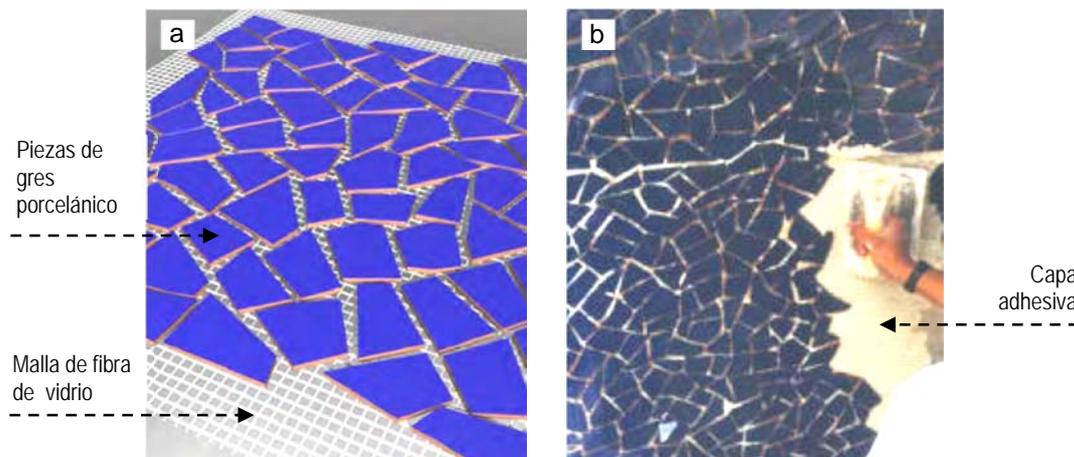


Figura 2.9: a) Malla de piezas de *trencadís* de gres porcelánico (Trencadís inovació, 2014) y b) Colocación de la malla de *trencadís* mediante la técnica directa en el paramento (BASF, 2000)

La *técnica indirecta o inversa* consiste en configurar el mosaico del revés sobre un molde provisional, generalmente de pequeño grosor. Posteriormente, el molde se rellena con el mortero, el cual se filtra por las juntas de las piezas y forma un único bloque. El panel de mosaico obtenido se transporta hasta el soporte y se adhiere a éste mediante la aplicación de la capa adhesiva. Según la bibliografía consultada, esta técnica fue usada habitualmente en los revestimientos de las construcciones islámicas y especialmente en la realización de mosaicos de azulejos cerámicos (González et al, 1995).

2.3 LA ADHERENCIA

El concepto de *adherencia* hace referencia a la unión que existe entre dos materiales puestos en contacto. Uno de los materiales implicados será el material *adhesivo* y el otro el *sustrato o adherente*.

En los revestimientos de mosaicos y/o *trencadís* analizados se define como sustrato el paramento de soporte (1), puesto que en él siempre irán adheridas las distintas capas del revestimiento (ver figura 2.10). Se establecen como materiales adherentes las teselas (5), puesto que se adherirán en la última capa del paramento. El resto de capas de mortero (capa de regularización (2); capa adhesiva (3) y rejuntado (4)) tendrán la función del adhesivo. Aunque también pueden tomar la función de soporte cuando endurecen.

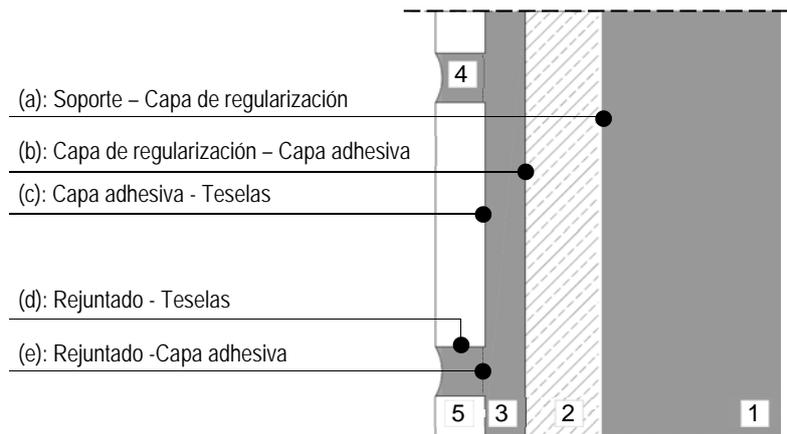


Figura 2.10: Interfaces presentes en un revestimiento de mosaico y/o *trencadís*

En el sistema analizado se define como el adhesivo aquel mortero en estado fresco o líquido capaz de generar su adhesión al sustrato y/o adherente. Según la literatura técnica, la *adhesión* son todas aquellas interacciones físicas y químicas creadas en la *interfaz o interfaces* entre estos materiales (adhesivo – sustrato/adherente). En la sección constructiva del mosaico y/o *trencadís* se pueden distinguir 5 interfaces, tal y como se indica en la figura 2.10: a) sustrato – capa de regularización; b) capa de regularización – capa adhesiva; c) capa adhesiva – teselas; d) rejuntado – teselas y, por último, e) rejuntado – capa adhesiva.

Cuanto mayor sea la compatibilidad entre el material adhesivo y el sustrato y/o adherente, mayor será la fuerza de unión entre ambos (Fernández, 1991). Por tanto, las interfaces (c) y (d) se consideran las más débiles del sistema, dado que siempre serán los materiales con las propiedades con mayores diferencias (ver figura 2.10).

2.3.1 Teorías de la adhesión

En este apartado se describirán los modelos de adhesión teóricos que existen en la literatura técnica, con el objetivo de conocer cómo se produce la adhesión entre las distintas capas o materiales del revestimiento de mosaico/*trencadís*. Según la bibliografía consultada, no existe una única teoría universal que explique todas las interacciones físicas y químicas que se producen en una unión adhesiva (Vázquez, 2010). Por lo que, se describirán brevemente las más reconocidas que faciliten la comprensión del sistema de revestimiento analizado con la utilización de morteros tradicionales o con morteros poliméricos de última generación.

Teoría de la adhesión mecánica

Esta teoría es la más antigua de todas y permitía explicar la adherencia de los revestimientos mediante morteros tradicionales de cal, cemento o yeso. Expone que el material adhesivo en estado líquido penetra en las porosidades o rugosidades superficiales del sustrato/adherente y cuando endurece se produce un anclaje mecánico entre ambos, tal y como se muestra en la figura 2.11a. En consecuencia, se establece que cuanto mayor sea la rugosidad y porosidad del sustrato/adherente mayor será la fuerza de unión con el adhesivo (Martín, 2000). Asimismo, cuanto mayor sea el área de contacto entre los dos materiales mayor será la adherencia entre ambos.

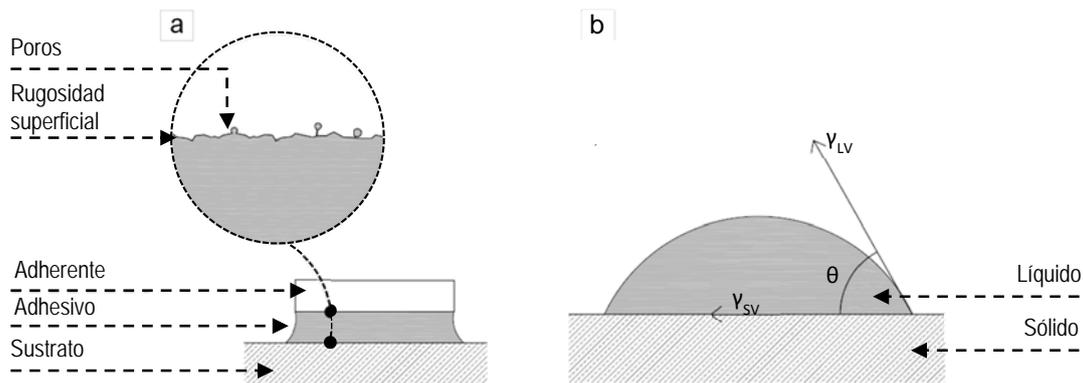


Figura 2.11: a) Esquema adhesión mecánica del adhesivo – sustrato/adherente y b) Ángulo de contacto entre líquido / sólido

Teoría de la adsorción termodinámica o mojado superficial

Para que se produzca la adhesión, el adhesivo debe mojar la superficie del sustrato/adherente para que tenga lugar un contacto a nivel molecular entre ambos (Fernández 1991). En ese caso, para que se cumpla la condición de mojado de un líquido sobre un sólido, la energía superficial del líquido (γ_{LV}) debe ser mayor a la del sólido (γ_{SV}), es decir, $\gamma_{LV} > \gamma_{SV}$. En este sentido, tal y como se muestra en el esquema de la figura 2.11b, cuanto menor sea el ángulo de contacto (θ) entre el líquido y sólido, mayor será su mojabilidad (Lisea et al, 1990).

Según la teoría de la adsorción termodinámica la adhesión entre el adhesivo y el sustrato/adherente se produce en esta fase de contacto líquido – sólido. En ese momento, se generan fuerzas intermoleculares en la interfase entre ambos materiales. Tales fuerzas se establecen como enlaces secundarios de naturaleza física, las cuales tienen una energía de enlace entre 0,08 - 40 kJ/mol (enlaces de van der Waals - enlaces de hidrógeno). En algunas ocasiones, dichos enlaces secundarios

pueden generar también enlaces primarios de naturaleza química que tienen una energía de enlace mayor entre 700 – 1100 kJ/mol (enlaces covalentes - enlaces iónicos) (Martín, 2000).

Teoría del enlace químico

La teoría del enlace químico considera que la adhesión entre el adhesivo y el sustrato/adherente se debe a la creación de enlaces primarios entre ambos, que pueden ser iónicos o covalentes (Martín, 2000). Dichos enlaces tienen una gran energía, cuando se produce una unión química entre dos materiales contribuye significativamente a una mayor fuerza de adhesión entre ambos (Vázquez, 2010).

Teoría ácido –base

Según esta teoría se genera una adhesión entre materiales cuando existen interacciones entre ácido-base (Martín, 2000). Se entiende como ácidos aquellos elementos capaces de aceptar electrones y donar protones. Al contrario que los elementos base, que son capaces de aceptar protones y donar electrones. Existen, además, los elementos anfóteros que pueden tomar la función de ácido o base (Vázquez, 2010). A continuación, se expondrán algunos ejemplos de estos elementos:

Ácido: moléculas parcialmente halogenadas; polímeros (PVC, PE, PP clorados, fluoruro de polivinilo, copolímeros de ácido acrílico-etileno) o sustancias inorgánicas (Sílice, Fe₂O₃, Fe₃O₄).

Base: ésteres, cetonas, éteres, compuestos aromáticos, polímeros (PMMA, poliestireno, EVA, policarbonatos, poliamidas, PU) o sustancias inorgánicas (CaCO₃, Al₂O₃ amorfo, FeO₃ amorfo).

Anfóteros: amidas, aminas, alcoholes, polímeros (poliamidas, polialcohol vinílico), o sustancias inorgánicas (bohemia, bayerita).

Como se puede observar, algunas de las sustancias inorgánicas y polímeros incluidas tanto en los elementos ácidos y/o base expuestos pueden encontrarse en el sistema de adhesión evaluado mediante un adhesivo de mortero o bien, mediante mortero polimérico.

Teoría eléctrica

La teoría eléctrica podría explicar parte de la unión entre materiales de diferente naturaleza, como por ejemplo un polímero y un vidrio. En ella se compararía esta unión con un condensador plano cuyas placas se constituyen por una doble capa eléctrica (Vázquez, 2010). Es decir, las fuerzas electrostáticas generadas por los dos materiales contribuirían a la unión entre ambos.

2.3.2 Causas o factores de la pérdida de adherencia

Históricamente, los mosaicos se aplicaron en paramentos interiores, lo que favoreció a su mayor conservación. Bien es conocido que los revestimientos exteriores se ven degradados en menor o mayor medida por los efectos ambientales y climatológicos. La lluvia, el viento, el sol o la contaminación ambiental de las ciudades, son agentes que producen alteraciones físico-químicas en los revestimientos acelerando su degradación. Esta se puede apreciar en las superficies por cambios de coloración, aparición de manchas o agentes biológicos, fisuras, o bien en desprendimientos parciales de parte del recubrimiento.

Las causas o factores de la pérdida de adherencia de los revestimientos generalmente actúan de manera combinada o consecutiva, por lo que raras veces se determinaría sólo una. A partir de la bibliografía consultada y el análisis de algunas restauraciones de obras históricas de mosaico/*trencadís* (Gómez, 2012) en la tabla 2.3 se presentan las seis más relevantes, ordenadas desde la fase de diseño hasta la etapa en servicio de los revestimientos.

FASES	CAUSAS / FACTORES
DISEÑO	1) Errores de diseño
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Selección de materiales inadecuados ▪ Solución constructiva inadecuada
CONSTRUCTIVA	2) Fallos en la aplicación
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inadecuada preparación del sustrato ▪ No uniformidad de la capa adhesiva ▪ Exceso de tiempo abierto de los morteros
	3) Retracción del mortero durante el secado
SERVICIO	4) Entrada de agua
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reacciones químicas nocivas ▪ Fenómenos de carácter expansivo
	5) Movimientos diferenciales en las interfases
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ciclos de choque térmico ▪ Ciclos de mojado/secado ▪ Ciclos de hielo/deshielo
	6) Movimientos estructurales o sísmicos

Tabla 2.3: Causas o factores de la pérdida de adherencia en los revestimientos de mosaico/*trencadís*

Como se puede observar en la tabla 2.3, la 1ª causa se relaciona con los errores de diseño, tanto de la solución constructiva del revestimiento, como en la selección de sus materiales (Chew, 1999; Ramos et al, 2012). La 2ª causa se vincula con los fallos originados durante la aplicación de las distintas capas de los revestimientos. En este grupo se incluirían 3 factores que podrían inducir al despegue de las teselas/piezas en un corto o largo plazo: primero, por una inadecuada preparación del sustrato; segundo, por una no uniformidad de la capa adhesiva y tercero, por un exceso del tiempo abierto de los morteros en estado fresco. En este sentido, se considera que cuanto mayor sea la adherencia inicial de las distintas capas del revestimiento, mayor será el tiempo y resistencia durante la etapa en servicio.

En cuanto la inadecuada preparación del sustrato se atribuiría a una mala condición previa de esta superficie, como por ejemplo, una falta de limpieza, humectación o bien, una baja rugosidad (Vázquez, 2010). Como bien indica la teoría de la adhesión mecánica, para que exista una buena adhesión entre adhesivo/sustrato es conveniente una alta superficie de contacto entre ambos, por tanto las actuaciones descritas contribuirían en ese aspecto. Asimismo, si no se aplica una capa uniforme de adhesivo o mortero sobre el sustrato, puede facilitar la retención de burbujas de aire en la interfaz, cuando se incrusten las teselas en paramento, reduciendo así, la superficie de contacto entre los dos materiales.

Por otra parte, una superación del tiempo abierto de los morteros en estado fresco también puede influir en el despegue de las teselas, puesto que estos empiezan a secarse y pierden su capacidad adhesiva (Jenni et al, 2005; Bühler et al, 2013). En los adhesivos cementicios o morteros cola, debido a su rápido fraguado, este factor señalado puede llegar a ser determinante, puesto que se forma

rápidamente una película de polímeros en la superficie, de manera que al incrustar la pieza sobre esta superficie la película de polímeros se dispersa por la interfaz y en el interior del mortero, tal y como se muestra en la sección transversal de las figuras 2.12a y b. Existen estudios en la literatura técnica que vinculan la formación de esta película con la pérdida de adherencia y la fisuración de la interfaz entre capa adhesiva y la tesela/pieza (*Jenni et al, 2005; Wetzel et al, 2010*).

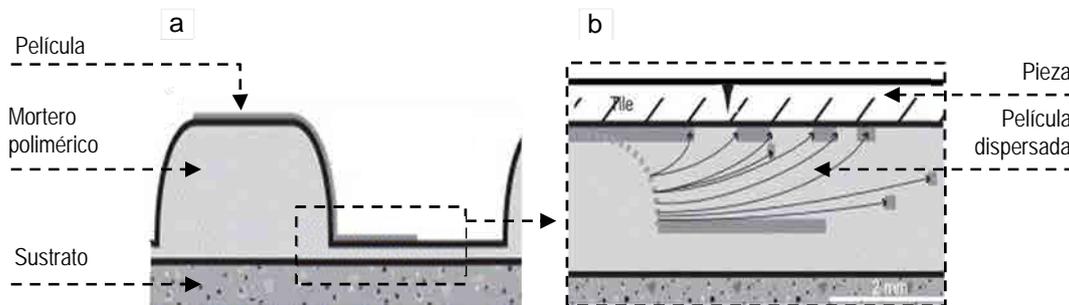


Figura 2.12: a) Sección transversal de una capa de mortero cola aplicado con una llana dentada sobre un sustrato y b) Detalle de la redistribución y flujo de la película de polímeros una vez se ha colocado la pieza sobre el mortero cola (*Jenni et al, 2005*)

Tal y como se indica en la tabla 2.3, la 3ª causa de la pérdida de adherencia puede originarse por la retracción de los morteros durante los primeros días o semanas de su aplicación (*Wetzel et al, 2012*). La pérdida de su volumen, por la evaporación del agua de amasado, genera tensiones en las interfaces opuesta a las fuerzas de adhesión, preferentemente se da en el rejuntable debido a condiciones de secado más pronunciadas (ver figura 2.13a) (*Jenni et al, 2006*). Como resultado de ese estado tensional pueden surgir fisuras en dichas interfaces, disminuyendo así la adherencia de las piezas y creando vías de conexión con el entorno ambiental exterior (*Jenni et al, 2006; Wetzel et al, 2012*).

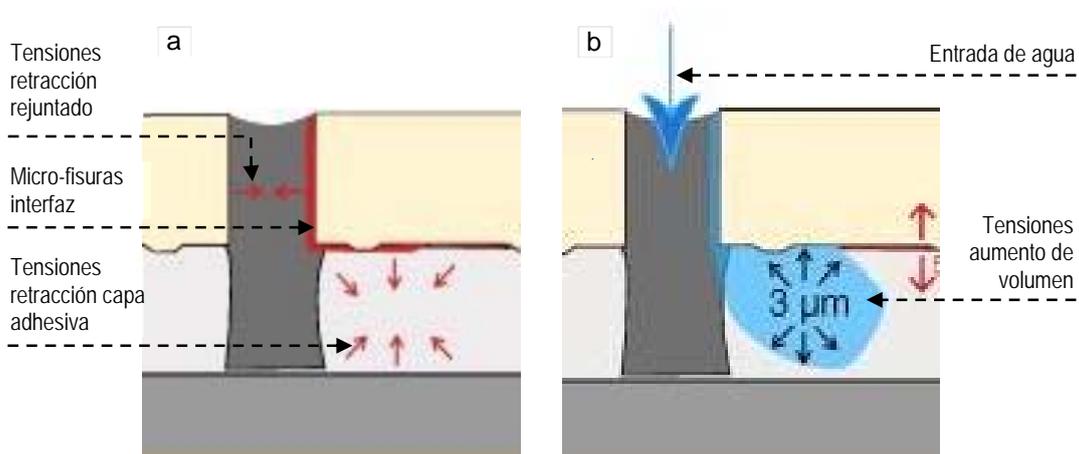


Figura 2.13: a) Tensiones por la retracción del rejuntable y la capa adhesiva y b) Aumento de volumen del mortero debido a la entrada de agua (*Wetzel et al 2012*)

La entrada de agua hacia el interior del revestimiento se considera la 4ª causa de pérdida de adherencia (ver tabla 2.3) y puede producirse por dos vías: una exterior y otra interior. En el caso de la exterior se daría en los revestimientos expuestos a factores climatológicos como la lluvia y humedad, entrando por las fisuras generadas en la interfaz (rejuntable – tesela/pieza) (ver figura 2.14a). Por otro lado, la interior puede originarse por efectos de capilaridad en la base de los muros o bien por filtraciones procedentes de las cubiertas, tal y como se muestra en la figura 2.14b (*CIDM, 2014*).

El agua en estado líquido, debido a su capacidad disolvente, puede llegar a ser uno de los factores determinantes para el inicio de reacciones químicas nocivas, contribuyendo así por ejemplo a fenómenos de lixiviación. Además, también sirve como método de transporte para la entrada de iones cloruros y sulfatos que pueden potenciar fenómenos de carácter expansivo (*Mahaboonpachai et al, 2008; Wetzel et al, 2012*). En este sentido, un continuado contacto de los morteros con el agua puede provocar un aumento de volumen de los mismos, generando unas tensiones perpendiculares a las distintas interfaces provocando un empuje hacia el exterior de las piezas/teselas, tal y como se muestra en la figura 2.14b (*Wetzel et al, 2010*).

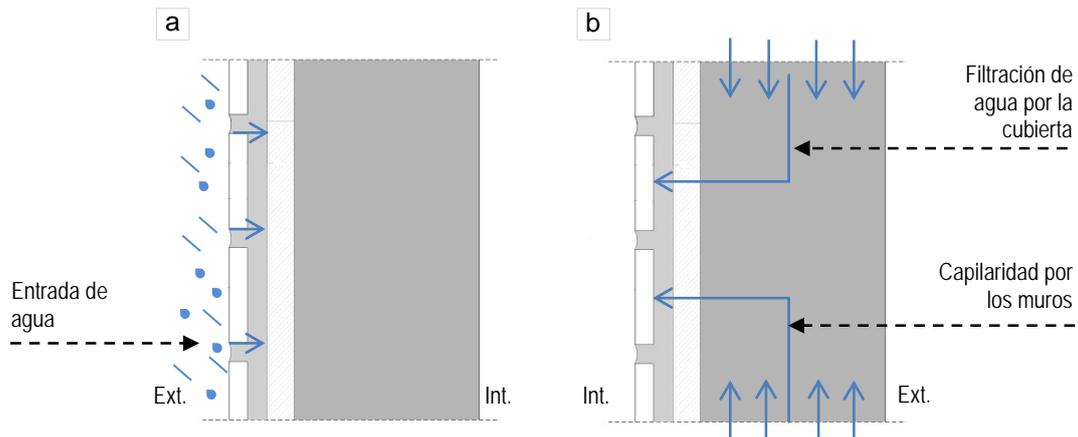


Figura 2.14: Vías de entrada del agua hacia el interior del revestimiento a) Exterior y b) Interior

En gran parte de los mosaicos históricos bizantinos, como en la basílica de San Marco en Venecia, la capa adherente se vio seriamente comprometida por la presencia continuada de agua salada filtrada por la base de los muros (*CIDM, 2014*). Debido a la poca o nula porosidad de las teselas de pasta de vidrio, las sales restaron depositadas en el trasdós de las piezas y, al cristalizar, la expansión producida fue capaz de generar su despegue (*Dal Bianco et al, 2012*).

La 5ª causa de la pérdida de adherencia se relaciona con los movimientos diferenciales en las interfaces producidos por los ciclos térmicos de mojado/secado y hielo/deshielo durante su fase de servicio (ver tabla 2.3). La exposición prolongada a los efectos ambientales, como la lluvia, el viento o la radiación solar, son capaces de aportar o restar energía térmica a los revestimientos exteriores, generando deformaciones nada menospreciables (*Chew, 1999*).

El mosaico *trencadís* al tratarse de un revestimiento compuesto por materiales con distintas propiedades, especialmente en la capa más superficial, provoca la aparición de tensiones tangenciales por incompatibilidad de deformación en las interfaces (*Wetzel et al, 2010*). Estas pueden ser capaces de producir la fisuración o el despegue parcial del revestimiento. Fenómenos similares también pueden surgir por las variaciones de volumen producidas por el efecto de los ciclos de hielo/deshielo en el agua situada en los poros internos del revestimiento (*Wetzel et al, 2012*).

Finalmente, la 6ª y última causa se vincula con los movimientos estructurales o sísmicos que se puedan producir en las edificaciones (*Chew, 1999*) (ver tabla 2.3). Las vibraciones producidas en estas situaciones pueden provocar el despegue de las teselas/piezas o de algunas capas de este tipo de revestimiento. Esta fue, desafortunadamente, una de las causas de la desaparición de algunas obras históricas de mosaico en la región de Rávena en Italia (*CIDM, 2014*).

2.3.3 Evaluación de la adherencia

Ensayos Mecánicos

En la actualidad los adhesivos cementosos o morteros cola empleados en los revestimientos de aplacado y/o mosaico/*trencadis* se rigen por la normativa UNE-EN 12004. En ella se evalúa la adherencia de estos morteros a partir de su resistencia a la tracción, es decir, la fuerza perpendicular al plano del revestimiento que es capaz de resistir el mortero. Por tanto, la normativa no tiene en cuenta las tensiones rasantes en las interfaces del revestimiento que contribuirían en esa adhesión.

En la figura 2.15a, se presenta la configuración del ensayo para determinar la adherencia o la resistencia a la tracción descrita en la normativa UNE-EN 1348. Como se puede observar, en una placa de hormigón se extiende una capa uniforme de mortero cola mediante una lana dentada y se colocan encima varias piezas de cerámica de 50x50 cm. Después de 27 días de curado se pegan los cabezales de tracción mediante un adhesivo de alta resistencia. A continuación, tras 24 horas más, se procede a realizar el ensayo y, para ello, se acopla el cabezal de tracción al equipo de medición, tal como se muestra en la figura 2.15a. Este último ejerce unas fuerzas de tracción, paralelas al plano de las piezas, a través de un marco de reacción compuesto por 3 patas regulables. El mortero se considera apto para su uso si alcanza un valor de resistencia a la tracción igual o mayor de $\geq 0,5$ MPa.

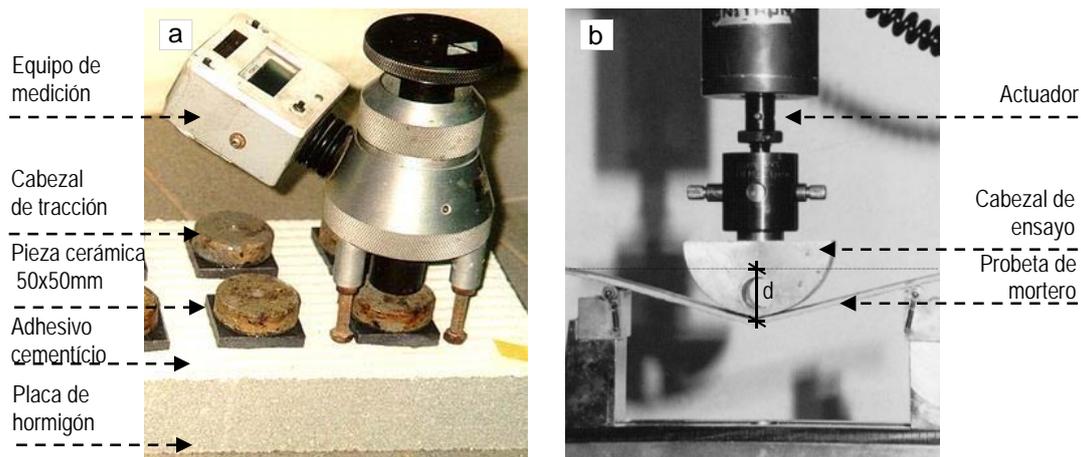


Figura 2.15: a) Ensayo de adherencia o resistencia a tracción UNE EN 1348 y b) Ensayo para determinar la deformabilidad transversal UNE EN 12002 (Porcar, 2008)

La normativa también contempla la realización de un ensayo para determinar la deformabilidad transversal de los morteros aplicados en la capa adhesiva y en el rejuntado (UNE EN 12002). En la figura 2.15b se presenta la configuración de dicho ensayo. Como se puede observar, se trata de un ensayo muy parecido al de resistencia a la flexión para morteros convencionales (UNE EN 196-1), puesto que se determina la fuerza necesaria para romper la sección central de una probeta de mortero apoyada en sus extremos ($L = 200$ mm).

No obstante, en este caso, se emplea una probeta de mortero de mayores dimensiones (300x45 mm) y de menor espesor (3 mm). El valor obtenido mediante la carga aplicada por el actuador central y la distancia (d) respecto al plano horizontal inicial, permite conocer la flexibilidad del mortero. Sin embargo, tampoco aporta información sobre las tensiones rasantes que surgirían durante un esfuerzo de cizalladura por la deformación transversal del mortero respecto al sustrato.

Evaluación de la durabilidad de la adherencia

En la normativa vigente UNE EN 12004 certifica la efectividad de la adherencia de los morteros cola realizando el ensayo de resistencia a la tracción (*UNE-EN 1348*) después de someterlos a 3 tipos de ensayos de envejecimiento acelerado por separado: envejecimiento por calor; almacenamiento en agua; ciclos de hielo/deshielo. En todos los casos, los morteros deben alcanzar un valor de resistencia a la tracción o adherencia igual o mayor de $\geq 0,5$ MPa para que sean considerados aptos.

En la tabla 2.4 se presenta la configuración de dichos ensayos de envejecimiento. Como se puede observar, las condiciones de curado y envejecimiento son diferentes para cada caso, lo que dificulta su posible comparación. Además, la normativa únicamente contempla el envejecimiento cíclico, más representativo de la realidad ambiental, en el caso del hielo/deshielo.

ENSAYOS	CONFIGURACIÓN	ADHERENCIA
Envejecimiento con calor	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 14 días de curado; ▪ 14 días en un horno a una temperatura de 70 ± 3 °C; 	
Inmersión en agua	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 7 días de curado; ▪ 21 días almacenadas en agua; 	$\geq 0,5$ MPa
Ciclos de hielo/deshielo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 7 días de curado; ▪ 21 días almacenadas en agua; ▪ 25 ciclo de hielo/deshielo; 	

Tabla 2.4: Ensayos de envejecimiento acelerado que contempla la normativa UNE EN 12004

Los ensayos de envejecimiento o durabilidad requieren de tiempo y recursos. Además, la normativa vigente no unifica criterios para evaluar superficies de un revestimiento, más acorde con la realidad, ni tampoco contempla la posibilidad de realizar un seguimiento mediante ensayos no destructivos. Estos últimos facilitarían la obtención de medidas in situ en obras existentes, alargarían el tiempo de los estudios experimentales, reducirían el número de probetas a evaluar y facilitarían información acerca del proceso de degradación.

Por todo ello, en la actualidad, existe un número reducido de estudios de durabilidad en la literatura técnica de revestimientos de aplacados o similares como el mosaico *trencadís*. Además, los que existen tienen una configuración distinta en cada caso (probetas, condiciones de envejecimiento acelerado y evaluación), por lo que se hace difícil también su correlación. Con el objetivo de exponer un reflejo de la situación actual en la tabla 2.5 se presentan algunas características de 5 estudios experimentales de durabilidad realizados en los últimos años y, a continuación, se describe brevemente cada uno de ellos.

En el 2001 *Shulze et al* evaluaron la efectividad a largo plazo de distintos morteros poliméricos expuestos a la intemperie y en condiciones de laboratorio. Las probetas empleadas partieron de unas mismas condiciones de producción y curado que, después, se almacenaron durante un periodo de 10 años en las distintas localizaciones (ver tabla 2.5). Las condiciones climáticas de almacenaje en el laboratorio fueron uniformes durante todo el estudio, con una temperatura y humedad de 25 °C y del 50%, respectivamente. En cambio, en la exposición a la intemperie, las probetas se situaron debajo de un cobertizo en la localidad de Brurghausen (Alemania) con una temperatura media anual de 8,7 °C y con precipitaciones durante todo el año.

AÑO	CONDICIONES		ENSAYOS EVALUACIÓN		DURACIÓN
	Laboratorio	Intemperie	Mecánicos	No destructivos	
2001	T = 23°C H _R = 50%	T _{anual} = 8,7 °C Burghausen (Alemania)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adherencia (DIN 18156); ▪ Compresión y flexión (DIN 196); 	-	10 años
2007	Ciclo térmico; T = 24 a 45°C Ciclo humedad; T = 24 °C; 2,25 l/min	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ensayo de corte simple (no normalizado) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Extensométrico 	200 ciclos (1 año)
2008	T _{sup.} = 90 – 120 °C	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Termografía; ▪ Fluorescencia sódica 	1 hora
2009	T = 25°C H _R = 60%	T _{anual} = 21 °C Itupeva (Brasil)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adherencia (NBR 14084); ▪ Deformabilidad transversal (UNE EN 12002); 	-	180 días
2012	-	T _{anual} = 8,8 °C Berna (Suiza)	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inspección visual; ▪ Extensométrico; ▪ Temperaturas; 	3 años

Tabla 2.5: Configuración de los estudios de durabilidad encontrados en la literatura técnica

El sistema de evaluación y seguimiento de los morteros en este estudio se realizó mediante 3 ensayos mecánicos normalizados: de adherencia o resistencia a la tracción (DIN 18156), de resistencia a compresión y a flexión (DIN 196) (ver tabla 2.5). La primera tanda de ensayos se realizó a los 28 días de edad y al cabo de 1, 2, 3, 5 y 10 años. Si bien los ensayos mecánicos realizados proporcionaron información puntual del material, al no efectuar un seguimiento mediante ensayos no destructivos, se perdió una valiosa información adicional de cómo se produjo el proceso de degradación del material analizado.

Por otro lado, *Yiu et al* en el 2007 evaluaron exclusivamente en condiciones de laboratorio un sistema de aplacado cerámico después de someterlo a 200 ciclos térmicos y de humedad (ver tabla 2.5). Como se puede observar en la figura 2.16a, las probetas empleadas estaban formadas por una base rectangular de hormigón (300x150x100 mm), una capa de mortero de 20 mm de espesor (cemento: árido; 1:3) y un sistema de embaldosado cerámico con piezas de 100x50 mm, rejuntado con una lechada de cemento de 3 mm.

Los ciclos de envejecimiento acelerado al que fueron sometidas estas probetas se basaron en las condiciones climáticas de Hong Kong, para ello se registraron distintas temperaturas en los edificios de la ciudad con este tipo de revestimientos. Todos los ciclos de envejecimiento acelerado se realizaron en el mismo laboratorio con una temperatura uniforme de 24 °C. El ciclo térmico consistió en introducir las probetas en un horno durante 30 minutos a una temperatura de 45°C y, a continuación, se secaron durante 10 minutos más mediante un ventilador. El ciclo de humedad consistió en pulverizar las probetas con agua, con un caudal de 2,25 l/min y, pasado ese tiempo, se secaron durante 10 minutos más con un ventilador igual que en ciclo térmico.

El método de control y evaluación se realizó mediante un ensayo no destructivo y otro mecánico no normalizado, especialmente configurado para este estudio (ver tabla 2.5). El sistema seguimiento no destructivo consistió en un control de las deformaciones de las distintas capas, para ello se colocaron 2 galgas extensiométricas en las distintas interfases de cada probeta, tal y como se muestra en la figura 2.16a. El ensayo mecánico adoptado fue de corte simple mediante la configuración que se presenta en la

figura 2.16b. Los autores del estudio quisieron determinar las tensiones rasantes que se generan en la interfaz mortero adhesivo-baldosas, no contempladas en la normativa y que contribuyen a la adhesión del revestimiento. Este ensayo se realizó primero antes empezar los ciclos de envejecimiento y a los 100 y 200 ciclos.

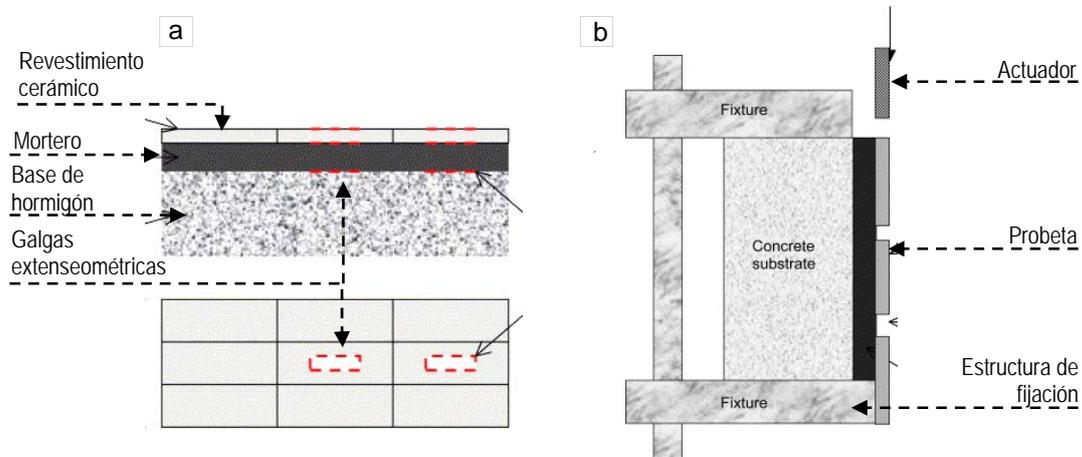


Figura 2.16: Configuración del estudio de *Yiu et al, 2007* a) Probetas y b) Ensayo de corte simple

Asimismo, *Mahaboonpachai et al* en el 2008 analizaron en condiciones de laboratorio la pérdida de adherencia de la interfaz (hormigón-mortero) de sistema de aplacado cerámico sometido a una carga térmica que simulaba la radiación solar, tal y como se muestra en la figura 2.17. Las probetas empleadas se configuraron sobre una base de hormigón, a la que se adhirieron dos piezas de gres porcelánico rectangular (45x45mm) mediante una capa de mortero polimérico de 6 mm de espesor.

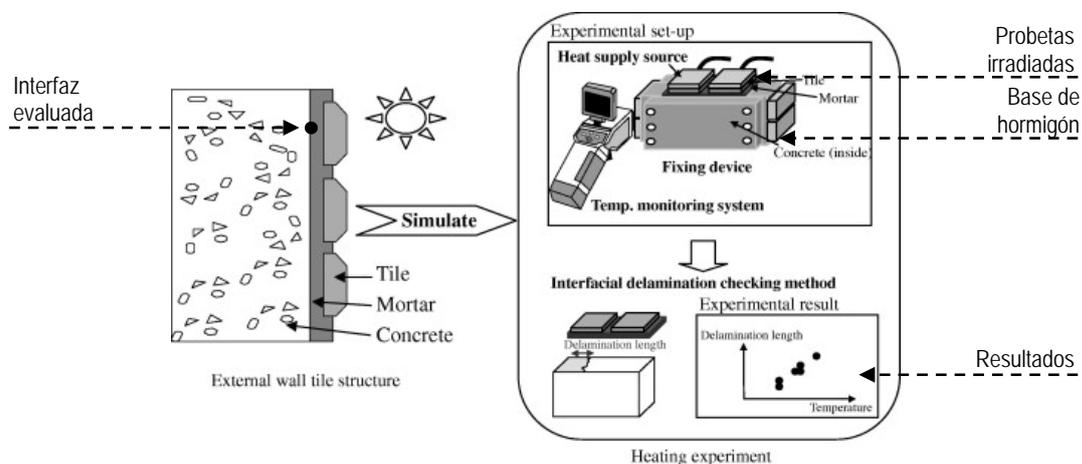


Figura 2.17: Configuración del estudio de *Mahaboonpachai et al en el 2008*

Como se puede observar en la figura 2.17, las probetas se colocaron horizontalmente y solamente se restringió el movimiento de la base de hormigón mediante unas abrazaderas metálicas fijadas en todo su perímetro. El calentamiento de las baldosas, simulando la radiación solar, se realizó colocando unas placas eléctricas encima de las baldosas y entre los dos materiales se aplicó previamente un gel térmico, para repartir el calor uniformemente en toda la superficie.

Una vez hecha dicha configuración, el ensayo consistió en calentar la superficie de las baldosas a altas temperaturas, entre 90 y 120 °C, y, a continuación, en menos de 1 hora, se dejaron enfriar a temperatura ambiente. El control de la temperatura superficial se realizó por el lateral de las probetas

mediante un equipo termográfico. Al finalizar el ensayo, se evaluó la pérdida de la adherencia de la interfaz (hormigón- mortero) aplicando una solución de fluorescencia sódica y su posterior observación a través de una luz ultravioleta. En este caso, no se realizó ningún ensayo mecánico para analizar el sistema.

Maranhao et al en el 2009, igual que el estudio de 2001, evaluaron el desempeño de distintos morteros poliméricos almacenados durante un largo periodo de tiempo en distintas condiciones: uniformes en el laboratorio y a la intemperie (ver tabla 2.5). En este caso, el almacenaje al aire libre se realizó en la población de Itupeva (Brasil) con una temperatura y precipitación media anual de 21 °C y 1,3 mm/año, respectivamente. La evaluación de los morteros se realizó únicamente mediante dos ensayos mecánicos normalizados (ver tabla 2.5): de adherencia o resistencia a la tracción (*NBR 14084*) y de deformación transversal (*UNE EN 12002*). Estos se realizaron a los 28, 90 y 180 días de edad de las probetas.

Por último, *Wetzel et al* en el 2012, estudió el proceso de degradación y la pérdida de adherencia de un sistema de embaldosado cerámico en paredes y techos expuestos a la intemperie en la ciudad de Berna (Suiza) durante un periodo de 3 años. Como se puede observar en la figura 2.18, para la configuración del estudio fue empleada una estructura prefabricada de hormigón. Esta se colocó en el lugar de ensayo separada del suelo para evitar el contacto con el terreno. Con posterioridad, varios de sus paramentos fueron revestidos in situ con un sistema de aplacado de gres porcelánico (30x30 cm), adherido mediante morteros cola normalizados. En cada uno de los sub-sistemas del revestimiento se adhirieron también tres piezas de vidrio, con el mismo formato del gres, para facilitar la inspección de la interfaz (pieza-mortero cola) (ver figura 2.18).

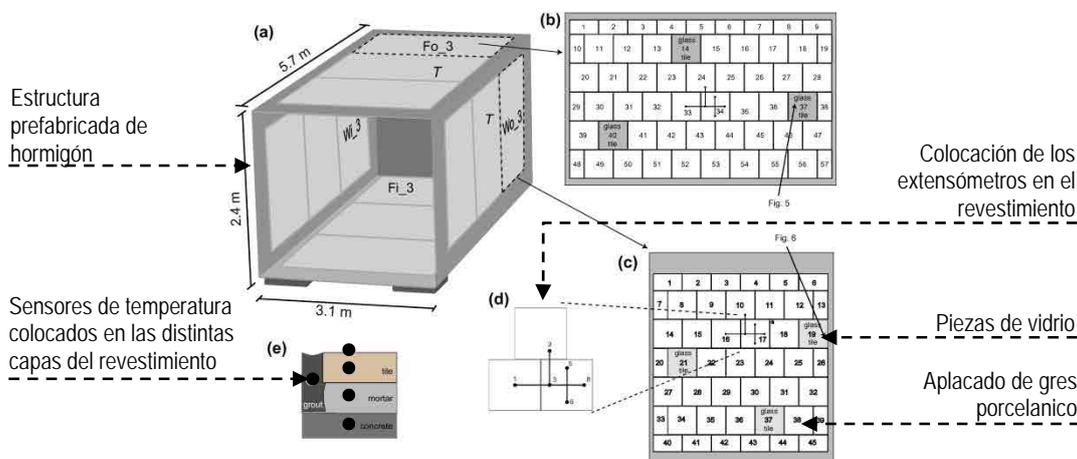


Figura 2.18: Configuración del ensayo del estudio de *Wetzel et al, 2012*

Asimismo, se colocaron galgas extensométricas (en la parte externa e interna de hormigón) de cada sub-sistema y sensores de temperatura en las distintas capas del revestimiento, tal y como se muestra en la figura 2.18. El método de evaluación se realizó únicamente mediante ensayos de seguimiento no destructivos (ver tabla 2.5): 1) Inspección visual; 2) Control extensométrico o de deformaciones y, por último, 3) Control de temperatura de los materiales. Ello permitió conocer el proceso de degradación del revestimiento durante los 3 años que duró el estudio. En este tiempo se realizaron 9 tandas de inspecciones visuales, que consistían en realizar un exhaustivo levantamiento de todos los daños. Los registros de deformación y temperatura se efectuaron en menos ocasiones, dado que cada uno de ellos requería el registro de datos cada 30 minutos durante 24 horas seguidas.

2.4 CONCLUSIONES

A partir de la revisión del estado del conocimiento sobre los revestimientos de mosaico/*trencadís* se establecen las siguientes conclusiones:

- Durante las fases de puesta en obra y curado de estos revestimientos se pueden originar algunos de los defectos iniciales que más adelante, en la fase de servicio, pueden provocar el despegue de los mismos. Ello se debería tener en cuenta y realizar un riguroso control en estas fases iniciales.
- En la etapa de servicio, los cambios cíclicos de temperatura y humedad de la atmosfera potencian las incompatibilidades de deformación entre los distintos materiales del revestimiento, provocando fisuras en sus interfaces y creando vías de conexión con el entorno ambiental exterior. La entrada de agua hacia el interior del revestimiento se considera una de las principales causas de la pérdida de adherencia de los revestimientos de mosaico/*trencadís*, esta puede ser el factor determinante para el inicio de reacciones químicas nocivas o bien potenciar fenómenos de carácter expansivo. En consecuencia, se deben emplear materiales de teselas o piezas con la mayor compatibilidad de deformación posible con los morteros.
- El sistema de evaluación de la adherencia y deformabilidad transversal que contempla la normativa vigente de los adhesivos cementicios o morteros cola (UNE EN 12004) no permite determinar las tensiones rasantes existentes en las interfases entre los materiales que contribuirían en el mecanismo de la adherencia.
- Los ensayos de envejecimiento normalizados para este tipo de revestimientos están definidos con el objetivo de garantizar una adherencia mínima y no permiten estimar la vida útil o la durabilidad de los mismos. La configuración de los ensayos es poco representativa de la realidad ambiental, dado que solamente se contempla el envejecimiento cíclico en el caso de hielo/deshielo. Además, no se considera la evaluación en conjuntos de piezas o superficies más extensas o bien, la posibilidad de realizar un seguimiento mediante ensayos no destructivos que facilitarían información acerca del proceso de degradación. Por consiguiente, la no unificación de los criterios experimentales implica que los estudios experimentales existentes en la literatura técnica tengan una configuración distinta en cada caso.
- Los ensayos no destructivos utilizados para la evaluación de la adherencia facilitan la recopilación de información adicional sobre el proceso de degradación y la pérdida de adherencia de los revestimientos. Además, permiten utilizar un menor número de probetas en los ensayos experimentales y obtener medidas in situ en obras existentes.

CAPÍTULO 3

TRENCADÍS EN LA OBRA DE GAUDÍ

3.1. INTRODUCCIÓN

Antoni Gaudí entendía la arquitectura como un todo y cuidaba hasta el más mínimo detalle. El arquitecto catalán volcaba todo su ingenio y racionalidad tanto en los condicionantes técnicos como en los aspectos estéticos y decorativos. Un buen ejemplo de ello son los pináculos de la Basílica de la Sagrada Familia. La construcción de estos elementos de remate significó un importante reto para Gaudí. El arquitecto había aplicado el revestimiento exterior de *trencadís* en muchas de sus obras anteriores pero ninguna de ellas había alcanzado tanta altura como la que presentaba la proyección de los pináculos de esta basílica barcelonesa.

A pesar del desafío, Gaudí logró una solución constructiva mediante prefabricados de hormigón ligeramente armados y revestidos con un *trencadís* de vidrio - importado expresamente de las islas venecianas de Murano -. Cabe destacar que se trata de una solución nunca vista antes en su obra, en la que aplicó gran parte de la experiencia constructiva, geométrica y material adquirida, y que ha perdurado a lo largo de los años. El arquitecto solo vio finalizada la primera torre de la basílica, la perteneciente a la Fachada del Nacimiento, dedicada a San Bernabé (ver figura 3.1a) e inaugurada el 30 de noviembre de 1925. A pesar de ello, desde su fallecimiento hasta la actualidad se ha mantenido la solución constructiva de Gaudí para la realización del resto de pináculos (ver figura 3.1b).

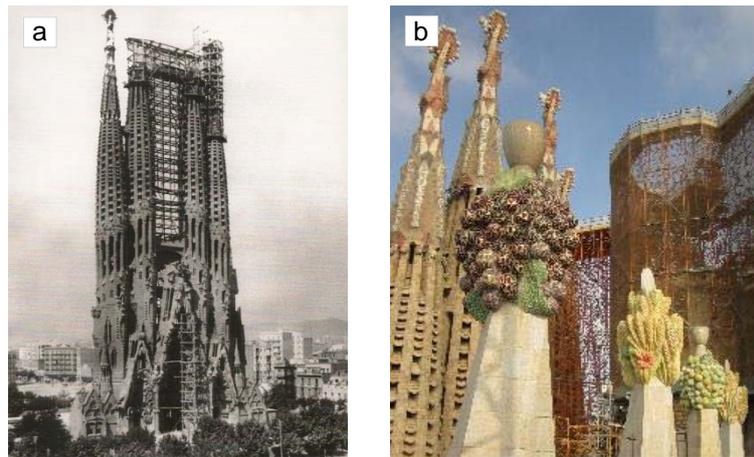


Figura 3.1: a) Fachada del Nacimiento el 1926 (ATESF) y b) obra de la Sagrada Familia (2012)

El presente capítulo tiene el objetivo de explicar la solución ideada por el arquitecto en los pináculos de la basílica, su desarrollo en la evolución de la obra hasta la actualidad y su estado actual de conservación. Para alcanzar esta finalidad es necesario, en primer lugar, realizar una revisión de cómo aplicó Gaudí el revestimiento del *trencadís* en sus obras anteriores. Ello permitirá conocer cómo evolucionó esta técnica de revestimiento desde la aplicación directa en paramentos hasta los prefabricados. Asimismo, también se podrán identificar las razones que llevaron al arquitecto a seleccionar un singular vidrio, importado de Italia, para la realización del *trencadís* de los pináculos.

En segundo lugar, se explica la evolución de la obra desde la concepción del primer pináculo de San Bernabé hasta los actuales del escultor japonés Etsuro Sotoo. Ello se realiza dividiendo la obra de la Sagrada Familia en tres etapas históricas. La primera de ellas, entre los años 1915 y 1930, corresponde a la época de Gaudí y a la realización de los pináculos de la Fachada del Nacimiento. La segunda, entre los años 1952 y 1978, pertenece a la construcción de los pináculos de la Fachada de la Pasión por los discípulos directos de Gaudí. Y, finalmente, la tercera atañe a la etapa más actual de la obra, entre los años 1985 y 2012, donde se decidió mantener el sistema constructivo desarrollado por el arquitecto y aplicarlo en los nuevos pináculos y otros elementos decorativos de la obra.

En la última parte del capítulo se expone el estado de conservación actual del *trencadís* de algunas de estas estructuras decorativas de la basílica, donde se ha podido acceder gracias al inicio de los trabajos para su rehabilitación. El análisis de los daños surgidos en estos revestimientos durante las diferentes etapas históricas permite determinar si existe un mismo patrón de comportamiento. Esta información es de gran utilidad para futuras rehabilitaciones ya que expone las medidas preventivas a adoptar para alargar la vida en servicio de dichos revestimientos y garantizar, así, la conservación y transmisión de la obra a futuras generaciones.

3.2. TRENCADÍS EN LA OBRA DE GAUDÍ: DEL REVESTIMIENTO AL PREFABRICADO

En la época de estudiante, Antoni Gaudí se sintió atraído por la arquitectura oriental a través de diversas colecciones de libros y fotografías del archivo de la Escuela de Arquitectura de Barcelona (Bergós, 1999). Influenciado muy probablemente por estos estilos, desde sus primeras obras le dedicó una especial atención a la cerámica decorativa exterior. Ejemplos de ello se pueden apreciar en sus primeras obras como la Casa Vicens (1883-1888) (ver figura 3.2a) o el Capricho (1883-1885), donde revistió las fachadas de estos edificios mediante cerámica esmaltada policromada de formato rectangular.

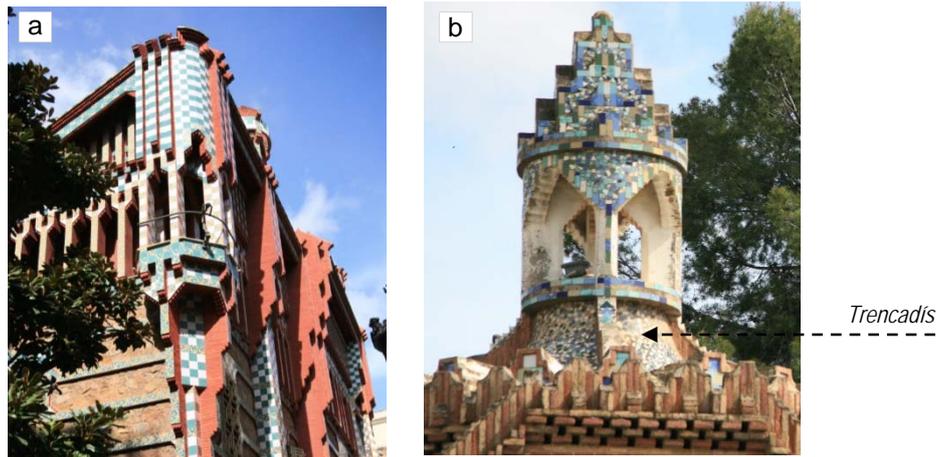


Figura 3.2: a) Fachada de la Casa Vicens (2015) y b) Chimeneas de la portería de la Finca Güell (2015)

Contemporáneamente a la construcción de estas obras, en el año 1884, el joven arquitecto empleó un sistema innovador de revestimiento para recubrir la cúpula del picador y las chimeneas de la portería de la Finca Güell (*Bassegoda et al, 2002*) (ver figura 3.2b). La técnica utilizada, popularizada con posterioridad como *trencadís*, consistía en romper las piezas de cerámica esmaltada en pequeños fragmentos poligonales, para posteriormente utilizarlas en un mosaico de diversas tonalidades, sobre una superficie de mortero de cal. Ello permitía la adaptación de las piezas rectangulares existentes en el mercado, en las superficies regladas de su obra y el aprovechamiento de todas las piezas, aunque éstas estuvieran rotas. Dado su interés por la geometría y la cultura oriental algunos autores han establecido una relación del *trencadís* con los centenarios revestimientos orientales de zillij o zelish (*Bassegoda et al, 2002*).

Años más tarde, en la obra del Palau Güell (1886-1890), el arquitecto volvió a emplear esta técnica en los revestimientos de las chimeneas y en la cúpula-linterna que decoraban la azotea del palacio. Además, en estas estructuras Gaudí empezó a experimentar la técnica del *trencadís* con otro tipo de materiales como el mármol, el vidrio o las piedras procedentes de los revestimientos interiores de los hornos de cal (*González, 1993*). Tal y como se puede observar en la figura 3.3a, con este último material realizó un singular "*mosaico pétreo*" en uno de dichos revestimientos.

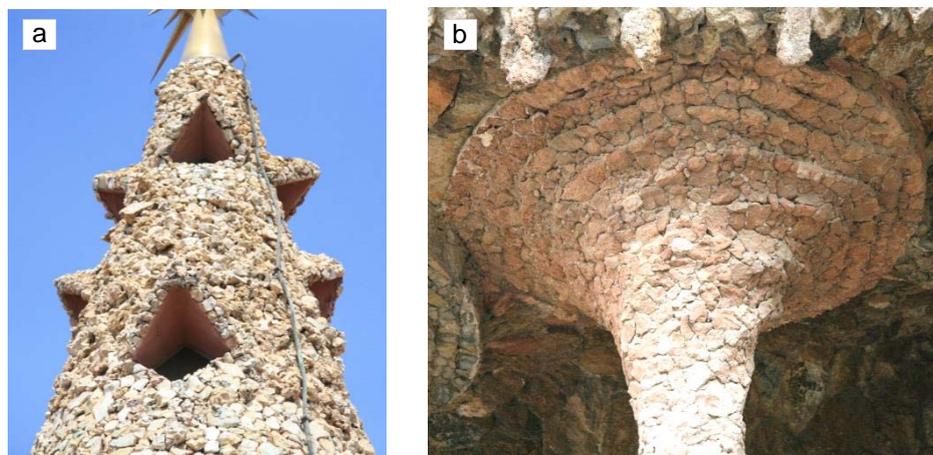


Figura 3.3: a) Cúpula linterna Palau Güell (2015)
y b) Capitel prefabricado de los pórticos de los muros de contención del Parque Güell (2015)

Las sucesivas obras del arquitecto, como el Palacio episcopal de Astorga (1883-1893), Botines (1885-1892) o Teresianas (1888-1890), se caracterizaron por su eclecticismo y el uso de la cerámica decorativa fue singularmente discreto. Sin embargo, en las siguientes obras de principio de siglo XX como el Parque Güell (1900-1905) o la torre Bellesguard (1900-1909), Gaudí volvió a emplear un *“mosaico pétreo”* similar al de la azotea del Palau Güell anteriormente comentado. No obstante, en estos casos evolucionó una vez más la técnica y desarrolló un sistema constructivo mediante piezas prefabricadas con este material; concretamente, se inició entre el año 1901 y 1903 en la realización de diversos elementos para los viaductos y de los muros de contención del Parque Güell (*Paricio, 1981*) (figura 3.3b).

Después del buen resultado, el sistema fue exportado a la obra de Bellesguard (1900-1909), donde se aplicó en diversos elementos de las fachadas como: dinteles, jambas o diversas tipologías de remates. Según la bibliografía consultada, las piezas prefabricadas de Bellesguard se realizaban a pie de obra. Primero, a partir de un modelo de barro obtenían un molde de yeso de la forma deseada. Seguidamente, depositaban las piedras de la zona en el fondo del molde y, finalmente, vertían un mortero de cemento rápido. Una vez endurecido se desmoldaba y se dejaba secar hasta el momento de su colocación en la fachada (*Bassegoda, 1989*).

Posteriormente, en la fase de construcción de la entrada del Parque Güell (1903-1905) volvió a utilizarse el *trencadís* cerámico en los revestimientos exteriores de la obra del arquitecto. Para realizarlo se emplearon dos sistemas constructivos: la aplicación directa y la indirecta o prefabricado. La aplicación directa del revestimiento se empleó para la realización de grandes superficies, como las cubiertas de los pabellones de entrada (ver figura 3.4a).



Figura 3.4: a) Piezas prefabricadas de los muros laterales de la escalinata principal (2015) y b) Cubierta del Pabellón de entrada del Parque Güell (2015)

Por otra parte, los prefabricados se emplearon para la construcción de elementos de pequeña dimensión y repetitivos, como las piezas de remate del muro de entrada, o los elementos de los revestimientos de los muros de la escalinata central (ver figura 3.4b). Según la bibliografía consultada, estos prefabricados, a diferencia de la obra de Bellesguard, se realizaron mediante moldes de madera y a través de la colocación de tres hiladas de rasilla cerámica, encima del *trencadís* de cerámica esmaltada previamente adherido al molde. La primera capa de rasilla se colocaba con una capa de cemento rápido y las dos consecutivas se adherían con mortero de cal (*Bassegoda, 1996*).

Con posterioridad, en la obra de rehabilitación de la Casa Batlló (1904-1906), Gaudí volvió a emplear el color de la cerámica esmaltada y el vidrio en el revestimiento exterior de su obra. Además, en

este caso lo realizó de manera contundente, puesto que lo empleó en gran parte de la envolvente exterior (fachadas, cubierta y azotea) y también en los elementos comunes interiores (vestíbulo o el patio de ventilación). De toda la genialidad decorativa de la obra, hay que destacar el nuevo revestimiento de *trencadís* adherido a la fachada principal existente. El arquitecto en este paramento decidió repicar todo el muro exterior de obra de fábrica formando sinuosas ondulaciones y seguidamente, sobre una nueva capa de mortero de cal, compuso un revestimiento de *trencadís* formado por pequeños fragmentos de vidrio de colores y platos de cerámica pintada (ver figura 3.5a). Según un antiguo contratista de la obra, Gaudí dirigió personalmente el diseño decorativo de la fachada, situándose en el medio del Paseo de Gracia e indicando a cada uno de los operarios donde iban exactamente colocados las diferentes tonalidades de los vidrios (*Bassegoda, 1989*).

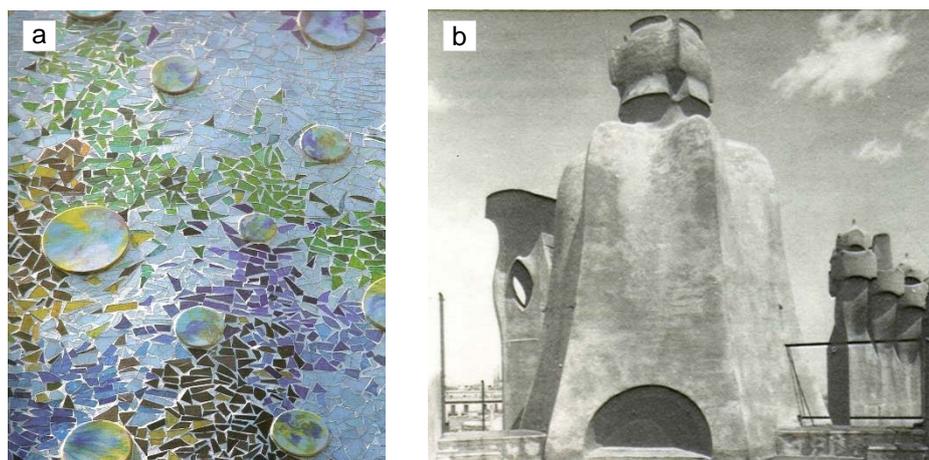


Figura 3.5: a) Detalle del revestimiento de *trencadís* de la Casa Batlló (*Bergós, 1999*) y b) Azotea en construcción de la Casa Mila o Pedrera (*Bassegoda, 1989*)

Años más tarde, en otra obra del Paseo de Gracia de Barcelona conocida popularmente como la Pedrera (1906-1910), el arquitecto volvió a emplear la técnica del *trencadís* para revestir las chimeneas y los elementos salientes de la azotea, como en la anterior obra del Palau Güell. No obstante, en este caso utilizó exclusivamente el mármol blanco para revestir estos elementos. Como se puede apreciar en la figura 3.5b, primero se aplicaba una capa mortero de cal de regularización y, posteriormente, una vez seca la superficie, se adhería el *trencadís* de mármol mediante una segunda capa de mortero.

Paralelamente a esta construcción, se seguía avanzando en otras partes de la obra del Parque Güell, como la Sala Hipóstila (1907-1909) y su plaza superior (1907-1914). No obstante, cuando se finalizaron estas dos obras, el idílico proyecto de Gaudí fue paralizado por falta de financiación. En este contexto, la optimización de los recursos de esta última parte de la obra fue muy importante y por este motivo, las piezas prefabricadas fueron elementos fundamentales en su construcción, hasta tal punto que algunos autores han denominado su construcción como un "*Mecano estructural*" (*Paricio, 1981*).

La mayoría de las piezas prefabricadas de esta última parte de la obra del parque fueron conformadas a la vez con su revestimiento exterior de *trencadís* de cerámica esmaltada y mediante diversas capas de rasilla cerámica, igual que los primeros prefabricados de la entrada del parque. Ello se puede apreciar en la figura 3.6a, de una de las muestras extraídas durante la restauración de la plaza entre los años 1985 y 1993 (*Lapeña et al, 1995*). Sin embargo, estos prefabricados a diferencia de los primeros, empezaron a tomar una función estructural. Baste como muestra, las dos tipologías de piezas prefabricadas, que conforman el forjado de la Sala Hipóstila del parque: las vigas de cerámica armada y los casquetes cerámicos (ver figura 3.6b) (*Paricio, 1981*).

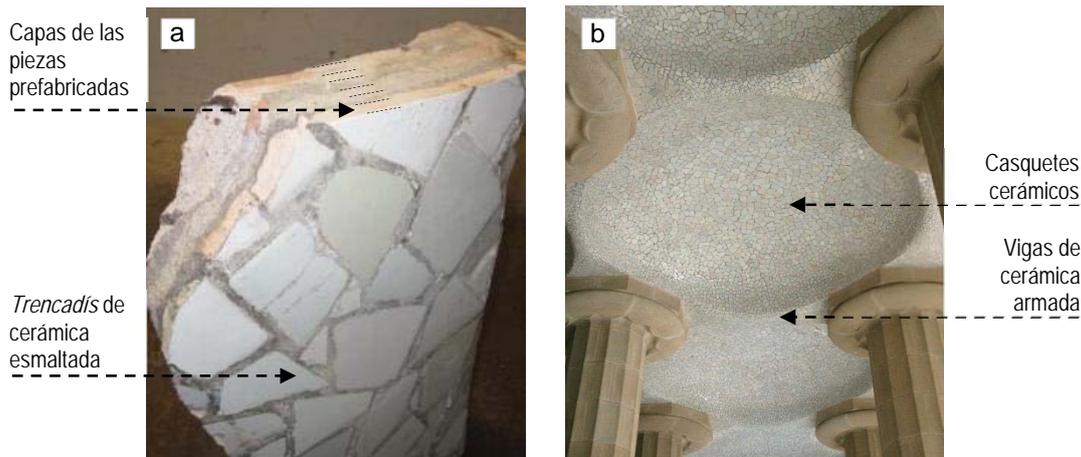


Figura 3.6: a) Muestra del forjado de la Sala hipóstila (2011) y b) Interior de la Sala Hipóstila (2015)

En la figura 3.7 se presenta un esquema de la composición de este forjado en planta y sección. Como se puede observar, las vigas de cerámica armada se encuentran apoyadas en los pilares de la sala, formando una cuadrícula de 4x4 m. Encima de este conjunto se colocaron los casquetes cerámicos prefabricados, a modo de bovedillas de vuelta tabicada (ver esquema figura 3.7). Gaudí, conociendo los esfuerzos flectores que debían resistir estas vigas cerámicas prefabricadas, colocó en su sección inferior dos flejes metálicos de sección rectangular helicoidal, embebidos en una capa de mortero a modo de armadura pasiva (ver sección A-A' figura 3.7). En su parte superior, como se puede apreciar en la sección transversal A-A' de la figura 3.7, estas se rellenaron mediante diversas hiladas de rasilla cerámica.

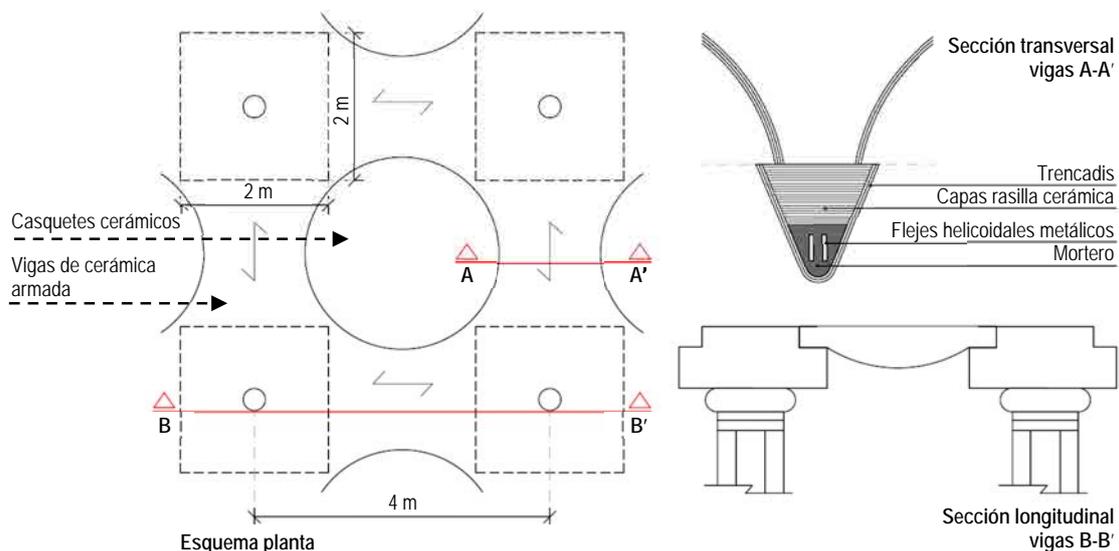


Figura 3.7: Esquema estructural del forjado de la Sala Hipóstila

Cabe destacar que los mismos flejes metálicos helicoidales fueron también utilizados en las vigas de los forjados de pabellones de entrada del parque (Aguado *et al*, 2002). En las últimas investigaciones realizadas acerca del conocimiento de Gaudí sobre el hormigón armado, se ha podido establecer una relación entre estos flejes metálicos con la patente alemana de hormigón armado llamada *Habrich*, registrada en Barcelona durante esa misma época (Grima, 2012).

Por otro lado, en la construcción del parque también se emplearon otro tipo de piezas prefabricadas de ladrillo que se revistieron con *trencadís* una vez estaban colocadas en la obra (Rovira, 1990). Ejemplo de ello se puede encontrar en el sinuoso banco que delimita la plaza superior realizado entre el año 1910 y 1913 (ver figura 3.8a). En este caso, se puede atribuir la aplicación directa del revestimiento a la necesidad de disimular las juntas entre las piezas simétricas que conformaban el banco.



Figura 3.8: a) Banco perimetral de la plaza superior del Parque Güell (2015) y b) Techo del pórtico de entrada a la cripta de la Colonia Güell (2011)

Con posterioridad, en la obra de la cripta de la Colònia Güell (1896-1916), el arquitecto volvió a emplear la técnica del *trencadís* para la decoración exterior de las ventanas y en el revestimiento del techo del pórtico de entrada. Cabe señalar que en esta última parte, como se puede observar en la figura 3.8b, el *trencadís* no siguió una composición aleatoria o por agrupaciones de colores como en sus anteriores obras. En este caso, el arquitecto hizo fragmentar las piezas rectangulares de cerámica en cuatro triángulos y, posteriormente, estos fueron colocados siguiendo la dirección de las dos familias de generatrices que componían los paraboloides hiperbólicos del techo (González et al, 2002).

Gaudí abandonó la obra de la Cripta de la Colonia Güell y se recluyó los últimos años de su vida en el templo de la Sagrada Familia para desarrollar el proyecto que le había acompañado durante toda su carrera profesional. Allí, las obras ya iniciadas en el año 1882 seguían a un buen ritmo, gracias a una generosa donación aportada en los primeros años (Bonet et al, 2010). No obstante, en el año 1905 el ritmo de las obras se ralentizó e incluso en algún momento se paralizaron debido a la disminución de los fondos y las donaciones. En este intervalo de tiempo, el arquitecto definió muchas partes que restaban del proyecto (Martinell, 1967). Entre estas, desarrolló la solución definitiva de los pináculos, dónde empleó por primera vez el característico revestimiento de *trencadís* en la obra de la Sagrada Familia.

En la *tabla 3.1* se presenta un resumen de la aplicación del *trencadís* en la obra de Gaudí, anteriormente expuesta en orden cronológico; el objetivo es mostrar una visión global del sistema y su evolución. Como se puede observar, el arquitecto experimentó con gran variedad de materiales en la aplicación de este tipo de revestimiento en el exterior durante toda su obra: cerámica esmaltada en las chimeneas de Palau Güell, vidrio en la Fachada de la Casa Batlló o mármol en las chimeneas de la Casa Milà (ver tabla 3.1). Asimismo, empleó diversas técnicas de aplicación: la tradicional directa en paramentos o bien, la indirecta mediante prefabricados cerámicos y dándole incluso en el forjado de la Sala hipóstila del Parque Güell una función estructural (Gómez-Ramió, 2014).

OBRAS	PERÍODO	REVESTIMIENTO	UBICACIÓN	MATERIAL	SISTEMA DE APLICACIÓN
Casa Vicens 	1883-1888	Aplacado	Fachada	Cerámica esmaltada	Directa
Capricho 	1883 -1885	Aplacado	Fachada	Cerámica esmaltada	Directa
Finca Güell 	1884 -1887	<i>Trencadís</i>	Cúpula picador	Cerámica esmaltada	Directa
			Chimeneas		
Palau Güell 	1886 -1890	<i>Trencadís</i>	Chimeneas	Cerámica esmaltada, Mármol, Vidrio	Directa
			Mosaico pétreo		
Palacio Episcopal	1883 -1893	-	-	-	-
Botines	1885 -1892	-	-	-	-
Teresianas	1888 -1890	-	-	-	-
Parque Güell 	1901-1903	Mosaico pétreo	Viaductos, muros de contención	Piedra del lugar	Prefabricados mortero
Bellesguard 	1900-1909	Mosaico pétreo	Dinteles, jambas y elementos de remate	Piedra del lugar	Prefabricados mortero
Parque Güell 	1903-1905	<i>Trencadís</i>	Cubierta pabellones entrada	Cerámica esmaltada	Directa
			Remate muro entrada, muros escalinata central		Prefabricados cerámica
Casa Batlló 	1904 -1906	<i>Trencadís</i>	Fachada, cubierta y azotea	Cerámica esmaltada y vidrio	Directa
Pedrera 	1906 -1910	<i>Trencadís</i>	Chimeneas	Mármol blanco	Directa
Parque Güell 	1907-1914	<i>Trencadís</i>	Forjado de la Sala hipóstila	Cerámica esmaltada	Prefabricados cerámica armada
			Banco plaza superior		Directa sobre prefabricados
Colonia Güell 	1896 -1916	<i>Trencadís</i>	Perímetro ventanas	Cerámica esmaltada	Directa
			Techo pórtico entrada		
Sagrada Familia 	1882 -1925	<i>Trencadís</i>	Pináculos	Pasta de vidrio	Prefabricados de hormigón armado

Tabla 3.1: Resumen de la aplicación del *trencadís* en la obra de Gaudí

En base a todo ello se puede establecer que la solución adoptada en los pináculos de la Sagrada Familia, a través de prefabricados de hormigón armado, es un paso más en la evolución de este sistema constructivo y surge fruto de la experiencia adquirida durante toda la obra del arquitecto. Asimismo, la elección de un material tan singular como la pasta de vidrio procedente de Venecia para el *trencadís* de los pináculos, no es una decisión aleatoria dado que, como se ha mostrado anteriormente, Gaudí conocía el comportamiento de otros materiales colocados a la intemperie. En el siguiente apartado se expondrá en detalle dicha solución y las referencias que tuvo el arquitecto para la elección de este material decorativo destinado a un revestimiento a gran altura.

3.3. EL DISEÑO DE LOS PINÁCULOS

Para definir las complejas formas del proyecto de la Sagrada Familia, Gaudí experimentó con numerosos modelos a escala de diferentes partes de la obra. La mayor parte de este trabajo espacial fue desarrollado en el estudio que tenía al pie de las obras del templo, conocido también con el nombre del "Obrador" (Gómez, 1996). Una de las primeras versiones de la Fachada del Nacimiento materializada en una maqueta fue presentada en el año 1910 en París delante de la *Société Nationale de Beux-Arts* (ver figura 3.9a), en una exposición patrocinada por, su amigo y mecenas, Eusebi Güell (Bonet et al, 2010).

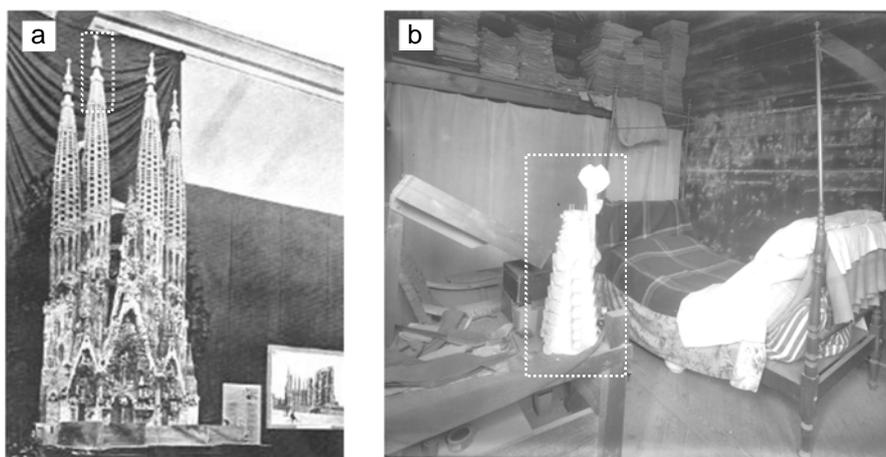


Figura 3.9: a) Maqueta de la Fachada del Nacimiento presentada a París en 1910 y b) Fotografía del dormitorio de Gaudí en el estudio de l'Obrador (ATESF)

La realización de esta maqueta de la Fachada obligó a Gaudí a definir los pináculos del templo, que era la única parte que restaba por completar de este conjunto. No obstante, en París presentó una versión previa. Según el discípulo Juan Matamala, en esta primera versión de la futura fachada, cada torre acababa con una estructura de bronce dorado y con un balcón mirador hexagonal franqueado por dos ángeles escultóricos. Las alas de estos asegurarían la seguridad de los futuros visitantes que quisieran acceder (ver figura 3.9a) (Matamala, 1999).

La versión definitiva de los pináculos se desarrolló alrededor del año 1915, al mismo tiempo que el arquitecto presentó la segunda versión de la sección transversal del templo (González et al, 2002). Sus singulares formas, muy distantes de la primera versión presentada en la exposición de París, representan algunos símbolos episcopales como la mitra, el anillo y el báculo. Para su definición Gaudí también trabajó con un modelo de yeso a escala. Este puede verse en una de las fotografías de su estudio publicadas poco después de su fallecimiento (ver figura 3.9b) (Gómez, 1996). En cuanto a su decoración, en este caso Gaudí la planteó a través de un revestimiento de *trencadís*, tal y como lo había realizado en muchas de sus obras anteriores. Sin embargo, consciente de la degradación de estos materiales a la intemperie y dada la dificultad de acceso a los pináculos para una posible reparación, el arquitecto decidió plantear otro material que pudiera resistir a una aplicación a gran altura (Bassegoda et al, 2002).

Gaudí, a partir del estudio de obras centenarias de mosaico veneciano, decidió emplear el mismo tipo de vidrio de estos revestimientos para los terminales de las torres. Según el discípulo Juan Matamala, mientras estaba realizando el proyecto de decoración del templo, Gaudí tenía colgado en las paredes de su estudio varias fotografías de composiciones de obras de mosaico veneciano, extraídas de su única carpeta de documentos gráficos. Concretamente, tenía fotografías del interior de la Basílica de

San Marco de Venecia, del interior de la iglesia de San Vitale de Ravenna y del interior de Santa Sofía en Istambul. Al lado de estas fotografías también habían diferentes imágenes de monumentos bizantinos y esbozos policromados de estos (*Matamala, 1999*).

En una de las fotografías del interior del *Obrador* publicadas el año 1926, poco después de la muerte del arquitecto (ver figura 3.10), se localizaron diversas imágenes de revestimientos de mosaico veneciano colgadas en una pared del estudio. Según la bibliografía consultada, estas fotografías o tal vez postales fueron traídas por, su amigo y colaborador, Lluís Bonet después de un viaje a Italia (*Gómez, 1996*). En la presente investigación se han podido localizar la procedencia de algunas de estas imágenes traídas por Lluís Bonet que, muy probablemente, fueron una referencia para el revestimiento de *trencadís* de los pináculos. En la figura 3.10 se señalan las obras localizadas y en la tabla 3.2 se presenta un estudio comparativo de su procedencia. Como se puede apreciar en tabla 3.2 las obras localizadas del estudio de Gaudí pertenecen a diferentes revestimientos interiores de edificaciones de la isla de Sicilia como el Duomo de Monreale, la Capella Palatina y el Duomo de Cefalú.

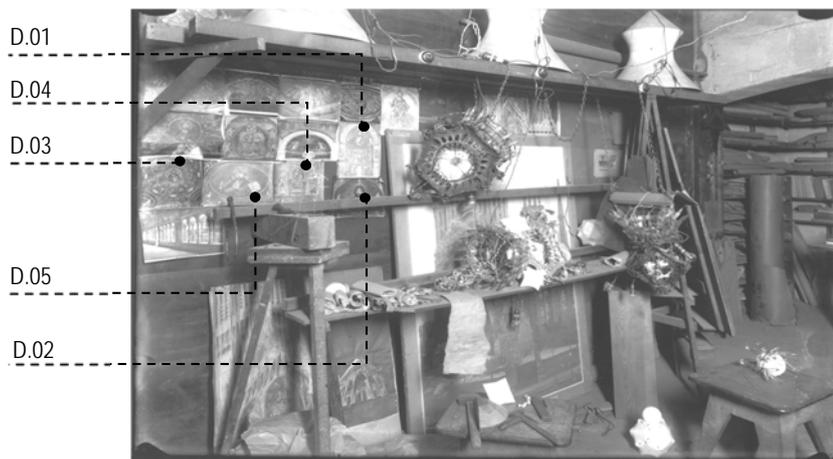


Figura 3.10: Pared con fotografías de mosaico veneciano del estudio de Gaudí en 1926 (*ATESF*)

	DESCRIPCIÓN	FOTOGRAFÍA ESTUDIO DE GAUDÍ	FOTOGRAFÍA DE LA OBRA
D.01	Mosaico absidal del Duomo de Monreale. Monreale, Sicilia		
D.02	Mosaico absidal del Duomo de Monreale. Monreale, Sicilia		
D.03	Mosaico de la cúpula de la Capilla Palatina. Palermo, Sicilia		
D.04	Mosaico de pared frontal del ábside central de la Capilla Palatina. Palermo, Sicilia		
D.05	Mosaico absidal del Duomo de Cefalú, Cefalú, Sicilia		

Tabla 3.2: Tabla comparativa de la procedencia de las imágenes del estudio de Gaudí (*ATESF; Velmans et al, 1999*)

En el año 1916 una vez ya iniciada la construcción de la base de los pináculos, Gaudí envió a los discípulos Rafols y Bonet a las islas de Murano. El fin del viaje era que se informaran de las propiedades y características de la pasta de vidrio que había estudiado en las anteriores obras para poderlo emplear en los pináculos de las torres (*Bassegoda 1996*).

3.4. EVOLUCIÓN CONSTRUCTIVA DE LOS PINÁCULOS DE LA SAGRADA FAMILIA

3.4.1. Primera etapa (1915-1930): Fachada del Nacimiento

Como se ha comentado anteriormente, la primera torre finalizada del conjunto de la Fachada del Nacimiento fue la torre dedicada a San Bernabé (ver figura 3.1a). Esta fue inaugurada el 30 de noviembre de 1925 alcanzando, en lo alto de su pináculo, casi 100 metros de altura. Según palabras del mismo arquitecto, para la terminación de esa “*punxa*”, que es como llamaba Gaudí a los pináculos, habían pasado cuatro años (*Martinell, 1967*). Muy probablemente la lentitud en su construcción, a pesar del uso de prefabricados, era debida al costoso y lento suministro del vidrio importado desde Italia (*Martinell, 1967*).

El pináculo de San Bernabé se desarrolla en una altura de 24,60 m y está compuesto en dos partes claramente diferenciadas: la base y el remate (ver figura 3.11). La primera parte o base del pináculo, con una altura de 7,60 m, está constituido por un núcleo resistente de hormigón armado colocado in situ, conformado a través de dos caras de encofrado. La cara exterior es un encofrado que cumple a la vez la función de revestimiento. Este se realizó mediante piezas de piedra, dónde aparece la inscripción de *Hosanna Exceleis* con un *trencadís* de vidrio de color blanco, alternadas con una obra de fábrica a juntas espigadas.

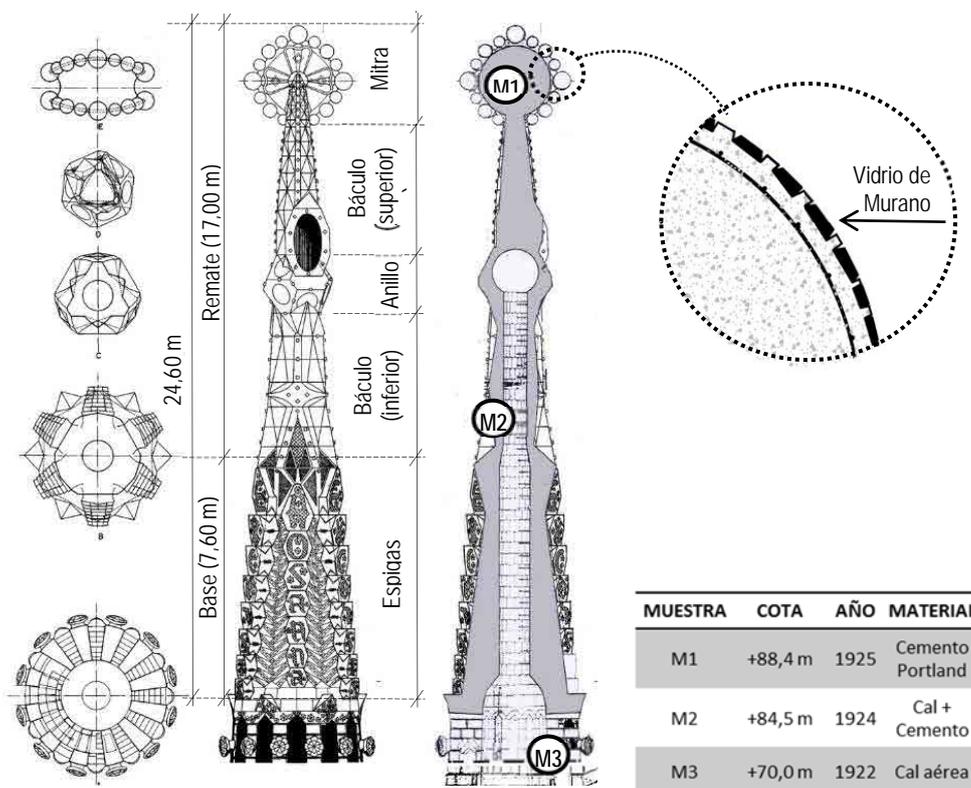


Figura 3.11: Plantas, alzado y sección del pináculo de San Bernabé

En la figura 3.12a se puede apreciar la elevación de estas piezas de piedra hasta la bastida perimetral de madera que envolvía la torre durante su construcción (ver figura 3.12b). Por otra parte, la cara interior se realizó mediante un encofrado de madera. Ello se pudo determinar a través de una inspección visual realizada en el interior del pináculo, donde encontraron las marcas de dicho encofrado (Espel *et al*, 2009).

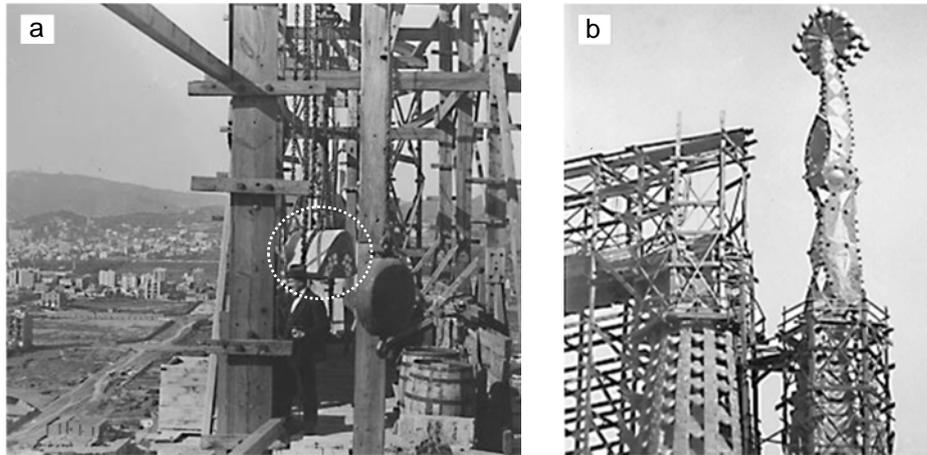


Figura 3.12: a) Elevación de las piezas de la base del pináculo y b) bastidas de madera para la construcción de los pináculos (ATESF)

La segunda parte y remate del pináculo, con una altura de 17 m representa el báculo, el anillo y la mitra episcopal (ver figura 3.11). Esta parte, a diferencia de la anterior, se realizó mediante piezas prefabricadas de hormigón ligeramente armadas con una tela de gallinero y revestidas con un *trencadís* de pasta de vidrio de Murano (Espel *et al*, 2009). Según una entrevista realizada a un antiguo trabajador de la obra, presente también durante la construcción de la Fachada de la Pasión, estas piezas se realizaban a pie de obra y siguiendo las indicaciones directas de Gaudí. Primero se colocaban los pequeños fragmentos de vidrio en la base de un molde realizando el revestimiento de *trencadís* y, posteriormente, se vertía el hormigón dentro (Grima, 2004). Con este sistema de fabricación se conseguían las complejas geometrías del arquitecto con un acabado liso y se facilitaba su puesta en obra (ver figura 3.12b).

En el año 1997 se caracterizaron químicamente tres muestras extraídas del pináculo de San Bernabé por parte del Consultorio Químico Lend Consulting y por el Departamento de Cristalografía y Mineralogía de la Universidad de Geología de Barcelona. Estas se localizan en la Figura 3.11, con la nomenclatura M1, M2 y M3. A partir de los resultados obtenidos, se pudo determinar la presencia de Clinker sin hidratar en dos de las muestras extraídas de la parte superior del pináculo (M1 y M2) y por lo tanto, el uso de cemento portland en esta parte.

Cabe señalar que en una de estas muestras (M2) también se encontró una pequeña cantidad de yeso. Según el citado informe, ello era debido al uso de portland blanco (Carbonell *et al*, 1997). No obstante, en recientes investigaciones se apuntó que la empresa Asland, propiedad del mecenas de Gaudí Eusebi Guell y suministradora del cemento portland en la obra, en esa época ya no fabricaba cemento blanco. Dicho material se empezó a fabricar en el año 1923 pero se paró la producción por falta de mercado. En base a lo expuesto, se formuló la hipótesis de que el yeso detectado en la composición se pudo haber usado como retardador de fraguado del hormigón, una práctica común en la época (Espel, *et al* 2009).

En los mismos análisis de las dos muestras con portland también se encontró la presencia de calcita. La poca cantidad encontrada en la muestra más elevada (M1), se atribuyó, según el citado informe, a la composición del árido de la mezcla de naturaleza granodiorita. No obstante, la presencia más elevada de dicho componente en la muestra (M2), planteó la hipótesis de una incorporación de cal en la dosificación del hormigón. El uso de la cal era bien conocida por Gaudí y, dadas las tensiones que deberían soportar la base de los pináculos, es fácil suponer que el arquitecto incorporara cal en la dosificación de estas piezas para conseguir flexibilidad en la base (*Espel, et al 2009*).

Después de la accidental muerte de Antoni Gaudí, el 11 de junio de 1926, la continuación de las obras de la Fachada del Nacimiento, hasta su finalización en 1930, las asumió su discípulo Doménech Sugranyes (1927-1936) (*Bassegoda, 1989*). Años más tarde, el transcurso de la Guerra Civil española entre 1936 y 1939 provocó la paralización total de la obra. En este periodo además, se sufrieron devastadores desperfectos por los incendios producidos durante los ataques (*Faulí, 2008*). Al finalizar la Guerra Civil, la recuperación de los fondos permitió realizar los trabajos de limpieza y la restauración de la cripta hasta el año 1950 (*Bonet et al, 2010*). Asimismo, se rescataron numerosas maquetas y contra moldes del estudio de Gaudí, que al ser de yeso, habían resistido a las altas temperaturas de los incendios. Ello fue uno de los factores determinantes para la continuación de la obra del arquitecto.

3.4.2. Segunda etapa (1952-1978): Los continuadores de Gaudí

La utilización de piezas prefabricadas revestidas con *trencadís* de vidrio de Murano no se volvió a emplear en las obras del templo hasta la construcción de los pináculos de la Fachada de la Pasión (1952-1978) (*Bassegoda, 1989*). El desarrollo de esta parte del proyecto se inició a partir de un dibujo de su entrada realizado por Gaudí en el año 1911. El arquitecto había manifestado en vida, a sus propios discípulos, que ello era suficiente para que continuaran el proyecto (*Bonet et al, 2010*). Si bien existían algunas diferencias geométricas y decorativas con la Fachada del Nacimiento, su resolución era muy parecida. Francesc Quintana se encargó de coordinar el equipo de dirección de las obra de la fachada con el resto de discípulos más directos de Gaudí, los cuales fueron asumiendo la dirección consecutivamente: Isidre Puig Boada entre los años 1966-1974 y Lluís Bonet y Garí entre los años 1971-1983 (*Espel et al, 2009*).

El principal material empleado durante la construcción de la Fachada de la Pasión fue el hormigón. La decisión de la utilización de este material se realizó muy probablemente teniendo en cuenta tres factores. Primero, Gaudí había introducido este material en el pináculo de San Bernabé. Segundo, el hormigón en ese momento de posguerra era un material más económico que la piedra y, tercero, el conocimiento técnico de este material en esa época ya estaba suficientemente desarrollado para su aplicación a gran escala en la obra.

Para la construcción de la fachada de la Pasión se utilizaron diversos tipos de hormigones: el hormigón ciclópeo o en masa y el hormigón armado, ya sea in situ o en elementos prefabricados (*Grima et al, 2007*). El hormigón ciclópeo o en masa, se empleó para la construcción de las cimentaciones y como núcleo resistente de los muros de la fachada revestidos con piedra de Montjuic. Por otra parte, el hormigón armado in situ se aplicó en los elementos estructurales singulares, como la losa de cimentación de la fachada, las columnas de la entrada y en los arcos de descarga. Cabe destacar que en estos elementos, dada su importancia estructural, se redactaron varios Pliegos de Condiciones Técnicas donde se incorporaban las características que tenía que cumplir el hormigón (*Artigas, 1955*). Finalmente, los prefabricados de hormigón se emplearon únicamente para la construcción de los pináculos de las torres.

Los pináculos de la Fachada de la Pasión alcanzaron los 112,1 m de altura, en el caso de las torres centrales, y los 101,9 m en las torres laterales. Estos se desarrollaban en 28 m de altura, conformados, como en el caso de la Fachada del Nacimiento, por dos partes claramente diferenciadas: la base de 8 m y el remate de 20 m (ver figura 3.11). Como se puede observar en la figura 3.13a, la primera parte o base del pináculo, donde aparece la inscripción *Hosanna Exceles* está constituida por un núcleo resistente de hormigón ciclópeo armado colocado in situ, conformado a través de dos caras de encofrado. La cara interior del encofrado se realizó con una mampostería de fábrica, mientras que la exterior se conformó mediante piezas de hormigón prefabricado, realizadas por una empresa subcontratada llamada BEIN, alternadas con un muro de fábrica a juntas espigadas (Espel et al, 2009). En el marco de la presente investigación, se detectó que algunas de estas piezas eran de piedra, como en la base de los pináculos de la Fachada del Nacimiento (1915-1930), probablemente reaprovechadas en esta construcción posterior.

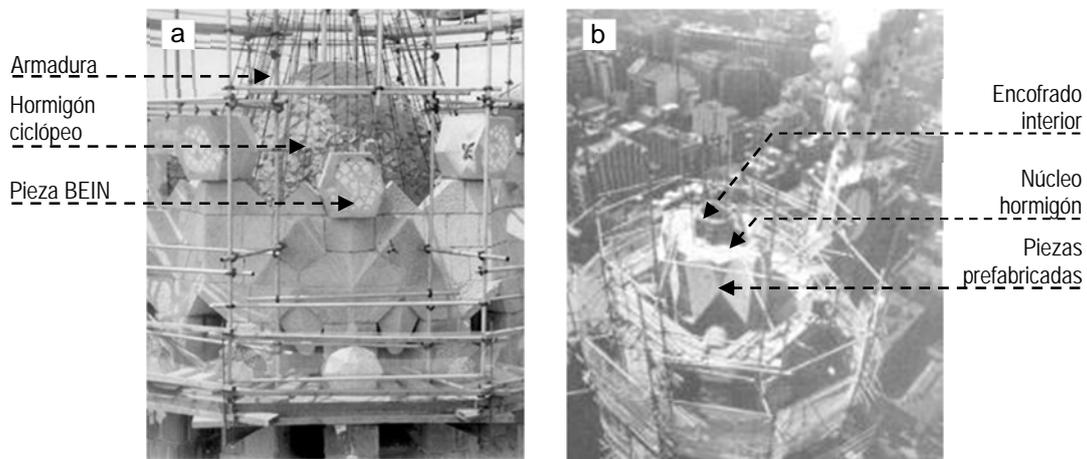


Figura 3.13: a) Construcción de la base del pináculo y b) Inicio de la construcción del remate del pináculo (ATESF)

En la figura 3.14a se puede observar dichos prefabricados de hormigón de la base situados a pie de obra esperando a ser colocados. En ellos se aprecia que la inscripción de *Hosanna Excels* y el resto de elementos decorativos de *trencadís* están adheridos mediante mortero en rebajes hechos en la misma pieza. Cabe mencionar que algunos de estos revestimientos también se realizaron una vez las piezas ya estaban colocadas, de tal manera que el revestimiento de *trencadís* disimulaba las juntas (ver figura 3.14b).

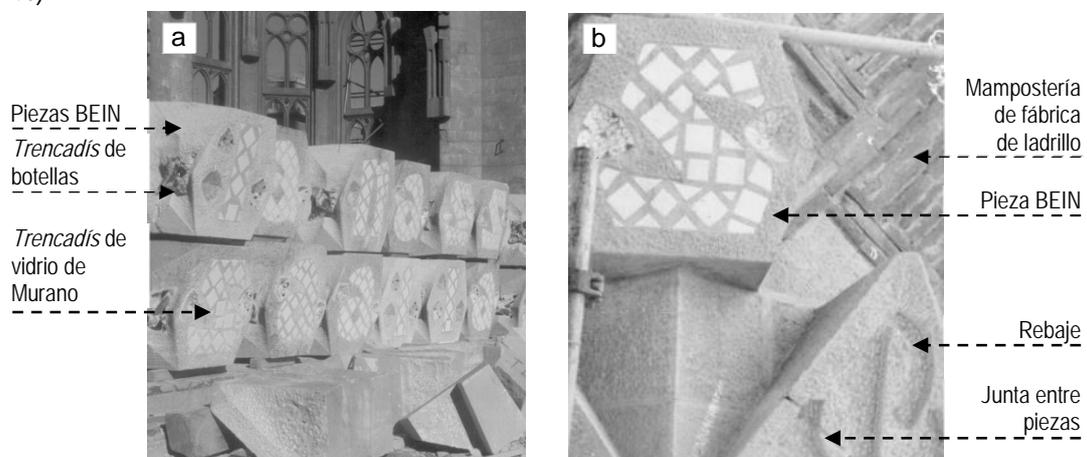


Figura 3.14: a) Piezas BEIN situadas a pie de obra y b) Construcción de la base del pináculo (ATESF)

Por otro lado, el remate o segunda parte del pináculo se realizó con un encofrado exterior de piezas prefabricadas de hormigón armado revestidas con *trencadís* (ver figura 3.13b). Éstas, según el sistema iniciado por Gaudí en la torre de San Bernabé, se seguían fabricando a los pies de las obras del templo (ver figura 3.15a). Primero se colocaban los fragmentos de vidrio de Murano en el fondo del molde realizando el *trencadís*. Seguidamente, se realizaba el armado y finalmente se vertía el hormigón. Una vez secas y desmoldadas, las piezas eran elevadas con una grúa hasta su posición mediante una armadura de colocación conformada a la pieza misma (ver figuras 3.15b y 3.16a).

Según un artículo publicado en la revista Temple en el diciembre del año 1975, dichas piezas alcanzaban una dimensión de 3,5 metros y pesaban aproximadamente 3 toneladas. Como se puede observar en la figura 3.16b, una vez colocadas las piezas se unía la armadura de colocación con el núcleo resistente de hormigón, siguiendo las directrices del detalle presentado en la parte superior de la misma figura. Cabe destacar que en los cuatro lados de la planta del pináculo y a lo largo de toda la altura de su remate existen juntas de mortero entre piezas, con el objetivo de absorber las dilataciones térmicas y movimientos diferenciales entre las mismas. Éstas, como se puede apreciar en la figura 3.17a, están decoradas con piedras de basalto negras en voladizo.

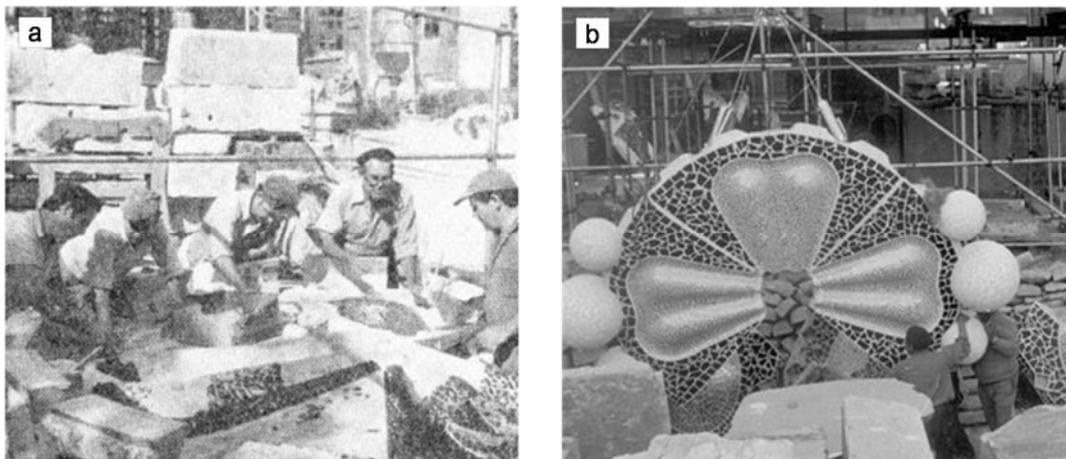


Figura 3.15: a) Fabricación de las piezas prefabricadas revestidas con *trencadís* y
b) Elevación de las piezas (ATESF)

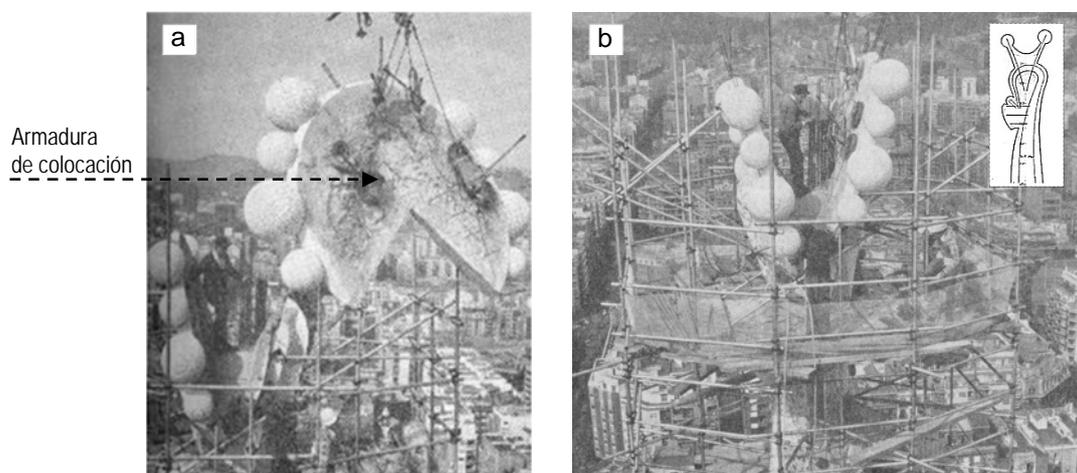


Figura 3.16: a) Colocación de la pieza del remate del pináculo y
b) Anclaje de la armadura de colocación de las piezas con el núcleo resistente (ATESF)

En la figura 3.17b se presenta una fotografía de la Fachada de la Pasión en sus últimos años de construcción al final década de los setenta. Como se puede apreciar, los dos pináculos laterales de la torre de San Jaime (derecha) y de San Felipe (izquierda) se encuentran casi finalizados. A diferencia del pináculo central dedicado a San Bartolomé, que aún le falta la finalización del remate y del pináculo Santo Tomás, situado también en la parte central de la fachada, que en ese periodo se encuentra en los trabajos de construcción de la base.

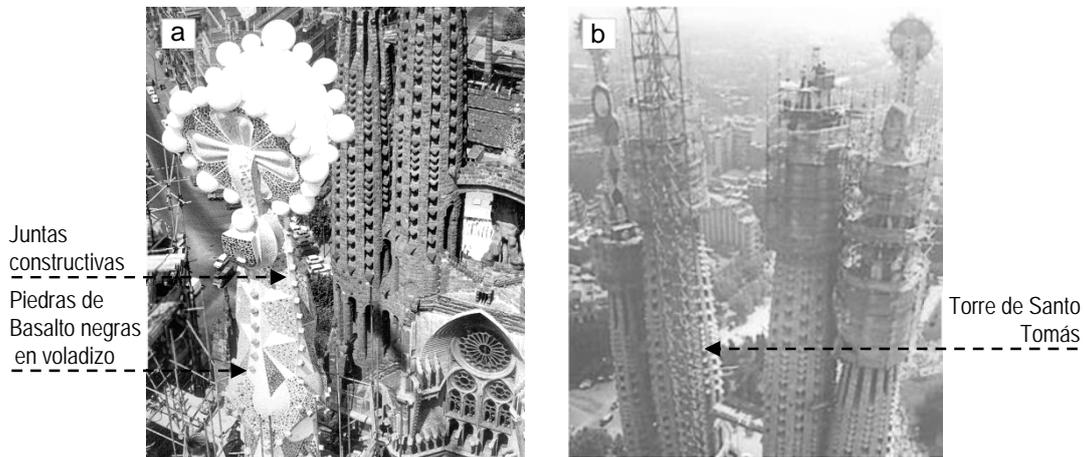


Figura 3.17: a) Remate del pináculo de Santo Bartolomé y b) Construcción de los pináculos de la Fachada de la Pasión (ATESF)

3.4.3. Tercera etapa (1985-2014): Actualidad

En la etapa más reciente de la construcción del templo se ha podido ver finalizado gran parte del proyecto de Gaudí con el cierre del cuerpo central. El incremento del ritmo de la construcción respecto a los periodos anteriores se debió principalmente a dos factores: el aumento de ingresos gracias al incremento de número de visitantes y a la incorporación de las nuevas técnicas de dibujo y cálculo. El arquitecto Jordi Bonet i Armengol, director de las obras desde el año 1985 hasta 2012, conjuntamente con la Dirección Facultativa del templo decidieron seguir empleado el sistema constructivo desarrollado por Gaudí, mediante piezas prefabricadas revestidas con *trencadís* de vidrio de Murano, para la construcción de los nuevos pináculos y la decoración de algunas partes del templo (ver figura 3.18a).

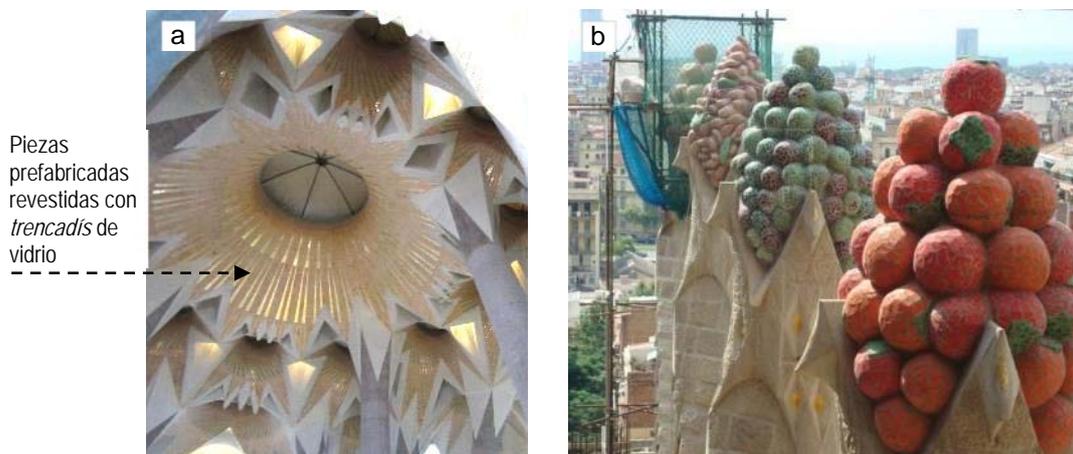


Figura 3.18: a) Hiperboloides de las naves decorados con prefabricados revestidos con *trencadís* de vidrio de Murano, 2014 y b) Pináculos de los ventanales laterales de la nave, 2011

En el caso de los nuevos pináculos además, se contó con la colaboración del escultor japonés Etsuro Sotoo, quien diseñó dichas estructuras decorativas. Los pináculos Sotoo se sitúan alrededor de toda la basílica a distintos niveles (30 y 45 m) y representan frutos de temporada, la uva y el trigo (ver figura 3.18b). Actualmente, debido a la falta de espacio en las obras del templo todas estas piezas prefabricadas revestidas con *trencadís* se realizan fuera de la obra por una empresa externa. Sin embargo, la pasta de vidrio empleada para realizar el revestimiento de *trencadís* de dichas piezas sigue siendo suministrada por la misma fábrica de Murano de la época de Gaudí (Orsoni S.L), productora de este material desde el año 1888.

Este tipo de vidrio importado desde Murano sigue siendo de fabricación artesanal y es producido mediante dosificaciones patentadas por la empresa productora. Por consiguiente, los vidrios de aproximadamente 10 mm de espesor adoptan características compositivas y estéticas distintas en función de cada fundición y de las condiciones de su secado. Las diferentes partidas de pasta de vidrio de diversas tonalidades se reciben en la obra en forma de placa rectangular de aproximadamente 250x400 mm (ver figura 3.19a).

Con posterioridad, éstas son cortadas en los fragmentos de *trencadís* manualmente mediante una sierra de disco y unas tenazas especiales (ver figura 3.19b). En el 2009 los técnicos de la obra detectaron roturas en algunas de las partidas de vidrio que no eran aptas para su utilización. Consecuentemente, la Dirección Facultativa estableció procedimientos de control de calidad basados en métodos de choque térmico y mecánico, con el fin de descartar aquellas partidas de baja calidad y con posibilidad de rotura una vez puestos en la obra (Vicente, 2009).

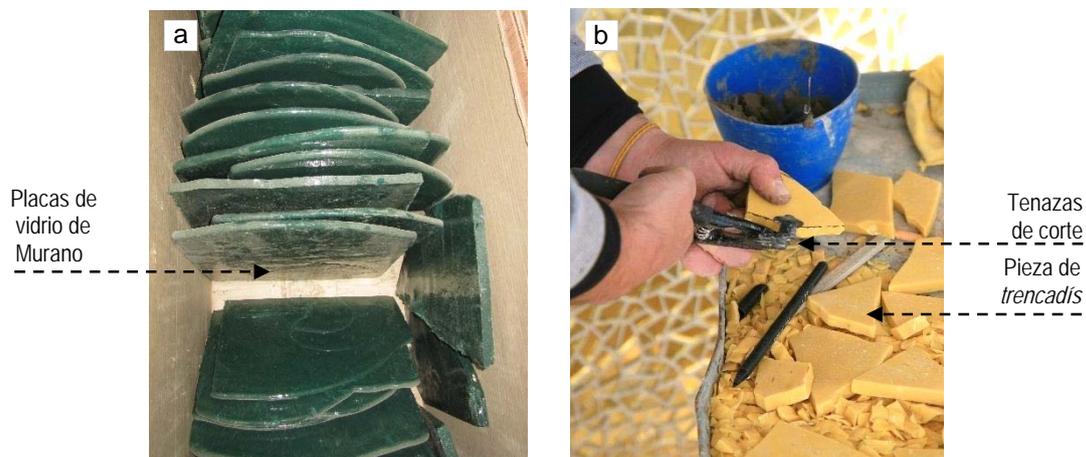


Figura 3.19: a) Placas de pasta de vidrio de Murano y b) Corte de la pasta de vidrio en piezas de *trencadís*

El sistema de fabricación de estas nuevas piezas revestidas con *trencadís* es muy similar al procedimiento empleado históricamente en la obra. En primer lugar, se obtiene un molde semiflexible de poliéster de la escultura realizada por el artista japonés Etsuro Sotoo. Posteriormente, se colocan manualmente los pequeños fragmentos de pasta de vidrio en el fondo de este molde, mediante una silicona de fácil eliminación (ver figura 3.20a y b). A continuación, se coloca en el interior una armadura de acero inoxidable y, seguidamente, se vierte el mortero o micro-hormigón, debido al pequeño tamaño del árido utilizado (Páez, 1986). De manera habitual se vibra el micro-hormigón con vibradores de aguja con el fin que el material rellene todas las juntas de *trencadís*. Para finalizar, se enrasa la parte posterior de la pieza y se coloca una armadura de colocación para su transporte y fijación en la obra.

En la dosificación de micro-hormigón de estas piezas se emplea una cantidad de cemento de 300 Kg/m³ de la categoría resistente de 52,5 R de color gris o blanco, en función del acabado final. Dicha dosificación se caracteriza por una composición con una relación agua/cemento elevada (0,81) y un esqueleto granular de áridos finos: ojo de perdiz calcáreo (2-6,3 mm) y arena calcárea (0-4 mm). Además de dichos componentes, también incorpora una adicción de mico-sílice negra y un aditivo superplastificante en una proporción de 3,75 % s.p.c.

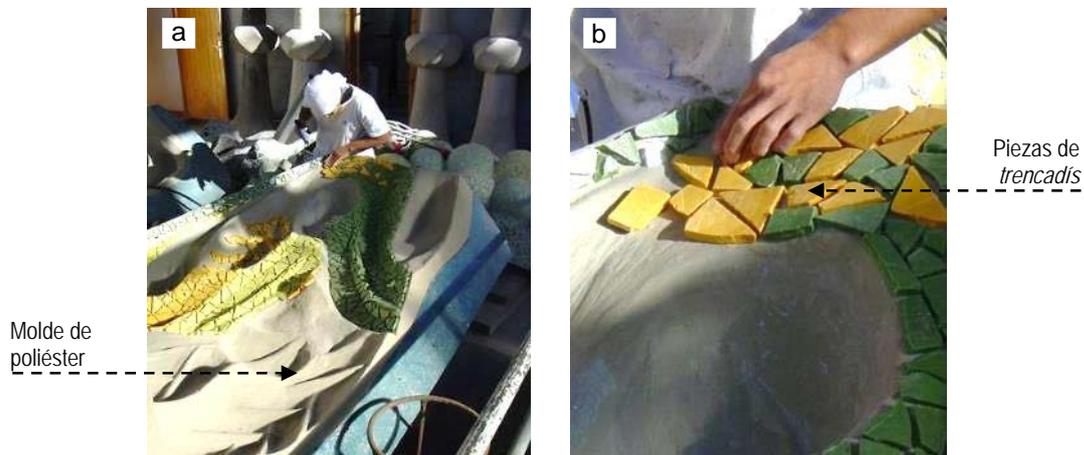


Figura 3.20: a) Colocación de las piezas de vidrio en los moldes b) Detalle del *trencadís* (ATESF)

La durabilidad de los materiales y la adherencia de los revestimientos en una obra como la Sagrada Familia es un aspecto de gran importancia. Por ello, la Dirección Facultativa estableció un procedimiento de riguroso curado de las piezas destinadas a los pináculos, con el fin de evitar una retracción excesiva del micro-hormigón, y consecuentemente, el desprendimiento de piezas de *trencadís* del revestimiento (Gomà, 2008). Este procedimiento consiste en primer lugar en un curado húmedo de la pieza sin desmoldar durante 5 a 7 días. Pasado ese tiempo, se desmolda la pieza y se realiza un curado mojado durante 7 días más, tapando la pieza con saco de tela y regándola con agua permanentemente. A continuación, ya fuera del taller se deja secar la pieza lentamente en un espacio al aire libre protegido del sol y tapándola con un plástico.

Cabe señalar que, según las instrucciones descritas por la Dirección Facultativa, se debe extraer en las dos primeras piezas producidas y durante los quince primeros días tres testimonios de 30 mm de diámetro por 150 mm de largo para evaluar la curva de su secado (Gomà, 2008). Asimismo, dicho procedimiento se repite a los 15 días posteriores. Para finalizar, pasados dos meses de la fabricación de las piezas estas se impermeabilizaban con un producto con base de siloxanes.

En la figura 3.21 se presenta un esquema de la sección constructiva de uno de los pináculos que rematan los ventanales de las fachadas laterales, situados a 30 m de altura. Estos tienen un radio aproximado de 2,00 m y una altura de 2,64 m y están formados por cinco piezas de micro-hormigón revestidas con *trencadís*. Cuatro de ellas forman la base y la quinta, y última, cierra el pináculo por la parte superior. Como se puede observar en la sección E-E' de la figura 3.2.1, dichas piezas cumplen una doble función: por un lado, son el revestimiento exterior del pináculo y, por el otro, son el encofrado del núcleo interno de hormigón realizado in situ. Con este sistema constructivo la armadura de colocación de cada una de las piezas quedan embebidas en el núcleo de hormigón y garantizan la estabilidad de todo el conjunto. Para finalizar, las juntas entre piezas se rellenan con mortero y se incrustan manualmente los fragmentos de pasta vidrio, garantizando así la continuidad del revestimiento.

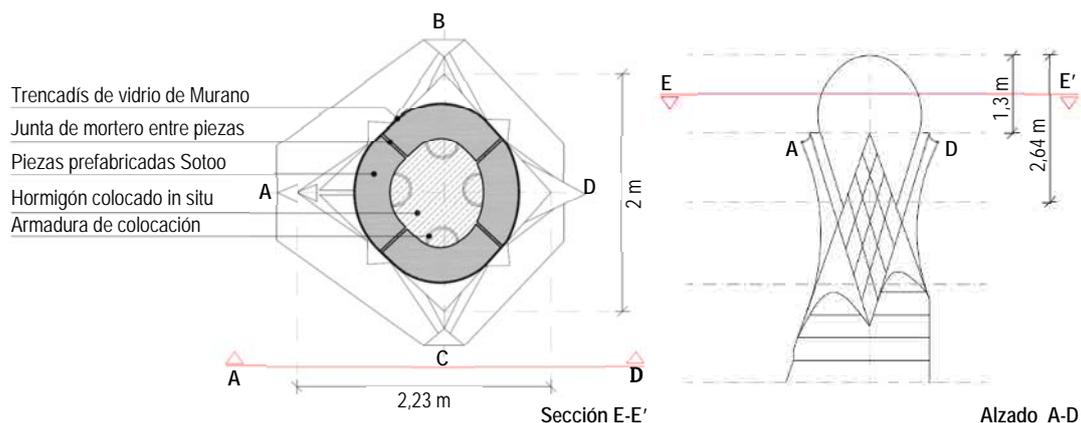


Figura 3.21: Esquema constructivo en planta y alzado de los pináculos Sotoo de los frontones de los ventanales de la nave

En la obra, también, se utiliza un mortero destinado a la restauración del *trencadís* de los pináculos. Fue diseñado con el objetivo de evitar daños de origen químico como: la reacción álcali-sílice, la reacción álcali-carbonato, la formación de taumasita, la corrosión electrolítica y para resistir ciclos de hielo/deshielo (Gomà, 2006). Asimismo, se definió un procedimiento para su correcta puesta en obra y curado que garantizara su adherencia con la base existente. Este se realizaba en cuatro fases: la primera, se repicaba la zona a reparar; la segunda, se empleaba un chorro de arena para conseguir esta superficie irregular y mejorar su anclaje con el mortero de restauración; la tercera, se aplicaba en la superficie saneada una imprimación de resinas epoxídicas o látex y, por último, cuando esta imprimación aún estaba fresca, se colocaba el mortero de restauración y, al mismo tiempo, se incrustaban las piezas de *trencadís* en él.

El proceso de curado se iniciaba inmediatamente después de su colocación y se realizaba durante 14 días. Era muy parecido al que se hacía con las nuevas piezas prefabricadas de los pináculos, pero con el inconveniente de que se realizaba en la obra y, por tanto, en altura. La zona reparada se tapaba con un saco de tela, humedeciéndola durante los primeros 5-7 días. Pasado ese tiempo, se cambiaba el saco por un plástico, para que el mortero perdiera humedad lentamente, y se dejaba durante los días restantes (Gomà, 2006).

3.5. ESTADO ACTUAL

Según las tres etapas constructivas descritas, se establece que los pináculos de la Sagrada Familia tienen una edad aproximada de 89,44 y 14 años, respectivamente. En la figura 3.22 se presenta un esquema de la vida en servicio de dichas estructuras decorativas, en función de sus diferentes etapas y de la cronología de la obra; asimismo, se muestra su ubicación en planta y alzado. Como se puede observar, los pináculos realizados en la última etapa, diseñados por el escultor Etsuro Sotoo, son de menor dimensión (2,6 m) y se encuentran distribuidos alrededor de toda la Basílica a una altura entre 30 y 45 m (ver figura 3.22). En la 1ª y 2ª etapa, por el contrario, se construyeron únicamente los cuatro pináculos de las torres de la fachada del Nacimiento y de la Pasión, respectivamente; tienen una dimensión aproximada de 25 m y se sitúan a más de 100 m de altura.

Durante estos períodos, como cualquier revestimiento exterior, el *trencadís* de los pináculos de la Sagrada Familia se ha visto degradado, en mayor o menor medida, por los efectos ambientales y

climatológicos. La lluvia, el viento, el sol o la contaminación ambiental de la ciudad, son agentes que producen alteraciones físico-químicas en los revestimientos acelerando su envejecimiento. Esta degradación o vetustez natural de los revestimientos se aprecia en las superficies a través de cambios de coloración, aparición de manchas o agentes biológicos, fisuras o bien, en un estado más avanzado, en desprendimientos de partes del recubrimiento.

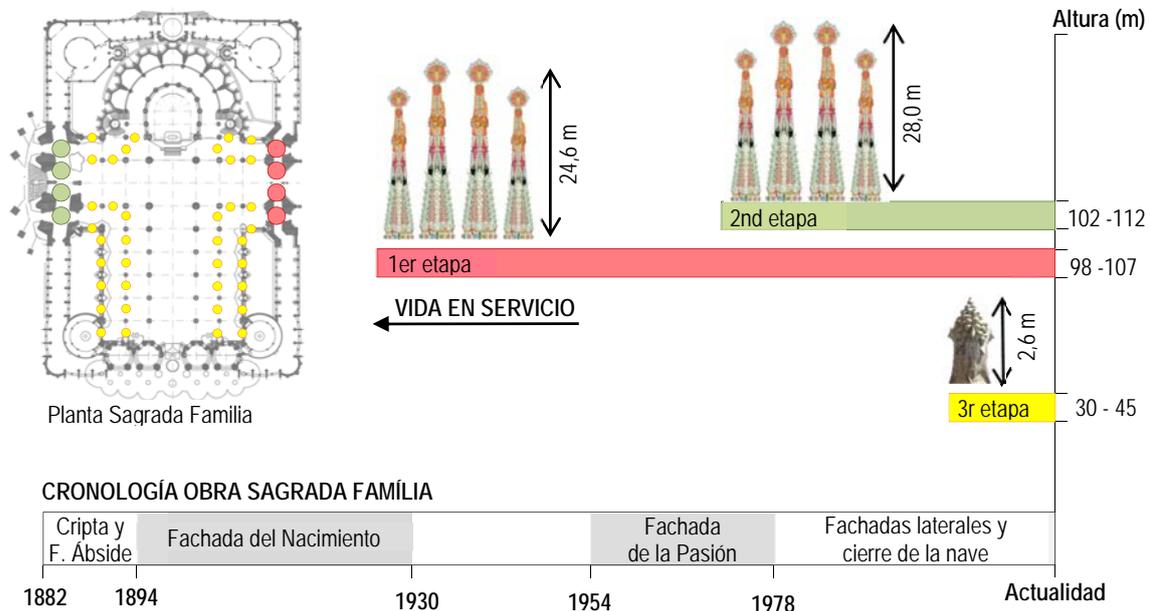


Figura 3.22: Esquema de la vida en servicio de los pináculos en función de la cronología de la obra

En este sentido, se podría considerar que la degradación de los revestimientos depende principalmente de las condiciones climáticas, de su ubicación y, sobre todo, del tiempo que llevan expuestos a la intemperie. Teniendo esto en cuenta, sería de esperar que el *trencadís* de los pináculos de la Fachada del Nacimiento, situados a 100 m de altura y con una mayor vida en servicio (89 años), presentara la mayor degradación respecto al resto. No obstante, la realidad observada en la obra fue otra distinta, el mayor número de daños se detectó en los pináculos de las dos últimas etapas (Fachada de la Pasión y Sotó).

En la figura 3.23a se presentan dos imágenes (base y remate) de uno de los pináculos de la Fachada del Nacimiento, en la figura 3.23b se muestran las mismas partes de uno de los pináculos de la Fachada de la Pasión, construidos 45 años más adelante. Ambos son de características similares y están expuestos a las mismas condiciones climáticas. Desde el punto de vista del envejecimiento de los materiales se cumple la predicción debida al tiempo. Como se puede observar, los materiales del pináculo de la Fachada del Nacimiento, como por ejemplo la piedra de Montjuic de la base, muestra la mayor vetustez respecto a los de la Fachada de la Pasión, puesto que lleva un mayor número de años expuestos a la intemperie (ver figura 3.23a). Sin embargo, desde el punto de vista de incidencias o daños dicha suposición no se cumple, dado que es en el pináculo de la Fachada de la Pasión, construido durante la década de los 70', donde se aprecian diversas caídas de las piezas del revestimiento (ver figura 3.23b). Además, el vidrio dorado se encuentra exfoliado y ha perdido coloración y brillantez, en comparación con el *trencadís* del pináculo de la Fachada del nacimiento de principios del s.XX (ver figura 3.23a y b).

Si bien es cierto que se ha mantenido el sistema constructivo de Gaudí y la procedencia de los vidrios de Murano, hay que tener en cuenta que la calidad del cemento y el tipo de armado de estas

piezas evolucionó incrementando su resistencia y rigidez (IECA, 2014). Ello puede haber modificado la interacción entre los materiales del revestimiento, dado que el hormigón tiene menos capacidad de absorber las deformaciones dimensionales de las piezas de vidrio, o bien, existir alguna interacción química que haya producido fenómenos expansivos. En consecuencia, se observa un mayor número de daños en el *trencadís* de los pináculos de las últimas etapas de la obra (por ejemplo, los de la fachada de la Pasión) y con una menor vida en servicio.

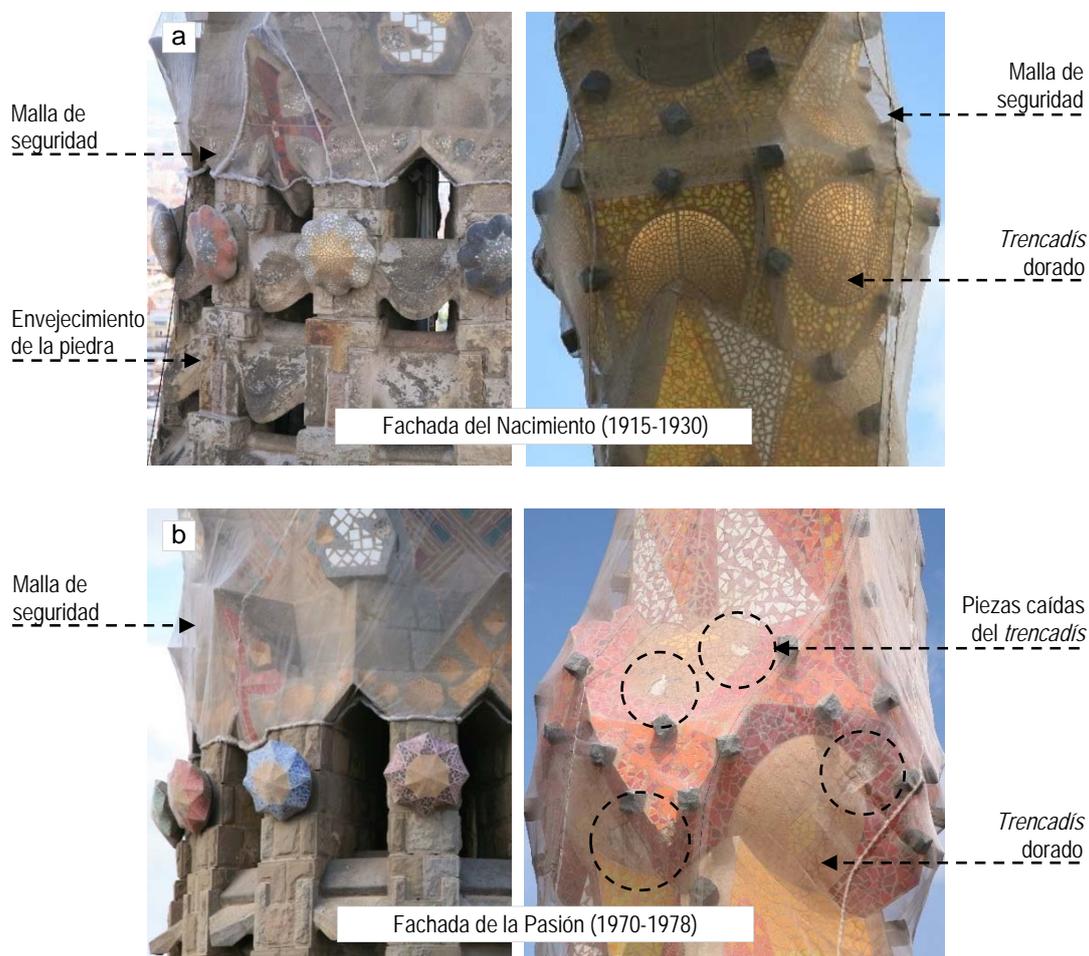


Figura 3.23: Estado actual de la base y de la zona del anillo de uno de los pináculos de las torres a) Fachada del Nacimiento (1915-1930) y b) Fachada de la Pasión (1970-78)

Frente a esta situación, la Dirección Facultativa de la obra decidió cubrir todos los pináculos con una malla de seguridad para prevenir los riesgos, tanto para los visitantes como para los trabajadores de la obra (ver figura 3.23). Posteriormente, se iniciaron los trabajos de inspección, análisis y restauración. La estrategia adoptada por la Dirección Facultativa fue empezar la restauración en aquellos pináculos donde los revestimientos presentaran un peor estado de conservación, es decir, en algunos de los pináculos Sotoo y en los pináculos de las torres de la Fachada de la Pasión. Además, teniendo en cuenta que hasta el momento no se ha intervenido en ninguno de los pináculos de las torres desde su construcción, sería un aprendizaje para actuar finalmente en los pináculos de la Fachada del Nacimiento, declarados en 2006 Patrimonio de la humanidad por la UNESCO.

En base a todo lo expuesto, en este apartado se incide únicamente en el estado de los pináculos dónde se han iniciado los trabajos de restauración y se pudo acceder para su inspección. En particular, en el marco de la presente investigación se examinó el pináculo de la torre de Santo Tomás,

perteneciente al conjunto de la Fachada de la Pasión (ver figura 3.17b) y los pináculos Sotoo situados a 30 y 45 metros de altura. La información aportada en el presente documento se obtiene a partir de inspecciones realizadas por la autora y por la documentación suministrada por los técnicos y la Dirección Facultativa de la Sagrada Familia.

3.5.1. Descripción de los daños

A partir del análisis de daños detectados durante las inspecciones del *trencadís* de los pináculos de la 2ª y 3ª etapa, se observó que a pesar de las diferencias de ubicación, de tiempo de vida en servicio y/o de los materiales los daños eran muy similares y podrían responder a un mismo o varios procedimientos de degradación. Por este motivo, en la tabla 3.3 se expone la clasificación de los daños localizados en dichas estructuras y se explica en detalle cada uno de ellos.

		
DAÑOS	FACHADA DE LA PASIÓN	SOTOO
Desprendimientos		
Caídas puntuales de piezas y/o material rejuntado	●	●
Conjunto de piezas de <i>trencadís</i> de una misma zona	●	●
Pequeños volúmenes de micro-hormigón	-	●
Fisuraciones		
Perpendiculares al perímetro de las piezas de vidrio	●	●
Agrietamiento de las piezas de vidrio	●	●
Interfase (vidrio y material de rejuntado)	●	●
Juntas constructivas	●	●
Exfoliación del vidrio metalizado	●	●
Presencia agentes biológicos / Manchas	●	●
Falta de material en el rejuntado	●	●
Aire ocluido	-	●

Tabla 3.3: Clasificación de los daños localizados en los pináculos de la 2ª y 3ª etapa

Desprendimientos

En las inspecciones realizadas en los pináculos de la 2ª y 3ª etapa se clasificó tres tipos de desprendimientos en los distintos revestimientos de *trencadís*. Estos son:

- Caídas puntuales de piezas de *trencadís* o del material de rejuntado;
- Desprendimientos de un conjunto de piezas de *trencadís* de la misma zona;
- Desprendimientos de pequeños volúmenes de micro-hormigón;

Las caídas puntuales de piezas se localizaron tanto en los pináculos Sotoo como en el pináculo de Santo Tomás. En este último, además, las piezas caídas correspondían a los elementos de la base (ver figura 3.24a), adheridas con mortero y también en el remate, hecho con piezas prefabricadas de hormigón (ver figura 3.24b). En las huellas de las piezas desprendidas se apreció la superficie lisa de la base de los vidrios, indicando una débil adherencia y una carencia de anclaje mecánico entre ambos materiales (vidrio-mortero/micro-hormigón). Además, en algunas se apreciaron restos de agentes biológicos en las superficies, así como fisuras perpendiculares en el material de rejuntado de la pieza. Estos datos muestran indicios del origen de los mismos desprendimientos, dado que manifiestan la existencia de tensiones tangenciales en el revestimiento, que provocaron la aparición de fisuras,

desvinculando las piezas en las interfaces y, consecuentemente, la entrada de agua en el interior y su estancamiento en la parte posterior de los vidrios.

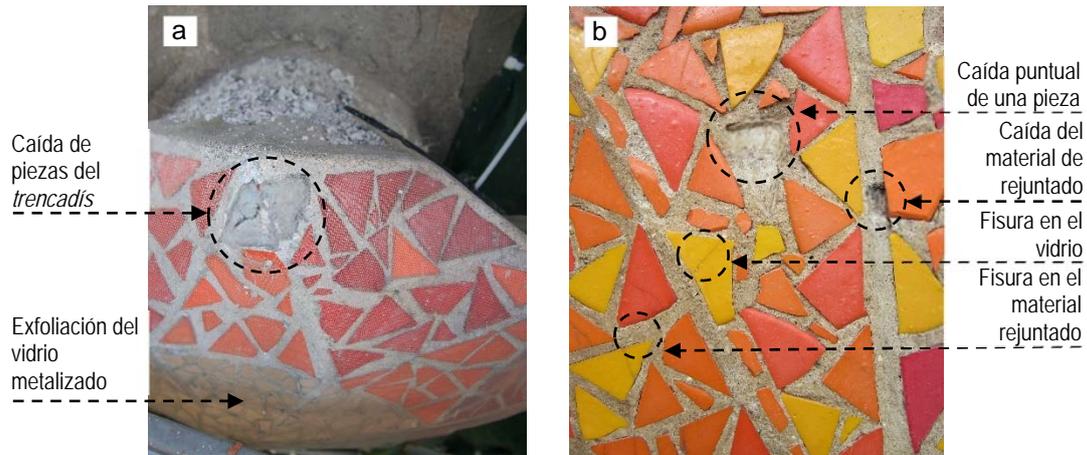


Figura 3.24: Estado inicial del *trencadís* del pináculo de Santo Tomás

a) De los florones de la base y b) Del remate

Del mismo modo, los desprendimientos de conjuntos de piezas de *trencadís* se localizaron en los pináculos de las dos últimas etapas de la obra. En el caso de Santo Tomás este tipo de daño se detectó únicamente en dos zonas del revestimiento de su remate. La primera de ellas se encontró en el *trencadís* de color rojo y blanco de la parte inferior del báculo, orientación oeste y aproximadamente a 100 m de altura (ver figura 3.25a).

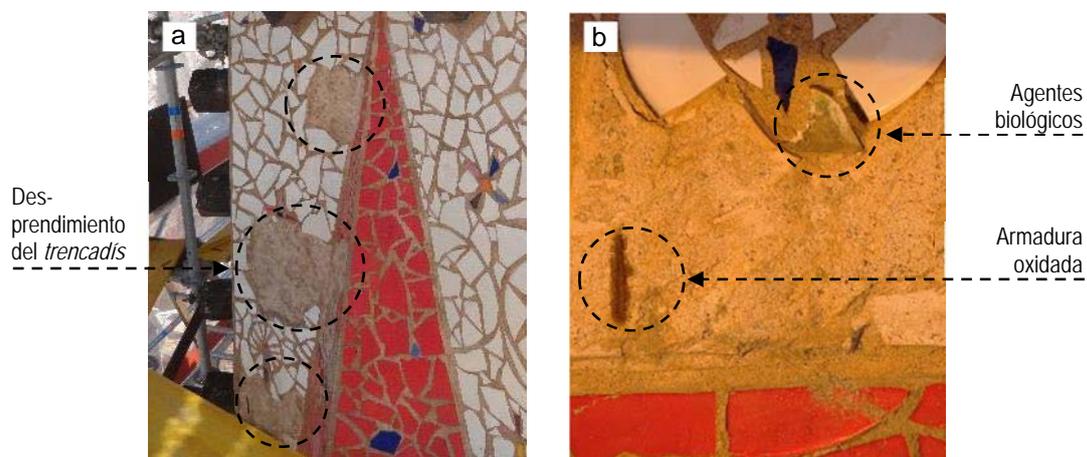


Figura 3.25: a) Desprendimientos *de trencadís* localizados en la parte inferior del báculo del remate del pináculo y b) Detalle del desprendimiento

Como se aprecia en el detalle de la figura 3.25b, en estas partes también se hallaron restos de agentes biológicos en las superficies y pequeños trozos de la armadura interna oxidada. Esto indica la entrada de agua en el interior de la estructura, una de las causas del desprendimiento del *trencadís*, dado que la oxidación de las armaduras de acero desencadena un aumento de volumen, capaz de producir fisuras y el desprendimiento de su recubrimiento. Dicho fenómeno se apreció en mayor magnitud en la otra zona desprendida del mismo pináculo. Concretamente, se localizó en el *trencadís* de color blanco de la parte superior del báculo, orientación este y aproximadamente a 107 m de altura (ver figura 3.26a). Como se puede observar en la figura 3.26a, y a diferencia del caso anterior, gran parte de la armadura interna, muy próxima a la superficie, está oxidada. Esta situación está provocada por un insuficiente

espesor de recubrimiento¹ probablemente por un error de fabricación. Asimismo, se detectaron fisuras, manchas y presencia de agentes biológicos en el revestimiento contiguo a la zona desprendida (ver figura 3.26b).

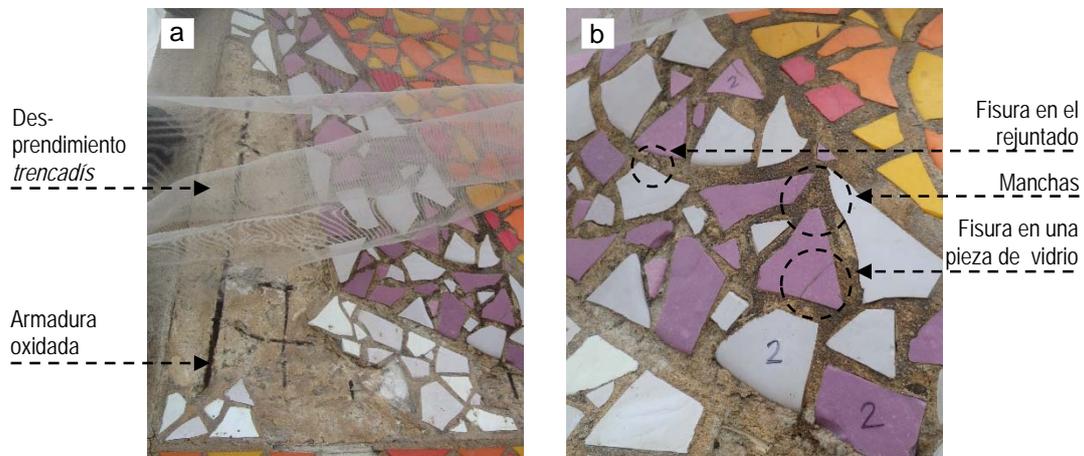


Figura 3.26: a) Desprendimiento de *trencadís* en la parte superior del báculo y b) Detalle del *trencadís* contiguo

En los pináculos Sotoo la armadura interna es de acero inoxidable, no obstante también se detectaron desprendimientos de conjuntos de piezas de *trencadís* muy parecidos a los del pináculo de Santo Tomás. Este tipo de daños se localizaron en pináculos situados a distintas alturas y con revestimientos de *trencadís* de distinta coloración, tal y como se muestra en las figuras 3.27a y b, aunque preferentemente se mostraron en los sometidos a una mayor exposición a la radiación solar.

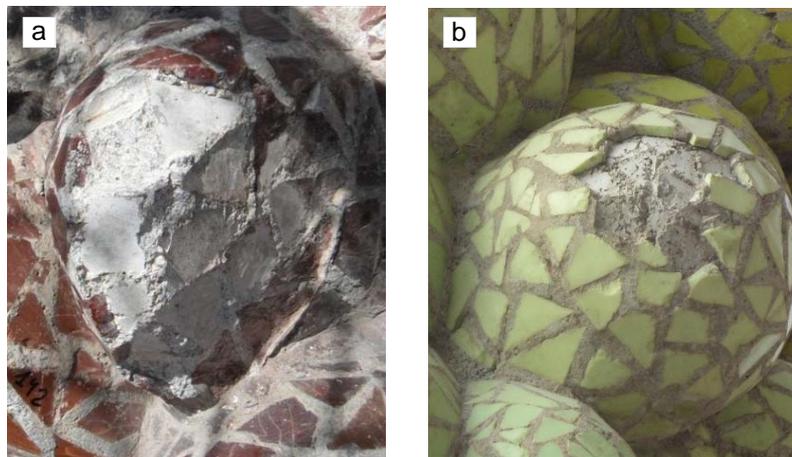


Figura 3.27: *Trencadís* pináculos Sotoo a) Pináculo de las Castañas (2001), 30 m de altura, orientación S-Oy b) Pináculo de la Uva blanca (2002), 45 m de altura, orientación S-O

En las zonas dañadas se apreció también superficies lisas de las bases de los vidrios desprendidos; asimismo, se detectaron fisuras en las piezas y en el rejuntado contiguo. Sin embargo, no se observó ningún indicio de presencia de agua y/o humedad como en el pináculo de Santo Tomás. Estos datos podrían indicar que dichos desprendimientos tendrían su origen en mecanismos físico-mecánicos debido a la incompatibilidad de deformación térmica entre las piezas de vidrio y el micro-hormigón. Los

¹ En vigente instrucción EHE-08, según las características de la estructura, se recomendaría un recubrimiento mínimo de las armaduras de 25 mm.

cambios de temperatura de la atmósfera o bien los efectos producidos por la acción directa de la lluvia, viento y, especialmente la radiación solar producen cambios de temperatura que a la vez se traducen en variaciones dimensionales en los materiales. A su vez, se generan tensiones rasantes en la interfase de los materiales que podrían llegar a comprometer la adherencia entre ambos y provocar los desprendimientos observados.

El tercer tipo de desprendimientos se detectó únicamente en algunos de los pináculos Sotoo, cuando se realizaban los trabajos de inspección y saneamiento, después de ejercer diversos movimientos y vibraciones en la estructura. Como se puede observar en la figura 3.28a y b, se tratan de roturas en la sección interna del hormigón a pocos centímetros del revestimiento y coincidentes con un volumen saliente del pináculo. Las fisuraciones no son totalmente limpias y se aprecia cierta rugosidad. Asimismo, en ellas se puede observar que no hay indicio de ningún tipo de armado o conector, a pesar de la alta cuantía de armado que dispone el conjunto del pináculo. Ello se debe al reducido tamaño y al ángulo agudo ($> 60^\circ$) de dichos volúmenes, que hacen difícil la colocación de un armado de conexión en su interior. En consecuencia, cualquier pequeño golpe o vibración debilitaría la sección resistente de estas partes de la pieza y produciría su desprendimiento. No obstante, también, puede ser fruto de un proceso de alteración por efectos químicos.

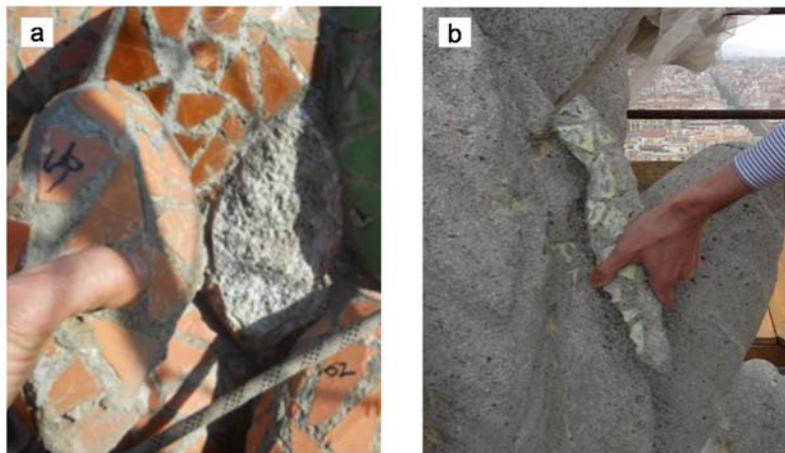


Figura 3.28: Pináculos Sotoo a) Pináculo de las Almendras (previo 2000), 30 m de altura, orientación S-O y b) Pináculo de las Espigas (2006), 45 m de altura, orientación N-E

Fisuraciones

Las fisuras detectadas en el *trencadís* de los pináculos inspeccionados se localizaron tanto en partes individuales del revestimiento (piezas de vidrio o material de rejuntado) (ver figura 3.29a), como abarcando ambos materiales a la vez (ver figura 3.30a). En la presente investigación estas fisuras se clasificaron en función de su geometría y ubicación:

- Fisuras perpendiculares al perímetro de las piezas de vidrio;
- Agrietamiento de las piezas de vidrio;
- Fisuras en las interfases (piezas de vidrio-material de rejuntado);
- Fisuras coincidentes con las juntas constructivas;

En el primer tipo, las fisuras de los vidrios se extendían por toda la superficie de la piezas, cuarteándolas, tal y como se aprecia en la figura 3.29a. En algunos casos, estas fisuras continuaban en la misma dirección por el rejuntado (ver figura 3.29b); en otros, se desviaban por la interfase entre ambos materiales (ver figura 3.30a). En cuanto al agrietamiento del vidrio, si bien era parecido al anterior,

respondía a unas fisuras en ramada que afectaban a toda la pieza y, como se puede observar en la figura 3.29b, variaba la dirección de las fisuras en el misma superficie del vidrio. En el *trencadís* de algunos pináculos Sotoo, como el pináculo de las castañas (ver figura 3.30b), tuvo que substituirse debido a que las fisuras se manifestaron más rápidamente. Teniendo en cuenta que se trata de un vidrio de fabricación artesanal, las fisuras detectadas podrían reflejar defectos de producción o secado. Sin embargo, también manifiestan la existencia de tensiones tangenciales en el revestimiento, las cuales sobrepasan la resistencia mecánica de los vidrios.

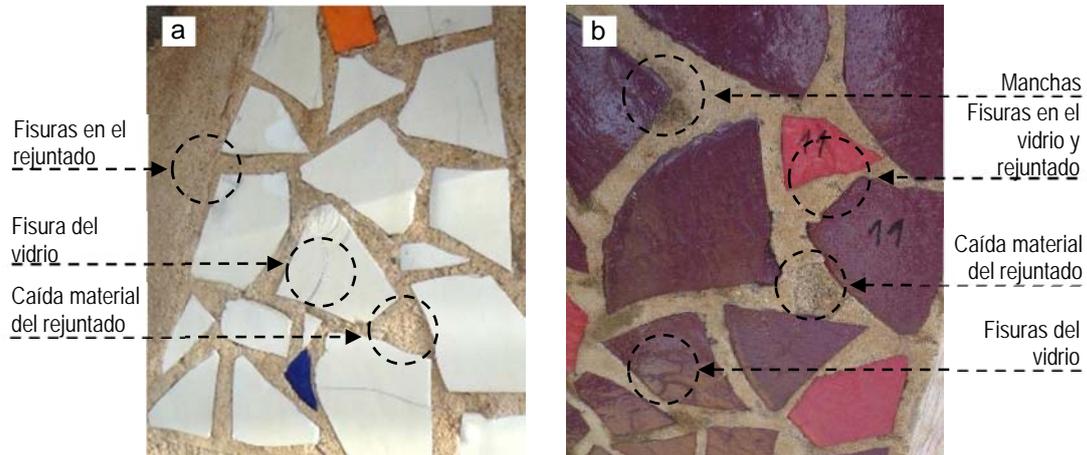


Figura 3.29: Fisuras en las piezas de *trencadís* de vidrio del pináculos de Santo Tomás
a) Fisura lineal y b) Agrietamiento

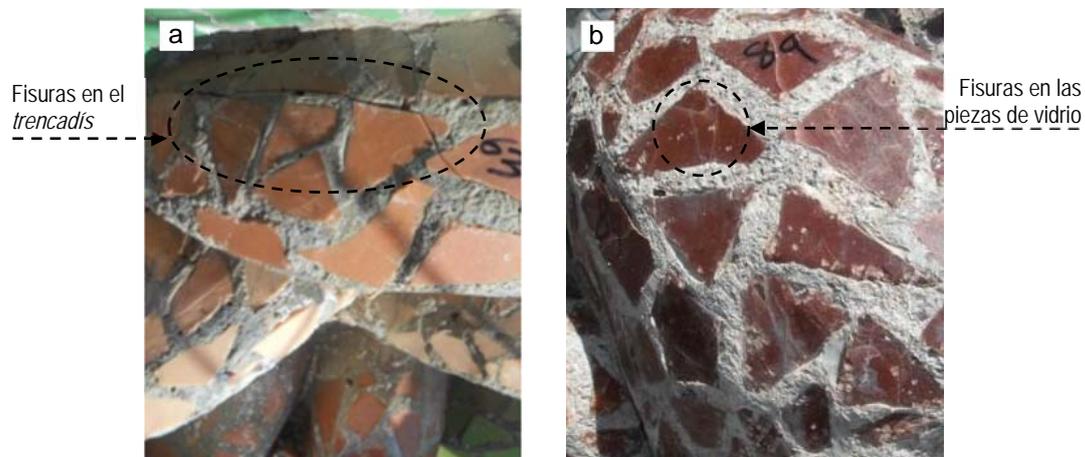


Figura 3.30: a) Fisura en el *trencadís* del Pináculo de las Almendras 4PI (previo 2000) y
b) Fisuras en las piezas de pasta de vidrio del Pináculo de las Castañas 1PI (2001)

Es habitual que las fisuras se extiendan por las zonas más débiles del revestimiento y en algunos casos, pueden señalar partes dañadas de la estructura. En este sentido, durante las inspecciones se detectaron fisuras que seguían las interfases entre las piezas de vidrio y el material de rejuntado, tal y como se muestra en la figura 3.31a. Estas podrían indicar un estado previo al desprendimiento de un conjunto de piezas de *trencadís* de la misma zona o bien, de pequeños volúmenes del micro-hormigón en el caso de los pináculos Sotoo. Algunas de estas fisuras coincidían, además, con las juntas constructivas de los pináculos (ver figura 3.32a y b), lo que podría indicar movimientos diferenciales en el revestimiento o la estructura. En la figura 3.31b se presenta uno de estos casos, donde se retiró el material de la junta entre piezas por su posible riesgo de desprendimiento.

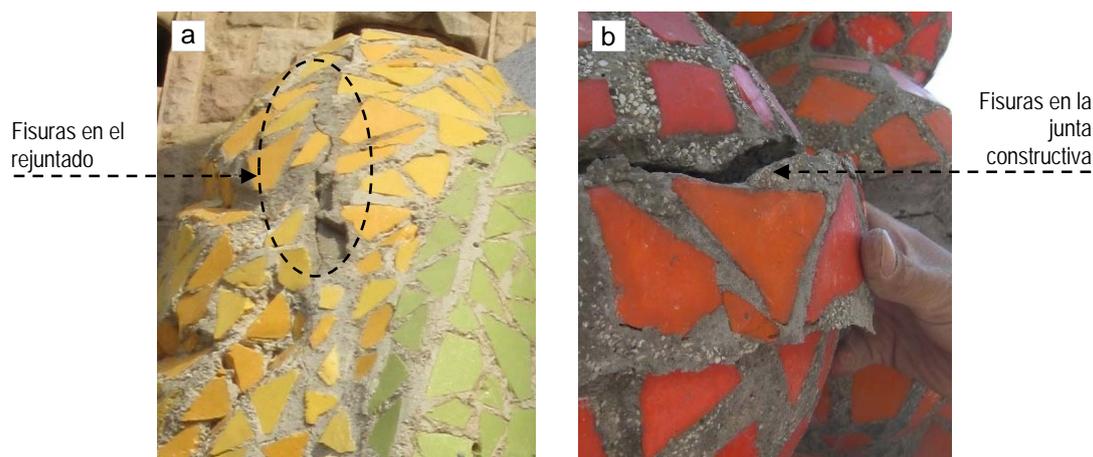


Figura 3.31: a) Fisura en el rejuntado del *trencadís* del Pináculo de las Espigas (2003) y b) Fisura horizontal en la junta constructiva del Pináculo de las Naranjas (previo 2000)

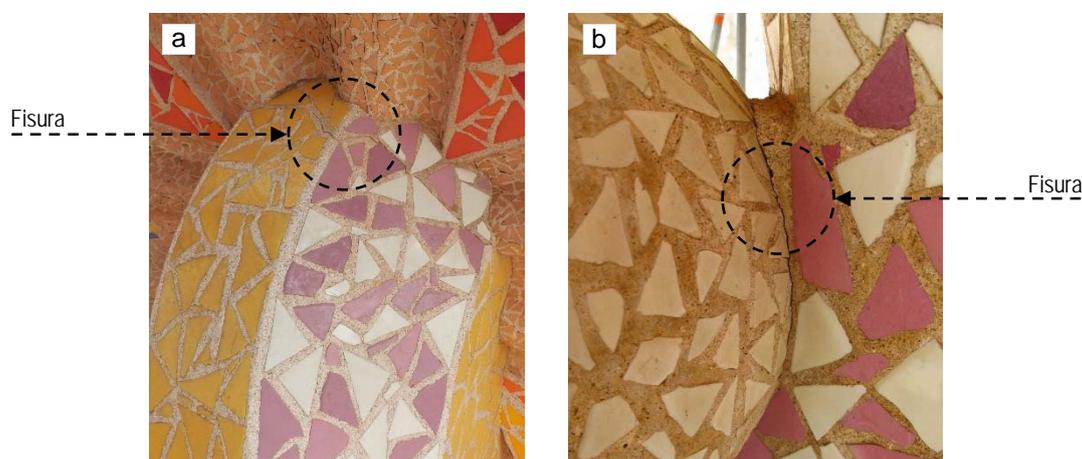


Figura 3.32: Fisuras en el rejuntado a) Parte superior del báculo y b) Junta de las esferas de la mitra del pináculo de Santo Tomás de la Fachada de la Pasión

Exfoliación del vidrio metalizado

En los revestimientos de los pináculos fueron empleadas piezas de vidrio metalizadas de oro y plata. Este tipo de vidrio, como su nombre indica, incorpora una fina lámina de metal en su interior, que se encuentra protegida por una fina capa de vidrio soplado llamada "cartellina" (Dal Bianco et al, 2012). Durante las inspecciones realizadas en los pináculos de la 2ª y 3ª etapa, estos vidrios además de presentar las fisuras anteriormente descritas, se observó, también, que la mayoría experimentaban un proceso de exfoliación en diferentes grados de afectación según la inclinación del revestimiento.

En los paramentos resguardados o verticales, tales como los revestimientos de las piezas Bein y en el revestimiento de la cruz del pináculo (ver figura 3.33a y b), los vidrios metalizados presentaban un cambio de coloración. Amarillo en el caso de los vidrios dorados y blanco en el de los plateados. En cambio, en las partes de este tipo de revestimiento con cierto grado de inclinación, como en la zona del anillo del pináculo de Santo Tomás (ver figura 3.34a), los vidrios se encontraban en un estado de degradación más avanzado. Como se puede observar en la figura 3.34b, estos presentaban un proceso de exfoliación de la "cartellina" y de la fina lámina de metal que alcanzaba en algunos puntos la parte posterior de las piezas de color azul.

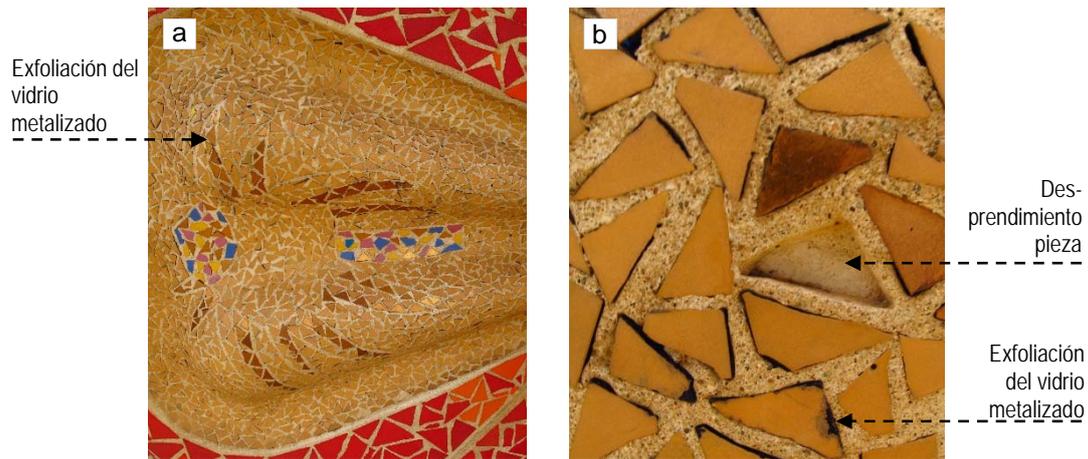


Figura 3.33: a) *Trencadís* dorado de la cruz de la mitra del pináculo y b) Detalle del revestimiento

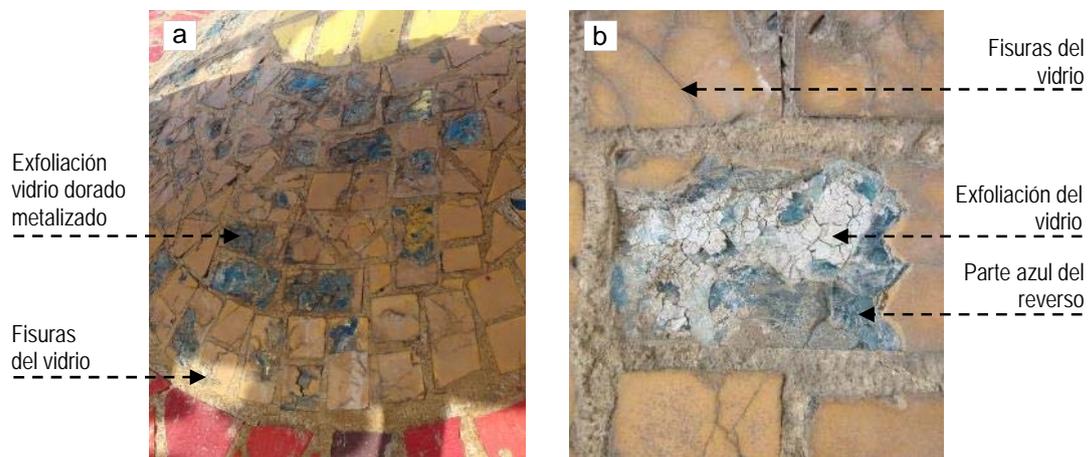


Figura 3.34: a) *Trencadís* dorado de la parte del anillo del pináculo y b) Detalle del revestimiento

En los pináculos Sotoo, a pesar de ser de más reciente construcción, se observó también el proceso de exfoliación de este tipo de vidrio (ver figura 3.35a y b). Teniendo en cuenta las condiciones de estos daños, se podría establecer que una de las causas de su exfoliación se debe a la entrada de agua en su interior, por tanto, las zonas más afectadas son las que por su inclinación puede existir una mayor acumulación de agua.

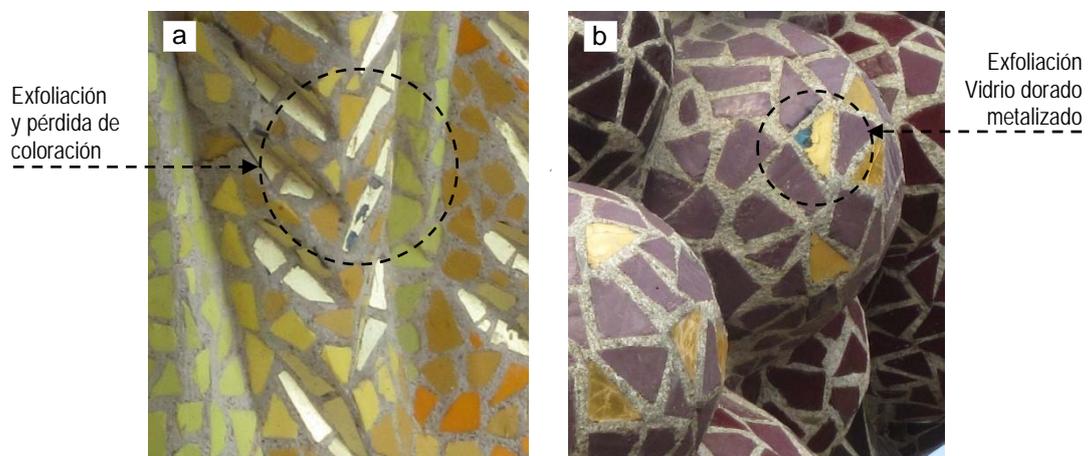


Figura 3.35: Detalle *trencadís* dorado a) Pináculo de las Espigas (2010) y b) P. de la Uva negra (2003)

Presencia de agentes biológicos / Manchas

Como se ha apuntado anteriormente, en el *trencadís* del pináculo de Santo Tomás se detectó la presencia de agentes biológicos en algunas superficies, en especial en las huellas de las piezas de vidrio desprendidas (ver figura 3.25b), lo que indica la existencia de fisuras en el revestimiento y la posterior entrada de agua antes de la caída. Asimismo, se localizaron manchas en las superficies del material de rejuntado (ver figura 3.36a). Todo ello apunta a una presencia continuada de agua y/o humedad en el pináculo, además de la deposición en el tiempo de partículas en las superficies.

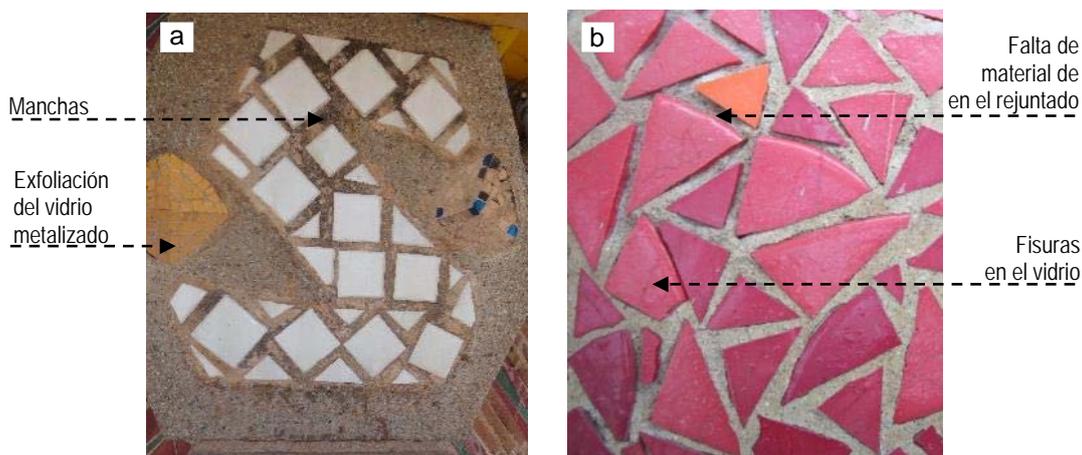


Figura 3.36: a) Manchas en el rejuntado y b) Falta de material de rejuntado en el *trencadís*

Falta de material en el rejuntado / Aire ocluido

En las inspecciones en el pináculo de Santo Tomás y en los pináculos Sotoo se localizaron zonas en el *trencadís* con falta de material de rejuntado, tal y como se puede apreciar en las figuras 3.36b y 3.37a, respectivamente. De igual modo, en algunos de los pináculos Sotoo se observó zonas con huellas de burbujas de aire ocluido (ver figura 3.37b). Ambos fenómenos se relacionan directamente con el uso de una pasta de hormigón de consistencia seca, incapaz de rellenar todos los espacios del rejuntado del *trencadís* y de liberar el aire retenido en el molde durante su vertido. Cabe la posibilidad que se deba a problemas relacionados con la ejecución de las piezas, especialmente con el vibrado del material vertido.

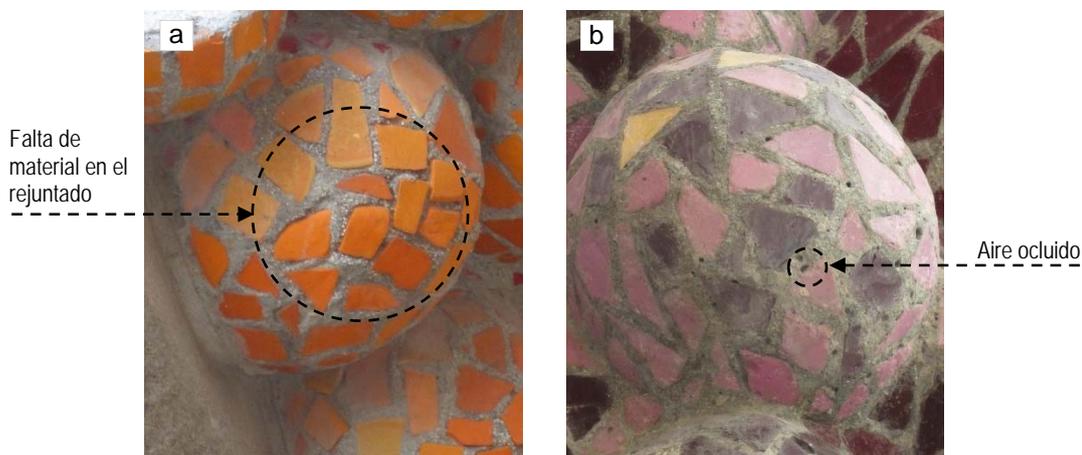


Figura 3.37: *Trencadís* pináculos Sotoo a) Pináculo de las naranjas 1TPI (previo 2000) y b) Pináculo de la uva negra 2TPS (2003)

3.5.2 Hipótesis de las causas

El origen de la degradación del *trencadís* no es debido a un único factor, si no, más bien, al resultado de la concatenación de diferentes procesos. En el esquema de la figura 3.38 se establecen las causas de los daños detectados en el revestimiento de los pináculos de la 2ª y 3ª etapa.

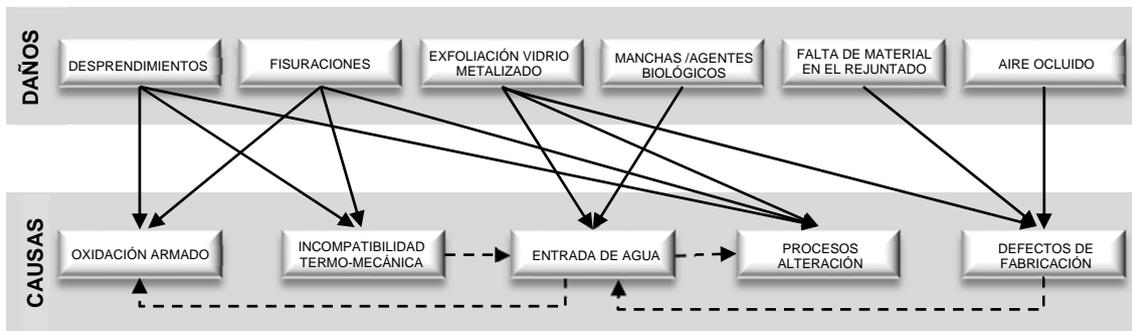


Figura 3.38: Esquema de las causas de los daños localizados en el *trencadís*

Como se aprecia en la figura 3.38, la entrada de agua en el interior del revestimiento supone uno de los principales factores de degradación, desencadenando tres procesos diferentes: efectos por ciclos de hielo/deshielo, reacciones químicas y deformaciones por ciclos de mojado/secado. En el primer proceso, el agua situada en los poros internos del revestimiento puede provocar fisuras o desprendimientos de material debido a variaciones de su volumen por los efectos de los ciclos de hielo/deshielo.

En el segundo proceso, el agua actúa de dos maneras distintas: como disolvente y como vía de transporte. En estado líquido, debido a su capacidad disolvente, es uno de los elementos determinantes para el inicio de las reacciones químicas nocivas o procesos de alteración de los materiales, contribuyendo, por ejemplo, a que se produzcan fenómenos de lixiviación o reacciones alcali-sílice. Baste como muestra el proceso de exfoliación de las piezas de vidrio metalizadas del *trencadís*, más acentuado en las superficies con más tendencia a la acumulación de agua (ver figura 3.34). Por otra parte, el agua actúa como vía de transporte de entrada de iones cloruros y sulfatos que potencian la corrosión de las armaduras y/o procesos de alteración de carácter expansivo (ver figura 3.38). Como se ha observado en el pináculo de SantoTomás, dichos procesos han ocasionado fisuras y el desprendimiento de partes del revestimiento (ver figura 3.26b).

En el tercer proceso, las variaciones de humedad de la atmosfera producen ciclos de mojado/secado de los materiales, generando deformaciones nada menospreciables; si estas se encuentran coartadas, se traducen en tensiones rasantes que pueden provocar fisuras y pérdida de adherencia de los revestimientos. Además, la presencia continua de agua y humedad facilita la aparición de manchas y de agentes biológicos en las superficies.

La vía preferente de entrada del agua hacia el interior del *trencadís* se localizaría en la interfase, después de su fisuración, entre las piezas de vidrio y el rejuntado. Esta se produce principalmente por la incompatibilización termo-mecánica de sus materiales con distintas propiedades al estar en contacto. En la tabla 3.4 se muestran los valores medios de las propiedades mecánicas y térmicas encontradas en la literatura técnica del vidrio y el mortero (más parecido al micro-hormigón). En ella se aprecia que el coeficiente de dilatación térmica del vidrio es el doble de la del mortero mientras que el módulo de elasticidad del segundo es entre 2,7 y 7,6 veces menor que el del primero. Así, dada una variación de

temperatura, los dos materiales puestos en contacto presentan diferentes tendencias de deformación, dando lugar a tensiones entre los mismos.

Materiales	Módulo de elasticidad (GPa)	Coefficiente de dilatación térmica (°C-1)	Conductividad térmica (W·m-1·K-1)
Mortero	10 - 25	$5 \cdot 10^{-6}$	1,7
Vidrio	68 - 76	$1 \cdot 10^{-5}$	1,1

Tabla 3.4: Propiedades mecánicas y térmicas del mortero y del vidrio (Neville, 2008)

Como consecuencia, se conciben dos posibles mecanismos de roturas: uno por agotamiento de la capacidad resistente a cortante y otro por la generación de un empuje al vacío. El primero de ellos se puede producir cuando la temperatura del vidrio es inferior a la temperatura del micro-hormigón (ver figura 3.39a). En este caso, las tensiones tangenciales generadas superarían la resistencia a cortante de la interfaz entre el micro-hormigón y las piezas de vidrio, causando un posible desprendimiento de las últimas (ver figura 3.24) o bien, su rotura interna por una superación de la resistencia a la tracción del vidrio (ver figura 3.30).

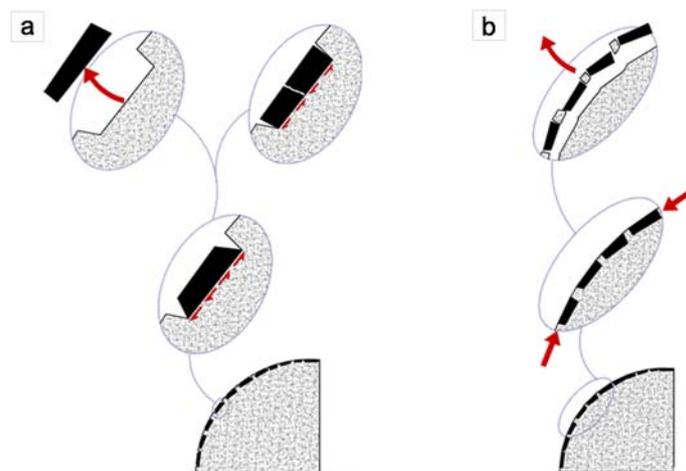


Figura 3.39: Posibles mecanismos de rotura a) $T_{\text{vidrio}} < T_{\text{micro-hormigón}}$ y b) $T_{\text{vidrio}} > T_{\text{micro-hormigón}}$

El segundo mecanismo (ver figura 3.39b) puede producirse cuando la temperatura de las piezas de vidrio es superior a la del micro-hormigón. En esas condiciones surgen fuerzas de compresión entre piezas adyacentes. Al no existir juntas de dilatación, dada la forma curva de las piezas (pináculos Sotoo), esas fuerzas pueden ser suficientes para generar un empuje al vacío del revestimiento, provocando el desprendimiento en un fenómeno análogo al pandeo (ver figura 3.2a). Además, también pueden inducir a fisuras en el rejuntado por un efecto de concentración de tensiones a compresión en los vértices de algunas piezas.

3.6. CONCLUSIONES

A pesar de las numerosas publicaciones realizadas hasta el momento sobre la persona y obra de Antoni Gaudí, aún existen interrogantes alrededor del arquitecto. El estudio realizado permitió conocer otros aspectos de su razonamiento constructivo y el conocimiento en detalle de elementos tan singulares dentro de su obra, como son los pináculos de la Sagrada Familia. A partir de su investigación desde distintos aspectos (histórico, evolutivo y estado actual) se establecen las conclusiones siguientes:

- En base el histórico realizado sobre la aplicación del *trencadís* en la obra de Gaudí, se concluye que el uso de los prefabricados revestidos con *trencadís* en los pináculos fue una solución fruto de la experimentación y de la experiencia constructiva adquirida durante el transcurso de su obra. Así pues, el uso de este sistema facilitó una construcción a gran altura y el control de calidad de los diseños de los revestimientos de *trencadís* antes de ser colocados. Como es sabido, Gaudí supervisaba personalmente y a pie de obra, el proceso de construcción y el acabado de las piezas prefabricadas de estas estructuras decorativas.
- Otra de las conclusiones derivadas del estudio histórico trata sobre la elección del material empleado en el *trencadís* de los pináculos, el vidrio de Murano. El arquitecto, consciente de la degradación de los materiales a la intemperie y de la dificultad de acceso a los pináculos para una posible reparación, vio en la pasta de vidrio, a partir del estudio de mosaicos del siglo XII, un material con la brillantez deseada y suficientemente durable para la aplicación en el remate de su obra.
- Del análisis sobre la evolución constructiva de la obra, desde su concepción hasta la actualidad, se extraen tres conclusiones. La primera es que el sistema constructivo de los pináculos se mantuvo fiel al diseño de Gaudí. La segunda, es que este sistema adquirió un alto valor arquitectónico e histórico que debe preservarse en la construcción de los nuevos pináculos de la obra. Por último, la tercera conclusión, es que se desconocen las características de los materiales (tipo de conglomerante y naturaleza del árido) empleados en los pináculos de la Fachada de la Pasión, información necesaria para su restauración.
- De la observación del estado de conservación de los pináculos de la obra se concluye que existe una degradación evidente del *trencadís* de estas estructuras y que ésta es más acusada en los de más reciente construcción (Fachada de la Pasión y Sotoo). Dado que se mantuvo el sistema y la procedencia de los vidrios empleados en el *trencadís*, es razonable pensar que la causa de la mayor degradación se debe a las distintas dosificaciones del hormigón y/o a la diferente calidad del cemento empleado o bien, a su incompatibilidad con la pasta de vidrio de Murano.

Desde una reflexión teórica se podría considerar que el incremento de la calidad del cemento durante las últimas décadas se tradujo en una mayor resistencia y rigidez del hormigón y, en consecuencia, en una menor capacidad de absorber de las variaciones dimensionales del *trencadís* de vidrio. Ello dio lugar a tensiones rasantes en estos revestimientos capaces de producir fisuras y el desprendimiento de piezas, tal y como se ha apreciado en las inspecciones.

- En base al análisis comparativo de los daños detectados en el *trencadís* de los pináculos de la 2ª y 3ª etapa se concluye que existen tipos de daños muy parecidos que responden a un similar patrón de comportamiento y/o fruto de unos mismos procesos de degradación. Estos principalmente tienen su origen en mecanismos de degradación físico-mecánicos por la incompatibilidad de deformación entre los materiales (vidrio-micro-hormigón), no obstante, se debe analizar en detalle si además existe algún proceso de alteración químico entre ambos.
- Fruto de las inspecciones realizadas en los pináculos de la 2ª y 3ª etapa (Santo Tomas y Sotoo) se determinan otras cuatro causas, no excluyentes, sobre el origen de los distintos daños detectados. La primera de ellas sería por defectos de fabricación, por el uso de un hormigón de consistencia seca en algunas de las piezas, que ocasionó la presencia de aire ocluido y la falta de material en el rejuntado del *trencadís*.

La segunda de las causas se atribuiría a las deformaciones diferenciales entre revestimientos y/o entre las distintas piezas que conforman los pináculos. Estas habrían provocado, principalmente, la aparición de fisuras en las juntas constructivas de estas estructuras. La tercera causa se asignaría a la baja cuantía de armado de algunos volúmenes de los pináculos debido a su geometría particularmente estrecha y de pequeña dimensión. Cualquier sollicitación habría debilitado su sección resistente y, en consecuencia, provocando fisuras capaces de inducir un desprendimiento.

Por último la cuarta causa, sería por la presencia continuada de agua y/o humedad en el interior del revestimiento y de la estructura. Ello provocó la aparición de manchas y presencia de agentes biológicos en las superficies asimismo, la oxidación de la armadura interna, en el caso de Santo Tomás y la consecuente fisuración y desprendimiento de algunas partes de su revestimiento. Por otro lado, el agua podría haber desencadenado algún proceso de alteración de origen químico en el micro-hormigón, provocando en los pináculos Sotoo los desprendimientos de pequeños volúmenes de este material. Además de la exfoliación generalizada del vidrio metalizado en los pináculos de las distintas etapas podría responder a un proceso de alteración por acción del agua.

CAPÍTULO 4

CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE MUESTRAS

4.1 INTRODUCCIÓN

El revestimiento exterior de *trencadís* de vidrio de Murano de los pináculos de la Sagrada Familia ha estado expuesto a duras condiciones ambientales y climatológicas. La lluvia, el viento, el sol, la contaminación ambiental de las ciudades, producen alteraciones físico-químicas en los revestimientos acelerando su degradación. En el capítulo anterior, se han presentado los signos evidentes de la degradación en este tipo de revestimientos, mostrándose de forma más acentuada en los pináculos de más reciente construcción (Fachada de la Pasión y Sotoo), en comparación con los de la época de Gaudí (Fachada del Nacimiento). En las inspecciones realizadas en los pináculos de estas dos últimas etapas se detectaron fisuraciones y desprendimientos de piezas del *trencadís* de una misma zona y en el caso de los pináculos Sotoo, además, desprendimientos de pequeñas partes del micro-hormigón.

Considerando su estado de conservación, todos los pináculos se cubrieron con una malla de seguridad para evitar riesgos a los visitantes y los trabajadores de la obra. En la figura 4.1a y b se muestra los pináculos de la 2ª y 3ª etapa durante la época de estudio, respectivamente. Como se puede apreciar en el pináculo de Santo Tomás de la figura 4.1a, los trabajos de inspección y restauración de estas estructuras a gran altura requieren una compleja infraestructura de acceso y ello repercute estéticamente en la obra.

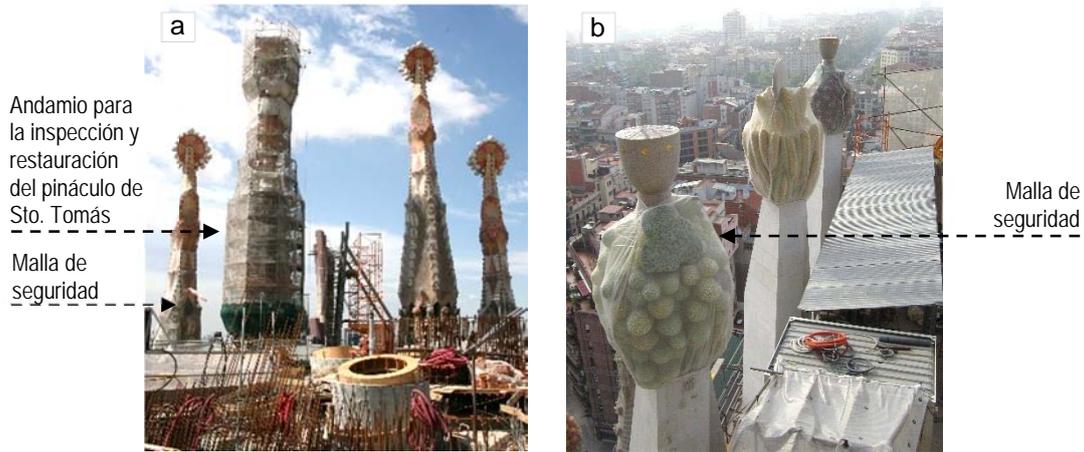


Figura 4.1: Estado de los pináculos en la época de estudio: a) Fachada de la Pasión (2013) y b) Pínáculos Sotoo a 45 m de altura, orientación N-E (2011)

A partir del análisis de los daños observados en estos pináculos, se establecieron dos hipótesis no excluyentes sobre las causas de su aparición; en una se afirmaría que las causas se deben a efectos físico-mecánicos y, en la otra, a efectos químicos: la 1ª hipótesis plantea que la fisuración y la pérdida de adherencia del *trencadís* se deben fundamentalmente a las características físico-mecánicas de los materiales puestos en contacto. El aumento de la calidad del cemento durante la evolución de la obra (IECA, 2014) repercute positivamente en una mayor resistencia y rigidez del hormigón, pero negativamente por cuanto permite una menor absorción de las variaciones dimensionales de las piezas de vidrio. En consecuencia, surgen tensiones rasantes en las interfaces entre ambos materiales que habrían producido las fisuras y los desprendimientos observados. La 2ª hipótesis plantea que la degradación acelerada del *trencadís* en estos pináculos, se debe a procesos de alteración de origen químico en los materiales y/o en su compatibilización, dando lugar a componentes de carácter expansivo capaces de inducir los daños detectados.

La restauración de los pináculos, ya sean los antiguos como los de más reciente construcción, es necesaria para detener su progresivo deterioro. Además, su alto valor patrimonial y arquitectónico exige la conservación de sus características. Por lo que, es prioritario identificar los procesos o causas de la degradación acelerada de dichos revestimientos, evitando su reaparición en partes ya restauradas y/o en los futuros pináculos de la obra. Asimismo, es preciso conocer los materiales existentes y emplear en su reparación los más similares y compatibles, minimizando el riesgo de la formación de nuevo daños.

4.2 OBJETIVO

En el presente capítulo se establecen dos objetivos principales: **caracterizar** los materiales existentes e **identificar** las causas de la degradación de los pináculos de las dos últimas etapas (Fachada de la Pasión y Sotoo), tal y como se muestra en el esquema de la figura 4.2. En cuanto a la caracterización se realiza en los pináculos de la Fachada de la Pasión, dado que se desconoce el tipo de conglomerante y árido empleado. En el presente capítulo se expone el análisis de diversas muestras procedentes de uno de ellos. A partir de los resultados obtenidos se conocerá el estado de conservación de los materiales analizados y se identificará también si existe algún proceso de alteración.

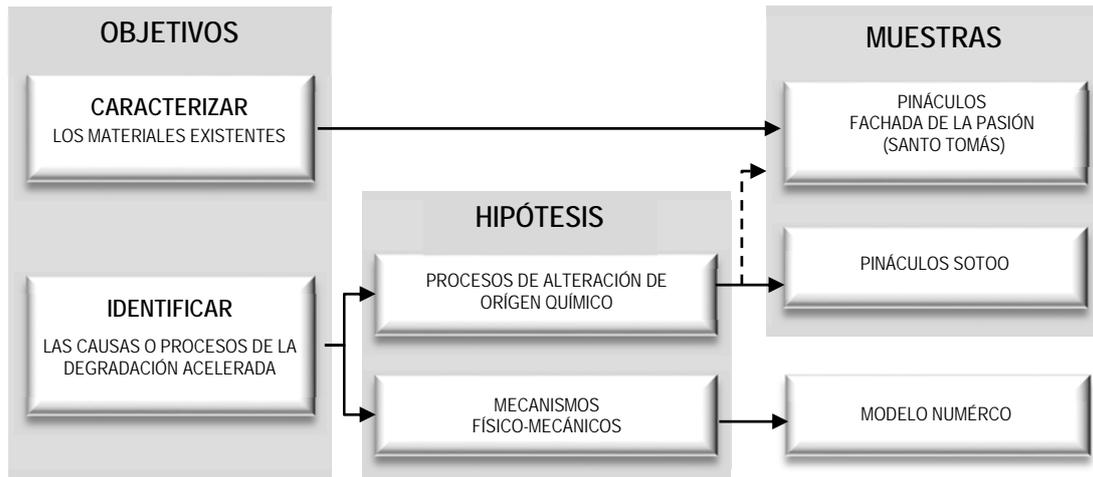


Figura 4.2: Esquema de los objetivos y de las vías de investigación expuestas en el capítulo

En relación al objetivo de identificar las causas, se consideran las dos hipótesis planteadas en el capítulo anterior: degradación por procesos de origen químico y/o degradación por mecanismos físico-mecánicos, tal y como se muestra en la figura 4.2. En la 1ª hipótesis, el análisis de la compatibilización química se centra en muestras procedentes de los pináculos Sotoo, en los que se produjeron caídas de piezas de *trencadís* y daños en el interior del micro-hormigón. Por otro lado, la validación de la 2ª hipótesis por mecanismos físico-mecánicos se realiza mediante un modelo numérico simplificado de las tensiones surgidas en el revestimiento *trencadís* (ver figura 4.2).

Para alcanzar estos objetivos, en el presente capítulo se expone primero la localización y descripción de las muestras extraídas de los distintos pináculos (apartado 4.3). Con posterioridad, se explica la campaña experimental desarrollada para su caracterización y análisis y la razón de ser de los ensayos efectuados en cada una de las muestras suministradas (apartado 4.4). A continuación, se detallan los resultados obtenidos en los distintos ensayos y su interpretación y análisis (apartado 4.5). Por otro lado, en el apartado 4.6, se presenta el modelo numérico de las tensiones surgidas en el revestimiento de *trencadís* y los resultados obtenidos en la validación de la 2ª hipótesis planteada. Finalmente, se exponen las conclusiones del estudio y algunas directrices para la futura rehabilitación de los pináculos de la obra (apartado 4.7).

4.3 DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS

La Dirección Facultativa de la obra facilitó las muestras extraídas de los pináculos donde se estaban realizando los trabajos de saneamiento. Unas procedían del pináculo de Santo Tomás (T), perteneciente al conjunto de la Fachada de la Pasión, y las otras a los pináculos Sotoo (S) de la almendras y de las espigas, situados a 30 y 45 m de altura, respectivamente.

4.3.1. Localización

Pináculo de Santo Tomás

En la tabla 4.1 se presenta la localización e imágenes de las muestras del pináculo de Santo Tomás. En la parte superior de la tabla se sitúan en la planta y alzado la ubicación exacta de las cuatro muestras extraídas y analizadas en el estudio: T.1, T.2, T.3 y T.4.

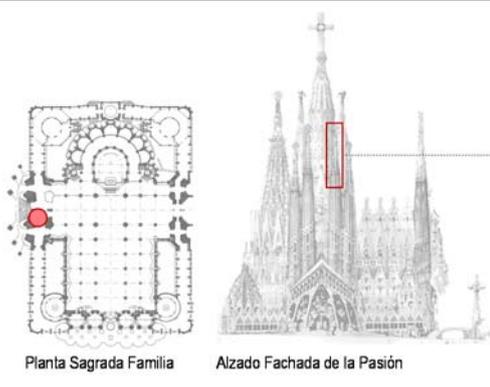
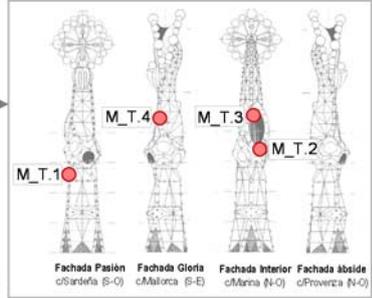
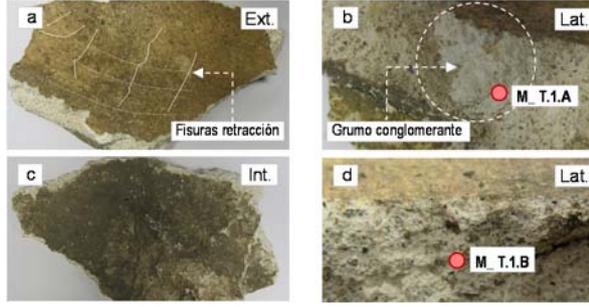
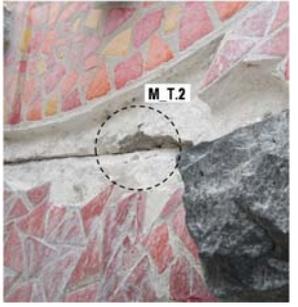
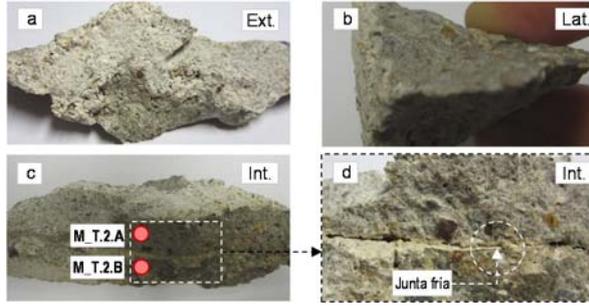
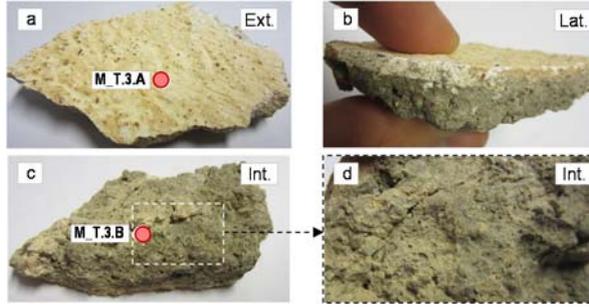
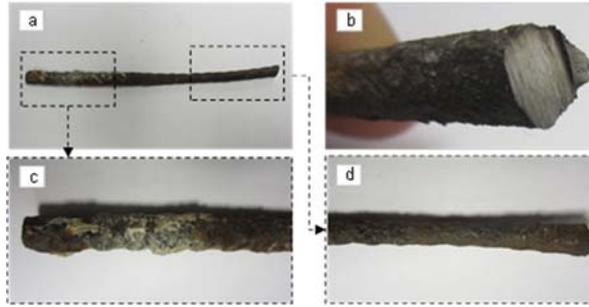
Muestras	Lugar de extracción	Detalles de la muestra
<p>PINÁCULO DE SANTO TOMÁS (2n Etapa)</p>		
<p>T.1. Orientación: (S-O) c/ Sardenya Altura: 100 m</p>		
<p>T.2. Orientación: (N-O) c/ Marina Altura: 102 m</p>		
<p>T.3. Orientación: (N-O) c/ Marina Altura: 105 m</p>		
<p>T.4. Orientación: (S-E) c/ Mallorca Altura: 105 m</p>		

Tabla 4.1: Muestras extraídas del pináculo de Santo Tomás

La primera de ellas (T.1) se situaba en el alzado correspondiente a la calle Sardenya, a una altura aproximada de 100 m y pertenecía al revoque de mortero de una de las juntas constructivas del remate, donde también se ubican las piedras negras de basalto en voladizo (ver tabla 4.1). Estas juntas presentaban un alto nivel de fisuración y su substitución requería conocer el tipo de conglomerante y árido empleado en el mortero existente, con el fin de evitar la formación de daños y no modificar el aspecto original del pináculo.

Las muestras T.2 y T.3 fueron extraídas de la salida superior del óculo del pináculo, situado en el alzado del interior de la basílica a una altura aproximada entre 102 y 105 m, respectivamente (ver tabla 4.1). La muestra T.2 pertenecía a la parte inferior de dicha salida, donde se localizó una de las juntas entre las piezas prefabricadas del pináculo; se extrajo parte del hormigón de una de ellas con el fin de analizar su estado y composición. La muestra T.3 pertenecía al revoque de mortero interno de la salida y se encontraba expuesta parcialmente a la intemperie; presentaba fisuraciones y signos de haber perdido su coloración, por lo tanto, su caracterización permitiría definir un material similar para su substitución y conocer su estado de conservación.

Finalmente, la muestra T.4 pertenecía a la armadura interior de una de las piezas prefabricadas del remate del pináculo, situada en el alzado lateral correspondiente con la calle Mallorca y a una altura aproximada de 105 m (ver tabla 4.1). Como se puede apreciar en la figura de su lugar de extracción, se trataba de una de las zonas donde se produjo un desprendimiento de un conjunto de piezas del *trencadís*, provocado por el aumento de volumen del armado interno debido al proceso de oxidación. El motivo de su análisis era conocer su soldabilidad y determinar si era posible realizar una soldadura de refuerzo. Por otra parte, es de suponer que el armado del pináculo era de las mismas características, por lo que los resultados obtenidos de su análisis serían extensibles a toda la estructura.

Pináculos Sotoo

En el caso de los pináculos Sotoo se tomaron dos muestras (ver tabla 4.2). La 1ª de ellas (S.1) pertenecía al pináculo de las almendras, uno de los primeros construidos en la 3ª etapa, se sitúa a 30 m de altura en la orientación suroeste y corresponde a la Fachada de la Pasión. Como se puede apreciar en la figura de su lugar de extracción de la citada tabla, la muestra S.1 era uno de los volúmenes de micro-hormigón desprendidos, descritos en el capítulo anterior, y se requería su análisis para determinar si existía algún proceso de alteración de origen químico que hubiera inducido a su rotura.

La 2ª de las muestras de los pináculos Soto (S.2) también correspondía a uno de los desprendimientos de micro-hormigón descritos (ver tabla 4.2). Este se localizó en el pináculo de las espigas, situado a 45 m de altura en la orientación noreste y corresponde a la Fachada del Nacimiento.

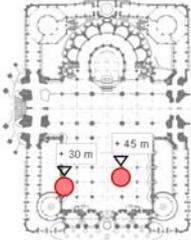
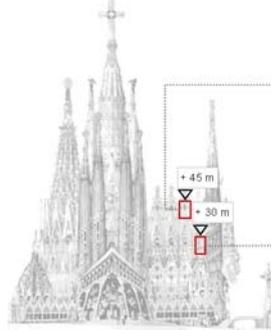
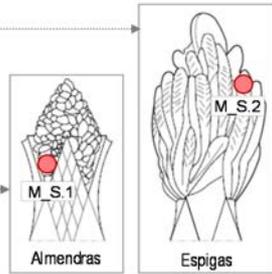
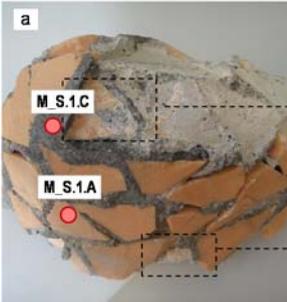
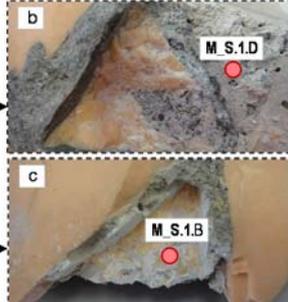
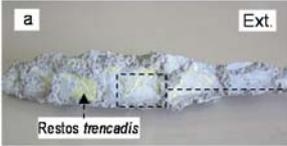
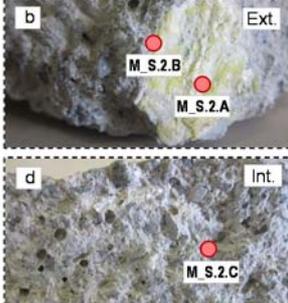
PINÁCULOS SOTOO (3ra Etapa)	 Planta Sagrada Familia	 Alzado Fachada de la Pasión	 Alzados pináculos Sotoo
Muestras	Lugar de extracción	Detalles de la muestra	
S.1. Orientación:(S-O) c/ Sardenya Altura: 30 m	 M.S.1	 M.S.1.C M.S.1.A	 M.S.1.D M.S.1.B
S.2. Orientación:(N-O) c/ Marina Altura: 45 m	 M.S.2	 Ext. Restos trencadís M.S.2.B	 Ext. M.S.2.B M.S.2.A Int. M.S.2.C

Tabla 4.2: Muestras extraídas de los pináculos Sotoo

4.3.2. Inspección visual de las muestras

A partir de la inspección visual realizada en las muestras descritas con anterioridad, en la tabla 4.3 se presenta un resumen de sus principales características y algunas observaciones detectadas durante la inspección. En lo que sigue, se describirá en detalle cada una de ellas.

Pináculo de Santo Tomás

Muestra T.1_Mortero de las juntas constructivas del remate del pináculo

La muestra T.1 tenía unas dimensiones aproximadas de 150x95 mm y un espesor de 15 mm. En su cara exterior presentaba una tonalidad de color beige y en ella se podía apreciar la direccionalidad circular del maestreado realizado durante su colocación y pequeñas fisuras radiales, probablemente fruto de la retracción del mortero, tal y como se puede apreciar en la figura a de la tabla 4.1. En los laterales de la misma se observó diversas características del árido y del conglomerante empleado. El árido, de color oscuro, presentaba una forma redondeada y un tamaño máximo aproximado de 1,5 mm. El conglomerante, de color blanco, podría indicar que se trataba de un cemento portland blanco o cal. Cabe señalar que en

una de las zonas se detectó un grumo del mismo no disuelto y una huella de un vidrio desprendido (ver figura b de la tabla 4.1). Asimismo, en su cara interior se apreció restos de suciedad de un color gris oscuro que indicaban su despegue del soporte previo a la extracción (ver figura c de la tabla 4.1).

MUESTRAS	DIMENSIONES	CARACTERÍSTICAS	OBSERVACIONES	
SANTO TOMÁS	T.1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 150x95 mm ▪ e=15 mm 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Exterior: mortero de color beige; acabado maestreado; ▪ Interior: árido redondeado $\leq 1,5$ mm; conglomerante de color blanco; 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pequeñas fisuras radiales en la capa exterior; ▪ Grumo de conglomerante no disuelto; ▪ Huella de un vidrio desprendido; ▪ Deposición de suciedad en la parte interior;
	T.2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 100x35 mm ▪ e=20 mm 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Exterior: fina capa de mortero de color blanco; ▪ Interior: micro-hormigón; árido ≤ 5 mm; conglomerante de color gris; 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Junta fría de color blanco en el micro-hormigón con pequeñas rendijas de aire;
	T.3	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 65x30 mm ▪ e=5 y 10 mm 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Exterior: (2,5 mm) color beige; acabado liso; árido fino; conglomerante de color blanco; ▪ Interior: superficie irregular; árido ≤ 5 mm; conglomerante color gris; 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta porosidad y coquera o deficiencia del hormigonado en la parte interior;
	T.4	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 120 mm ▪ e= 6 mm 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ barra corrugada 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Oxidación y ha perdido parte de su sección transversal;
SOTOO	S.1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 120x210 mm ▪ Alt: 90 mm 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Exterior: (10 mm) color gris oscuro; árido ≤ 6 mm; ▪ Interior: gris claro; árido ≤ 6 mm; 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Huellas de piezas desprendidas de <i>trencadis</i>; ▪ Espacios vacíos en el rejuntado; ▪ Fina capa de color blanco en el interior del vidrio; micro-hormigón e interfase;
	S.2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 350x60 mm ▪ e=60 mm 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Micro-hormigón; color gris; árido ≤ 6 mm; aire ocluido \varnothing 1-3 mm; 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Restos de piezas de <i>trencadis</i> en la parte exterior; ▪ Fina capa de color blanco en el interior del vidrio; micro-hormigón e interfase;

Tabla 4.3: Características de las muestras analizadas en el estudio

Muestra T.2_Hormigón de una de las piezas del remate del pináculo

La muestra T.2 era de forma triangular con unas dimensiones aproximadas de 100x35 mm y un espesor máximo de 20 mm (ver figura b de la tabla 4.1). En la superficie más próxima al exterior del pináculo, se apreció una capa de mortero de una tonalidad blanca de pocos milímetros de espesor que, observando el lugar de su extracción, correspondía al mortero empleado para tapar la junta entre piezas (ver figura a de la tabla 4.1).

En los laterales de la muestra se apreciaron tres tonalidades de material claramente diferenciadas, tal y como se puede observar en la figura c de la tabla 4.1. La primera y más clara correspondía al mortero descrito con anterioridad y las dos siguientes de un color gris claro y oscuro, se encontraban separadas por una junta longitudinal. En ella se apreciaron diversas rendijas de aire y una finísima capa blanca en la

interfaz entre las dos tonalidades de hormigón (ver figura d de la tabla 4.1). Teniendo en cuenta que ambos tipos de micro-hormigón presentaban una misma forma y granulometría del árido (≤ 5 mm), se dedujo que esta junta se había producido durante la producción de las piezas; primero habrían vertido una pequeña cantidad de hormigón para rellenar las juntas del *trencadis* y posteriormente al verter el resto, se creó esta junta fría entre los dos tiempos de vertido.

Muestra T.3_Enlucido de mortero de la salida superior del óculo

La muestra T.3, con unas dimensiones aproximadas de 65x30 mm y con un espesor entre 5 y 10 mm, presentaba también dos caras claramente diferenciadas: la exterior, de un color beige con un acabado liso y un árido fino y la interior de color gris, una superficie irregular y un árido más grueso (ver figura a, b y c de la tabla 4.1). La capa exterior, de aproximadamente de 2,5 mm de espesor, pertenecía al enlucido de la salida del óculo y su color blanco indicaba que estaba realizado con un conglomerante de cal o de cemento blanco. La parte interior de la muestra se caracterizaba por un conglomerante de cemento gris y un árido más grueso, con un tamaño máximo aproximadamente de 5 mm, parecido al de la anterior muestra T.3 (ver figura d de la tabla 4.1). Lo cual indicaría que también formaba parte de una de las piezas prefabricadas del remate pináculo. Cabe destacar que en esta parte de la muestra se apreció una cierta porosidad y una coquera o deficiencia del hormigonado.

Muestra T.4_Armadura de las piezas

La muestra T.4 tenía una longitud aproximada de 120 mm y un diámetro de 6 mm, este último valor indicaba que se trataba de un estribo. Como se puede apreciar las figuras de la tabla 4.1, el estribo analizado se encontraba en proceso de oxidación y ya había perdido parte de su sección transversal. A pesar de ello, se podía intuir en la superficie las corrugas del estribo y aún conservaba la mayor parte de su sección.

Pináculos Sotoo

Muestra S.1_Pináculo de las almendras

Las dimensiones de la muestra S.1 en la base eran de 120x210 mm y en altura de 90 mm (ver figura a de la tabla 4.2). En ella se apreció diversas huellas de piezas desprendidas del *trencadis* de vidrio totalmente lisas. Asimismo, se observó que el micro-hormigón de la muestra no había rellenado todos los espacios del rejuntado y que éste presentaba dos tonalidades: la exterior de 10 mm de espesor de un color más oscuro y la interior, de un color gris claro (ver figura b de la tabla 4.2). Estas dos tonalidades del micro-hormigón de la muestra podrían indicar una antigua reparación. No obstante, el examen en detalle las burbujas de aire ocluido entre ambas tonalidades señalaba que procedían de una misma amasada. Es importante destacar que se apreció una fina capa de material de color blanco en el interior, en la interfaz entre las piezas de vidrio desprendidas y en el micro-hormigón (ver figura b y c de la tabla 4.2), este material podría ser fruto de algún proceso de alteración.

Muestra S.2_Pináculo de las espigas

La muestra S.2 tenía unas dimensiones de 350x60 mm y un espesor 60 mm. Como se puede observar en figura a de la tabla 4.2, su parte exterior presentaba restos del revestimiento de *trencadis* de vidrio aún adherido. Del mismo modo que en la muestra S.1, se detectó una fina capa de color blanco en el interior y en las interfases del vidrio y el micro-hormigón (ver figuras b y d de la tabla 4.2). En la parte

interior del hormigón se apreció el tamaño máximo del árido empleado, no mayor a 6 mm, y pequeñas burbujas de aire ocluido entre 1-3 mm de diámetro.

4.4 CAMPAÑA EXPERIMENTAL

En la tabla 4.4 se presentan las distintas partes de material extraídas de cada una de las muestras descritas en el apartado anterior, así como los diferentes ensayos de caracterización efectuados. Las técnicas utilizadas fueron: difracción de rayos x (DRX); análisis térmico (ADT-TG); microscopía metalográfica; microscopía electrónica de barrido (MEB).

MUESTRAS		DESCRIPCIÓN		ENSAYOS		
Pináculo Sto. Tomás Fachada de la Pasión (2n Etapa)	T.1	A	Grumo conglomerante	(ver figura b de la tabla 4.1)	Difracción Rayos X (DRX) Análisis térmico diferencial (ADT) Termo gravimétrico (TG)	
		B	Mortero enlucido	(ver figura d de la tabla 4.1)		
	T.2	A	Hormigón (exterior)	(ver figura c de la tabla 4.1)		
		B	Hormigón (interior)	(ver figura c de la tabla 4.1)		
	T.3	A	Mortero enlucido	(ver figura a de la tabla 4.1)		
		B	Hormigón	(ver figura c de la tabla 4.1)		
	T.4		Estribo	(ver figuras de la tabla 4.1)		Microscopía metalográfica
	Pináculos Sotao (3r Etapa)	S.1	A	Vidrio de Murano		(ver figura a de la tabla 4.2)
B			Interfaz Vidrio-Hormigón	(ver figura c de la tabla 4.2)		
C			Hormigón (exterior)	(ver figura a de la tabla 4.2)		
D			Hormigón (interior)	(ver figura d de la tabla 4.2)		
S.2		A	Vidrio de Murano	(ver figura a de la tabla 4.2)	Microscopía electrónica de barrido (MEB)	
		B	Interfaz Vidrio-Hormigón	(ver figura b de la tabla 4.2)		
		C	Hormigón	(ver figura d de la tabla 4.2)		

Tabla 4.4: Campaña de ensayos realizada para la caracterización de las muestras

Los ensayos de difracción de rayos X (DRX) y el análisis térmico (ADT-TG) facilitaron información cualitativa de las fases cristalinas o semi-cristalinas del material evaluado y permitieron detectar si existía algún elemento anómalo (Alejandre, 2002). La técnica ADT-TG, aunque menos precisa que la DRX, posibilitó, además, clasificar la naturaleza aérea o hidráulica de los conglomerantes mediante la correlación entre los resultados del análisis térmico diferencial (ADT) y termogravimétrico (TG) (Moropoulou et al, 2000). La microscopía metalográfica proporcionó información sobre las características estructurales del metal. Por otro lado, la microscopía electrónica de barrido (MEB) permitió la observación y la caracterización de las superficies de los materiales y, también, aportó información sobre la composición química cualitativa de sus componentes (Alejandre, 2002).

Los ensayos de DRX y MEB se realizaron en los Servicios Científicotécnicos de la Universidad de Barcelona. Para el ensayo de DRX se utilizó un equipo Panalytical X'Pert PRO MPD, para el MEB se empleó un equipo de microscopía electrónica de barrido con energía dispersiva de rayos X ESEM Quanta 200 con microanálisis EDAX. El análisis ADT-TG se efectuó en el Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid. Por otro lado, la microscopía metalográfica se realizó en el Centro de Integridad Estructural y Fiabilidad de los Materiales (CIEFMA) del Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica de la UPC, mediante un microscopio óptico metalográfico Olympus Bx41m.

Todas las muestras (excepto el estribo) antes de ser analizadas se machacaron con un mortero hasta obtener pequeños trozos (< 5 mm). Las muestras destinadas a los ensayos DRX y ADT-TG fueron,

además, tamizadas por una abertura de tamiz inferior a los 0,063 mm y se empleó el polvo obtenido para su análisis. La muestra del estribo (T.4) fue preparada siguiendo la normativa estándar internacional ASTM E3-01.

4.5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.5.1. Muestras del Pináculo de la Fachada de la Pasión (T.1, T.2 y T.3)

En la tabla 4.5 se presenta la caracterización de las muestras T.1, T.2, T.3 mediante las técnicas de ensayo de difracción (DRX) y análisis térmico (ADT-TG). Los resultados de DRX de la tabla indican los componentes químicos y sus intensidades (a través de círculos de diámetro variable en función de la intensidad) de las distintas reflexiones detectadas en los difractogramas de cada una de las muestras analizadas.

Por otro lado, los resultados del ADT-TG muestran las temperaturas y la pérdida de peso que se produjeron durante las transformaciones físico-químicas del material analizado. Estas se relacionan también con componentes químicos presentes en las muestras, a partir de estudios consultados en la literatura técnica. Para facilitar la comprensión de todos estos resultados, a modo de ejemplo, en este apartado se muestra el difractograma DRX (figura 4.3) y el termograma ADT-TG (figura 4.4) de una de las muestras analizadas (T.1.A), el resto se presentan en el Anexo A de este documento.

MUESTRAS		T.1		T.2		T.3	
FÓRMULA QUÍMICA	COMPONENTES	A	B	A	B	A	B
CaCO ₃	Calcita	●	●	●	●	●	●
Ca(OH) ₂	Portlandita		●	●	●		
Ca ₃ Al ₂ O ₆	Aluminato tricálcico					●	●
Ca ₂ SiO ₄	Silicato bicálcico						●
Ca ₂ (Al,Fe) ₂ O ₅	Brownmillerite		●			●	●
SiO ₂	Cuarzo	●	●	●	●	●	●
NaAl Si ₃ O ₈	Albita	●	●	●	●	●	●
KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂	Moscovita	●	●	●	●	●	●
KAlSi ₃ O ₈	Microclina	●	●	●	●	●	●
TEMPERATURAS (°C)	COMPONENTES Y PROCESOS	TEMPERATURAS (°C) (PÉRDIDA DE PESO %)					
< 120	Pérdida de agua	66,5* (1,8)	40,5* / 87,4* (6,6)	86,9* (6,6)	40,6* / 87,4* (5,0)	46,1* (2,2)	40,2* / 85,1* (2,5)
200 - 600	Pérdida de agua unida estructuralmente	233,6* (1,2)	200-600 (2,8)	200-600 (2,7)	200-600 (2,2)	200-600 (4,5)	200-600 (2,3)
400 - 430	Endo. Descomposición hidróxido cálcico	418,2* (2,5)	424,04* (1,0)	422,31* (1,0)	426,31* (1,2)	-	-
400 - 500	Deshidratación hidróxido cálcico	480,8* (2,2)	-	-	-	-	-
570	Transformación del cuarzo	570,4* (13,0)	570,51* (3,6)	570,99* (3,0)	570,52* (5,5)	570,20* (9,5)	569,91* (6,5)
> 600	Descomposición carbonato cálcico	600-750,4* (13,0)	600-712,0* (3,6)	600-708,1* (3,0)	600-725,4* (5,5)	600-736,0* (9,5)	600-731,4* (6,5)
750 - 1100	Exo. Oxidación del Fe (II)	-	887,9* (0,7)	887,3* (0,6)	881,3* (0,4)	-	879,6* (0,4)
HIDRAULICIDAD DEL CONGLOMERANTE		Baja	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta

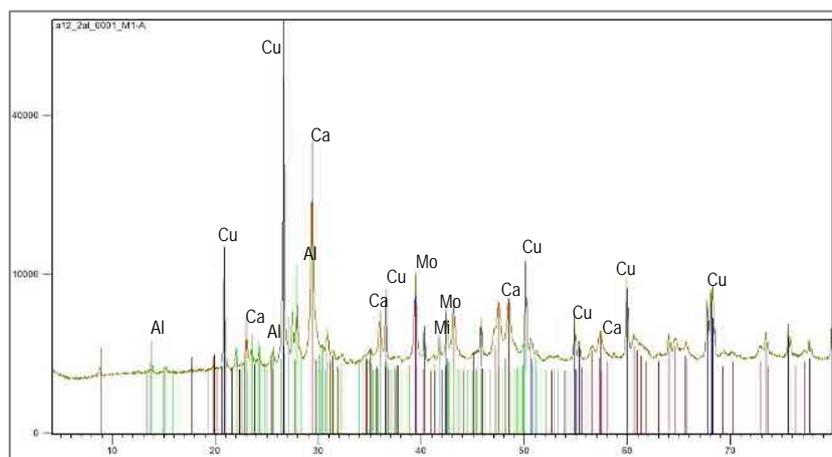
(*) Picos máximos de temperatura del ADT

Tabla 4.5: Resultados de Difracción y Análisis térmico de las muestras

A partir de los resultados DRX se estableció que el árido empleado en todas las muestras analizadas era de naturaleza silícea. En los difractogramas obtenidos, como se puede observar en la tabla 4.5, se detectaron picos de mayor intensidad, correspondientes a los componentes del cuarzo y de la calcita, y de menor intensidad, que se relacionan con la moscovita y minerales del grupo de los feldespatos como la microclina y la albita, que pertenecen a elementos de la serie de la calcosódica (plagioclasas). Todos ellos, excepto la calcita, incorporan silicatos en su composición, por lo que formarían parte del mismo tipo de árido de naturaleza silícea. Además, es razonable considerar que en todo el pináculo de Santo Tomás se empleara el mismo árido durante su construcción. En la muestra T.1.A, del grumo de conglomerante blanco, también se detectó la misma composición del árido, lo que indicaría que se adhirieron fragmentos durante la extracción del material (ver figura 4.3).

El componente de la calcita detectado en todas las muestras se atribuiría a la composición del conglomerante. En la muestra T.1.A este componente indicaría cal en estado carbonatado o bien un cemento blanco. En el resto de muestras T.1.B, T.2 (A y B) y T.3 (A y B) se atribuiría únicamente a un cemento portland, puesto que además de la calcita se localizaron otros componentes correspondientes a este tipo de conglomerante, tales como: la portlandita; el aluminato tricálcico, que es uno de los primeros componentes del cemento portland que reacciona con el agua y el silicato bicálcico, que indica que existen partes del cemento sin hidratar (ver tabla 4.5).

En las muestras T.1.B y T.3 (A y B) se detectó, además, la componente de la brownmillerite o ferrito aluminato tetracálcico (ver tabla 4.5). Su aparición conjunta con los componentes del cemento portland, en especial en la muestra T.1.B y no en la T.1.A, donde se manifestaron restos del árido, sugiere que formaría parte del cemento. Según la literatura técnica, el cemento portland gris tiene una cantidad de hierro entre el 2-5%, mientras que el blanco tiene un 0,1% (Morsli et al, 2009), por lo que se podría establecer que dicho componente indicaría la utilización de un cemento gris en las muestras T.1.B y T.3 (A y B) y las inspecciones visuales lo constatarían (ver tabla 4.1).



Componentes		Origen	
Ca	Calcita	CaCO ₃	Conglomerante
Cu	Cuarzo	SiO ₂	
Al	Albita;	Na Al Si ₃ O ₈	Árido
Mo	Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂	
Mi	Microclina	K Al Si ₃ O ₈	

Figura 4.3: Difractograma de la muestra T.1.A

En la figura 4.4 se presenta el termograma ADT-TG de la muestra T.1.A. En esta técnica de análisis la muestra se sometió a variaciones graduales de temperaturas que van de los 25 °C hasta los 1000 °C, a una velocidad de 10°C/minuto y en una atmósfera de aire con un flujo de 100 ml/min. Durante este proceso se registraron simultáneamente dos tipos de datos: las variaciones de temperatura (ADT) respecto a una muestra inerte de referencia y la pérdida de peso (TG). En el termograma de la figura 4.4 la línea discontinua representada corresponde a la pérdida de peso TG y la continua, al termograma ADT.

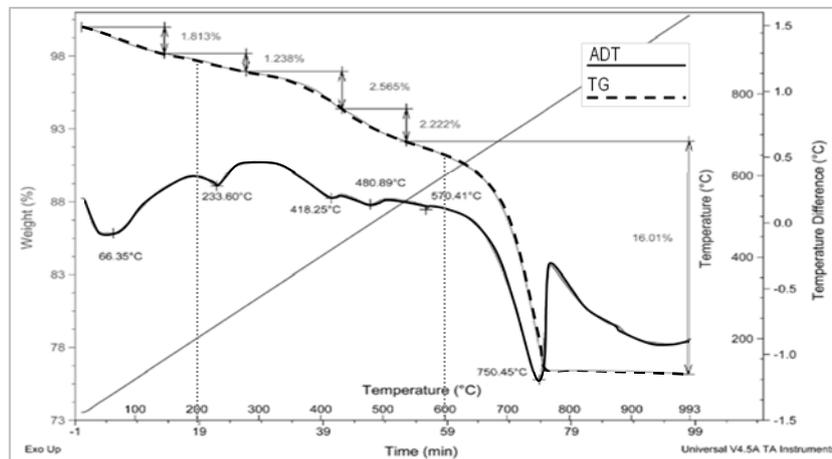


Figura 4.4: Termogramas (ADT-TG) muestra T.1.A

Toda esta información permite identificar las temperaturas donde se producen las transformaciones físico-químicas que experimenta el material analizado durante su descomposición. Estas pueden ser exotérmicas, que desprenden calor o energía cuando se producen, o bien endotérmicas, que requieren o absorben el calor. En el termograma de la figura 4.4 también se indican los picos máximos de temperatura ADT y el porcentaje de pérdida de peso TG de los distintos efectos térmicos registrados. A partir de estudios de la literatura técnica, estos efectos se relacionan directamente con la composición química y la estructura cristalina del material ensayado.

El 1º efecto endotérmico detectado en el termograma ADT de la muestra T.1.A se manifestó a los 66,35 °C, acompañado por un 1,81% de pérdida de su peso (ver figura 4.4), y correspondía a la pérdida de agua de la propia muestra (*Bakolas et al, 1998*). Como se puede observar en la tabla 4.5, dicho efecto fue común en todas las muestras y llegó a representar en algunas un 6,6% de su peso (T.1.B y T.2.A).

El 2º pico endotérmico se produjo a los 233,60 °C, acompañado por un 1,2% de pérdida de su peso. Este se vincularía principalmente con la pérdida de agua unida estructuralmente (*Moropoulou et al, 2003*), lo que reflejaría indicios de un conglomerante hidráulico. En el resto de muestras, que a diferencia de la muestra T.1.A se localizaron componentes de cemento portland en los resultados de DRX, se apreció un efecto endotérmico mayor entre el rango de temperaturas (200-600 °C) que la literatura técnica vincula a este efecto, además de un mayor porcentaje de pérdida de agua (ver tabla 4.5 y anejo A). Ello podría indicar el uso de un conglomerante de cal, en vez de cemento blanco en la muestra T.1.A.

El 3º y el 4º efecto endotérmico detectados en el difractograma de la figura 4.4, con máximos en 418,25 y 480,89 °C, y acompañados por una pérdida de peso del 2,56 y 2,28%, respectivamente, se relacionan con la descomposición y deshidratación del hidróxido cálcico (*Vuk et al, 2002; Sepulcre-Aguilar et al, 2003*). En la tabla 4.5 se puede observar que la descomposición del hidróxido cálcico se produjo en todas las muestras excepto en la T.3, mientras que el proceso de deshidratación se manifestó únicamente

en la muestra T.1.A. Ello podría indicar un porcentaje mayor de hidróxido cálcico en esta última muestra respecto al resto.

El 5º efecto por orden de temperatura, con un máximo en 570,41 °C, pertenece a las reacciones debidas a la transformación de cuarzo (*Martín et al, 2008*), componente del árido manifestado en todas las muestras, tanto en los resultados de ADT como de DRX, tal y como se aprecia en la tabla 4.5. A continuación, el 6º efecto endotérmico tuvo lugar después de los 600 °C, con un máximo en 750,45 °C, y se vincula con la descomposición del carbonato cálcico (*Sepulcre-Aguilar, 2010; Saika et al, 2009*). Como se observa en la tabla 4.5, en todas las muestras se apreció este pico máximo endotérmico por encima de los 700 °C, siendo la muestra T.1.A la que mostró una mayor pérdida de peso (13,0%), de lo que se dedujo que esta tenía una mayor concentración.

En todas las muestras donde se localizaron componentes de un conglomerante de cemento, excepto la T.3.B, se manifestó un pico exotérmico alrededor de 880 °C de temperatura que se atribuyó a la oxidación exotérmica del Fe (II) (*Sanchez-Ramos et al, 2008*). Del mismo modo, que el componente de la brownmillerite o ferrito aluminato tetracálcico, detectado en los resultados de DRX, podría formar parte de este tipo conglomerante (ver tabla 4.5).

Existen estudios en la literatura técnica que clasifican la hidráulidad de los morteros a partir de la relación entre CO₂/H₂O (enlazada químicamente) y el porcentaje de la pérdida de peso de CO₂ obtenidos en análisis ADT-TG (*Moropoulou et al, 2000*). En base a las consideraciones adoptadas en el estudio referenciado y los resultados obtenidos en el estudio, se estableció que la muestra T.1.A se encontraba en el rango de los componentes ligeramente hidráulicos, posible reflejo de un conglomerante de cal hidráulica. Mientras que en el resto de muestras, tal y como se indica en la tabla 4.5, los resultados estuvieron dentro de los componentes altamente hidráulicos y se relacionaría con un conglomerante de cemento.

4.5.2. Resumen resultados muestras pináculo Fachada de la Pasión (T.1, T.2 y T.3)

En base todo lo expuesto, se establece que todas las muestras analizadas se encontraban en buen estado de conservación y en ellas, se utilizó un mismo tipo de árido de naturaleza silíceo, tal y como se indica en el resumen de los resultados de la tabla 4.6.

MUESTRAS	COMPOSICIÓN		ESTADO DE CONSERVACIÓN
	Conglomerante	Árido	
T.1	A B	Cal hidráulica	
T.2	A B	Cemento portland	Buen estado
T.3	A B		

Tabla 4.6: Resultados de la caracterización mediante DRX y ADT-TG

En la muestra T.1, perteneciente a las juntas constructivas del pináculo, se habría empleado un conglomerante mixto, es decir, de cal hidráulica (T.1.A) y cemento portland (T.1.B), con el fin de conseguir un mortero más flexible y con mayor absorción de las deformaciones de la estructura. Cabe destacar que dicha dosificación también fue identificada en el primer pináculo construido por Gaudí y es razonable pensar que la emplearan también en este caso (ver Capítulo 3). A partir de los resultados obtenidos, es difícil determinar si el cemento empleado era gris o blanco, puesto que dejando de lado el color, tan sólo se

distinguen por el porcentaje de hierro. No obstante, la pequeña cantidad de hierro localizada en la muestra T.1.B podría reflejar la composición de un cemento gris.

Por otro lado, la similitud de los resultados obtenidos en las muestras T.2.A y T.2.B, indicaría que el vertido del hormigón en el molde de las piezas prefabricadas de los pináculos fue en dos tiempos y que ello propició a que se formara una junta fría entre las dos capas detectadas en la inspección visual (ver tabla 4.1). Asimismo, la semejanza de resultados entre las dos muestras de la T.3 manifestaría que la T.3.B formaría parte de una capa de mortero y no al hormigón de una de las piezas prefabricadas del remate, como la T.2, tal y como se había determinado durante la inspección visual.

4.5.3. Muestra del armado del Pináculo de la Fachada de la Pasión (T.4)

En la figura 4.5 se presentan las imágenes a distintos aumentos (500, 100 y 50 μm) obtenidas en análisis del estribo del pináculo de Santo Tomás (T.4) mediante un microscopio óptico metalográfico. En la primera de ellas (figura 4.5a) se puede observar que la muestra presenta pequeñas impurezas naturales del acero, apreciándose en su contorno una capa de óxido debido a la corrosión de mismo.

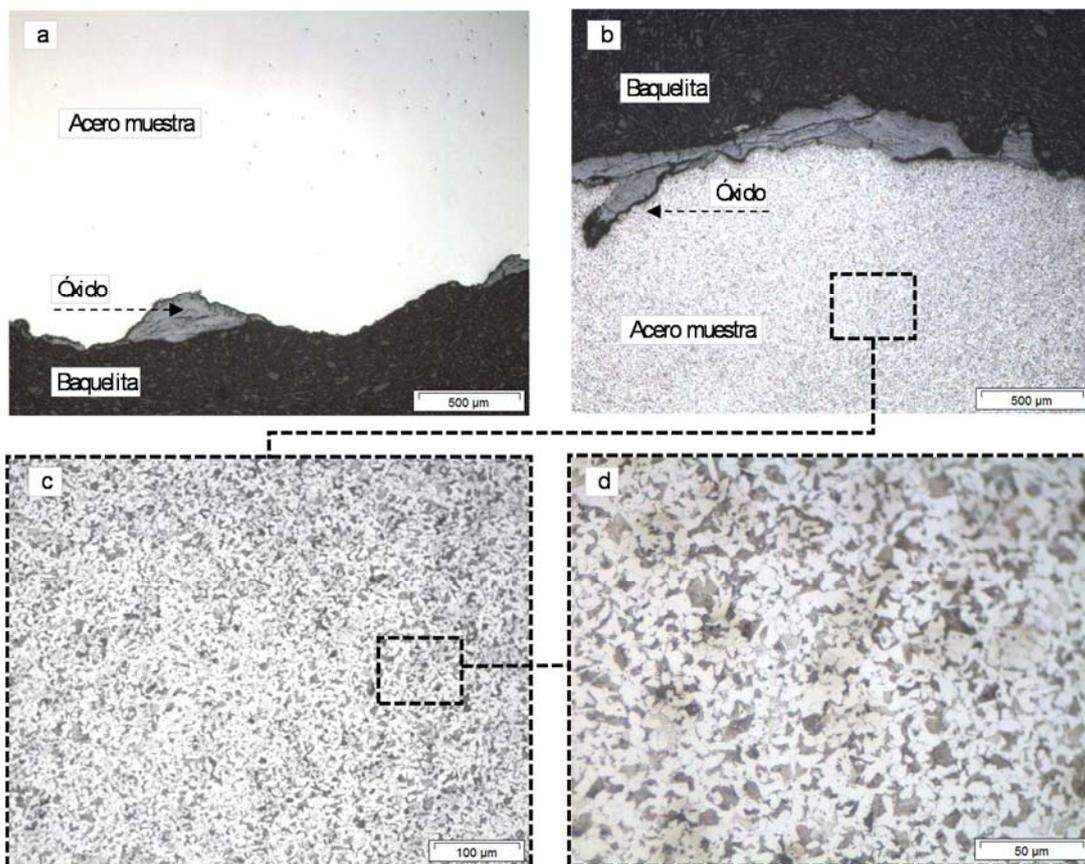


Figura 4.5: a) Perímetro de la Muestra T.4 a 500 μm ; b) Perímetro de la muestra atacada por el reactivo metalográfico Nital; c) Microestructura de la T.4 a 100 μm y d) Microestructura de la T.4 a 50 μm

En la segunda de las imágenes (figura 4.5b) se presenta otra parte del perímetro de la misma muestra T.4. No obstante, a diferencia de la anterior, ésta fue atacada con el reactivo metalográfico Nital (con el 2% de ácido nítrico), permitiendo visualizar así, con el mismo microscopio, la microestructura del acero al carbono formado principalmente por los constituyentes metálicos de la ferrita y la perlita. En esta imagen se aprecia también una capa de óxido, mayor en comparación con la anterior, que penetra en la

sección del metal base, lo cual puede ser un foco de tensiones y, consecuentemente, un posible punto de rotura.

En las siguientes imágenes (figuras 4.5c y d) se presentan en detalle la misma microestructura de la muestra pero esta vez a mayores aumentos. En ellas se aprecian los cristales blancos de la ferrita, formada principalmente por hierro y con un máximo de 0,008% de carbono, y los granos más oscuros de la perlita, constituida por láminas alternadas de cementita (carburo de hierro) y ferrita.

A partir de la estimación óptica de la proporción (ferrita/ perlita), realizada por técnicos del Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalurgia de la UPC, se estableció que se trataba de un metal con un contenido de carbono equivalente de 0,35% y, por lo tanto, no apto para soldaduras con responsabilidad estructural. En el caso que se realizara una soldadura sin responsabilidad estructural en la armadura del pináculo con un acero inoxidable (más noble), podría producirse una corrosión galvánica agravando los daños. Por lo que, sería conveniente substituir, en la medida de lo posible, el armado del pináculo y en los casos que no fuera, protegerlo con un producto anticorrosivo.

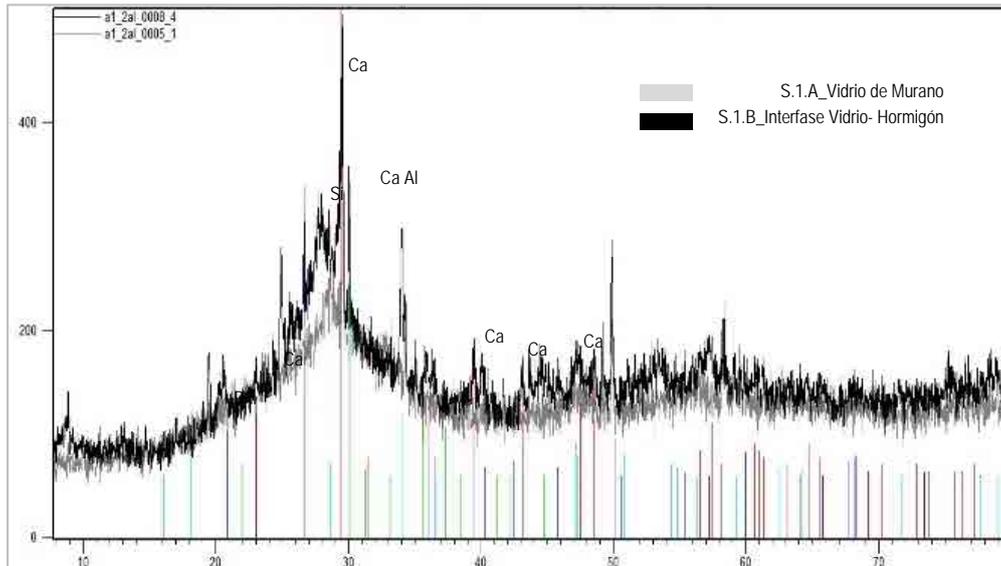
4.5.4. Muestras Pináculo Sotoo de las almendras (S.1)

Muestra S.1.A / S.1.B_Vidrio de Murano / Material interfaz Vidrio-micro-hormigón

Las reflexiones de los difractogramas DRX indican los distintos minerales presentes en una muestra analizada. En un material como el vidrio, con una estructura amorfa y compuesto por gran variedad de minerales, es difícil determinar su composición mediante esta técnica, puesto que los difractogramas se caracterizan por muchas reflexiones de baja intensidad y reducida frecuencia. Sin embargo, es posible detectar si existe alguna anomalía o proceso de alteración si se analizan los difractogramas comparativamente.

En este sentido, en la figura 4.6 se presenta el difractograma comparativo entre la muestra S.1.A y S.1.B, que corresponden al vidrio de Murano y al material de color blanco detectado entre éste con el hormigón, respectivamente. Como se puede observar, la tendencia entre ambos difractogramas es muy similar indicando que podría tratarse del mismo material. Este sería de origen vítreo dadas las características de reflexiones (numerosas y de baja intensidad). Pero además, existirían restos de micro-hormigón adheridos en ambas muestras, puesto que se identificaron reflexiones de componentes propios de este material, como la calcita, la portlandita y el aluminato cálcico (ver figura 4.6).

En el difractograma del material blanco de la interfaz (S.1.B) se detectaron reflexiones dispares respecto la muestra del vidrio (S.1.A). Entre estas, únicamente se pudo identificar la componente de la sílice, que podría pertenecer tanto a la composición del árido empleado en el micro-hormigón, como a otro parte del vidrio analizado. Queda por determinar si el resto de las reflexiones no identificadas podrían responder a fases iniciales de algún proceso reactivo, o bien a otros componentes del micro-hormigón.



Componentes		Origen
Ca	Calcita	CaCO ₃
P	Portlandita	Ca (OH) ₂
Al	Aluminato cálcico	Ca A ₁₂ O ₄
Si	Sílice	Si O ₂
		Vidrio

Figura 4.6: Diffractogramas de las muestras S.1.A y S.1.B

Muestra S.1.C / S.1.D_Micro-hormigón exterior / interior

En la figura 4.7 se presenta el difractograma comparativo entre el hormigón exterior (S.1.C) e interior (S.1.D) de la muestra S.1. Como se puede observar, los difractogramas de ambas muestras son muy parecidos indicando que se trata del mismo material. En ellos se aprecian picos de mayor intensidad que corresponden a los componentes del cuarzo y de la calcita y de menor intensidad, a los de la portlandita y a la moscovita. Los componentes de la calcita y la portlandita pertenecen al conglomerante de cemento portland utilizado, mientras que el cuarzo y la moscovita forman parte de la composición del árido de naturaleza silíceo.

En la comparación entre los dos difractogramas se aprecia que el componente de la calcita es mayor en la muestra de hormigón exterior (S.1.C) y que la componente de la portlandita desaparece en la muestra de hormigón interno (S.1.D). A pesar de estas diferencias, no se detecta ningún componente reactivo, ni componente alguno fruto de una reacción química debido a un proceso de alteración en el micro-hormigón.

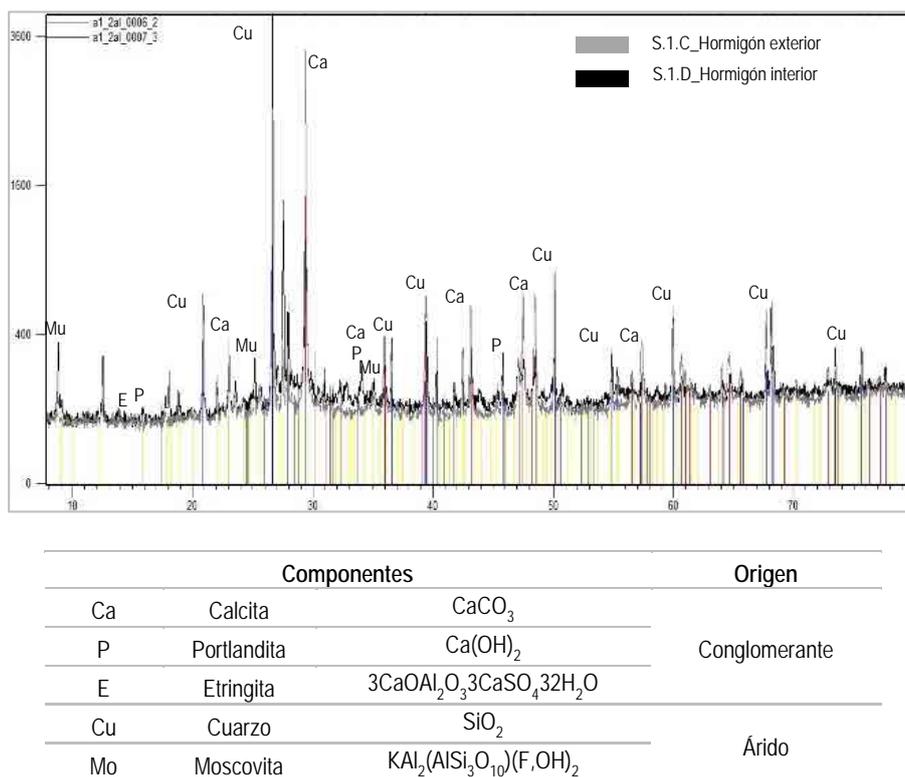


Figura 4.7: Difractogramas de la muestras S.1.C y S.1.D

Análisis comparativo entre las muestras S.1(A, B, C y D)

En la figura 4.8 se presenta la comparación de los cuatro difractogramas de la muestra S.1 (A, B C y D), con el objetivo de poder reconocer el origen de las reflexiones no identificadas en el anterior análisis de la interfaz S.1.B, dado que podrían revelar alguna anomalía.

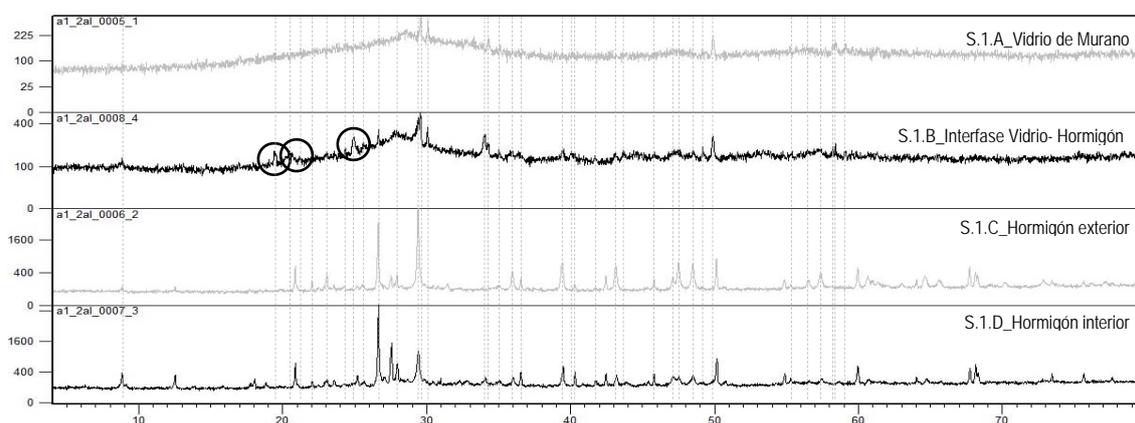


Figura 4.8: Análisis comparativo difractogramas muestra S.1

Como se puede observar, todas las reflexiones del difractograma de la interfaz S.1.B, exceptuando tres destacadas con un círculo, se relacionaron con las reflexiones de los difractogramas de las muestras de micro-hormigón (S.1.C y S.1.D) y/o con las del vidrio (S.1.A). Este hecho indicaría que las tres reflexiones no identificadas podrían corresponder a uno o varios elementos fruto de algún proceso de alteración entre el vidrio de Murano y el micro-hormigón. Dicha interfase se estudia en detalle en el apartado 4.5.4 mediante MEB en la muestra S.2.

4.5.5. Muestras Pináculo Sotoo de las espigas (S.2)

Muestra S.2.A_Superficie vidrio de Murano

En la figura 4.9 se presenta el análisis mediante MEB de una parte de la superficie del vidrio de Murano de la muestra S.2.A. Como se puede observar, la superficie analizada presenta rugosidades y en ella se ha depositado pequeñas partículas de color blanco (ver figura 4.9a).

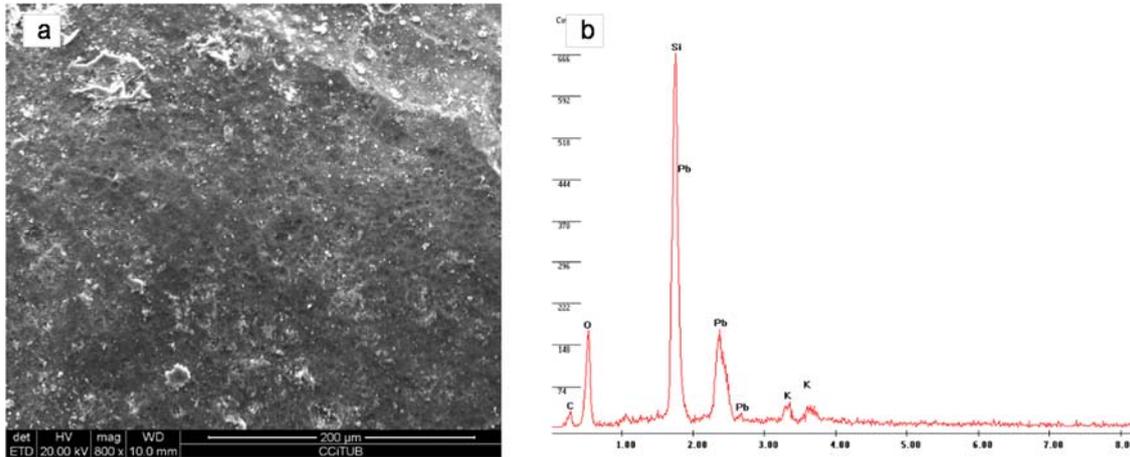


Figura 4.9: a) Superficie del vidrio de Murano (800 x) y b) Análisis mineralógico de la Muestra S.2.A

A partir del análisis elemental químico de esta superficie, presentado en la figura 4.9b, se determinó que las reflexiones obtenidas con mayor intensidad pertenecían a los componentes de la sílice (Si) y del Plomo (Pb). Estos formarían parte de la composición del vidrio de Murano, dado que el dióxido de silicio (SiO_2) es uno de los principales componentes de una estructura vítrea (Fernández, 2003) y el óxido de plomo (PbO), se emplea habitualmente en la producción de vidrios artísticos y decorativos como el vidrio de Murano (Cabrera, 2004). Por otro lado, también se detectaron reflexiones de baja intensidad correspondientes al oxígeno (O), al carbono (C) y al potasio (K). Este último elemento, también pertenecería al vidrio puesto que generalmente se encuentra en su composición en cantidades menores del 1% (Fernández, 2003).

En la figura 4.10 se presenta otra parte de la muestra de la superficie del vidrio (S.2.A) analizada por MEB. En la figura 4.10a se observa que la superficie del vidrio se encuentra deslaminada y fracturada, debido a los trabajos de saneamiento del pináculo. En la figura 4.10b se presenta una imagen ampliada de la zona anterior, donde se identifica el gel resultante fruto de una reacción álcali-sílice. El cual se caracteriza por una morfología cristalina y cuarteada. La reacción álcali-sílice se produce cuando los álcalis presentes en el hormigón (Na^+ , K^+ e ión OH), fruto de la hidratación del cemento portland, reaccionan con alguna fuente de sílice reactiva.

En el caso de estudio, dicha reacción no se produjo con los áridos empleados en la dosificación del micro-hormigón, sino con la sílice procedente del vidrio de Murano. Los pináculos, al encontrarse expuestos a la intemperie (lluvia o la humedad ambiental), tuvieron un flujo de agua del exterior al interior y viceversa, que facilita dicha reacción. Como resultado se obtiene el gel detectado, que se deposita entre las láminas de la estructura del vidrio. En la figura 4.10c se observa en detalle este elemento anómalo en dos fases de su formación: del tipo gel, mediante pequeños polígonos planos en la parte central de la imagen, y del tipo cristalino, en la zona superior e inferior izquierda de la misma imagen. El gel observado

en la parte central, de mayor presencia, se asemejaría al denominado en la literatura técnica como “gel masivo”, compuesto por dióxido de silicio (SiO_2), óxido de calcio (CaO), óxido de potasio (K_2O) y, ocasionalmente, por óxido de sodio (Na_2O) (Menéndez, 1993). Mientras que el del otro tipo se vincularía con el denominado “cristales tipo espada”, que tendrían la misma composición que la anterior, pero con una mayor relación K/Ca (Menéndez, 1993).

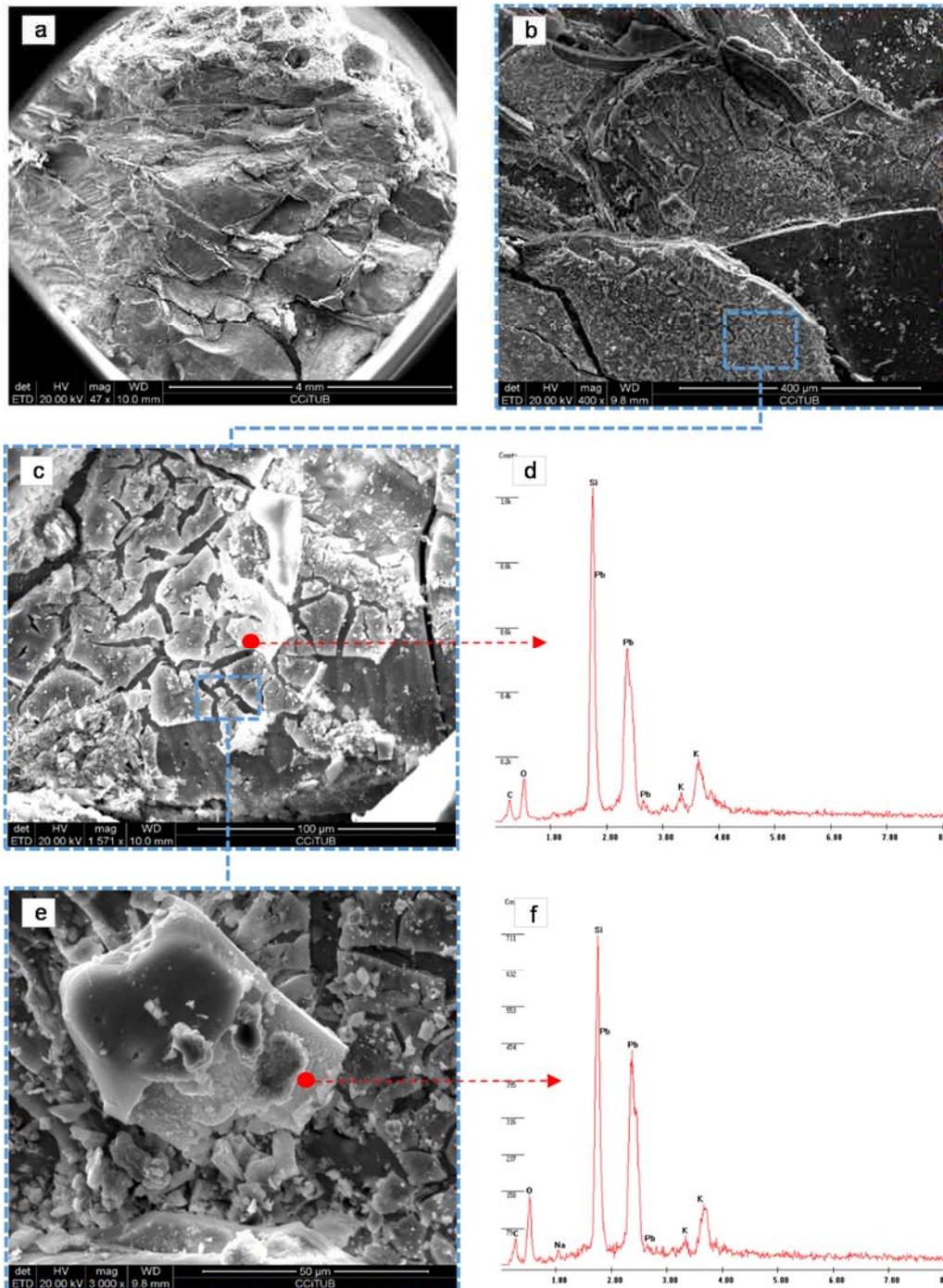


Figura 4.10: a, b, c, e) Imágenes de la Superficie del vidrio de Murano (47, 400, 1571, 3000 x, respectivamente) y d y f) Análisis mineralógico de la muestra S.2.A

En el análisis químico complementario de la zona descrita, presentado en la figura 4.10d, se observó que las reflexiones pertenecían a los mismos componentes obtenidos con anterioridad en la

superficie del vidrio (4.9b). Sin embargo en este caso, se apreció una mayor presencia de potasio (K) por lo que se podría vincular con la composición del gel. En la figura 4.10e se presenta en detalle la imagen de gel masivo detectado, donde se aprecia la forma poligonal de este. En el análisis químico complementario de la zona observada, presentado en la figura 4.10f, se volvió a obtener los mismos elementos del vidrio del caso anterior. No obstante, también se detectó pequeñas cantidades de sodio (Na) que reafirmarían la presencia de gel masivo (Menéndez, 1993).

En la figura 4.11 se presenta otra de las zonas de la superficie del vidrio de la muestra S.2.A. Del mismo modo que en el caso anterior, en la figura 4.11a se presenta la totalidad de la muestra.

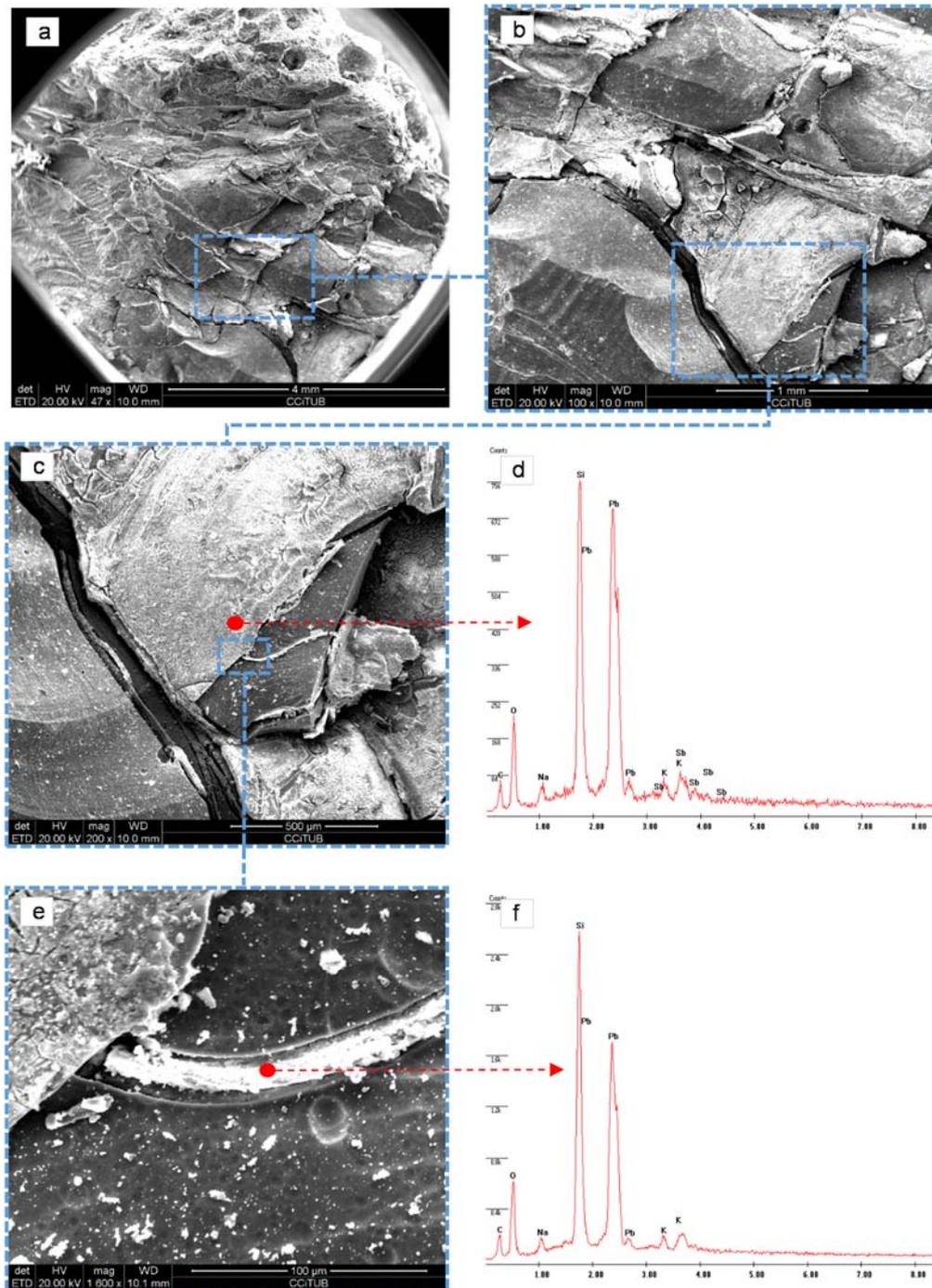


Figura 4.11: a, b, c y e) Imágenes de la Superficie del vidrio de Murano (47, 100, 200 y 1600 x, respectivamente) y d y f) Análisis mineralógicos de la muestra S.2

En las figura 4.11b y c se muestran en detalle la superficie del vidrio de la muestra S.2.A a distintos aumentos. En el análisis químico complementario de la zona descrita (ver figura 4.11c), las reflexiones obtenidas con más intensidad pertenecían a los elementos de la sílice (Si) y el plomo (Pb) como en el caso anterior. Asimismo, se apreciaron reflexiones de baja intensidad pertenecientes a los elementos del oxígeno (O), carbono (C), potasio (K), sodio (Na). La baja concentración de potasio (K) detectado en el análisis de la figura 4.11c, junto con el resto de elementos encontrados, permite suponer que pertenecerían a la composición del vidrio (Fernández, 2003) y no a un gel fruto de una reacción álcali-sílice como en el caso anterior.

Además de estos, en el difractograma de la figura 4.11c, también se detectaron pequeñas cantidades antimonio (Sb) que, según la bibliografía consultada, se emplearía habitualmente como agente decolorante del vidrio para obtener los colores amarillo y gris (Fernández, 2003). Teniendo en cuenta que en el pináculo de las espigas, de donde procede la muestra S.2, se emplearon vidrios de dicha tonalidad se determinó que este elemento también pertenecía a la composición del vidrio de Murano.

En la figura 4.11e se muestra una fisura detectada en la superficie del vidrio S.2. A rellena de un material de color blanco. Es sabido que el gel resultante de la reacción álcali-sílice tiende, generalmente, a depositarse en espacios vacíos, poros o bien microfisuras (Metha et al, 1986), por lo que se creyó oportuno analizar en detalle esta zona. En el estudio químico complementario del material encontrado, presentado en la figura 4.11f, se obtuvieron los mismos elementos (excepto el antimonio) y en las mismas intensidades que el caso anterior (ver figura 4.11f), de lo que se concluyó que el material de la fisura también era de naturaleza vítrea y no un producto surgido por un proceso de alteración.

Muestra S.2.B_ Interfaz micro-hormigón - vidrio de Murano

En la figura 4.12 se presenta el análisis por MEB de una parte de la muestra S.2.B de la interfaz entre hormigón y el vidrio de Murano. En la figura 4.12a se aprecian los dos materiales analizados (vidrio y micro-hormigón) y separados en el centro de la imagen. En el lado izquierdo, se observa la morfología de la matriz cementante del micro-hormigón, mientras que en el lado de derecho, se aprecia la morfología laminar del vidrio. Entre ambas se manifiesta una fina lámina de aire que podría indicar un principio del despegue de la pieza de vidrio.

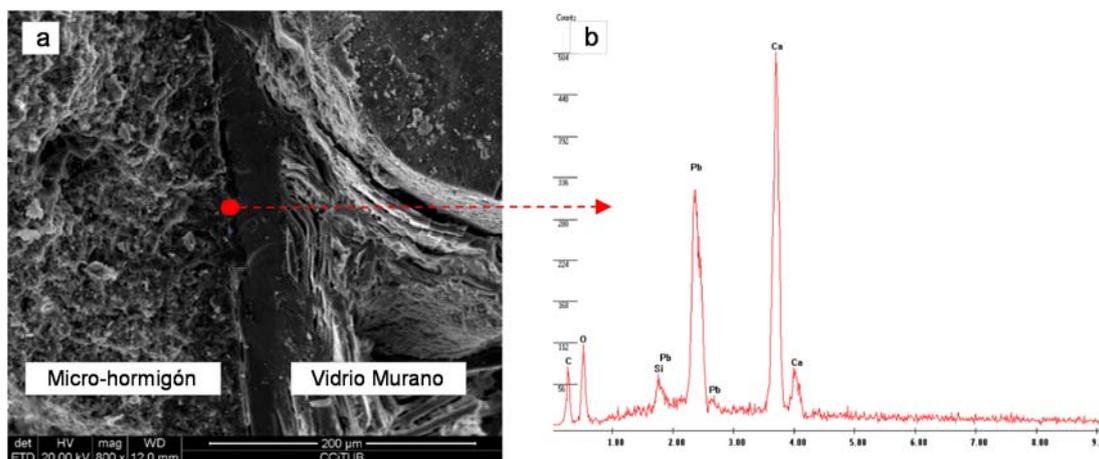


Figura 4.12: a) Imagen de la interfaz hormigón-vidrio de Murano (800 x) y b) Análisis mineralógico de la muestra S.2.B

En la figura 4.12b se presenta el análisis químico complementario de la interfaz analizada. Las reflexiones obtenidas con más intensidad corresponden a los elementos del calcio (Ca) y del plomo (Pb), y en menor intensidad, a los del oxígeno (O), al carbono (C) y a la sílice (Si). Teniendo en cuenta el análisis del vidrio expuesto con anterioridad, se establece que el plomo y la sílice pertenecen a su composición, mientras que el calcio pertenecería a la composición del conglomerante del micro-hormigón.

En la siguiente figura 4.13a se presenta un poro detectado en la interfaz de la muestra S.2.B. Como en anteriores casos, esta zona se creyó conveniente analizar, dado que el gel resultante de una reacción álcali-sílice tiende a depositarse en estos puntos (Metha et al, 1986).

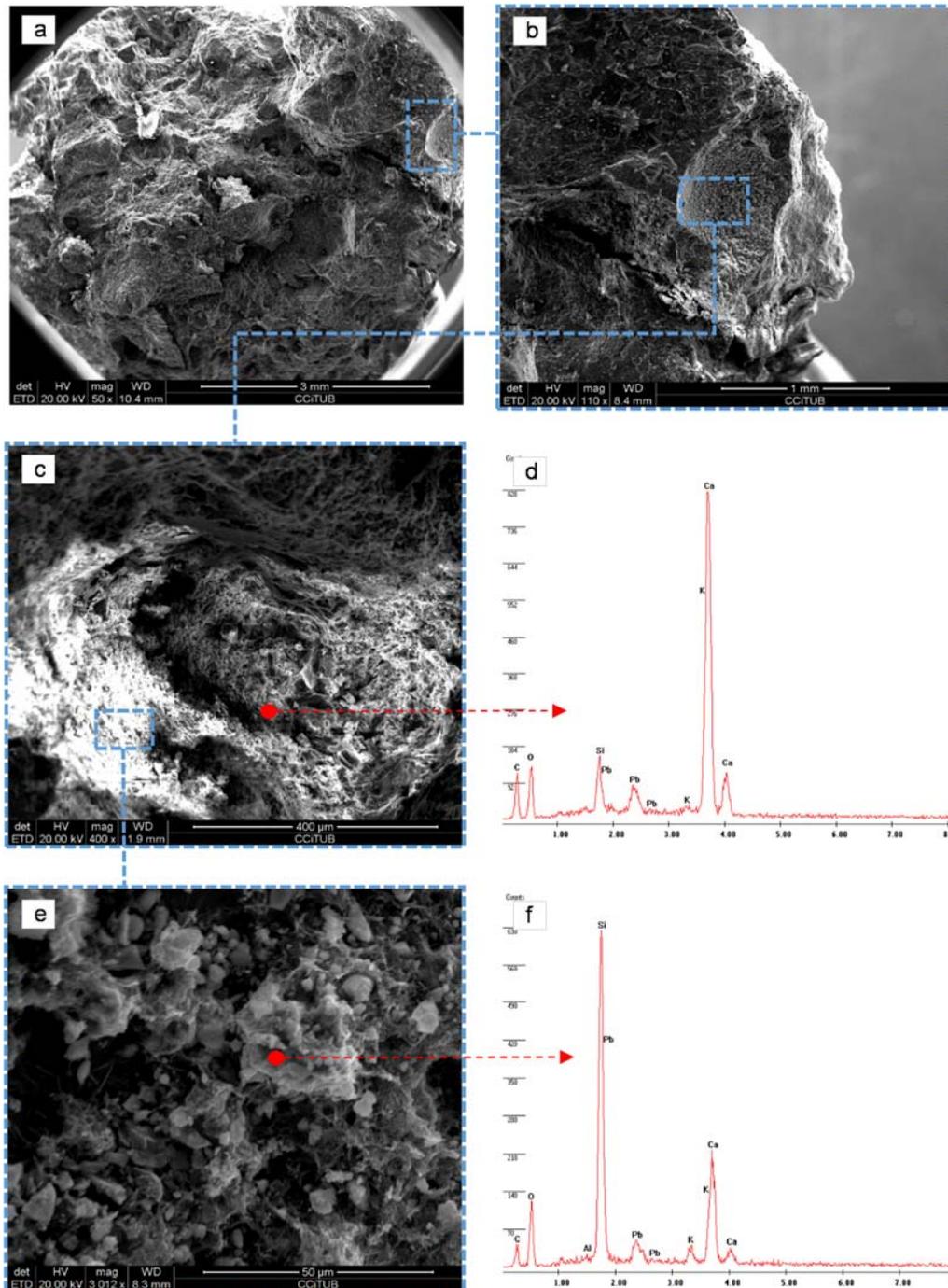


Figura 4.13: a, b, c y e) Poro de la interfaz micro-hormigón-vidrio de Murano (50,110, 400, 3012 x, respectivamente) y d y f) Análisis mineralógico del poro de la muestra S.2.B

Como se puede apreciar en la figura 4.13b, dentro del poro se observó una superficie cristalina y de color blanco. En la figura 4.13c se presenta en detalle dicha superficie y en ella se aprecia el producto blanquecino descrito anteriormente pero, debido a su forma esférica, no fue posible identificarlo con mayor nitidez. En la figura 4.13d se presenta el análisis complementario químico de la superficie analizada. Como se puede observar las reflexiones con más intensidad corresponden al calcio (Ca) y al potasio (K), y en menor intensidad al oxígeno (O), carbono (C), sílice (Si) y plomo (Pb). Estos dos últimos elementos podrían formar parte de la composición del vidrio (*Fernandez, 2003*). Aunque la sílice (Si) también podría atribuirse, como el resto de elementos, a la composición micro-hormigón. Cabe recordar que en el análisis DRX de la muestra S.1 se estableció que el árido empleado en los pináculos Sotoo era de naturaleza silíceo (ver figura 4.7).

En la figura 4.13e se presenta en detalle otra superficie del interior del poro. En ella se aprecia la matriz cementante del micro-hormigón. En la figura 4.12f se presenta el análisis químico complementario de la superficie estudiada donde se detectan los mismos elementos que en el caso anterior y una pequeña cantidad de aluminio (Al). El mayor porcentaje de sílice (Si) y plomo (Pb) respecto al anterior difractograma podría reflejar restos de vidrio en este poro de la interfaz. Ahora bien la sílice (Si), como el resto de elementos, también podría pertenecer a la composición del micro-hormigón. El calcio (Ca) se atribuiría a la matriz conglomerante, mientras que la sílice (Si), el potasio (K) y el aluminio (Al) pertenecerían a componentes del árido, como la moscovita ($KAl_2(AlSi_3O_{10})(F,OH)_2$) o el cuarzo (SiO_2). Del mismo modo que en la otra interfaz analizada de la muestra S.2 no se observó ningún elemento resultante fruto de algún proceso de alteración.

Muestra S.2.C_Interior del hormigón

En la figura 4.14 se presenta el estudio mediante MEB de la zona interior del micro-hormigón de la muestra S.2. En la figura 4.14a se aprecia la matriz de la superficie del micro-hormigón y en la parte central resalta una forma poligonal plana envuelta por una pasta blanquecina. En la figura 4.14c se presenta en detalle el elemento detectado y, como se puede observar, en su parte superior se manifiesta otro elemento poligonal de las mismas características, pero de color más blanquecino.

En las figuras 4.14b y 4.14d se presenta el análisis químico complementario de estos dos elementos poligonales detectados. En el más blanquecino (ver figura 4.14b), se obtuvieron reflexiones de mayor intensidad correspondientes a los componentes de la sílice (Si) y del aluminio (Al) y en menor intensidad, a los del calcio (Ca), potasio (K), oxígeno (O), carbono (C), magnesio (Mg) y hierro (Fe). El alto contenido aluminio (Al) y sílice (Si) y la presencia de magnesio (Mg) y hierro (Fe) en el análisis, no detectado en otros casos, podría indicar la composición del árido del micro-hormigón. Asimismo, la calcita (Ca) pertenecería a la composición del conglomerante de cemento portland.

En la figura 4.14d se presenta el análisis químico complementario del primer elemento poligonal detectado en la muestra analizada (ver figura 4.14c). Como se puede observar, prácticamente se obtuvieron los mismos elementos y en las mismas intensidades que el caso anterior. Solamente se debe señalar la disminución del porcentaje de calcio (Ca) y la desaparición del magnesio (Mg) por lo que, se establece el mismo análisis de su composición respecto al anterior.

Finalmente en la figura 4.14e se presenta en detalle la matriz cementante del hormigón de la muestra analizada. Ésta como se puede observar se caracteriza por una estructura cristalina y un árido fino. En la figura 4.14f se presenta el análisis complementario de la superficie descrita. Como se puede observar, en este caso, las reflexiones más intensas pertenecen al calcio (Ca) y la sílice (Si) y en menor

intensidad, pertenecen al oxígeno (O), al carbono (C), al aluminio (Al), al magnesio (Mg) y finalmente al azufre (S). El alto contenido de calcio (Ca), respecto a los casos anteriores, señalaría el análisis del conglomerante de cemento portland. Asimismo, el resto de elementos detectados se relacionarían con la composición del árido empleado.

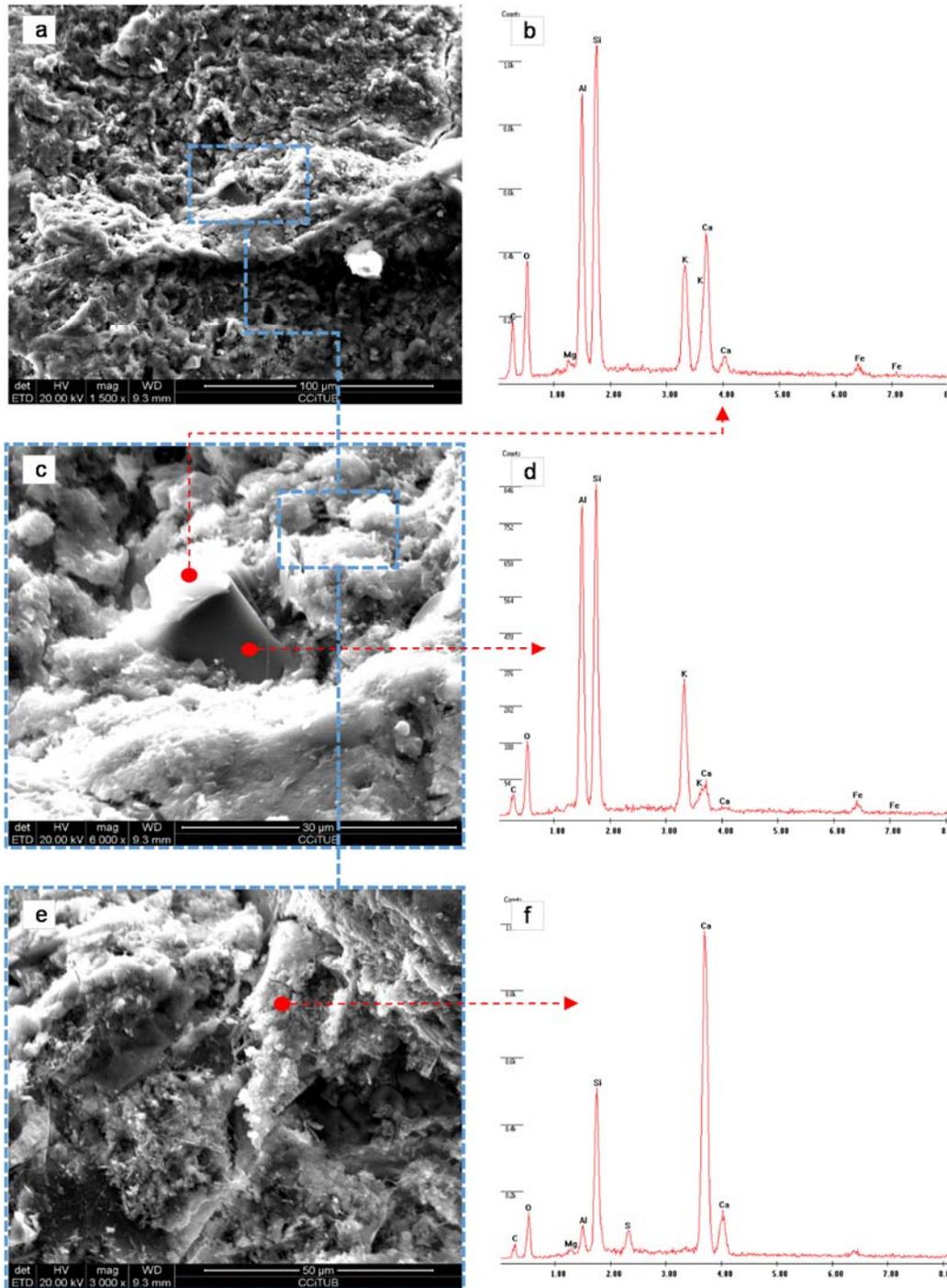


Figura 4.14: a, c y e) Imagen del interior del hormigón (1500, 6000, 3000 x, respectivamente) y b, d y f) Análisis mineralógico de la muestra S.2.C

4.5.6. Resumen resultados muestras pináculos Sotoo S.1 y S.2

En la tabla 4.7 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en el análisis de las muestras S.1 y S.2 procedentes de los pináculos Sotoo, mediante DRX y MEB, respectivamente. Como se puede observar, todas las muestras examinadas, excepto una pequeña zona de la S.2.A, se encontraron en buen estado de conservación. En la muestra S.1.B se sugirió un posible proceso de alteración, debido a tres reflexiones del difractograma no identificadas, pero ello no se pudo verificar a través del DRX.

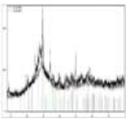
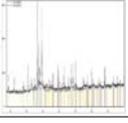
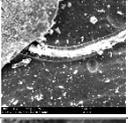
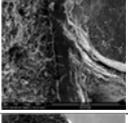
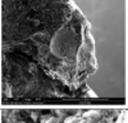
TECNICAS	MUESTRAS PINÁCULOS SOTOO	FIGURAS	RESULTADOS
DRX	A Vidrio de Murano	4.6 	Buen estado
	B Interfaz (Vidrio- micro-hormigón)		Buen Estado (Posible proceso de alteración no identificado)
	C Micro-hormigón (exterior)	4.7 	Buen estado
	D Micro-hormigón (interior)		
MEB	A Superficie del vidrio	4.9 	Gel resultante fruto de una reacción alcali-silíce
		4.10 	
	B Interfaz (vidrio- micro-hormigón)	4.11 	Buen estado
		4.12 	
		4.13 	
		C Interior del micro-hormigón	

Tabla 4.7: Resumen del análisis de las muestras S.1 y S.2 de los pináculos Sotoo

En la zona anómala de la muestra S.2.A se detectó el gel resultante fruto de un reacción alcali-silíce. Dicha reacción tuvo lugar de manera puntual entre las láminas de la estructura del vidrio, puesto que se dio simultáneamente una alta concentración de sílice reactiva (vidrio de Murano) y la presencia de álcalis de sodio y potasio, procedentes del micro-hormigón del pináculo. El gel detectado fruto de esta reacción al ser higroscópico es capaz de generar tensiones cuando se expande por acción del agua. Éstas podrían haber ocasionado algunas de las fisuras localizadas en los revestimientos de *trencadís* de los pináculos Sotoo e incluso algún despegue de alguna pieza. Sin embargo, la poca cantidad de gel detectada y la inexistencia de este elemento en el interior del micro-hormigón de la misma muestra S.1.A apuntan que ello no fue la causa de los desprendimientos de pequeñas partes de micro-hormigón de estos pináculos. Por lo tanto, el material de color blanco detectado en el interior del micro-hormigón y en la interfaz entre éste y las piezas de vidrio de ambas muestras, señalarían algún compuesto presente en el material y disuelto por la entrada del agua en el interior del pináculo.

4.6 ANÁLISIS DE LAS TENSIONES EN EL TRENCADÍS DE LOS PINÁCULOS

En este apartado se expone la simulación numérica de una pieza de un pináculo a escala real, considerando distintas curvaturas y diferentes escenarios de temperaturas. El modelo teórico se realizó con el objetivo de verificar las tensiones que se producen en la interfaz, fruto del distinto comportamiento entre el núcleo de micro-hormigón de las piezas y el *trencadís* de vidrio, capaces de inducir al despegue del revestimiento. En este sentido, se empleó como valor de referencia de riesgo de desprendimiento, la tensión normal de 0,5 MPa que establece la normativa UNE EN 12004, para adhesivos cementicios o morteros cola, como adherencia mínima óptima en el ensayo de resistencia a la tracción (UNE EN 1348).

4.6.1 Características del modelo numérico

El modelo numérico se realizó para la simulación de una parte o pieza de los pináculos Sotoo de más reciente construcción. Como se puede observar en la figura 7.15a, el modelo tiene unas dimensiones de 200x410 mm y está compuesto por tres capas: Dos de ellas, una interior de 400 mm (1ª) y otra exterior de 10 mm (3ª), representan el núcleo interno de micro-hormigón (1ª) y el revestimiento de *trencadís* (3ª), respectivamente. La 2ª capa intermedia, sin espesor, simula la interfaz de contacto entre ambas.

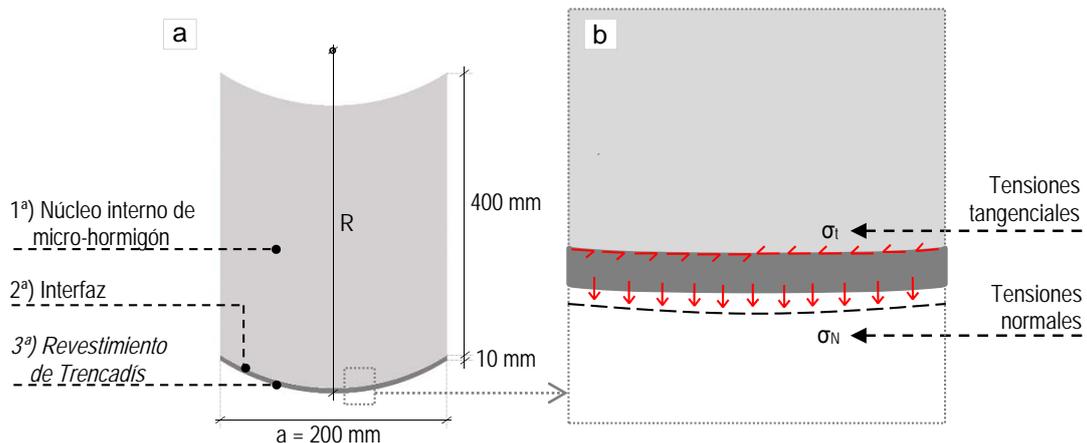


Figura 4.15: a) Configuración del modelo numérico y b) Detalle de las tensiones generadas en la interfaz

En esta estructuración del modelo por capas, la 1ª capa de micro-hormigón, se simuló como un material homogéneo, isotrópico y elástico lineal. Asimismo, la 3ª capa de *trencadís*, a pesar de ser un revestimiento compuesto por dos distintos materiales (piezas de vidrio de Murano y rejuntado de micro-hormigón), también se consideró como un material homogéneo, isotrópico y elástico lineal. En este caso, se realizó una homogeneización de las propiedades de los materiales del revestimiento con el fin de reducir el esfuerzo computacional. Ello no perjudicó en la representatividad del análisis, dado que lo que se buscó fue caracterizar la interfaz y las tensiones que se podrían generar en ella, a raíz del distinto comportamiento entre el núcleo de micro-hormigón y ese revestimiento de *trencadís* equivalente, tal y como se muestra en figura 7.15b.

La 2ª capa o interfaz también se simuló como un material elástico lineal y en ningún caso se consideró su rotura, puesto que se trataba de una verificación. Si bien en el modelo la interfaz fue introducida como un material, en realidad, ésta se trata de una transición entre las distintas capas de materiales. Por esta razón, se consideró que tenía una altísima rigidez y que el contacto entre los materiales era perfecto.

En la tabla 4.8 se presentan los parámetros mecánicos aplicados a cada material del modelo numérico, obtenidos en anteriores estudios experimentales con dosificaciones y piezas de vidrio de Murano utilizadas en la Sagrada Familia para este tipo de aplicaciones (Gómez, 2012). En el caso del *trencadís* equivalente se calculó un módulo de elasticidad y un coeficiente de dilatación térmica ponderada, teniendo en cuenta que el revestimiento está compuesto por piezas de vidrio y un rejuntado de micro-hormigón. Por otra parte, la interfaz se simuló con una rigidez (normal y tangencial) de $1 \cdot 10^7$ N/mm³.

MATERIALES	MÓDULO DE ELASTICIDAD (MPa)	COEF.DE DILATACIÓN TÉRMICA (°C ⁻¹)
Micro-hormigón	50 000	$1 \cdot 10^{-6}$
<i>Trencadís</i> equivalente	27 000	$1 \cdot 10^{-5}$

Tabla 4.8: Parámetros mecánicos empleados en el modelo

En el análisis se realizó mediante un modelo de tensión plana (2D) con elementos finitos triangulares usando el programa de cálculo DIANA, tal y como se muestra en la figura 7.16a. Cada capa o material se modelizó mediante una distinta malla de elementos finitos para poder simular los diferentes comportamientos de los materiales. En la 1ª capa de micro-hormigón, cada elemento finito de la malla tenía una longitud de 5 mm. Mientras que la del revestimiento equivalente del *trencadís*, esta dimensión fue menor (< 3 mm), equivalente a la 1/3 parte del espesor del revestimiento de 10 mm.

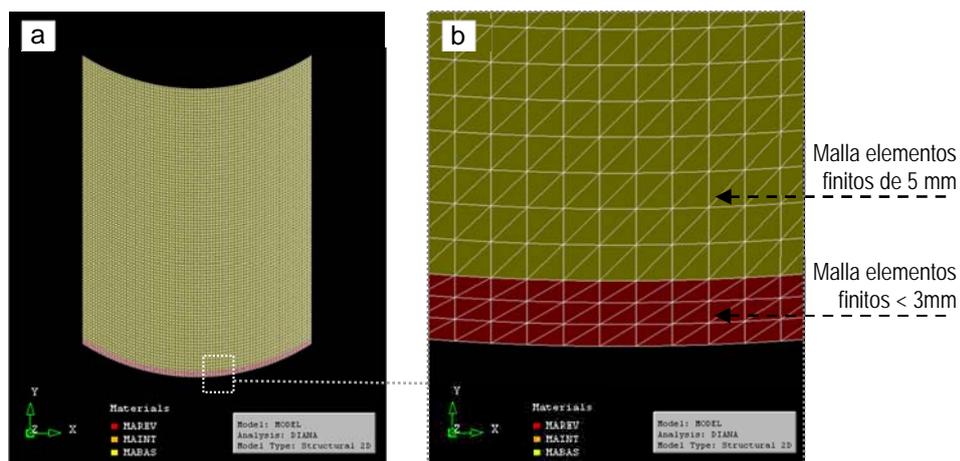


Figura 4.16: a) Modelo mediante elementos finitos triangulares y b) Detalle de la malla de cada material del modelo

4.6.2 Estudio paramétrico

En el estudio paramétrico se consideraron distintas geometrías y diferentes escenarios de temperatura del modelo numérico. La variación de la forma o curvatura del modelo se definió restringiendo la dimensión del ancho de la pieza (a) y variando el radio de curvatura (R), de este modo, cuanto mayor era el radio más plana sería la superficie del revestimiento (ver figura 4.15). En todas las simulaciones se empleó el parámetro (R/a) que relacionaba estas dos dimensiones. Como se muestra en la tabla 4.9, se realizaron nuevo modelos numéricos considerando diferentes ratios R/a desde 8,06 hasta 1,01.

Asimismo en el análisis tensional se simularon distintos escenarios de temperatura durante la etapa en servicio de la pieza en verano, estos se presentan en la tabla 4.10. Según estudios de la literatura técnica, en esta estación del año es cuando existen mayores variaciones de temperatura dentro de las distintas capas de un revestimiento, por lo que se simuló estos escenarios extremos (Wetzel et al, 2012).

ANCHO (a)	RADIO DE CURVATURA (R)	R/a
200	1600	8,06
	800	4,12
	400	2,24
	300	1,80
	200	1,41
	150	1,25
	100	1,12
	50	1,03
	25	1,01

Tabla 4.9: Geometrías consideradas en el modelo numérico

Como se puede observar en la tabla 4.10, además de estas temperaturas en servicio, también se tuvo en cuenta el momento de fabricación de la pieza: invierno o verano. Se consideró que las diferencias de temperatura entre el ambiente exterior y la que alcanzaba el micro-hormigón durante el proceso de fraguado, podrían repercutir en las tensiones surgidas en su posterior etapa en servicio. En este caso, se emplearon las temperaturas medias de invierno (5 °C) y verano (19 °C) de la población de la comarca del Berguedá donde actualmente se fabrican estas piezas (ver tabla 4.10).

TEMPERATURAS MEDIAS VERANO (°C)			
Producción	Pieza micro-hormigón	<i>Trencadís</i> de Vidrio de Murano	ΔT_{T-P}
<i>Invierno</i>	5	60	40
		40	20
		20	0
<i>Verano</i>	19	60	40
		40	20
		20	0

Tabla 4.10: Escenarios de temperatura medias en verano consideradas en el modelo numérico

En cuanto las temperaturas en servicio de los materiales del modelo, se simuló que el núcleo interno de micro-hormigón estaría, en todos los escenarios a 20 °C, como la temperatura media en verano en Barcelona. Por otro lado, para el revestimiento de *trencadís* equivalente se establecieron distintas temperaturas de 20, 40 y 60 °C (ver tabla 4.10). Estas dos últimas, se determinaron considerando que el revestimiento podría alcanzar temperaturas extremas debido a la aportación de energía por la radiación solar incidente. Por consiguiente, se consideraron 3 variaciones de temperatura entre *trencadís* y el micro-hormigón (ΔT_{T-P}) de 0, 20 y 40 °C (ver tabla 4.10).

4.6.3 Resultados y análisis

En la figura 4.17 se presentan los resultados de las tensiones normales (σ_N) obtenidas en la interfaz (Micro-hormigón - *trencadís*) del modelo numérico y en función de las distintas variables del estudio paramétrico (escenarios de temperatura y geometría (R/a)). En ella también se indica, mediante una línea recta de puntos, el valor de 0,5 MPa que corresponde a la mínima adherencia o resistencia de a la tracción que establece la normativa UNE EN 12004. Este valor permitirá determinar los escenarios en los que puede existir un riesgo de desprendimiento del revestimiento.

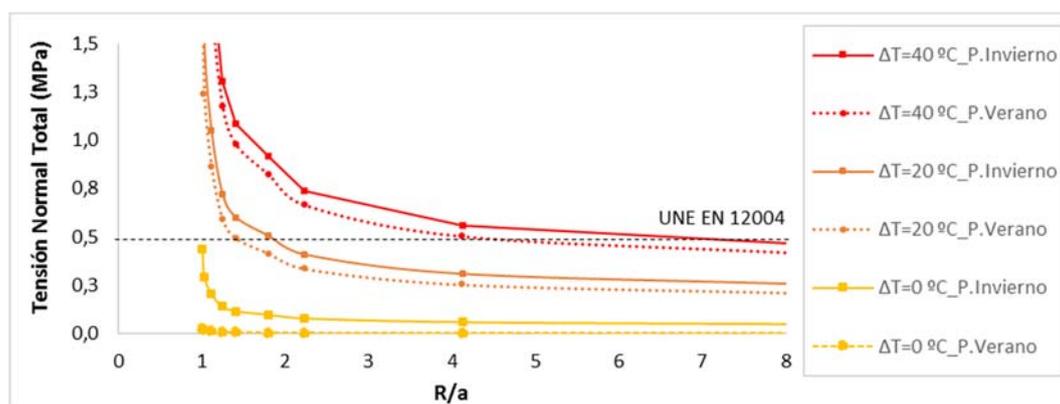


Figura 4.17: Tensiones normales obtenidas en el modelo numérico en función de las variables establecidas en el estudio paramétrico

En primer lugar, en la figura 4.17 se puede apreciar que cuanto mayor es la diferencia de temperatura media (ΔT_{T-P}) entre el revestimiento de *trencadís* equivalente y el núcleo interno de micro-hormigón, mayores son las tensiones obtenidas para todos los casos de R/a . En el caso de una diferencia $\Delta T_{T-P} = 40$ °C las tensiones superarían el valor establecido en la normativa para ratios entre $4 \leq R/a \leq 7$. En cambio, para $\Delta T_{T-P} = 20$ °C las tensiones superarían dicho valor para ratios entre $1,5 \leq R/a \leq 2$.

Todo ello señala que el incremento de temperatura conlleva un incremento de las tensiones generadas en la interfaz entre los dos capas, debido a su incompatibilidad de deformación. Por tanto, el empleo de micro-hormigones con propiedades elásticas próximas al revestimiento de *trencadís*, contribuirá a reducir el estado tensional en cualquier escenario de temperatura.

Por otro lado, también se observa en la figura 4.17 que para valores del parámetro R/a , relacionado con el radio de curvaturas de la pieza, superiores o iguales a 4, las tensiones normales obtenidas son prácticamente uniformes o con un leve incremento. Sin embargo, cuanto el parámetro R/a se aproxima más a 1, las tensiones normales aumentan significativamente. Estos resultados indicarían que cuanto más redondeadas son las formas de las piezas de los pináculos mayor será el nivel de tensión existente en la interfaz (micro-hormigón- *trencadís*) y mayor será el riesgo de despegue del revestimiento.

En cuanto a los escenarios de producción se puede apreciar que, en todos los casos, las tensiones son superiores cuando su fabricación fue en invierno. Como se puede observar en la figura 4.17, en el escenario donde las temperaturas de los materiales fueran iguales, es decir, $\Delta T_{T-P} = 0$ °C, en el caso que las piezas se hubieran producido en invierno se establece una tensión media de 0,16 MPa. Además, para ratios $R/a = 1$ dicho valor se aproxima al valor de 0,5 MPa establecido por la normativa.

Por el contrario, en el caso que la fabricación se hubiera realizado en verano las tensiones surgidas en este escenario ($\Delta T_{T-P} = 0$ °C) serían muy inferiores, estableciéndose en una tensión media de 0,011 MPa. Este hecho mostraría que las tensiones originadas por las mayores diferencias de temperatura durante fabricación en invierno, repercutirían en el estado tensional de las piezas durante la fase en servicio. Por tanto, sería conveniente producir las piezas en estaciones de primavera-verano, cuando no existen tanta diferencia entre la temperatura ambiente y el fraguado del micro-hormigón de la pieza.

4.7 CONCLUSIONES

En base los resultados obtenidos en los distintos estudios realizados y expuestos en el capítulo se establecen las siguientes conclusiones:

- A partir de la caracterización de las muestras de mortero y/o hormigón procedentes del pináculo de la Fachada de la Pasión (Santo Tomás) se determina que el árido empleado en la construcción del pináculo era de naturaleza silíceo, compuesto por cuarzo, moscovita y feldespatos. Asimismo, se concluye que el conglomerante era de cemento portland y que en el caso del mortero de las juntas constructivas del pináculo (muestra T.1) era mixto, formado por una parte de cal hidráulica y cemento. Esta última dosificación se habría empleado para dar mayor flexibilidad al mortero y capacidad para absorber las deformaciones de la estructura. Todas las muestras analizadas se encontraban en buen estado de conservación y no se detectó ningún elemento anómalo o proceso de alteración.

En base el análisis de las muestras de hormigón procedentes de una de las piezas del pináculo (T.3A y B) se pudo concluir además, que el vertido del hormigón en los moldes se realizó en dos tiempos. Primero se echó una pequeña cantidad de hormigón para rellenar las juntas del revestimiento de *trencadís* y posteriormente, se vertió el resto. Este proceso de fabricación sería la causa de la aparición de la junta fría detectada en la muestra de hormigón analizada.

- De la examinación del estribo del pináculo de Santo Tomás se concluye que existe un proceso de oxidación y que se trata de un acero con un contenido de carbono del 0,35% y, por lo tanto, no es apto para soldaduras con responsabilidad estructural. En consecuencia, se propone substituir, en la medida de lo posible, el armado del pináculo y en los casos que no sea protegerlo con un producto anticorrosivo.
- De acuerdo con el análisis realizado de las muestras procedentes de los pináculos Sotoo se concluye que éstas se encontraron en buen estado de conservación, excepto una pequeña parte de una de ellas, dónde se localizó ocasionalmente el gel resultante de una reacción álcali-silíceo. Dicha reacción tuvo lugar de manera puntual entre las láminas de la estructura de las piezas de vidrio, puesto que se dio simultáneamente una alta concentración de sílice reactiva (vidrio de Murano) y la presencia de álcalis de sodio y potasio, procedentes del micro-hormigón del pináculo.

El gel detectado podría haber ocasionado algunas de las fisuras localizadas en el *trencadís* de estos pináculos e incluso algún despegue puntual de alguna pieza. Sin embargo, la poca cantidad detectada y la inexistencia de esta sustancia en el interior del micro-hormigón apuntan que ello no fue la causa de los desprendimientos de pequeñas partes de micro-hormigón de estos pináculos. Por tanto, el material de color blanco detectado en el interior del micro-hormigón y en la interfaz entre éste y las piezas de vidrio de ambas muestras, señalarían algún compuesto presente en el material y disuelto debido a la entrada del agua en el interior del pináculo.

- En base el análisis tensional realizado mediante una simulación numérica de una pieza del pináculo se establece que las diferencias de deformación térmica entre el *trencadís* de vidrio y el núcleo de micro-hormigón puede ser una de las causas de los despegues de piezas y/o partes del revestimiento. Además, las tensiones normales generadas en la interfaz entre ambas capas, fruto de dicha incompatibilidad y capaces de inducir el despegue, pueden verse incrementadas por la mayor geometría esférica de las superficies del revestimiento.

Asimismo, se establece que la época del año cuando se fabrican estas piezas puede repercutir en el estado tensional de las mismas durante la fase en servicio. Siendo en invierno el escenario más crítico de producción debido a las mayores diferencias entre la temperatura ambiente y el fraguado del micro-hormigón de la pieza.

En base a todo lo expuesto, se considera que el empleo de micro-hormigones con propiedades elásticas más próximas al revestimiento de *trencadís*, contribuirán a reducir el estado tensional en cualquier escenario de temperatura. Además, se recomienda producir estas piezas en estaciones de primavera-verano para reducir las tensiones generadas durante su producción.

CAPÍTULO 5

OPTIMIZACIÓN DE DOSIFICACIONES

5.1 INTRODUCCIÓN

Una de las singularidades de la Sagrada Familia en cuanto a su proceso constructivo reside en el hecho de que es una de las pocas obras que lleva en paralelo los trabajos de nueva construcción con los de la rehabilitación de la obra existente. Sus pináculos son un buen ejemplo de ello, el avance de la obra requirió la construcción de nuevas piezas para las futuras estructuras, pero, a su vez, el estado de conservación de los existentes implicó el inicio de los trabajos para su rehabilitación.

Teniendo en cuenta los procesos de degradación del *trencadís* de los pináculos mediante mecanismos químicos y físico-mecánicos, expuestos en el capítulo anterior, se hizo necesaria una revisión de los materiales empleados en ambas aplicaciones. Considerando que se puede incidir poco en las propiedades del vidrio de Murano del *trencadís*, el presente capítulo trata del análisis y la optimización de las dosificaciones de mortero y micro-hormigón empleados en la restauración y la construcción de los pináculos. El objetivo final es el de alargar la vida en servicio de estos revestimientos y evitar, en la medida de lo posible, la reparación de los daños analizados.

En la actual restauración de los pináculos se hace uso de otro tipo de morteros pre-dosificados, además del definido con anterioridad para esta aplicación, para dar respuesta a diferentes condicionantes. Por una parte, fue preciso aplicar un mortero que regularizara las superficies existentes previamente saneadas y con distintos espesores fruto del repicado. Asimismo, se requirió la utilización de adhesivos cementicios o morteros cola para la restitución del *trencadís* sobre bases de mínimos espesores (< 5 mm)

y una alta adherencia inicial, para respetar los niveles originales de los revestimientos y facilitar su puesta en obra. En el marco de la presente investigación también se consideró oportuno validar *in situ* la adherencia de los mismos, a pesar que todos ellos cumpliera con las normativas.

En la tabla 5.1 se muestran los diferentes materiales empleados en las distintas aplicaciones (restauración y obra nueva) y el objetivo principal de estudio en cada uno de ellos. Cabe destacar que la optimización de las dosificaciones partió en todos los casos de las empleadas hasta el momento en la obra. La razón de ello se debe a que, en una obra completamente establecida y organizada como es el caso de la Sagrada Familia, los cambios serían más efectivos si se partía de sistemas y materiales ya conocidos por los trabajadores.

APLICACIÓN	MATERIALES	OBJETIVO
RESTAURACIÓN	Morteros pre-dosificados	Verificar su adherencia en obra
	Morteros dosificados en obra	Optimizar sus propiedades
OBRA NUEVA	Micro-hormigón de las piezas prefabricadas pináculos	en estado fresco y endurecido

Tabla 5.1: Objetivos del estudio

En este capítulo se describen los procedimientos y materiales empleados en la restauración de los pináculos (ver apartado 5.2.1). Asimismo, se explican las dos campañas experimentales vinculadas a esta aplicación: la primera, realizada para evaluar *in situ* la adherencia de los morteros pre-dosificados (ver apartado 5.2.2) y la segunda, destinada a la optimización de la dosificación del mortero de restauración (ver apartado 5.3). La dosificación propuesta, como resultado del estudio, fue posteriormente aplicada en la restauración de los pináculos de la Fachada de la Pasión.

También se expone el estudio de optimización de la dosificación de micro-hormigón destinada a las nuevas piezas prefabricadas de los pináculos Sotoo (ver apartado 5.4). La investigación realizada buscó dar respuesta a los diferentes daños surgidos en estas estructuras decorativas, además de intentar reducir los tiempos y costes de fabricación.

5.2 RESTAURACIÓN DE LOS PINÁCULOS

5.2.1 Materiales y procedimientos

Ante la necesidad de restaurar los pináculos de las dos últimas etapas (Fachada de la Pasión y Sotoo), la Dirección Facultativa de la obra decidió substituir todos aquellos revestimientos de *trencadís* que presentaran algún tipo de degradación. En este cometido se estableció un procedimiento de actuación que intentara agrupar todas las circunstancias que pudieran surgir durante estos trabajos. Dicho procedimiento se dividió en tres fases: primera, el saneamiento de la superficie a reparar; segunda, la consolidación del paramento, y tercera, la reconstrucción del revestimiento de *trencadís*. Estos se presentan desglosados a modo de esquema en la figura 5.1 y la descripción en detalle de los mismos se presenta adjunta a este documento (ver Anexo B).

También se determinaron los materiales y los morteros que se deberían aplicar en cada fase (ver Anexo B). En total se definieron cuatro tipos de morteros para la restauración (ver tabla 5.2). Tres de ellos eran pre-dosificados (el de regularización, el de colocación y el del rejuntado del *trencadís*) y fueron seleccionados por su alta adherencia, flexibilidad y resistencia. Mientras que el cuarto fue la dosificación

optimizada del mortero de restauración de la obra (ver apartado 5.3), denominado en la tabla 5.2 como mortero UPC.

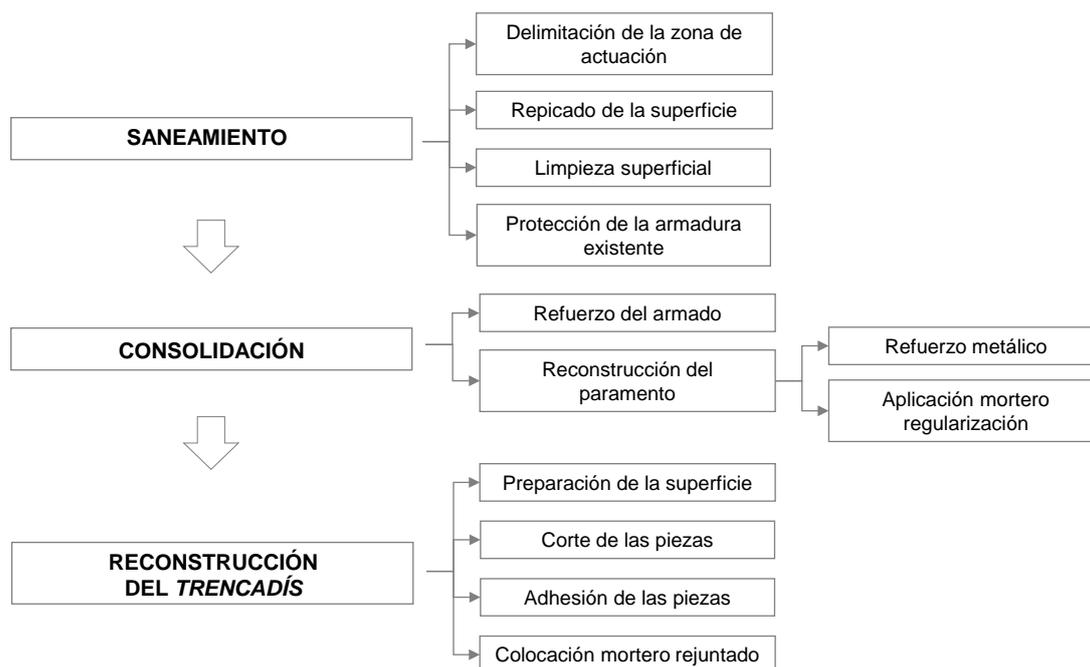


Figura 5.1: Esquema de la intervención en el *trencadís* de los pináculos

MORTEROS	ESPESOR DE APLICACIÓN	CARACTERÍSTICAS	APLICACIÓN
Mortero de Regularización	3 > e < 100 mm	<ul style="list-style-type: none"> Mortero destinado a la reparación de elementos de hormigón; Cumple con la de la normativa UNE EN 1504-3:2005; Incorpora micro-fibras plásticas; 	
Mortero de colocación del <i>trencadís</i>	3 > e < 6 mm	<ul style="list-style-type: none"> Alta adherencia inicial (> 1 MPa); Alta deformación transversal (5-6 mm); Tiempo de rectificación (> 40 min); Cumple con la normativa UNE EN 12004; Adhesión de mosaico vidriado; 	
Mortero rejuntado del <i>trencadís</i>	3 > e < 15 mm (Ancho juntas)	<ul style="list-style-type: none"> Resistencia a flexo-tracción (> 7 MPa); Resistencia a compresión (> 25 MPa); Retracción (< 1,5 mm/m); Absorción de agua < 1,5 g; Cumple con la normativa UNE EN 13888; 	
Mortero UPC	30 < e > 40 mm	<ul style="list-style-type: none"> Ver dosificación P. Red apartado 5.3 	Ver figuras 5.2a y b

Tabla 5.1: Morteros empleados en la restauración de los pináculos

El mortero de restauración UPC se aplicó en dos zonas de los pináculos de la Fachada de la Pasión que requerían un revestimiento con un mayor espesor de aplicación respecto a los pre-dosificados, pero que mantuvieran los criterios de flexibilidad, adherencia y resistencia necesarios. Respecto a la dosificación propuesta, fruto del estudio que se presenta, se añadió una pequeña cuantía de micro-fibras plásticas (0,6 Kg/m³), para evitar posibles fisuraciones, y se empleó una arena de naturaleza silíceas, con el fin de respetar el mismo tipo de árido existente (ver Capítulo 4).

Este mortero se utilizó en la restitución del *trencadís* de botellas de las piezas prefabricadas de hormigón (o piezas BEIN) de la base de los pináculos (ver figura 5.2a) y en las juntas constructivas del remate (ver figura 5.2b). En esta última zona, el mortero original incorporaba una adición de cal en la dosificación, con el fin de absorber cualquier movimiento o deformación de la estructura (ver Capítulo 4). El mortero aplicado siguió esta misma filosofía pero a través de la incorporación de materiales contemporáneos.

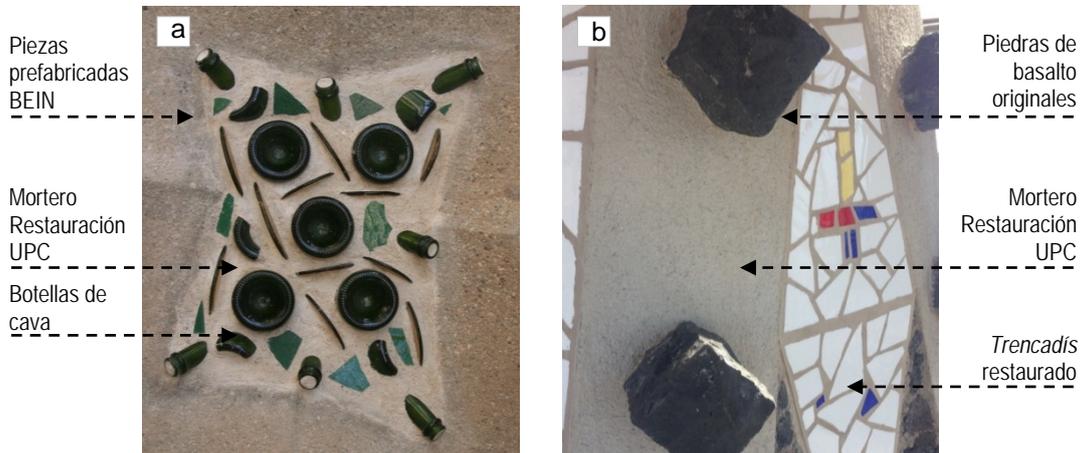


Figura 5.2: Intervenciones en la restauración del pináculo de Santo Tomás a) *Trencadís* de botellas de los laterales de las piezas Bein de la base y b) Juntas constructivas del remate

5.2.2 Evaluación en obra de los morteros de restauración pre-dosificados

La evaluación de la adherencia de los morteros pre-dosificados empleados en la restauración de los pináculos se realizó en los paramentos del remate del pináculo de Santo Tomás (Fachada de la Pasión). Una vez saneada la base existente de hormigón fueron aplicados dos tipos de mortero: el de regularización y posteriormente, el adhesivo cementicio o mortero cola para adherir las piezas de *trencadís* de vidrio (ver figura 5.3a). En ambos casos, antes de su aplicación, se saturaron de agua los paramentos para que no absorbieran el agua de amasado de los morteros aplicados y se produjera una pérdida de prestaciones en la interfaz.

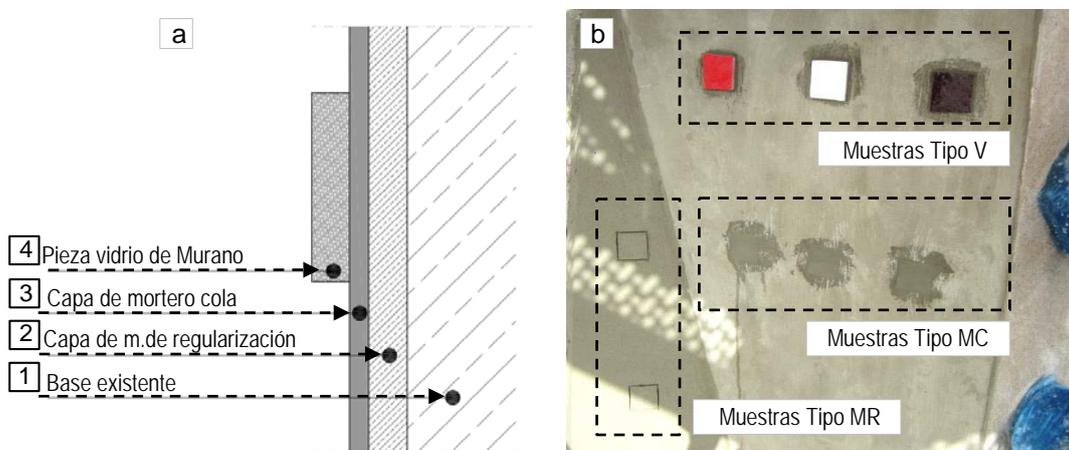


Figura 5.3: a) Sección constructiva del revestimiento del *trencadís* del pináculo de St. Tomás y b) Muestras realizadas en el estudio

En la campaña se prepararon tres tipos de muestras (MR, MC y V) para determinar la adherencia entre las distintas interfaces de cada material (ver figura 5.3b). De cada tipo se prepararon 10 muestras, con una dimensión de 50x50 mm cada una, siguiendo la normativa de ensayo (UNE-EN 1348). En la tabla 5.2 se detallan las características de cada muestra y la interfaz que se pretendía caracterizar en cada caso.

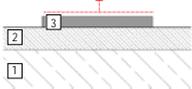
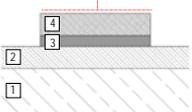
MUESTRAS TIPO	INTERFAZ A CARACTERIZAR
<p>Mortero de Regularización (MR)</p> 	Interfaz entre la base existente de hormigón del pináculo (1) y el mortero de regularización (2)
<p>Mortero cola (MC)</p> 	Interfaz entre mortero de regularización (2) y el adhesivo cementicio o mortero cola para la colocación del <i>trencadís</i> (3)
<p>Vidrio de Murano (V)</p> 	Interfaz entre mortero cola (3) y una pieza de vidrio de Murano de 50x50 mm (4)

Tabla 5.2: Características de las muestras realizadas

Con el objetivo de evaluar una situación de adherencia desfavorable, se realizaron los ensayos de adherencia 6 días después de la aplicación de los morteros. En las diferentes muestras preparadas se adhirió una chapa metálica mediante un pegamento de base polimérica (ver figura 5.4a). Esta chapa incorporaba en su cara opuesta una barra metálica con un encaje roscable en su extremo, donde se acoplaba el equipo de extracción (ver figura 5.4b). El equipo de extracción estaba compuesto por tres patas adaptables que servían de marco de reacción para generar las fuerzas de tracción aplicadas por el sistema de extracción central. Esas fuerzas eran generadas por un mecanismo giroscópico roscable y se registraban en un visor superior. Una vez realizado el ensayo se fotografió la sección resultante para determinar la superficie real de arrancamiento en cada caso.

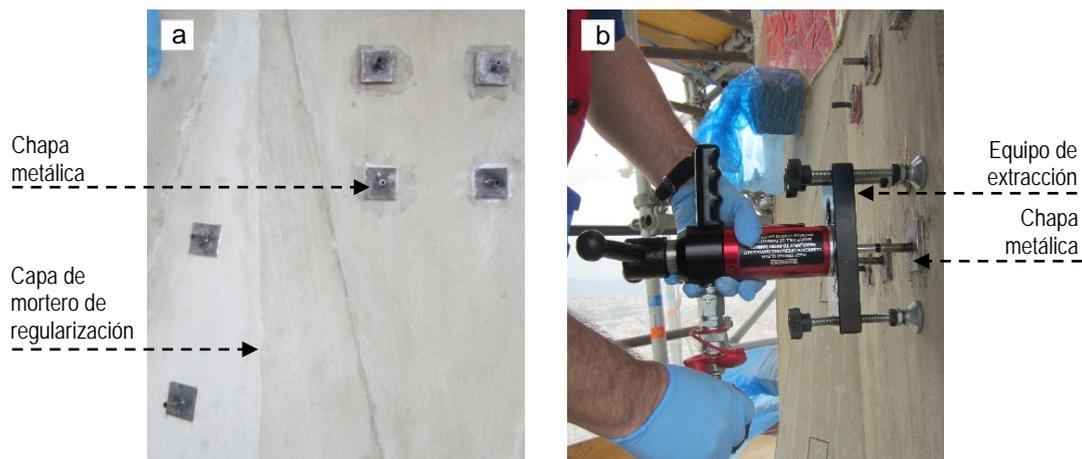


Figura 5.4: a) Muestras con las chapas metálicas adheridas b) Equipo de extracción

En la tabla 5.3 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos realizados; pudiéndose observar que tan sólo se presentan los resultados de las Muestras tipo MC y V. El motivo de ello se debe a que el adhesivo empleado con el mortero de regularización en el ensayo no logró una buena adherencia (MR). Consecuentemente, al realizar los ensayos se rompió antes la unión entre el adhesivo y el mortero (MR), que este último con la base existente del pináculo.

MUESTRAS TIPO	RESULTADOS \bar{X} (CV%)	
	Superficies (mm ²)	Tensión (MPa)
Mortero cola (MC)	2689,60	1,23 (0,18)
Vidrio de Murano (V)	2637,50	1,39 (21,9)

Tabla 5.3: Resultados del ensayo de adherencia in situ

En las muestras ensayadas de este tipo (MR) se obtuvo un valor medio de resistencia a tracción (o adherencia) de 0,75 MPa. Valor próximo a la adherencia garantizada por el fabricante (1 MPa), por lo que se puede esperar en esta interfase "real" una adherencia mayor a la obtenida y más próxima a los requerimientos impuestos. En las muestras tipo MC y V se obtuvo valores medios de adherencia de 1,23 y 1,39 MPa, respectivamente (ver tabla 5.4). Estos resultados indican que el mortero cola empleado para la colocación de las piezas de *trencadís* presenta una adherencia inicial mayor a la que garantiza la normativa y el fabricante en las distintas interfases caracterizadas. Además, se espera que al cumplir 28 días esta resistencia sea mayor.

5.3 OPTIMIZACIÓN DEL MORTERO DE RESTAURACIÓN

El mortero destinado a la reparación de los pináculos fue definido en su día para evitar cualquier tipo de daño de origen químico como: la reacción álcali-sílice, la reacción álcali-carbonato, la formación de taumasita, la corrosión electrolítica, además de considerar la resistencia a ciclos de hielo/deshielo (*Gomà, 2006*). Las directrices de prevención aplicadas en la dosificación están de acuerdo con la literatura técnica. No obstante, existen otros fenómenos de carácter físico-mecánico que también deben condicionar dicha dosificación.

En anteriores estudios se evaluaron distintas actuaciones para mejorar la flexibilidad de los morteros destinados a aplicaciones similares y reducir las tensiones rasantes existentes en el revestimiento de *trencadís* por incompatibilidad de deformación (*Gómez, 2012*). Concretamente, las modificaciones propuestas fueron redefinir el esqueleto granular de la matriz con una relación Cemento: Árido (1:3,5) y la incorporación de resina de látex en una proporción Látex: Agua (1:5). Según la bibliografía consultada la incorporación de látex en una mezcla de mortero permite aumentar su deformabilidad, mejorar su cohesión y sus propiedades adherentes sin disminuir la resistencia (*Muhammad et al, 2011; Winneleld et al, 2012*).

A partir de la experiencia adquirida, en la campaña experimental que se presenta se evaluó si dichas actuaciones también eran compatibles con la dosificación del mortero analizada. De este modo permitiría reducir su módulo de elasticidad y aproximarlos, en la medida de lo posible, a las propiedades térmicas del vidrio de Murano. También se evaluaron otras variables: la incorporación de un aditivo expansivo, para mejorar su aplicación sobre base existente y la adherencia con las piezas de *trencadís* de vidrio.

5.3.1 Materiales y dosificaciones

En la tabla 5.4 se presentan las dosificaciones realizadas en la campaña: la Patrón, utilizada en la obra, y tres modificaciones respecto de esta, incorporando las dos actuaciones validadas en anteriores estudios (*Gómez, 2012*). Las características técnicas y los nombres comerciales de los materiales empleados en la campaña son presentados en el Anexo B de este documento.

La dosificación Patrón tenía un esqueleto granular con una relación cemento-árido 1:2 y estaba compuesta por gran cantidad de finos, como el cuarzo o el humo de sílice, que proporcionan gran

compacidad y resistencia al mortero (ver tabla 5.4). Asimismo, incorporaba un aditivo superplastificante que permitía reducir el contenido de agua sin modificar la consistencia del mortero y disminuir la porosidad y mejorar su desempeño mecánico. Por último, la incorporación del airante, mejoraría su resistencia frente a ciclos de hielo-deshielo.

DOSIFICACIONES		Patrón	P. Red.	Látex	Expansivo
MATERIALES		CONTENIDO (kg/m ³)			
Conglomerante	Cemento Portland Blanco I 52,5 R	304,1	240,5	223,1	223,1
Áridos	Arena Calcárea (0-4 mm)	1034,5	1224,6	1136,0	1217,1
	Cuarzo Micronizado	22,4	-	-	-
	Humo de Sílice	22,4	-	-	-
	Aditivo aireante	4,5	-	-	-
Aditivos y adiciones	Agente Expansivo	-	-	-	46,3
	Látex	-	13,6	17,5	18,2
	Superplastificante (% s.p.c)	1,3	1,0		
Agua	Agua libre	149,8	54,3	70,0	72,7
	Agua / Cemento	0,50	0,26	0,35	0,36
Proporción	Cemento / Árido	1:2	1:3,5	1:3,5	1:3,5
	Látex /Agua	-	1:5	1:5	1:5
Consistencia UNE-EN 1015-3:2000 (mm)		160		210 ± 10	

Tabla 5.4: Dosificaciones realizadas en la campaña experimental

A través del ensayo *UNE-EN 1015-3:2000* se determinó que la Patrón alcanzaba una consistencia de 160 mm (ver figura 5.5a). Valor que indicó que la pasta tenía una baja trabajabilidad para la aplicación (ver figura 5.5b). En las dosificaciones propuestas se estableció una consistencia de 210 ± 10 mm para mejorar este parámetro, añadiendo a la mezcla agua con látex (ver tabla 5.4). Este parámetro fue contrastado y validado por los técnicos de Sagrada Familia.

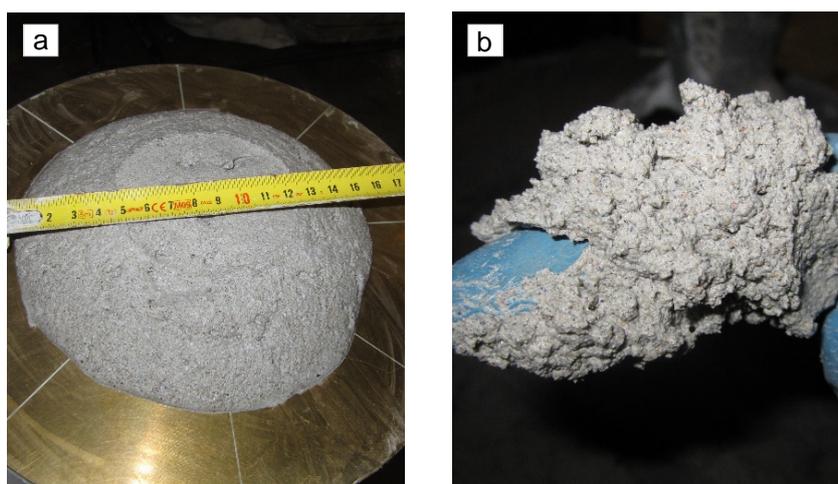


Figura 5.5: a) Consistencia de la Patrón de 160 mm y b) Detalle de la textura de la Patrón

La primera dosificación propuesta se denominó Patrón Reducida (P.Red.), dado que en ella se suprimieron los componentes del humo de sílice, el cuarzo micronizado y el incorporador de aire usados en la dosificación de referencia (ver tabla 5.4). Dichas modificaciones se realizaron teniendo en cuenta dos aspectos: primero, un mortero de revestimiento no necesitaba alcanzar resistencias tan elevadas y

segundo, la incorporación de resina látex contribuiría a la cohesión de la mezcla y reduciría la necesidad de incorporar tantos finos.

Partiendo de esta serie de modificaciones, en la segunda dosificación propuesta, denominada Látex, se eliminó también el superplastificante empleado en la dosificación P.Red. (ver tabla 5.4). Finalmente, la última dosificación, denominada Expansivo, se le incorporó un aditivo expansivo, con el fin de favorecer el contacto entre el mortero de reparación y el sustrato, reduciendo la incidencia que fenómenos de retracción que pudieran comprometer la adherencia entre ambos.

5.3.2 Producción y curado

En la fabricación de los morteros se emplearon las velocidades descritas en la *UNE-EN 196* y el proceso adoptado fue el siguiente:

- 1º) Mezcla durante 2 minutos a velocidad lenta, según, los materiales finos (que pasan casi en su totalidad por el tamiz 0,063 mm) con la mitad del agua de amasado o agua con látex según el caso;
- 2º) Incorporación del aditivo superplastificante (Patrón y P. Red.) y mezcla durante un minuto y medio a velocidad media;
- 3º) Incorporación de los áridos empezando siempre por el más grueso y acabando por el más fino, y mezcla durante tres minutos a una velocidad media;
- 4º) Adición de pequeñas cantidades del agua o agua con látex restante durante un minuto y medio a una velocidad rápida. En el caso de las dosificaciones propuestas, se incorporó agua con látex hasta que el mortero presentase la consistencia establecida.

Una vez fabricado el mortero se moldaron y compactaron las probetas para la realización de los ensayos en estado endurecido. Todas las probetas prismáticas se compactaron según la normativa *UNE-EN 196-1:2005* y las cilíndricas según *UNE-EN 12390-2:2009*. También se fabricaron probetas de 40x160x160 mm para la realización de un ensayo de adherencia entre vidrio y mortero. Una vez enrasada su superficie, se colocaron dos vidrios de Murano rectangulares de 50x50 mm diagonalmente dispuestos en cada probeta (ver figura 5.6a). El procedimiento de curado adoptado en todas las probetas sigue lo descrito en la *UNE-EN 196-1:2005*.

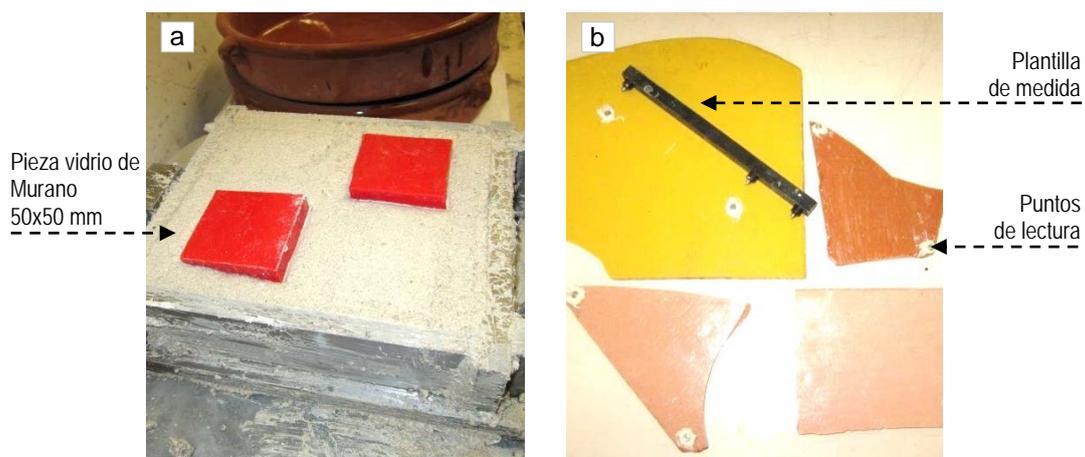


Figura 5.6: a) Probeta para el ensayo de adherencia entre mortero y vidrio y b) Muestras de vidrio de Murano preparadas para el ensayo para determinar el coeficiente de dilatación térmica

5.3.3 Ensayos

En la tabla 5.5 se presenta la relación de los ensayos realizados según sus normativas, así como el número y el tipo de probeta ensayada por cada dosificación. Durante la campaña experimental se determinó, también, el coeficiente de dilatación térmica de seis muestras de vidrio de Murano suministrados por los técnicos de Sagrada Familia. Para ello se adaptó el mismo ensayo realizado en las probetas prismáticas de mortero según la *UNE-EN 1770:1999* (ver figura 5.6b).

ENSAYO	NORMATIVA	TIPO DE PROBETA (mm)	Nº	PARÁMETRO
Flexo-tracción	UNE-EN 196-1:2005	40x40x160	3	Resistencia a flexo-tracción
Compresión cúbica			6	Resistencia a compresión
Porosidad	UNE-EN 1936		1	Porosidad abierta%
Coeficiente de dilatación térmica	UNE- EN 1770:1999	Vidrios de Murano	2	Coeficiente de dilatación térmica
			6	
Módulo de Deformación	UNE 83316-1:1996		2	Módulo de elasticidad estático
Compresión cilíndrica		Ø 100; H=200		Resistencia a compresión
Ultrasonidos	UNE-EN 12504-4:2006		2	Módulo de elasticidad dinámico
Adherencia	UNE-EN 1348*	40x160x160 2 Vidrios 50x50	2	Resistencia a tracción o adherencia

(* Adaptación de la normativa de ensayo

Tabla 5.5: Ensayos realizados durante la campaña

En caso del ensayo de adherencia entre mortero y vidrio se adaptó la normativa de ensayo *UNE-EN 1348* y se utilizó el mismo equipo de extracción descrito en el apartado anterior (ver figura 5.4b). Para preparar el ensayo primeramente se colocaron estas probetas sobre una superficie plana horizontal. Centrado encima de cada vidrio, se adhirió una chapa metálica mediante un pegamento de base polimérica (ver figura 5.7a). Esta chapa incorpora en su cara opuesta una barra metálica con un encaje roscable en su extremo, donde se acopla el equipo de extracción. Este ejerce fuerzas de tracción aplicadas por el sistema de extracción central. Esas son generadas por un mecanismo giroscópico roscable y se registran en el visor superior (ver figura 5.7b).

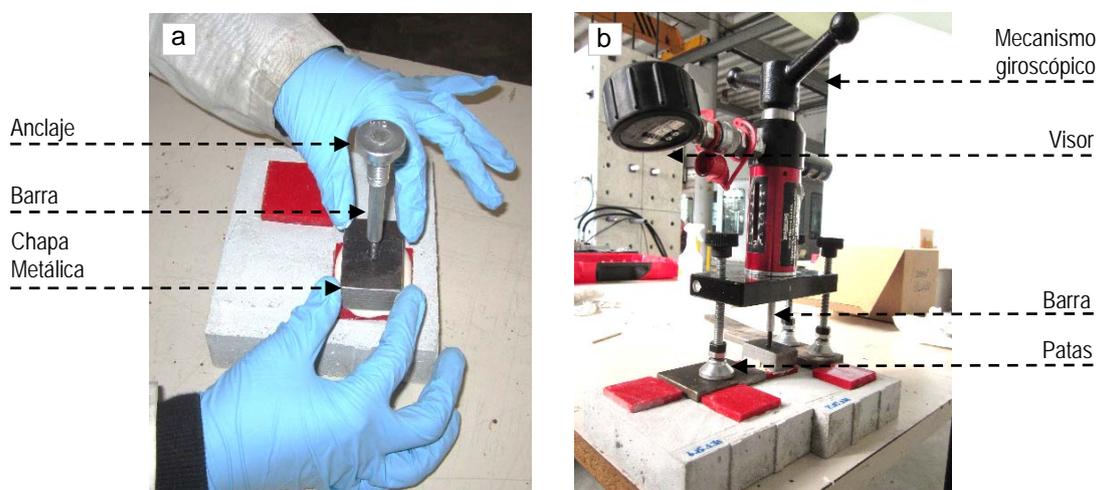


Figura 5.7: a) Preparación del ensayo de adherencia y b) Equipo de extracción

5.3.4 Resultados y análisis

En la tabla 5.6 se presentan los resultados obtenidos en la campaña experimental. La dosificación Patrón alcanzó los valores más elevados de resistencia a compresión cilíndrica (15,0 MPa) y de módulo de elasticidad estático (14.565 MPa).

RESULTADOS		DOSIFICACIONES				Vidrio de Murano
PROBETA (mm)	ENSAYO	Patrón	P. Red.	Látex	Expansivo	
NORMATIVA		\bar{X} (CV %)				
Ø100; H=200	Compresión (MPa)	15,0 (0,3)	14,5 (2,4)	9,9 (16,6)	5,8 (6,3)	
UNE-EN 83316-1	Módulo de elasticidad (MPa)	Estático	14.565,4 (1,1)	13.673,9 (5,2)	10.634,7 (2,2)	8 344,0 (3,2)
Ø100; H=200		Dinámico	17.760,3 (0,9)	14.589,1 (0,8)	11.569,3 (6,7)	10 561,2 (1,8)
UNE-EN 12504-4						
40x40x160	Flexo-tracción (MPa)	4,3 (10,2)	4,8 (1,9)	4,6 (9,3)	2,8 (3,3)	
UNE-EN 196-1	Compresión cúbica (MPa)	23,7 (8,4)	16,5 (10,2)	12,5 (7,3)	8,3 (7,7)	
50x50	Adherencia (MPa)	0,26 (55,9)	0,34 (20,8)	0,38 (62,8)	0,18 (29,5)	
UNE-EN 1348						
40x40x160	Porosidad (%)	13	19	21	20	
UNE-EN 1936						
40x160x160	Coeficiente de dilatación térmica (°C ⁻¹)	7,4 E-06	7,5 E-06	6,2 E-06	3,7 E-06	1,3 E-05
UNE-EN 1770						

Tabla 5.6: Resultados en estado endurecido

La dosificación P.Red fue la que se acercó más a la Patrón, presentando una reducción del 3,3% en la resistencia a compresión cilíndrica (14,5 MPa) y un 6,1% en su módulo elástico (13 673 MPa). Por lo tanto, el cambio de esqueleto granular y la aportación del látex permitieron mantener la resistencia a compresión, con niveles próximos a la Patrón, con una pequeña disminución del módulo elástico. En ese caso, es interesante observar que la reducción en el contenido de finos (debido a la eliminación de humo de sílice y del cuarzo micronizado) redujo la demanda de agua en P.Red, lo que permitió bajar la relación a/c requerida para alcanzar la consistencia estándar (ver tabla 5.4). Ello, teóricamente, contribuiría a un posible aumento de la resistencia y módulo. No obstante, el hecho de reducir el contenido de cemento y eliminar adiciones, compensaron ese efecto, dando lugar a propiedades mecánicas cercanas a la de la dosificación Patrón.

La dosificación Látex presentó una reducción de la resistencia a compresión cilíndrica del 31,7% (9,9 MPa) respecto a P.Red, y una disminución de 22,2% del módulo estático (10634 MPa). La eliminación del aditivo superplastificante obligó aumentar el contenido de agua para alcanzar la consistencia estándar (ver tabla 5.4). Con ello se aumentó la relación a/c, reduciendo la resistencia y el módulo elástico del material.

Por otro lado, los valores más bajos de resistencia a compresión cilíndrica (5,8 MPa) y módulo estático (8344 MPa) se dieron en la dosificación Expansivo. Frente a la P.Red hubo una reducción de un 60,0% y un 27,6%, respectivamente. Además de las razones expuestas en el párrafo anterior, la incorporación del agente expansivo redujo aún más la trabajabilidad de la mezcla y dificultó su

compactación. Por este motivo se apreciaron reducciones aún más significativas tanto en su resistencia como en su módulo elástico.

Los resultados de módulo de elasticidad dinámico mostraron una misma tendencia respecto al estático (ver tabla 5.6). La dosificación Patrón alcanzó el valor más elevado (17.760 MPa) y un 21,9% superior respecto al módulo estático. A esta la siguieron en cuanto a resultados la dosificación P.Red (14.589 MPa), la Látex (11.569 MPa) y, finalmente, la Expansivo (10.561 MPa). En estas tres últimas dosificaciones propuestas se logró una mejora significativa en el módulo y, además, los resultados obtenidos se acercaron al valor recomendado (12.000 MPa) en los morteros monocapa aplicados a revestimientos (CSTB 2669-4 –A3:2), en especial en las dosificaciones Látex y Expansivo.

El efecto positivo de la incorporación del látex se reflejó principalmente en los resultados de resistencia a flexo-tracción. Las dosificaciones P.Red y Látex presentaron un incremento de la resistencia respecto a la Patrón (4,37 MPa) en un 10,6% y un 5,9%, respectivamente (ver tabla 5.6). Sin embargo, con la incorporación del agente expansivo se produjo el efecto contrario, ya que en esta dosificación se disminuyó la resistencia a flexión un 35,4% respecto a la Patrón.

En los resultados de compresión cúbica, igual que en la cilíndrica, la Patrón manifestó la mayor resistencia, alcanzando los 23,7 MPa. En cambio, la dosificación P.Red presentó una reducción del 30,3% respecto a esa última, seguida por la dosificación Látex, con una disminución del 47,2%. Finalmente, la incorporación del agente expansivo también implicó una disminución del 64,9% de la resistencia a compresión respecto a la Patrón (ver tabla 5.6).

En los resultados de adherencia, respecto a la Patrón (0,26 MPa), las dosificaciones Patrón Reducida (P.Red) y Látex presentaron un aumento del 30,7% y del 46,1%, respectivamente (ver tabla 5.6). Ello se debió principalmente a la introducción de la resina látex que mejoró las propiedades mecánicas de la interfaz mortero-vidrio. En el caso de la dosificación Expansivo este efecto vino contrarrestado por la incorporación del aditivo expansivo que causó una reducción considerable de la adherencia medida (0,18 MPa).

En todas las dosificaciones propuestas se apreció un aumento de la porosidad respecto a la Patrón (13%) (ver tabla 5.6). Esta tendencia se vio influenciada por el cambio del esqueleto granular y la eliminación de las adiciones que aportaban finos. En ese sentido, el menor porcentaje de finos propició una menor compactación y menos vacíos en las dosificaciones propuestas. No obstante, las porosidades obtenidas en dichas dosificaciones, alrededor del 20,0%, se consideran normales en morteros (Alejandre, 2002).

Finalmente, se observó que las dosificaciones Patrón, P.Red y Látex mostraron coeficientes de dilatación térmica bastante similares, próximos al $7,0 \text{ E-}06 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (ver tabla 5.6). La dosificación Expansivo presentó el valor más bajo ($3,7\text{E-}06 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) debido a su baja resistencia mecánica. Los resultados obtenidos fueron aproximadamente 5,5 veces menores respecto al medido para el vidrio de Murano ($1,34 \text{ E-}05 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), lo que mostró una posible incompatibilidad mecánica entre ambos materiales. Cabe destacar que entre los distintos colores de las muestras de vidrio no se apreció una grande diferencia entre los resultados. Por lo que se establece que si existe una diferente deformación entre ellos no se debe a su composición, sino a la capacidad de absorción térmica de cada color.

En base a los resultados obtenidos se determinó que: la redefinición del esqueleto granular de la matriz y la introducción de resina de látex mejoraron la flexibilidad de los morteros sin que se vieran perjudicadas sus capacidades resistentes. Para la aplicación específica del mortero de reparación de los

pináculos, la dosificación P.Red, con el aditivo superplastificante, presentó los mejores resultados y se consideró válida para su uso en la obra.

5.4 OPTIMIZACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN PARA LAS PIEZAS PREFABRICADAS

En el análisis de los pináculos de más recientes construcción (pináculos Sotoo) se determinó que la mayoría de daños localizados en sus revestimientos de *trencadís* surgieron por una incompatibilidad termo-mecánica de sus materiales puestos en contacto. También se detectó puntualmente la existencia de un ataque álcali-sílice entre los componentes silíceos del vidrio de Murano del revestimiento y los álcalis, fruto de la hidratación del cemento. Además, la falta de armado en algunas partes de estos pináculos debido a su pequeña dimensión agravó el problema, se detectaron fisuras en las inspecciones con un posible riesgo de desprendimiento (ver Capítulo 3 y 4).

En base al contexto expuesto, se propuso optimizar la dosificación de micro-hormigón destinada a las piezas prefabricadas de los futuros pináculos. En el estudio se determinaron cinco principales objetivos para dar respuesta a los requerimientos de la aplicación y alargar la vida en servicio de estas estructuras decorativas. Estos objetivos son:

- Mejorar la flexibilidad del micro-hormigón, para reducir las tensiones existentes en el revestimiento por incompatibilidad de deformación;
- Sustituir total o parcialmente el armado existente por la incorporación de fibras plásticas estructurales en la dosificación;
- Alcanzar una dosificación con una buena adherencia durable con las piezas de *trencadís*;
- Incorporar aditivos que alarguen o eviten una posible reacción álcali sílice en el revestimiento;
- Facilitar el proceso de producción de las piezas mediante el alcance de una dosificación autocompactante;

Para alcanzar estos objetivos se realizaron diversas campañas experimentales. En lo que sigue se expone una visión general del estudio y se describen las distintas campañas. Las características y el detalle de los diferentes materiales empleados en cada una de ellas se presentan en el Anexo B de este documento.

Durante la realización de las diferentes campañas se definieron además distintos objetivos específicos como son:

- Evaluar un aditivo modificador de la viscosidad que permite recuperar mezclas con exceso de agua;
- Analizar el uso de una imprimación adicional en el reverso de las piezas de *trencadís* de dos materiales (vidrio de Murano y gres porcelánico) para aumentar su adherencia con el micro-hormigón;
- Evaluar el acabado final del revestimiento en piezas prefabricadas de *trencadís*;

5.4.1 Campañas experimentales del estudio

El estudio de optimización se desarrolló a través de varias campañas experimentales consecutivas hasta alcanzar una dosificación que cumpliera los requisitos de la aplicación. En total se realizaron seis campañas, en distintas ubicaciones, y los objetivos de cada una partían de los resultados de la anterior (ver figura 5.8).

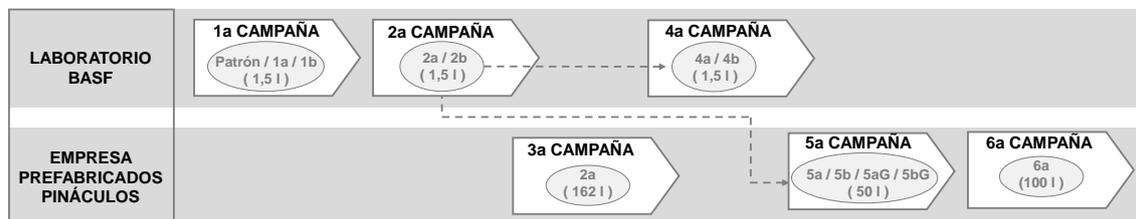


Figura 5.8: Esquema general de las campañas realizadas en el estudio de optimización

La 1ª, 2ª y 4ª campaña se efectuaron en los laboratorios de la empresa BASF, lo que permitió acceder a aditivos de última generación y contar con la experiencia sobre su uso. En estas campañas se fabricaron pequeñas amasadas, de 1,5 l cada una, para evaluar con facilidad las actuaciones realizadas en las dosificaciones tanto en estado fresco como endurecido (ver figura 5.8).

La 3ª, 5ª y 6ª campaña la producción de las dosificaciones se efectuó en la empresa que actualmente realiza las piezas prefabricadas de los futuros pináculos, con el objetivo de implantar las dosificaciones propuestas mediante sus métodos de fabricación y equipos (ver figura 5.8). Además, se produjeron cantidades más elevadas de cada dosificación, entre 50 y 160 l cada una, lo que permitió evaluarlas en situaciones reales de obra, en detrimento de un mayor control de las cantidades y las condiciones de fabricación de una situación de laboratorio. El curado y realización de los ensayos en estado endurecido de las probetas en estas campañas se efectuaron en el laboratorio de Estructuras Lluís Agulló de la UPC. En la tabla 5.7 se presentan los ensayos, normativas y probetas empleadas en cada campaña experimental.

ESTADO	ENSAYOS	NORMATIVA	PROBETA (mm)	CAMPAÑAS EXPERIMENTALES						
				1a	2a	3a	4a	5a	6a	
Fresco	Consistencia	UNE-EN 1015-3	---	x	x		x			
	Densidad en fresco			x	x		x			
	Extensión de flujo/Asentamiento	UNE-EN 12350						x	x	
	Aire ocluido							x	x	
Endurecido	Densidad	UNE 12390-7	Ø100;H=200					x	x	
	Porosidad abierta	UNE EN 1936						x	x	
	Compresión	UNE 12390-3						x	x	
	Módulo de elasticidad	UNE-EN 13412						x	x	
	Flexo-tracción	UNE-EN 196-1	40 x 40 x 160	x	x		x	x	x	
				Compresión	x	x		x	x	x
	Flexo-tracción	UNE EN 14651	150 x 150 x 600			x		x	x	
	Adherencia	UNE-EN 1348*	50 x 50		x	x				

(*) Adaptación de la normativa de ensayo

Tabla 5.7: Ensayos realizados en las distintas campañas experimentales del estudio de optimización

En la *1ª campaña experimental* se caracterizó la dosificación Patrón de partida empleada hasta el momento en la obra y se evaluó la incorporación de aditivos y adiciones, que mejoraran las propiedades del micro-hormigón. En esta campaña se efectuaron cinco ensayos, dos en estado fresco y tres en endurecido (ver tabla 5.7). En base a los resultados obtenidos en la Patrón se establecieron distintos objetivos para mejorar las propiedades del micro-hormigón de las piezas. Los indicadores y los rangos de los mismos se presentan en la tabla 5.8.

PROPIEDADES	OBJETIVOS	INDICADORES	RANGOS
Fresco	Aumentar trabajabilidad	Extensión de flujo	> 205 mm
Endurecido	Disminuir rigidez	Resistencia Compresión	> 20 MPa
		Resistencia Flexión	> 2 MPa
	Aumentar flexibilidad	Módulo de elasticidad (E)	15000 - 20000 MPa
Armado	Incorporación fibras plásticas	Resistencia residual (f_{R3m})	1,5 MPa

Tabla 5.8: Objetivos alcanzar en la dosificación final propuesta

En la *2ª campaña experimental* se redefinió el esqueleto granular y la relación a/c de la matriz de la dosificación Patrón, se incorporaron fibras plásticas estructurales y se añadió un aditivo elastificante para mejorar su flexibilidad. Para evaluar las diferentes actuaciones se realizó la misma serie de ensayos respecto a la anterior campaña además de un ensayo de adherencia entre el vidrio o gres y el micro-hormigón propuesto (ver tabla 5.7).

En la *3ª campaña experimental* se propuso ampliar los ensayos de caracterización de la dosificación propuesta, alcanzada en la 2ª fase, e implantarla en la empresa que produciría las futuras piezas (ver figura 5.8). En la *4ª campaña experimental* tuvo lugar en el laboratorio y se realizaron diferentes modificaciones en la dosificación propuesta en la 2ª fase, tales como la disminución de la relación a/c y el aumento de la cuantía de fibras hasta 12 Kg/m³.

En la *5ª campaña experimental* del estudio se estableció repetir la dosificación propuesta en la 2ª campaña en la empresa de los prefabricados, pero esta vez incrementando sólo su contenido de fibras hasta 12 Kg/m³. Esta serie de modificaciones fueron evaluadas con una campaña de ensayos más extensa respecto las anteriores (ver tabla 5.7) y, además, se valoró el desempeño y el acabado en dos pequeños prototipos de piezas de *trencadís* empleando los moldes originales de los pináculos Sotoo. La *6ª y última campaña experimental* consistió en la repetición de los ensayos de la anterior campaña debido a un error de pesada durante la producción de la dosificación en la empresa (ver tabla 5.7).

5.4.2 Campañas experimentales 1 y 2: Actuaciones sobre la dosificación Patrón

Dosificaciones y métodos

En la tabla 5.9 se presentan las dosificaciones fabricadas en la 1ª y 2ª campaña experimental del estudio: la Patrón, empleada hasta el momento en la obra, y cuatro modificaciones respecto a esta. La Patrón tiene una relación a/c de 0,81 y emplea un cemento de color blanco, por lo que se entiende que se quiere conseguir una determinada coloración en el rejuntado del *trencadís* de las piezas. Esta dosificación está compuesta por tres distintos tipos de áridos: ojo de perdiz, arena calcárea y micro sílice negra, con el fin de dar compacidad y resistencia a la mezcla. Asimismo, incorpora un aditivo superplastificante, que permite sin modificar la consistencia reducir el contenido de agua y la porosidad.

En las dosificaciones de la 1ª campaña experimental (1a y 1b) se mantuvo las cantidades y la misma relación a/c (0,81) de la Patrón más una cuantía de 3,5 Kg/m³ de fibras plásticas estructurales y un

aditivo elastificante en una proporción del 5 y 10% (s.p.c), respectivamente (ver tabla 5.9). La cuantía de fibras incorporadas respondía a la necesidad de alcanzar la resistencia residual a tracción (f_{R3m}) más desfavorable obtenido en el cálculo de las piezas (1,5 MPa) (ver Anexo B). Por otro lado, el aditivo elastificante mejoraría la consistencia de la pasta del micro-hormigón y su flexibilidad en estado endurecido.

DOSIFICACIONES		Patrón	1a	1b	2a	2b
MATERIALES		CANTIDADES (kg/m ³)				
Conglomerante	Cemento Portland Blanco I 52,5 R	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00
	Árido Ojo de Perdiz (2-6,3mm)	950,00	950,00	950,00	894,66	894,66
Áridos	Arena Calcárea (0-4mm)	875,00	875,00	875,00	730,00	730,00
	Micro Sílice negra	25,33	25,33	25,33	-	-
	Filler Calizo	-	-	-	266,66	266,66
	Fibras plásticas estructurales (F 57/48)	-	3,50	3,50	3,50	3,50
	Superplastificante(% s.p.c)	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75
Aditivos y Adiciones	Elastificante (% s.p.c)	-	5,00	10,00	5,00	5,00
	Modificador de la viscosidad (% s.p.c)	-	-	-	-	0,30
	Agua	Agua libre	244,67	244,67	244,67	266,66
Relación a/c		0,81	0,81	0,81	0,89	1,00

Tabla 5.9: Dosificaciones fabricadas en la 1ª y 2ª campaña experimental

Las dosificaciones de la 2ª campaña experimental (2a y 2b) se definieron manteniendo el contenido de cemento (300 kg/m³) y de superplastificante (3,75% s.p.c) de la Patrón, añadiendo la cuantía de fibras plásticas (3,5 Kg/m³) y el aditivo elastificante (5% s.p.c) de la 1ª campaña y modificando su esqueleto granular y la relación a/c (0,89). Esta redefinición del esqueleto consistió en sustituir la componente de la micro-sílice negra por un filler de naturaleza caliza, reducir el contenido de árido grueso (ojo de perdiz) en un 5,8% e incrementar el fino (arena calcárea) en un 16,5% (ver tabla 5.9).

En el caso de la dosificación 2b se propuso evaluar los efectos de un aditivo modificador de la viscosidad (0,3% s.p.c), para lo cual la relación a/c fue de 1. Este aditivo se emplea generalmente cuando existe un exceso de agua en la amasada o bien, cuando se produce una exudación en la mezcla y así no desechar material.

Producción y curado

En la fabricación de las distintas dosificaciones de la 1ª y 2ª campaña experimental se empleó las velocidades de amasado que establece la normativa *UNE-EN 196* y el proceso adoptado fue el siguiente:

- 1º) Mezcla en la amasadora todos los componentes sólidos a una velocidad lenta durante medio minuto (ver figura 5.9a);
- 2º) Incorporación de 3/4 partes del agua de amasado, o agua con el aditivo elastificante según el caso, y mezclar todo durante medio minuto a la misma velocidad;
- 3º) Repetición del mismo proceso y añadir el agua de amasado restante, mezclada con una cantidad inicial de aditivo superplastificante y volver a mezclar todo, a velocidad lenta, durante medio minuto;
- 4º) Adición gradual y lenta del resto de superplastificante, durante de tres minutos y medio, hasta conseguir una consistencia deseada;
- 5º) Reposo de la mezcla durante medio minuto y, seguidamente, mezclar todo durante un minuto a una velocidad rápida;

- 6º) Validación de la consistencia en fresco mediante la realización del ensayo normalizado *UNE-EN 1015-3:2000*. En la 2ª campaña se alcanzaron dosificaciones autocompactantes, por esta razón se realizó este ensayo sin efectuar golpes (ver figura 5.9b).

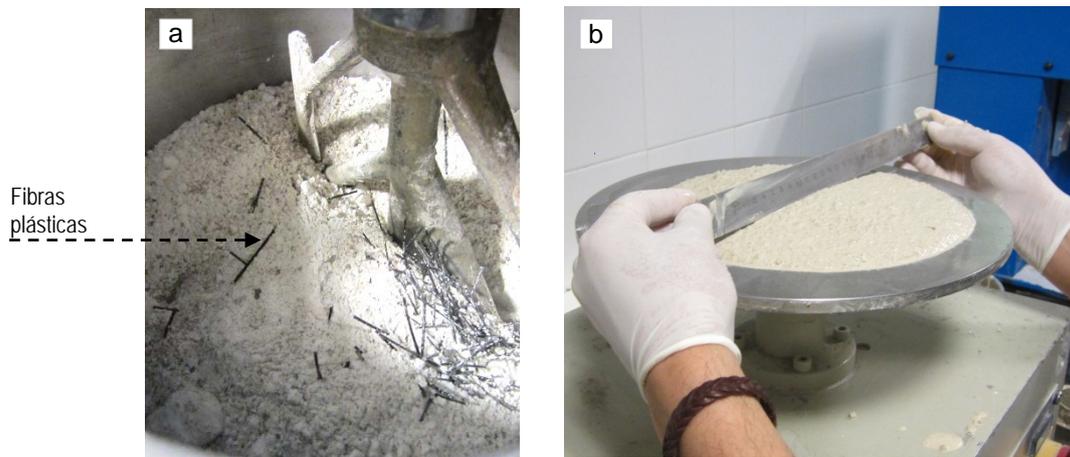


Figura 5.9: a) Mezcla de los componentes sólidos de las dosificaciones propuestas y b) Medición de la consistencia

De cada dosificación se rellenaron 6 probetas prismáticas de 40x40x160 mm en dos fases: en la primera la mitad del molde y en la segunda el resto. En la 1ª campaña experimental las probetas se compactaron durante un minuto en una mesa vibradora y después se introdujeron en una cámara húmeda ($20 \pm 1^\circ \text{C}$), con una humedad relativa de ($98 \pm 2\%$), para proceder a su correcto curado.

En la 2ª campaña se realizó el mismo proceso sin la compactación. También se fabricaron otras probetas para evaluar el uso de una imprimación adicional en el reveso de las piezas de *trencadis* de dos materiales (vidrio de Murano y gres porcelánico), con el objetivo de aumentar su adherencia con el microhormigón. Además, la imprimación aplicada en las piezas de vidrio reduciría el contacto entre estas y los álcalis presentes en el cemento y postergaría una posible reacción álcali-sílice. Esta tenía una base de resinas sintéticas en dispersión acuosa, era bi-componente e incolora y tenía un tiempo abierto superior a dos horas, por lo que se podría incorporar al proceso de producción de las piezas (ver figura 5.10a).

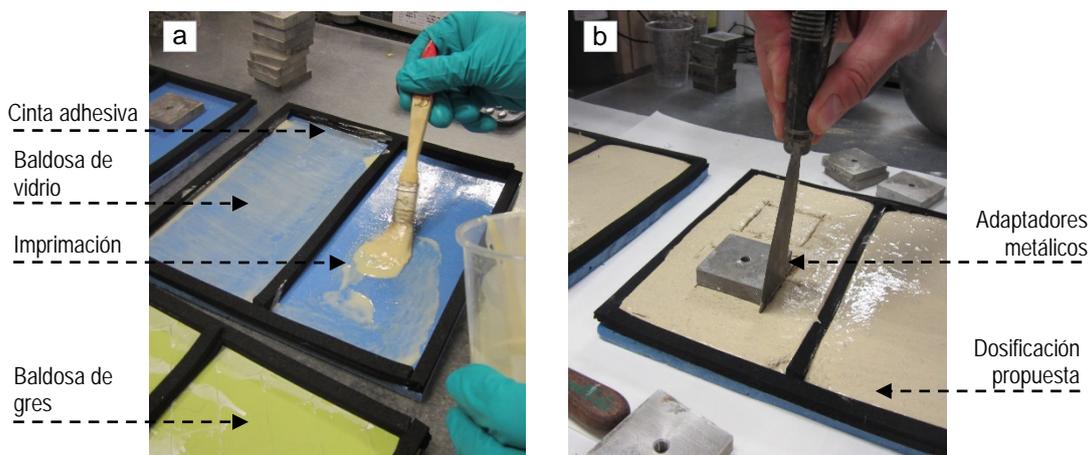


Figura 5.10: a) Aplicación de la imprimación en las baldosas de vidrio y gres y b) Realización de cortes para el ensayo de adherencia

Para la fabricación de dichas probetas se utilizaron dos baldosas de vidrio de Murano de color azul y dos de gres porcelánico de color verde, con unas dimensiones de 240x300 mm cada una. En su parte posterior, estas se dividieron con una cinta adhesiva de 1 cm de espesor hasta conseguir dos moldes en cada de una de ellas. En el caso del gres se distingue el reverso de las piezas por una diferente coloración y porque existe una serigrafía en la superficie para aumentar su adherencia. Posteriormente, en una de las dos baldosas de cada material se aplicó la imprimación mediante un pincel (ver figura 5.10a). Pasados 20 minutos tras su aplicación, cada probeta o baldosa se rellenó con las dosificaciones propuestas (2a y 2b). Como se puede observar en la figura 5.10b, en el micro-hormigón fresco se realizaron los cortes mediante una espátula del perímetro del adaptador del ensayo de adherencia.

Resultados y análisis

En la tabla 5.10 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos realizados en estado fresco y endurecido de la 1ª y 2ª campaña experimental. También se incluyen los valores del coeficiente de variación (CV %) obtenidos con más de una muestra.

RESULTADOS			DOSIFICACIONES				
ENSAYO	EDAD días	UNIDADES	Patrón	1a	1b	2a	2b
			\bar{X} (CV %)				
Consistencia	-	mm	205,0	230,0	228,0	275,0	280,0
Densidad en fresco	-	Kg/m ³	2250,0	2240,0	2230,0	2300,0	2320,0
Compresión 40 x 40 x 160 mm	1	MPa	16,9 (1,3)	14,0 (3,0)	12,0 (3,0)	15,3 (1,4)	11,5 (1,9)
	7		27,0 (0,8)	23,0 (1,5)	20,9 (2,7)	28,0 (0,0)	22,2 (0,0)
	28		39,5 (0,4)	34,0 (0,2)	31,4 (1,1)	31,7 (1,8)	25,5 (0,6)
Flexo-tracción 40 x 40 x 160 mm	1	MPa	4,7	4,2	3,5	4,4	3,5
	3		4,7	4,2	3,5	-	-
	7		7,0	5,9	5,4	4,5	5,1
	28		8,0	7,0	5,0	8,2	7,4
Módulo de elasticidad 40 x 40 x 160 mm	28		22 690,0	21 060,0	19 150,0	18 301,0	19 531,0
Adherencia 50 x 50 mm	Gres+ Imp	15	-	-	-	0,5 (0,0)	0,4 (17,0)
	Vidrio+ Imp		-	-	-	0,8 (41,5)	0,6 (9,7)

Tabla 5.10: Resultados de la 1ª y 2ª campaña experimental

La consistencia alcanzada por la Patrón (205 mm) fue la más reducida de todas las dosificaciones y mostró una baja trabajabilidad para la aplicación (ver figura 5.11a). La pasta obtenida se detectó un poco disgregada y con falta de finos. Además, el acabado no respondía al uso de un cemento blanco y la micro-silice negra podía verse a simple vista (ver figura 5.11b). En las dosificaciones 1a y 1b, gracias a la incorporación del aditivo superplastificante, se aumentó la consistencia respecto a la Patrón un 12,1% y un 11,2%, respectivamente. Sin embargo, la mayor fluidez y la falta de finos repercutieron en un menor anclaje de las fibras plásticas incorporadas. La doble cantidad del aditivo elastificante añadida en la 1b (10% s.p.c), no se reflejó en los resultados (ver tabla 5.10).

En la dosificación 2a (2ª campaña) la mayor relación a/c (0,89) y la redefinición del esqueleto granular permitieron mejorar notablemente la trabajabilidad y alcanzar una mezcla autocompactante, por lo

que la extensión de flujo (275 mm) fue un 34,1% superior respecto a la Patrón. Además, su mayor contenido de finos permitió envolver mejor las fibras y mejorar su anclaje respecto a las dosificaciones anteriores (1a y 1b). La extensión de flujo de la 2b (280 mm) reveló el buen desempeño del aditivo modificador de la viscosidad añadido, puesto que alcanzó un valor similar al de la 2a, a pesar de tener una relación a/c de 1.

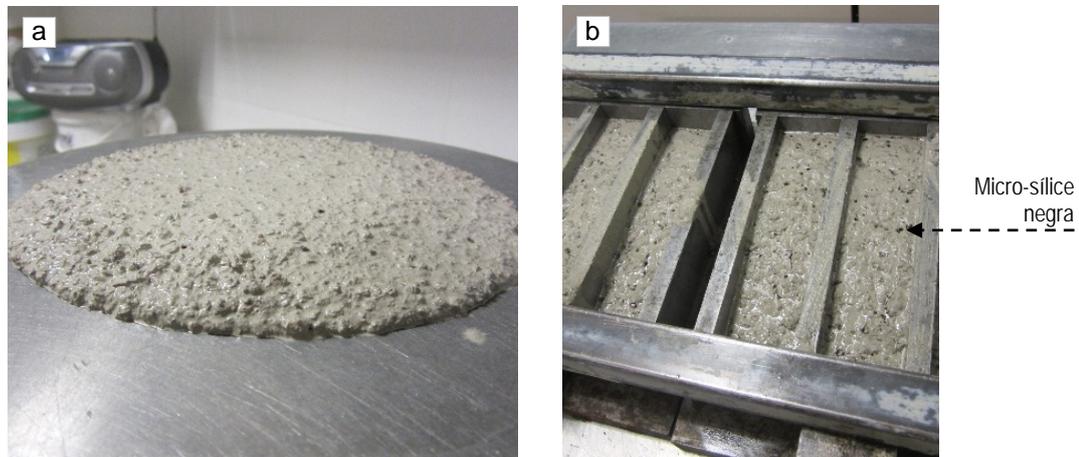


Figura 5.11: Dosificación Patrón a) Consistencia y b) Vibrado de las probetas

Las dosificaciones realizadas en la 1ª campaña, incluida la Patrón, obtuvieron valores medios de densidad en fresco de 2240 Kg/m³, mientras que en las de la 2ª campaña fueron de 2300 Kg/m³. Las mayores densidades reflejaron el mayor contenido de agua, pero también un menor porcentaje de aire oculto, puesto que al ser mezclas más fluidas permitieron escapar las burbujas de aire con mayor facilidad.

Los ensayos en estado endurecido se realizaron en distintas edades con el fin de evaluar el comportamiento de las dosificaciones. En la 1ª campaña experimental, la Patrón presentó los resultados más elevados en todas las edades. A los 28 días dicha dosificación alcanzó una resistencia a compresión de 39,5 MPa, a flexo-tracción de 8,0 MPa y de módulo de elasticidad de 22 690 MPa, valores que indicaron su gran resistencia mecánica y una elevada rigidez. Respecto a esta, la dosificación 1a, con un 5% s.p.c de aditivo elastificante y con una incorporación de fibras plásticas, disminuyó levemente esos valores. En concreto, se redujo un 13,9% la resistencia a compresión (34 MPa), un 12,5% a flexo-tracción (7,0 MPa) y un 7,1% su módulo de elasticidad (21.060 MPa).

De forma análoga, en la dosificación 1b, con un 10% s.p.c de aditivo elastificante y con el mismo contenido de fibras que la 1a, los resultados obtenidos disminuyeron respecto a los de la Patrón. No obstante, los descensos de las resistencias y del módulo fueron más significativos respecto a los de la 1a (ver tabla 5.10). Se estableció que ambas incorporaciones (aditivo elastificante + fibras) permitían mejorar la flexibilidad del micro-hormigón, aunque el mayor contenido de aditivo elastificante (10% s.p.c) podría repercutir en una reducción de sus capacidades mecánicas.

La dosificación 2a (2ª campaña) obtuvo a los 28 días respecto a la Patrón un incremento del 2,5% en la resistencia a flexo-tracción (8,2 MPa), una bajada del 19,7% de la resistencia a compresión (31,7 MPa) y una disminución del 19,3% en el módulo de elasticidad (18 301 MPa). Esta dosificación respondía a los requerimientos impuestos en la aplicación, mantenía las capacidades mecánicas respecto a la Patrón y, además, era más flexible y resistente a la flexo-tracción (ver tabla 5.8). Por lo tanto, era válida para su uso en las piezas prefabricadas de los futuros pináculos.

La dosificación 2b presentó resultados de resistencia a compresión (25,5 MPa), flexotracción (7,4 MPa) y módulo (19.531 MPa) dentro de los rangos establecidos, aunque más bajos respecto la 2a (ver tabla 5.10). Hecho que indicó que el aditivo modificador de la viscosidad incorporado era apto para su utilización en obra cuando se diera un exceso de agua en la mezcla.

En cuanto a los ensayos de adherencia en la tabla 5.10 sólo se presentan los resultados de las muestras de vidrio y gres con imprimación. Ello se debe a que en las muestras de los dos materiales sin imprimación el micro-hormigón se despegó antes de realizar el ensayo y el despegue fue totalmente limpio (ver figura 5.12a). En las secciones de las muestras ensayadas se apreció que el micro-hormigón absorbió parte de la imprimación y, por esta razón, mayoritariamente la rotura se produjo en este material, en vez de la interfase con las piezas de vidrio o gres (ver figura 5.12b).

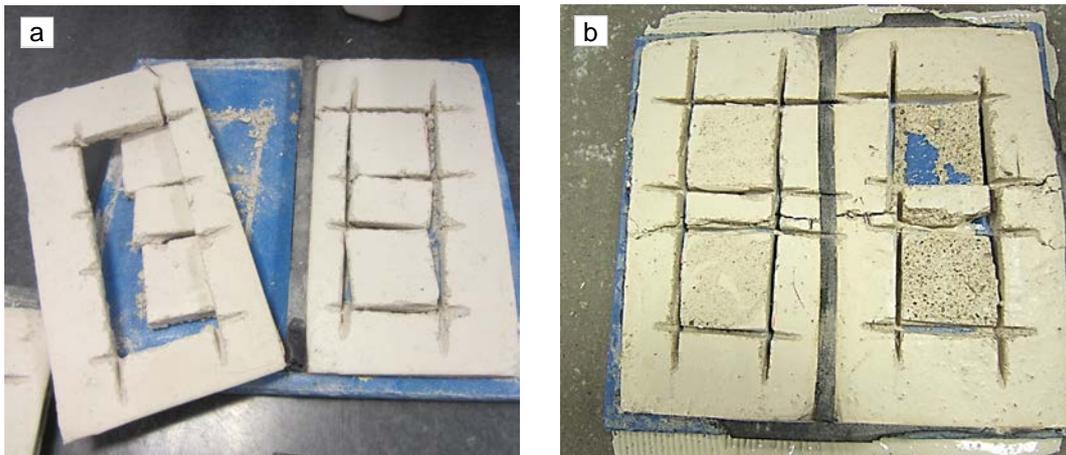


Figura 5.12: Probetas de vidrio de Murano ensayadas a adherencia a) Sin imprimación adicional b) Con imprimación previa

La dosificación 2a presentó mayores resultados en ambos materiales respecto a la 2b. El valor de la adherencia en la interfase con el gres de esta dosificación (2a) fue de 0,5 MPa, mientras que en el vidrio fue un 60% superior y se estableció en un 0,8 MPa. La normativa vigente de los adhesivos cementicios o morteros cola (*UNE-EN 12004*) establece una adherencia mínima en la colocación de baldosas cerámicas de 0,5 MPa. Por lo tanto, los resultados obtenidos en la dosificación 2a a los 15 días de edad cumplen lo que establece dicha normativa y además, en el caso del vidrio superaron ese valor. En consecuencia, se establece que la aplicación de una imprimación en el reverso de las piezas es una buena medida adoptar con el fin de aumentar la adherencia en la base de las piezas. Además, alargaría el contacto entre el vidrio de Murano y los álcalis del cemento y por tanto, una posible reacción alcali-sílice.

5.4.3 Campañas experimentales 3: Implantación en obra

Dosificaciones y métodos

En la 2ª fase experimental se estableció que la dosificación propuesta (2a) tenía altas prestaciones mecánicas y un buen comportamiento elástico que respondían a los requerimientos de la aplicación estudiada. En la 3ª campaña experimental se propuso implantar dicha dosificación en la empresa que actualmente produce las piezas de los pináculos Sotoo, mediante sus métodos de producción y equipos.

Si bien es cierto que en el presente estudio se partió de una dosificación Patrón ya conocida por esta empresa, la optimización de la misma con la incorporación de fibras plásticas y otros aditivos hizo necesario el seguimiento y apoyo para garantizar el éxito de su implantación. La filosofía adoptada en este

proceso fue acompañar a los trabajadores durante las primeras amasadas y ajustar la dosificación desarrollada a sus condiciones y métodos de producción.

Producción y curado

En el proceso de implantación en la empresa se aprovechó la experiencia de los trabajadores para definir los criterios sobre la fabricación de la dosificación propuesta (2a) (ver tabla 5.9). Uno de estos fue el de conseguir la consistencia deseada de la pasta a partir de la incorporación gradual del aditivo superplastificante. Ello permitiría, con la misma dosificación, alcanzar distintos tipos de consistencia en función de las geometrías de cada pieza, además de regular la cantidad de agua aportada por la humedad de los áridos, distinta en función de las estaciones el año.

Para la producción de la dosificación propuesta (2a) se utilizó una amasadora de obra de rotación horizontal con una capacidad nominal de 200 litros. Antes de iniciar el proceso, ésta se humedeció sin que quedara agua sobrante dentro para no añadiría a la mezcla. El proceso adoptado durante producción fue el siguiente:

- 1º) Incorporación en la amasadora de todos los componentes sólidos de la dosificación, excepto las fibras plásticas, empezando siempre por el más grueso y acabando por el más fino. Añadiendo al mismo tiempo la mitad del agua del amasado y mezclar todo durante medio minuto a una velocidad media;
- 2º) Incorporación gradual de las fibras plásticas, evitando la formación de erizos, y volver a mezclar todo durante medio minuto. En la figura 5.13a se presenta la pasta del amasado en este primer tiempo de su producción;
- 3º) Incorporación del aditivo elastificante mezclado con el resto de agua de amasado y mezclar todo durante un minuto. En las dosificaciones que agregan aditivos, para que estos puedan tener el efecto esperado, se recomienda que sean incorporados después de haber añadido agua, así los áridos no los absorben. Como se puede apreciar en la figura 5.13b, la incorporación de estos componentes modificaron la consistencia de la mezcla haciéndola más trabajable y de alta viscosidad;
- 4º) Incorporación gradual del aditivo superplastificante hasta que alcance la consistencia adecuada, determinada por los trabajadores de la empresa.

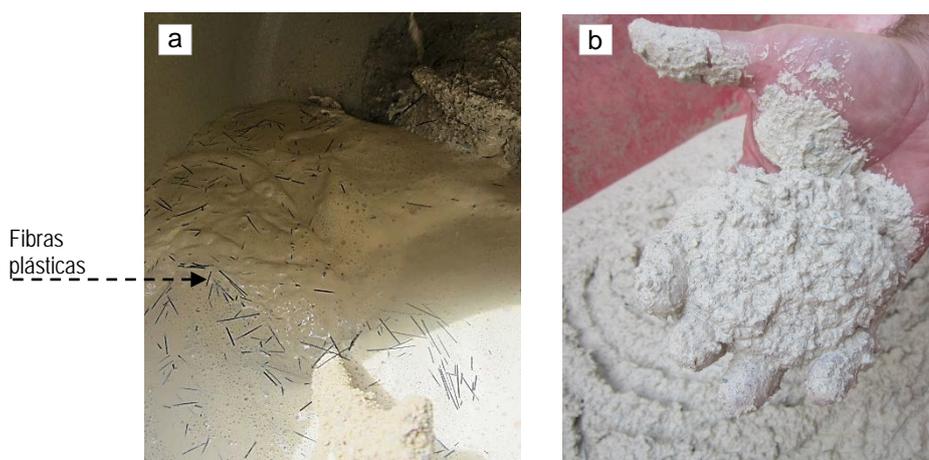


Figura 5.13: a) Primer tiempo del amasado de la dosificación propuesta y b) Detalle de la pasta

Una vez validada la consistencia se moldaron 3 tipos de probetas destinadas a diferentes ensayos: dos para los ensayos realizados para la 3ª campaña y un tercero para los ensayos de durabilidad, descritos en el capítulo 6 (ver tabla 5.11).

ENSAYOS	PROBETAS (mm)	TRENCADÍS				Nº TOTAL
		Gres		Vidrio		
		Imp	Sin	Imp	Sin	
Flexo-tracción	150x150x600	-				4
Adherencia	200x100x200	3	2	3	2	10
Durabilidad (Capítulo 6)	200x50x200	9	8	9	8	34

Tabla 5.11: probetas fabricadas en la 3ª campaña

Al ser una dosificación autocompactante no se realizó ningún proceso de vibrado, aunque sí un ligero movimiento transversal de los moldes para asentar el micro-hormigón. Durante las primeras 24 horas las probetas se curaron en las instalaciones de la empresa, en un ambiente interior protegido y tapadas con un plástico para evitar la pérdida de humedad. Posteriormente, se llevaron al Laboratorio de la UPC, donde se curaron durante 28 días en una cámara húmeda con una temperatura entre 20-25 °C y una humedad del 100%.

El primer tipo de probeta (150x150x600 mm) se realizó para poder determinar la resistencia residual a la tracción por flexión de la dosificación propuesta (2a) (ver tabla 5.11). De ésta se moldaron cuatro probetas según lo establecido por la normativa *UNE EN 12390-1* (ver figura 5.14a y b).

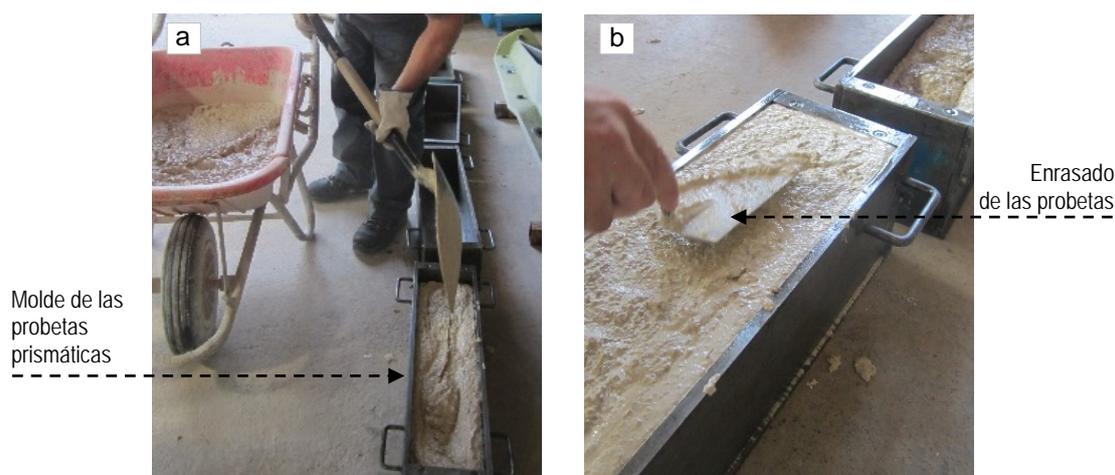


Figura 5.14: a) Relleno de las probetas prismáticas b) Enrasado de las probetas

El segundo tipo de probeta, de dimensiones de 200x100x200 mm, se diseñó específicamente para esta campaña para determinar la resistencia al arrancamiento de las piezas de *trencadís*. En este ensayo, como el de la 2ª fase experimental, se analizó también la influencia del material de las piezas de *trencadís* (vidrio de Murano o gres porcelánico) y el desempeño de una imprimación adicional en su reverso. De este tipo se fabricaron 10 probetas, la mitad se realizaron con piezas de gres y el resto con piezas de vidrio de Murano (ver tabla 5.11). En 3 de las probetas de cada material se aplicó la imprimación adicional 20 minutos antes del vertido del micro-hormigón (ver figura 5.15a).

Estas probetas se fabricaron igual que las piezas prefabricadas de los pináculos. Primero se depositaron las piezas de vidrio o gres en el fondo del molde y, posteriormente, se vertió el micro-hormigón dentro. Se emplearon cinco piezas cuadradas de 50x50 mm en cada una de las probetas, dispuestas en forma de cruz y separadas por un rejuntado de 12,5 mm, representando el desempeño del revestimiento. En ellas también se colocó una armadura interna de acero inoxidable para evitar la rotura por flexión en el ensayo (ver figura 5.15b).

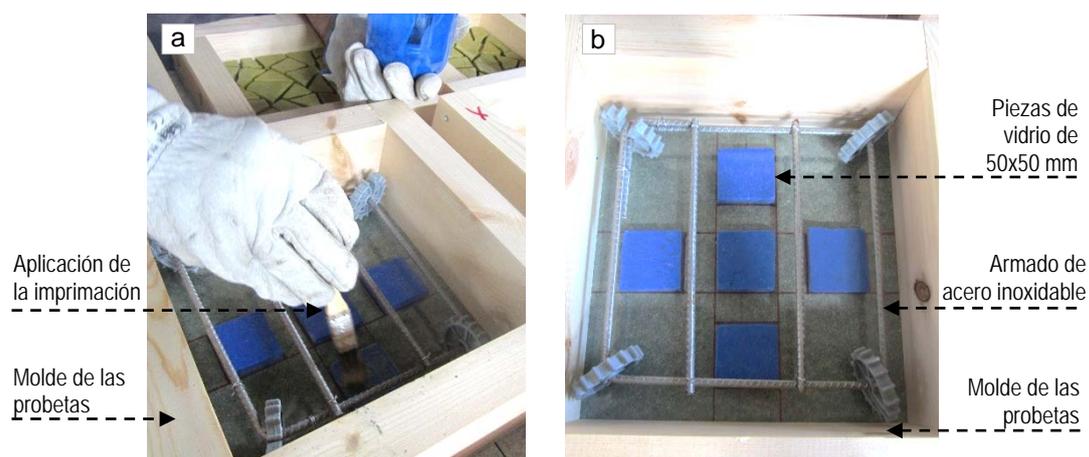


Figura 5.15: a) Aplicación de la imprimación en el reverso de las piezas b) Probetas para evaluar la adherencia al arrancamiento de las piezas antes del vertido del hormigón

Resultados y análisis

En la tabla 5.12 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de la 3ª campaña experimental. En ella se describen las dimensiones de las probetas, su edad y la normativa empleada. Para realizar los ensayos de la 3ª campaña se empleó la máquina de ensayo servo hidráulica INSTRON 8803 que cumple la normativa *UNE EN 12390-4*.

		RESULTADOS		DOS. 2a (obra)	
PROBETA (mm)		ENSAYO	EDAD días	UNIDADES	
NORMATIVA				\bar{X} (CV %)	
150x150x600 UNE EN 14651	Flexo-tracción	f_L	14	MPa	1,4
			24		1,6 (27,4)
		f_{R1} (w= 0,5 mm)	14		0,4
			24		0,3 (32,3)
		f_{R2} (w= 1,5 mm)	14		0,3
			24		0,2
		f_{R3} (w= 2,5 mm)	14		0,2
			24		0,2
50x50 UNE-EN 1348*	Adherencia	Gres	Imprimación	0,5 (9,9)	
			Sin	0,5 (32,6)	
		Vidrio	Imprimación	0,7 (20,1)	
			Sin	0,8 (32,8)	

(*) Adaptación del ensayo normalizado

Tabla 5.12: Resultados de la 3ª campaña experimental

Antes de ejecutar los ensayos a *flexo-tracción*, se efectuó una entalla centrada en uno de los laterales de cada una de las probetas prismáticas (150x150x600 mm), dejando una altura efectiva de 125 mm. En este tipo de ensayo se establece la resistencia residual a la tracción por flexión a partir de una curva carga-desplazamiento del borde de la fisura, obtenida aplicando una carga puntual centrada sobre la probeta de estudio apoyada en una luz de 500 mm.

Mediante la entalla realizada, se asegura que la principal fisura por flexión aparezca centrada en el medio de la probeta (ver figura 5.16a). Para poder medir y registrar los desplazamientos de dicha fisura se instala un transductor a lo largo del eje longitudinal, centrado en la mitad de la anchura de la probeta, permitiendo realizar lecturas con una precisión de 0,01 mm.

Las probetas se ensayaron a una edad de 14 y 24 días. En el ensayo se obtuvieron los valores de resistencia correspondiente al límite de proporcionalidad (f_L) y se definieron las resistencias residuales asociadas a la carga registrada en el ensayo para aberturas de fisura de 0,5mm, 1,5 mm, 2,5 mm y 3,5 mm (f_{R1} , f_{R2} , f_{R3} y f_{R4} respectivamente). El límite de proporcionalidad indica la primera fisuración del microhormigón y la resistencia de su matriz. En las dos edades ensayadas se obtuvieron resultados especialmente bajos, inferiores a los 2,0 MPa (ver tabla 5.12).

En la comparación de estos valores con los resultados obtenidos en el ensayo de flexión (UNE EN 196-1) de las probetas prismáticas de (40x40x160 mm) de la 2ª fase de la campaña (ver tabla 5.10), se observó que existe una gran diferencia de resultados para una misma dosificación (2a). Concretamente, en estos anteriores ensayos se obtuvieron resistencias a flexión a las 24 horas de 4,40 MPa, de 4,50 MPa a los 7 días y de 8,20 MPa a los 28 días. Según la literatura técnica consultada, una explicación a esta diferencia de resultados podría deberse a un posible efecto tamaño de las probetas de ensayo (Mahamud *et al*, 2013).

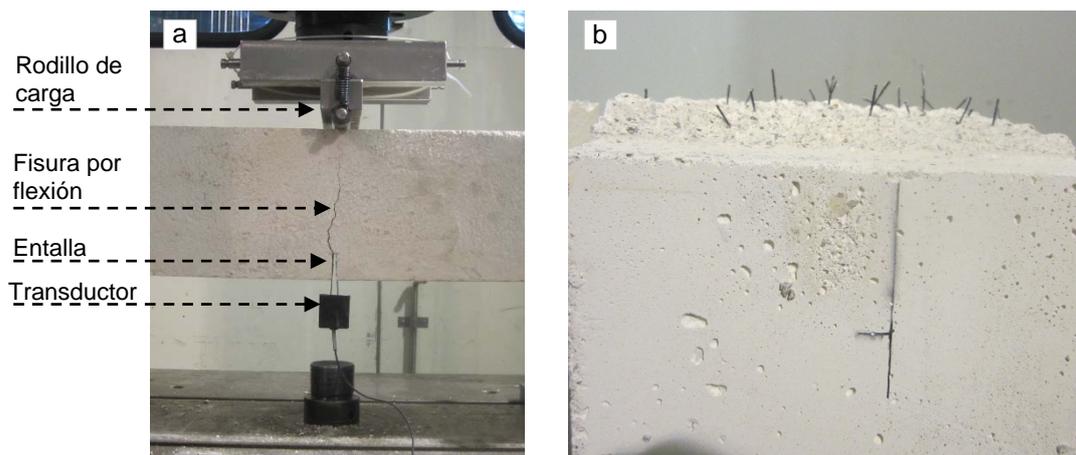


Figura 5.16: a) Ensayo para determinar la resistencia residual a la tracción por flexión y b) Sección resultante de la probeta ensayada

Después de la primera rotura del hormigón (f_L) existió una cierta resistencia residual que mantuvo unida la fisura producida por el ensayo a flexión, gracias a la contribución de las fibras. Los valores de las resistencias residuales obtenidas también fueron bastante bajas (ver tabla 5.12). En ninguno de los casos se aproximaron a la contribución mínima de las fibras calculada, establecida en 1,5 MPa (ver tabla 5.8). Como se puede observar en la figura 5.16b, existió una baja cuantía de fibras que atravesó por la sección de rotura, lo cual explica la caída de los resultados obtenidos.

El ensayo de adherencia para determinar la resistencia de las piezas al arrancamiento se realizó a los 28 días de edad. Para preparar el ensayo primero se colocó cada una de las probetas en una superficie plana horizontal. Seguidamente, en la pieza central de cada una de las probetas se adhirió una abrazadera metálica mediante un adhesivo de base polimérica (ver figura 5.17a).

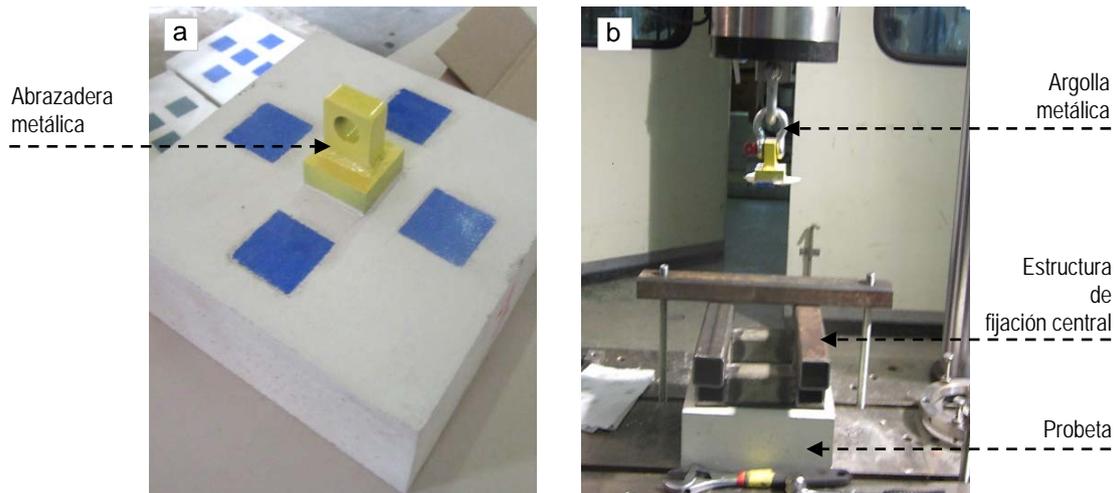


Figura 5.17: a) Probetas de ensayo para determinar la resistencia al arrancamiento y b) Ensayo en la prensa INSTRON

Una vez preparada, la probeta se colocó en la máquina INSTRON fijada mediante una subestructura metálica perimetral, con el objetivo de generar un marco de reacción durante el ensayo. Finalmente, se fijó la abrazadera metálica de la probeta al actuador central de la máquina mediante un argolla metálica, de manera que se pudiera generar la fuerza de tracción necesaria para realizar el ensayo de arrancamiento (ver figura 5.17b).

Los resultados de las tensiones de rotura (o adherencia) presentadas en la tabla 5.12 se calcularon a partir de la superficie de la pieza resultante una vez realizado el ensayo. Es decir, contando la superficie de la pieza más el hormigón adherido a ella (ver figura 5.18a). Las piezas de vidrio de Murano sin imprimación revelaron los resultados más elevados del ensayo, establecidos en una tensión media de 0,85 MPa. Considerando que en la 2ª fase no se pudieron obtener los resultados en las piezas sin imprimación, dado que el micro-hormigón se despegó el antes de realizar el ensayo, el valor obtenido en esta fase correspondería a la resistencia ejercida por el rejuntable del micro-hormigón en el confinamiento de las piezas (ver tabla 5.10).

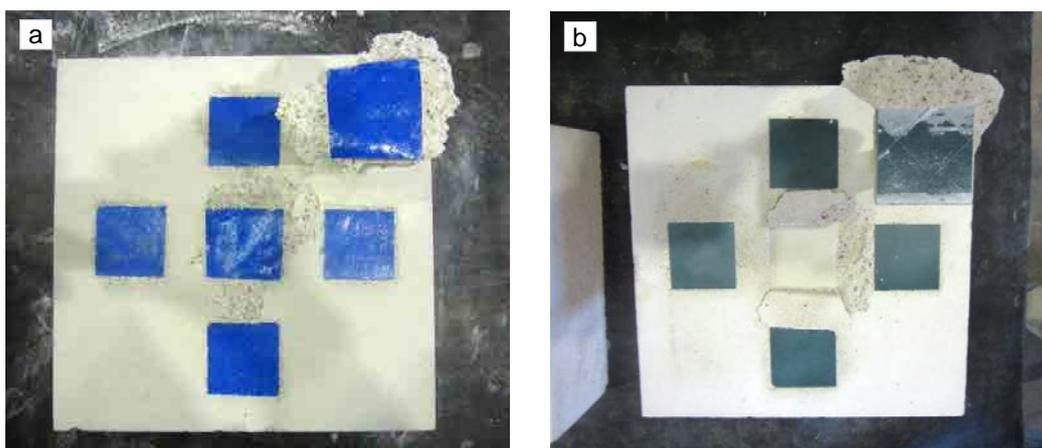


Figura 5.18: Probetas ensayadas al arrancamiento a) Probeta de vidrio con imprimación y b) Probeta de gres sin imprimación

En el caso de las piezas de vidrio, donde se aplicó la imprimación la adherencia al arrancamiento disminuyó un 12,9% y se obtuvo una media de 0,74 MPa (ver figura 5.12). La rotura, como en la 2ª fase, se manifestó en la sección interna del vidrio y en el micro-hormigón contiguo a la pieza que absorbió la

imprimación (ver figura 5.18a). En las probetas con piezas de gres no se apreció la influencia de la imprimación en los resultados fueron iguales de 0,5 MPa (ver tabla 5.12). No obstante, en los casos donde no se usó la imprimación el despegue de algunos laterales de las piezas fue totalmente limpio (ver figura 5.18b).

5.4.4 Campaña experimental 4: Redefinición de la dosificación propuesta

Dosificaciones y métodos

A pesar que el proceso de implantación fue un éxito, los resultados a flexo-tracción obtenidos en la dosificación (2a) fabricada por la empresa fueron muy bajos; por lo se volvió a redefinir la dosificación propuesta en los laboratorios de la empresa BASF en la 4ª fase del estudio. En este proceso se realizaron dos actuaciones en dicha dosificación sin perder los requerimientos de trabajabilidad y consistencia establecidos al inicio del estudio. La primera actuación fue disminuir su relación a/c (0,89) para aumentar la capacidad resistente de la matriz del micro-hormigón e incrementar los valores de resistencia a la rotura por flexión. La segunda actuación fue incrementar el contenido de las fibras plásticas para aumentar los resultados de resistencia residual.

En un primer momento se pensó aumentar el contenido de fibras respecto la dosificación 2a, de 3,5 kg/m³ a 6 kg/m³; se sustituyó el volumen del incremento de las nuevas fibras (2,5 kg/m³), por parte del volumen del árido grueso de la dosificación (un 2,8% menos de ojo de perdiz 2-6 mm). Sin embargo, durante la producción las mezclas admitieron un porcentaje mayor de fibras, hasta llegar a los 12 kg/m³ y se consideró oportuno mantener este incremento sin volver a modificar de nuevo volumen del árido grueso. En la tabla 5.13 se presentan las dosificaciones (4a y 4b) alcanzadas en 4ª campaña con una cuantía de fibras plásticas de 12 kg/m³ y unas relaciones a/c del 0,65 y 0,60, respectivamente.

DOSIFICACIONES		4a	4b
MATERIALES		CANTIDADES (kg/m ³)	
Conglomerante	Cemento Portland Blanco I 52,5 R	300,00	300,00
	Árido Ojo de Perdiz (2-6,3mm)	869,33	869,33
Áridos	Arena Calcárea (0-4mm)	730,00	730,00
	Filler Calizo	266,66	266,66
	Fibras plásticas estructurales	12,00	12,00
Aditivos y Adiciones	Superplastificante(% s.p.c)	4,50	5,00
	Elastificante (% s.p.c)	5,00	5,00
Agua	Agua libre	195,33	180,00
Relación a/c		0,65	0,60

Tabla 5.13: Dosificaciones fabricadas en la 3ª y 4ª campaña experimental

Las dosificaciones con baja relación a/c fue necesario emplear una cantidad mayor de superplastificante para alcanzar una consistencia apta para la aplicación. Respecto a la dosificación 2ª (2ª campaña), se añadió un 20,0% más de aditivo en la 4a y un 33,3% en la 4b.

Producción y curado

En esta campaña se realizó el mismo procedimiento de producción y curado que en la 1ª y 2ª fase experimental (ver apartado 5.4.2). Asimismo, se moldó 6 probetas prismáticas (40x40x160 mm) por dosificación y se realizaron los mismos ensayos que en la 1ª campaña del estudio (ver tabla 5.7).

Resultados y análisis

En la tabla 5.14 se presentan los resultados obtenidos en la 4ª campaña experimental. Las dosificaciones fabricadas (4a y 4b) alcanzaron mezclas con una buena trabajabilidad y los 12 kg/m³ de fibras plásticas quedaron bien distribuidas en la pasta. En la 4a se determinó una consistencia de 260,0 mm, mientras que en la 4b, con una menor relación a/c (0,6), este resultado fue de 195,0 mm, no alcanzando los valores impuestos en de la aplicación (> 205 mm). Ambas dosificaciones presentaron una densidad en fresco (2391 Kg/m³) superior a la dosificación 2a (2300 Kg/m³) al tener un menor consumo de agua respecto a esta.

PROBETA (mm) NORMATIVA	RESULTADOS			DOSIFICACIONES	
	ENSAYO	EDAD	UNIDADES	4a	4b
				\bar{X} (CV %)	
UNE-EN 1015-3	Extensión de flujo	-	mm	260,0	195,0
	Densidad en fresco	-	Kg/m ³	2404,0	2378,0
40x40x160 UNE-EN 196-1	Flexo-tracción	7 día	MPa	8,0	11,3
		28 días		10,2	10,6
	Compresión	7 días		48,6 (2,2)	51,3 (0,0)
40x40x160 UNE-EN 13412	Módulo de elasticidad	28 días		25 240,0	24 420,0

Tabla 5.14: Resultados de la 4ª campaña experimental

Como en las primeras campañas, los ensayos en estado endurecido se realizaron a distintas edades. A los 28 días ambas dosificaciones (4a y 4b) alcanzaron altos valores de resistencia mecánica. En el ensayo a flexo-tracción obtuvieron valores medios de 10,4 MPa y en compresión de 49,9 MPa, lo que representó un incremento respecto a la 2a del 26,8% del 57,4%, respectivamente. Ello se debió a la disminución de la relación a/c y al incremento de la cuantía de fibras. En la figuras 5.19a se presentan algunas de las probetas ensayadas en esta fase del estudio. Como se puede observar, estas se encuentran fisuradas, sin embargo no han roto la sección por completo, gracias al efecto de las fibras (ver figura 5.19b).

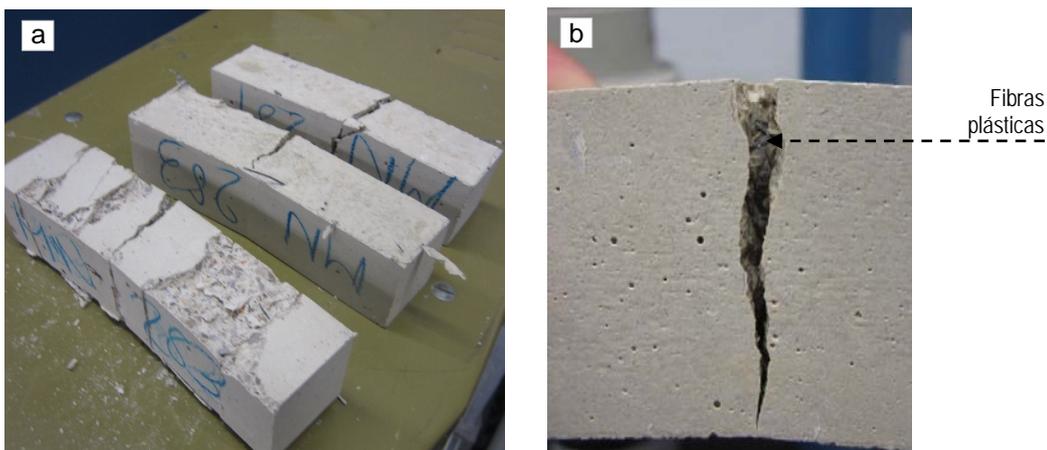


Figura 5.19: a) Probetas ensayadas de las dosificaciones con 12 kg/m³ de fibras plásticas y b) Detalle de la rotura por flexión de una de las probetas

La alta resistencia mecánica de estas dosificaciones (4a y 4b) también influyó en su mayor rigidez y en un aumento de su módulo de elasticidad respecto la dosificación 2a. Este se estableció en una media de 24.830 MPa, un 35,6% superior al de la dosificación 2a (18.301 MPa), y fuera de los rangos establecidos

al inicio del estudio (ver tabla 5.8). Por lo tanto, estas dosificaciones no eran aptas para la aplicación en las piezas prefabricadas de los pináculos.

5.4.5 Campañas experimentales 5 y 6: Redefinición final de la dosificación propuesta

Teniendo en cuenta, los altos valores de resistencia mecánica y módulo alcanzados por las dosificaciones (4a y 4b) de la 4^a campaña experimental, se consideró oportuno repetir una 5^a campaña en la empresa de los prefabricados, recuperando la dosificación propuesta (2a), pero esta vez incrementando su contenido de fibras hasta 12 Kg/m³. Esta dosificación obtenida en la 2^a campaña, además de ser más flexible que la Patrón, también dio buenos resultados en los ensayos de durabilidad que se realizaban paralelamente.

No obstante, durante la producción del micro-hormigón de esta campaña existió un error de pesada en el contenido de fibras. El error cometido no invalidó la campaña puesto que la búsqueda de la flexibilidad depende principalmente de la matriz de la mezcla y no tanto de las cuantía de fibras incorporadas. Sin embargo, en la 6^a campaña experimental se volvió a repetir la dosificación propuesta (2a) con la cuantía correcta de fibras (12 Kg/m³) y se evaluó con la misma campaña de ensayos para poder cuantificar su contribución.

En la tabla 5.15 se presentan las dosificaciones de la 5^a y 6^a campaña experimental del estudio. Las cuatro primeras (5a, 5b, 5aG, 5bG) corresponden a las dosificaciones fabricadas en 5^a fase del estudio y la quinta y última (6a) a la 6^a fase. Todas ellas parten de la dosificación 2a, aunque presentan pequeñas variaciones en función de algunos condicionantes surgidos durante la producción.

DOSIFICACIONES		5a	5b	5aG	5bG	6a
MATERIALES		CANTIDADES (kg/m ³)				
Conglomerante	Cemento Portland Blanco I 52,5 R	300,00	300,00	-	-	-
	Cemento Portland Gris I 52,5 R	-	-	300,00	300,00	350,00
Áridos	Árido Ojo de Perdiz (2-6,3mm)	894,66	894,66	894,66	894,66	894,66
	Arena Calcárea (0-4mm)	730,00	730,00	730,00	730,00	730,00
	Filler Calizo	266,66	185,00	266,66	185,00	266,66
	Fibras plásticas (F57/48)	1,20	1,20	1,20	1,20	12,00
Aditivos y Adiciones	Superplastificante(% s.p.c)	1,85	1,72	0,60	2,00	1,85
	Elastificante (% s.p.c)	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Agua	Agua libre	266,66	225,00	266,66	225,00	240,00
Relación a/c		0,89	0,75	0,89	0,75	0,68

Tabla 5.15: Dosificaciones de la 5^a y 6^a campaña experimental

La trabajabilidad de las mezclas fue establecida por los trabajadores de la empresa visualmente de ahí que se emplearan distintas cantidades de aditivo superplastificante en cada amasada, siguiendo los criterios definidos en la 3^a campaña. Por otra parte, las dosificaciones de la 5^a campaña deberían haber incorporado 12 Kg/m³ de fibras, sin embargo por error, sólo se incorporó la décima parte (1,2 Kg/m³). En la dosificación 6a (6^a campaña) el contenido de cemento blanco debería de haber sido igual que en las dosificaciones anteriores (300 kg/m³), por el contrario fue de 350 kg/m³.

La dosificación 5a tenía las mismas cantidades y componentes respecto la 2^a (2^a campaña) excepto en el contenido de fibras (1,2 kg/m³) y de aditivo superplastificante (1,85% s.p.c). En la 5b con el fin de disminuir más su módulo de elasticidad, aunque manteniendo el incremento de fibras, se consideró

tantear con esta dosificación dónde se modificara el esqueleto granular y la relación a/c de la dosificación 2a. La 5b tenía un 30,0% menos de filler y una relación a/c de 0,75.

Las dosificaciones 5a y 5aG y las 5b y 5bG eran similares entre sí, diferenciándose en el color del cemento y en la cantidad de superplastificante. Ello responde, en cuanto al color del cemento, a la intención de caracterizar todas las dosificaciones posibles en la obra, puesto que los artistas de los pináculos utilizan indistintamente ambas coloraciones.

La dosificación 6a (6ª campaña) parte de la dosificación 2a pero con una cuantía de 12 kg/m³ de fibras plásticas, un 16,6% más de cemento gris, y una relación a/c de 0,68. Esta dosificación (6a) se diseñó con una relación inicial a/c de 0,8 para incrementar levemente su resistencia mecánica respecto a la 2a, sin perder significativamente su flexibilidad. Por este motivo, la cantidad de agua de esta dosificación es menor respecto a la 2a (240 kg/m³). Sin embargo, el día de la producción se añadió más de la cantidad de cemento de la establecida inicialmente por equivocación y se disminuyó la relación a/c hasta 0,68. Si bien la mezcla perdió un poco de trabajabilidad con un 9,9% menos de agua, los trabajadores la consideraron apta para la producción de las piezas.

Producción y curado

El proceso de producción de las dosificaciones de las campañas 5ª y 6ª fue el mismo que el realizado en la 3ª fase del estudio (ver apartado 5.4.3). Todas las probetas fabricadas fueron moldeadas siguiendo sus respectivas normativas, aunque se ejerció en todas ellas, a diferencia de la 3ª campaña, un vibrado externo de los moldes a través de un vibrador de aguja (Ø 25,6 mm), reproduciendo el proceso de producción real de las piezas. Con posterioridad, se realizó el mismo proceso de curado de la 3ª campaña en las instalaciones de la UPC (ver apartado 5.4.3).

En la tabla 5.16 se presenta el número de probetas producidas por cada dosificación de estudio. Mediante las dosificaciones de cemento blanco de la 5ª campaña (5a y 5b) se moldaron todas las probetas prismáticas del estudio, mientras que con las de cemento gris (5aG y 5bG) se moldaron las cilíndricas y un prototipo de pieza revestida con *trencadís*. En la 6ª y última campaña se realizaron los mismos tipos de probetas que en la anterior fase pero en un número mayor de muestras (ver tabla 5.16)

Los prototipos de piezas de *trencadís* de la 5ª campaña fueron fabricadas siguiendo el mismo proceso de producción que se realiza para las piezas prefabricadas de los pináculos. El objetivo era poder validar el desempeño de las dosificaciones propuestas y el acabado final del revestimiento de dichas piezas. Para su producción fue empleado un antiguo molde de poliéster de los pináculos, donde se adhirieron piezas de *trencadís* de vidrio y gres mediante una silicona de fácil eliminación (ver figura 5.20a y b).

PROBETAS (mm)	Nº DOSIFICACIÓN		
	5a / 5b	5aG / 5bG	6a
150x150x600 (UNE EN 12390-1)	3	-	6
40x40x160 (UNE-EN 196-1)	6	-	9
Ø100;H=20 (UNE-EN 12390-2)	-	3	9
Pieza revestida con <i>trencadís</i>	-	1	-

Tabla 5.16: Probetas fabricadas en la 5ª y 6ª campaña experimental

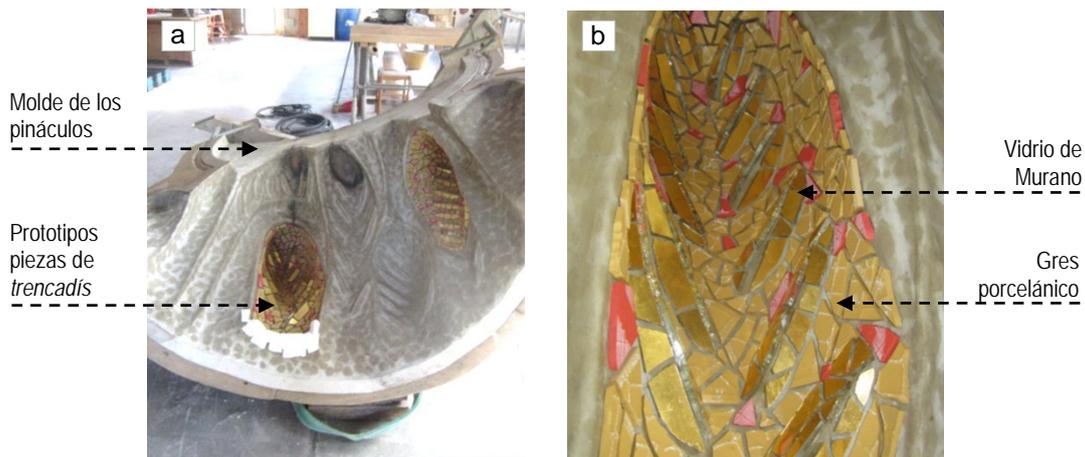


Figura 5.20: Molde de las piezas prefabricadas de los pináculos Sotoo donde se realizaron los prototipos de piezas de *trencadís* y b) Detalle del revestimiento de *trencadís* de las pruebas

Una vez vertido el micro-hormigón en los moldes se realizó un proceso de vibrado interno (vibrador de aguja; \varnothing 25,6 mm) para que la mezcla rellenara el rejuntado del *trencadís* (ver figura 5.21a). Por último, se enrasó con una paleta la parte posterior de las piezas y se colocó una armadura de manipulación (ver figura 5.21b) A diferencia del resto de probetas estas se curaron íntegramente en las instalaciones de la empresa de los pináculos.

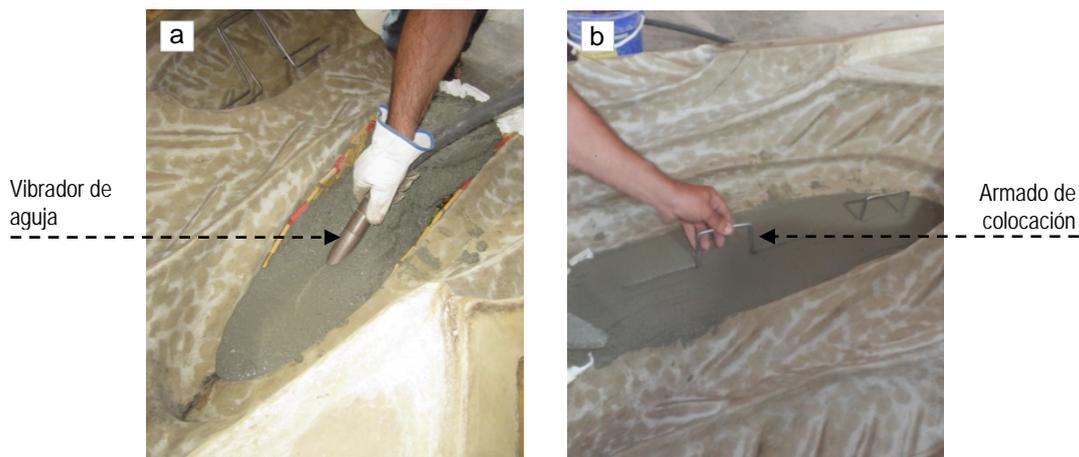


Figura 5.21: a) Vibración de una de las probetas con *trencadís* y b) Colocación del armado de manipulación

Resultados y análisis

En la tabla 5.17 se presentan los resultados obtenidos en estado fresco y endurecido de las dosificaciones de la 5ª y 6ª campaña experimental. La consistencia en fresco en ambas fue determinada mediante el cono de Abrams (*UNE-EN 1015-3*) debido a la falta de disponibilidad de los equipos empleados en anteriores campañas. En todas las dosificaciones producidas los valores de *extensión de flujo* obtenidos superaron el umbral de 205 mm de la Patrón, por lo que alcanzaron los requerimientos de trabajabilidad inicialmente establecidos (ver tabla 5.8).

Las dosificaciones de la 5ª campaña presentaron un valor medio de extensión de flujo de 296 mm, próximo al de la dosificación 2a (275 mm), a pesar de tener un contenido menor de aditivo superplastificante. La dosificación 5aG, donde se empleó la menor cantidad de aditivo superplastificante (0,6% s.p.c), obtuvo el mayor valor de extensión de flujo (362,5 mm), así como de asentamiento de toda la

campana. La dosificación 6a (6ª campana) obtuvo un valor de extensión (255 mm) un 7,2% menos respecto a la 2a, debido a su menor contenido de agua y de superplastificante.

RESULTADOS			DOSIFICACIONES				
PROBETA (mm)	ENSAYO	UNID.	5a	5b	5aG	5bG	6a
NORMATIVA			\bar{X} (CV %)				
UNE-EN 12350	Extensión de flujo	mm	287,5	252,5	362,5	283,0	255,0
	Asentamiento	mm	160,0	120,0	240,0	160,6	163,3
	Densidad en fresco	Kg/m ³	2344,9	2268,6	2205,1	2268,6	21948,3
	Aire ocluido		2,8	2,8	3,0	3,8	3,4
Ø100;H=200 UNE EN 1936	Porosidad abierta	%	-	-	21,9 (1,6)	17,3 (1,3)	21,9 (0,7)
Ø100;H=200 UNE 12390-7	Densidad	Kg/m ³	-	-	1856,4 (0,4)	2025,3 (0,2)	2010,2 (0,6)
40x40x160 UNE-EN 196-1	Flexo-tracción		4,9 (6,6) 27,6 (3,7)	5,3 (5,3) 31,8 (6,4)	-	-	6,1 (7,8) 34,8 (7,3)
Ø100;H=200 UNE 12390-3	Compresión		-	-	15,1 (2,1)	24,7 (2,5)	28,0 (3,9)
Ø100;H=200 UNE-EN 13412	Módulo de elasticidad	MPa	-	-	13.731,0 (0,7)	21.012,0 (2,3)	21.242,7 (6,5)
	f_L		3,6 (34,5)	2,9 (3,6)	-	-	3,4 (1,6)
150x150x600 UNE EN 14651	Flexo-tracción	f_{R1} (w= 0,5 mm)	-	-	-	-	1,6 (34,2)
		f_{R2} (w= 1,5 mm)	-	-	-	-	2,4 (16,7)
		f_{R3} (w= 2,5 mm)	-	-	-	-	2,8 (19,7)
		f_{R4} (w= 3,5 mm)	-	-	-	-	3,0 (21,1)

Tabla 5.17: Resultados de la 5ª y 6ª campana experimental

Las dosificaciones de la 5ª campana alcanzaron valores de densidad en fresco entre los 2200 - 2300 Kg/m³ y muy similares a la Patrón (2250 kg/m³). Estos resultados eran razonables a la luz de las altas relaciones agua/cemento empleadas y, que al tratarse de un micro-hormigón, la cantidad de pasta se sitúa en la gama alta. En la dosificación 6a (6ª campana) la densidad fue un poco menor (21948 kg/m³) aunque se relaciona por una mayor cantidad de aire ocluido en la mezcla (ver tabla 5.17).

En este sentido, los valores de aire ocluido (determinado mediante el procedimiento descrito en la normativa UNE EN 12350-7) los resultados se situaron alrededor del 3,0% en casi todas las dosificaciones producidas en las dos campanas (ver tabla 5.17). En las dosificaciones 5bG y la 6a alcanzaron un valor superior de 3,8% y del 3,4%, respectivamente. Aunque teniendo en cuenta la granulometría del micro-hormigón fabricado, más próxima a la de un mortero, los valores obtenidos de aire ocluido se consideran bajos.

Los ensayos en estado endurecido se realizaron a los 28 días de edad en las dos campanas 5ª y 6ª. En los resultados a flexo-tracción de las probetas de 40x40x160 mm las dosificaciones 5a y 5b presentaron una bajada de la resistencia respecto a la Patrón (8,0 MPa) del 37,6 y 33,0%, respectivamente. Ello se debe principalmente a las modificaciones realizadas en la matriz. Aunque los valores obtenidos de 4,9 MPa en la 5a y de 5,6 MPa en la 5b, se consideran válidos, puesto que superan los 2 MPa establecidos al inicio del estudio (ver tabla 5.8). La menor resistencia obtenida en la 5a se relaciona por su mayor relación a/c (0,89) y por tanto, mayor porosidad, que tiende a presentar resultados más bajos de resistencia mecánica. En la dosificación 6a (6ª campana) se alcanzó una mayor resistencia (6,1 MPa), respecto a las de la 5a campana, debido a la contribución de los 12 Kg/m³ de fibras.

La redefinición del esqueleto granular de la Patrón en las dosificaciones propuestas (5a, 5b y 6a) permitieron disminuir su alta resistencia a compresión cubica (39,0 MPa). Por lo que en dichas dosificaciones se disminuyó ese valor, un 30,0%, un 19,1% y un 10,7%, respectivamente (ver tabla 5.17). Los resultados obtenidos superaron el mínimo de resistencia a compresión requerida en el estudio, establecida en 20 MPa. La dosificación 6a (6ª campaña) alcanzó el mayor valor de resistencia (34,8 MPa) debido a su menor relación a/c (0,68).

Las dosificaciones de cemento gris de la 5ª campaña experimental (5aG y 5bG) alcanzaron resistencias de compresión cilíndrica de 24,7 MPa y 15,1 MPa, respectivamente. Valores más bajos respecto a las obtenidas en la compresión cubica, pero ello se atribuye a un efecto de escala. En la dosificación 6a (6ª campaña) se obtuvo un resultado mayor respecto a éstas, establecido en 28,0 MPa, por lo que ello se relaciona por su menor relación a/c y la mayor cuantía de fibras de esta dosificación.

Los módulos de elasticidad obtenidos en las dosificaciones propuestas (5aG, 5bG, y 6a) no se encontraron dentro del rango establecido al inicio del estudio entre 15000-20000 MPa, aunque sí se aproximaron (ver tabla 5.8). La dosificación 5aG con una relación a/c superior (0,89) obtuvo un módulo de 13 731 MPa, valor por debajo de ese rango. Ello se correlaciona con la baja resistencia a compresión obtenida en esta dosificación (< 20 MPa) y al tener una relación a/c más elevada tiene una mayor porosidad y por tanto, tiende a ser más flexible y menos resistente.

Las dosificaciones con unas relaciones a/c superiores, como la 5bG (0,75) y la 6a (0,68), presentaron un módulo de elasticidad superior, próximo a los 21000 MPa. Si bien los resultados superaban el rango establecido al inicio del estudio (15000-20000 MPa), ambas dosificaciones disminuyeron el módulo respecto a la Patrón (22690 MPa) en un 7,3% y 6,3%, respectivamente. Por lo que dichas dosificaciones eran más flexibles y menos resistentes que la Patrón.

En el ensayo a flexo-tracción de las probetas de 150x150x600 mm sólo obtuvieron los valores de límite de proporcionalidad (f_L), relacionado con la primera fisura que se produce en el ensayo, las dosificaciones de la 5ª campaña (5a y 5b). El motivo de ello se debe a que no se pudieron obtener el resto de resistencias residuales, a causa de la poca cuantía de fibras de las dosificaciones debido a un error de pesada. No obstante, los valores f_L alcanzados en ambas dosificaciones de 3,6 MPa (5a) y de 2,9 MPa (5b) superaron los 2 MPa establecidos al inicio del estudio.

En la dosificación 6a (6ª campaña) con una matriz similar, especialmente con la 5a, pero con una cuantía de fibras de 12 Kg/m³, el resultado de f_L fue parecido y se estableció en 3,4 MPa. En esta dosificación sí que se obtuvieron los valores de resistencia residual (post fisuración) asociadas a la carga registrada en el ensayo, para aberturas de fisura de 0,5mm, 1,5 mm, 2,5 mm y 3,4 mm (f_{R1} , f_{R2} , f_{R3} y f_{R4} respectivamente). Todas las resistencias residuales obtenidas superaron los 2 MPa (ver tabla 5.17). Además, la resistencia residual f_{R4} alcanzó el mayor resultado (3 MPa) y dobló el valor buscado en el cálculo de 1,5 MPa (ver tabla 5.17).

Ninguna de las probetas ensayadas de 150x150x600 mm de la 6ª fase experimental rompió por completo su sección tras el ensayo (ver figura 5.22a). Después de la fisuración del micro-hormigón, las fibras distribuidas por la probeta "cosieron" la fisura e hicieron que todo el bloque trabajara traccionado (Pujadas, 2013) (ver figura 5.22b). En la figura 5.23a y b se presentan unas de las gráficas que relacionan la carga con el ancho de fisura (CMOD) obtenido en el ensayo que muestra dicho comportamiento. Como se puede observar en las dos gráficas, existe una tendencia prácticamente lineal hasta la 1ª fisura (f_L) y, posteriormente, aunque el ancho de fisura incrementa se produce una recuperación de los resultados

gracias a la aportación de las fibras. En el caso de la probeta de la figura 5.23b, el máximo de carga se alcanzó una vez la probeta ya estaba fisurada.

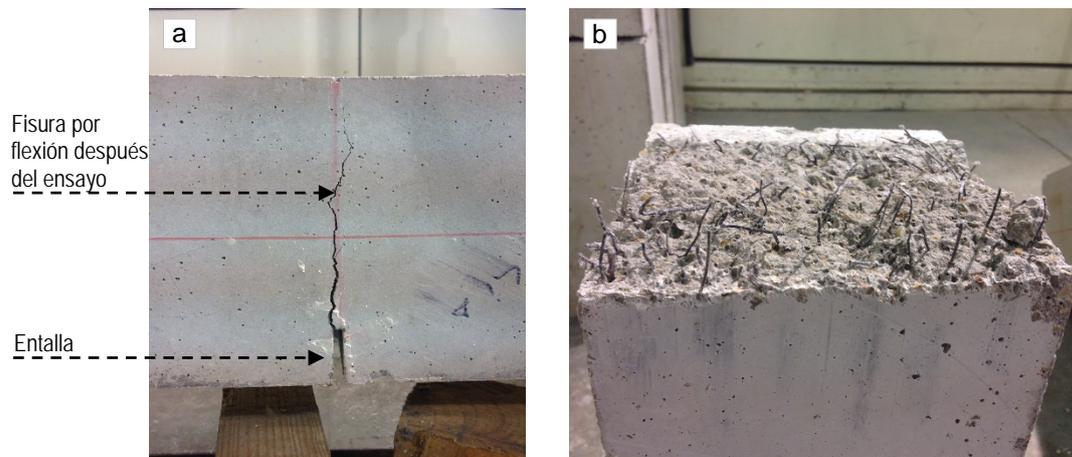


Figura 5.22: Detalle de una probetas después del ensayo a flexo-tracción y b) Sección de la probeta de micro-hormigón y 12kg/m^3 de fibras

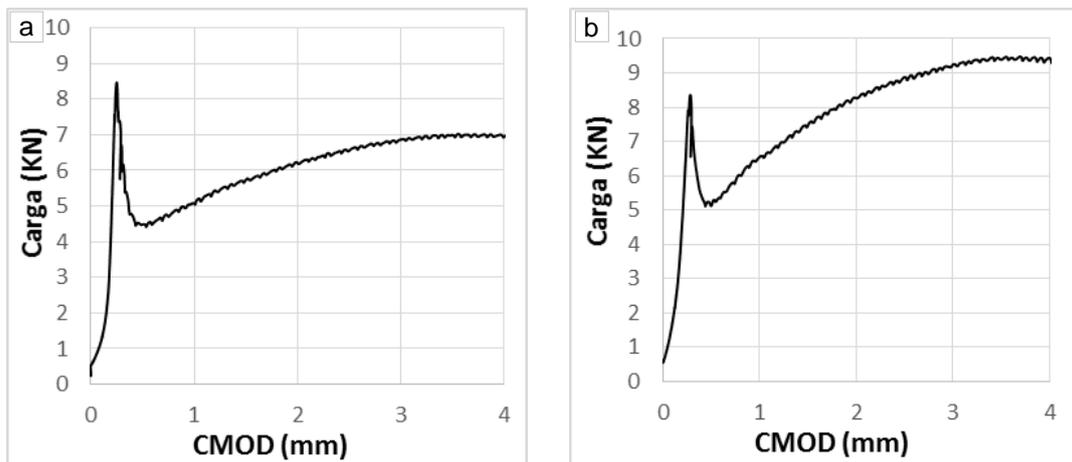


Figura 5.23: Graficas Carga-CMOD de dos de las probetas ensayadas

Según los técnicos de la Sagrada Familia los dos prototipos de piezas revestidas con trencadís fabricados en la 5ª campaña experimental, con las dosificaciones 5aG y 5bG, fueron plenamente satisfactorios. En la figura 5.24a y b se presentan algunas de las imágenes suministradas, donde se aprecia que el micro-hormigón relleno perfectamente el rejuntado del trencadís, obteniendo un buen acabado del revestimiento.

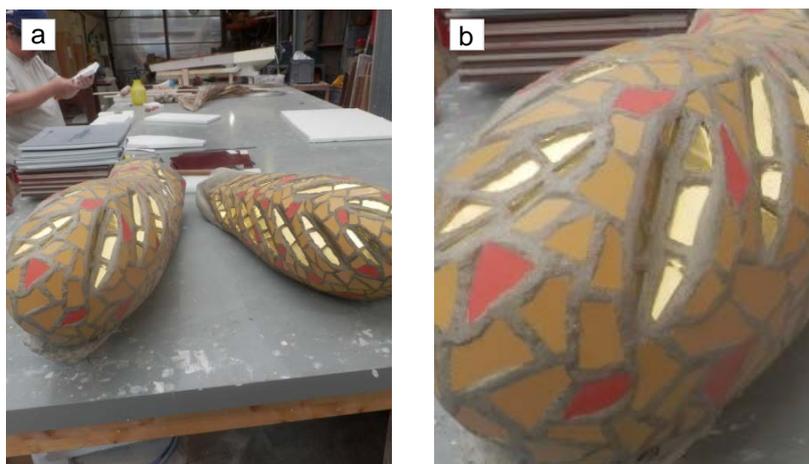


Figura 5.24: a) Piezas revestidas con *trencadís* fabricadas durante la 5ª campaña experimental y b) Detalle del revestimiento de *trencadís*

Dosificación propuesta final

En base a los resultados obtenidos en la tabla 5.18 se presenta la dosificación que se propone para la futura fabricación de las piezas prefabricadas de los futuros pináculos. Esta tiene el mismo esqueleto granular que las dosificaciones 5a, 5aG (5ª fase) y 6a (6ª fase) y las mismas cantidades de los aditivos. A diferencia de estas se propone una relación a/c de 0,8, dado ello permitirá obtener un módulo dentro del rango establecido (15 000-20000 MPa) que se encuentra entre medio del obtenido por dichas dosificaciones (5aG y 6a). Así que el micro-hormigón producido podrá ser más flexible que el que se estaba usando pero manteniendo las capacidades resistentes. Asimismo, se propone una cuantía de 12 kg/m³ en vista de los buenos resultados obtenidos en la dosificación 6a. Ello permitirá sustituir total o parcialmente la armadura de acero inoxidable y además, evitará en un posibles desprendimientos.

	MATERIALES	CANTIDADES (kg/m ³)
Conglomerante	Cemento Portland Blanco I 52,5 R	300,00
	Cemento Portland Gris I 52,5 R	
Áridos	Árido Ojo de Perdiz (2-6,3mm)	894,66
	Arena Calcárea (0-4mm)	730,00
	Filler Calizo	266,66
	Fibras plásticas estructurales (F 57/48)	12,00
Aditivos y Adiciones	Superplastificante (% s.p.c)	1,85
	Elastificante (% s.p.c)	5,00
Agua	Agua libre	240,00
Relación a/c		0,80

Tabla 5.18: Dosificación propuesta para las futuras piezas prefabricadas de los pináculos

5.4.6 Sistema de producción actual de las piezas prefabricadas de los pináculos

En la actualidad la dosificación de micro-hormigón propuesta obtenida fruto de este estudio es empleada para la fabricación de las nuevas piezas de los pináculos Sotoo (ver tabla 5.18). Gracias a la aportación de las fibras de la dosificación (12 kg/m³) es posible reducir la cuantía del armado de acero

inoxidable de estas piezas, por lo que solamente se dispone sólo de una armadura para su colocación en obra (ver figura 5.25a y b).



Figura 5.25: Molde y armadura de colocación de las futuras piezas prefabricadas de los pináculos antes del vertido del micro-hormigón y b) Pieza prefabricada de micro-hormigón con fibras una vez desmoldada

La Dirección Facultativa de la obra en vista de los buenos resultados de acabado y comportamiento de los morteros cola empleados en la restauración de los pináculos varió el sistema de producción de estas piezas respecto a las de la época de Gaudí. Una vez finaliza el proceso de curado de las piezas de micro-hormigón con fibras, se abujarda la superficie para incrementar la adherencia y el anclaje de los morteros. Con posterioridad, se adhieren las piezas de *trencadís* una a una en la superficie, mediante el mortero de colocación pre-dosificados empleados también en la restauración (ver figura 5.26a y b). En este caso al no tratarse de revestimientos patrimoniales, como es el caso de la restauración de los pináculos de la Fachada de la Pasión, se emplea indistintamente piezas de vidrio de Murano y de gres porcelánico. Para finalizar la pieza, se aplica el mortero de rejuntado en el nuevo revestimiento de *trencadís*.

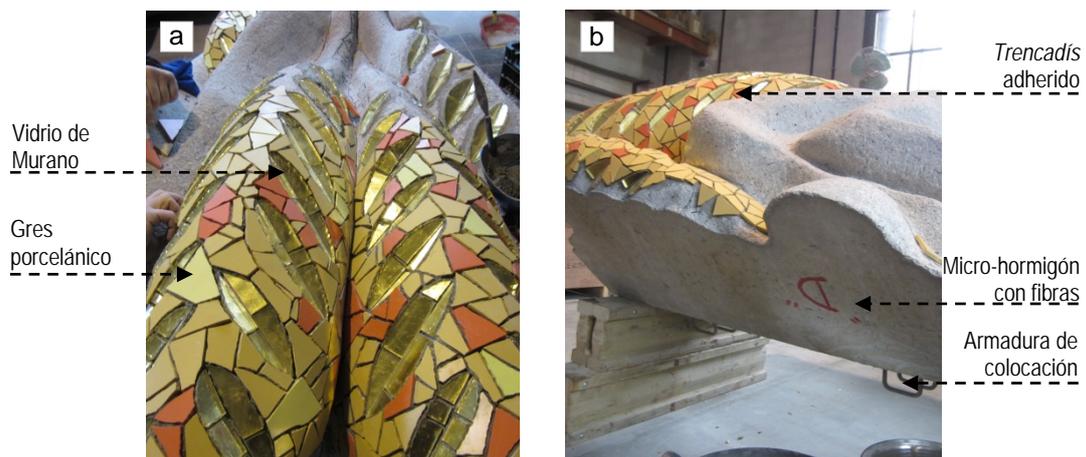


Figura 5.26: a) Detalle del nuevo revestimiento de *trencadís* durante su colocación y b) Piezas prefabricadas de micro-hormigón con fibras revestidas con *trencadís* de los nuevos pináculos

5.5 CONCLUSIONES

En base los resultados obtenidos en los distintos estudios realizados y expuestos en este capítulo se establecen las siguientes conclusiones:

- A partir de la campaña realizada en uno de los pináculos de la Fachada de la Pasión (Sto. Tomás) se determina que los morteros pre-dosificados empleados para su restauración son de alta calidad y aptos para la aplicación. Así lo demuestran los valores de adherencia media obtenidos in situ, que atienden con holgura a los requerimientos impuestos por la normativa como también, los garantizados por el fabricante. Los valores obtenidos son adherencias iniciales (6 días) por lo que se espera alcanzar a los 28 días valores de adherencia ligeramente superiores.
- De la campaña de optimización del mortero de restauración se concluye que la redefinición de la matriz con un esqueleto granular en una relación cemento-árido 1:3,5 en volumen, y la introducción de resina de látex en una proporción 1:5 respecto al agua, son buenas medidas adoptar para mejorar la flexibilidad de los morteros sin que se vean perjudicadas su capacidad resistente.
- En la aplicación específica del mortero de reparación de los pináculos, la dosificación propuesta Patrón Reducida (P.RED) consiguió altas capacidades mecánicas y mejoró su flexibilidad respecto a la dosificación Patrón de referencia. Se mantuvo la resistencia a compresión, a la vez que se redujo tanto el módulo de elasticidad dinámico (en un 17,5%) como el estático (en un 6,12%). Ello favorecerá la adaptabilidad del mortero a las deformaciones térmicas que podrían acelerar el proceso de degradación de los pináculos. Asimismo se verificó un incremento en la adherencia con las piezas de vidrio de Murano respecto a la Patrón. Por otro lado, dosificación propuesta, simplificó el proceso de producción, mediante la reducción del número de materiales, y reducción de su coste, dado que disminuyó un 21% del contenido de cemento respecto a la dosificación Patrón.
- De esta misma campaña se concluyó que la incorporación del aditivo expansivo en la dosificación no proporcionaba mejoras en la resistencia del mortero, ni en su adherencia con los vidrios de Murano para el caso estudiado.
- En base a las diferentes campañas de optimización de la dosificación de micro-hormigón destinada a los nuevos pináculos se concluye que las modificaciones realizadas en el esqueleto granular de la matriz de la dosificación Patrón de partida y la adición de un aditivo elastificante en un (5% s.p.c) permitieron mejorar la trabajabilidad y la flexibilidad de las dosificaciones propuestas. Ello facilitara el proceso de producción de las piezas y alargará también, la vida en servicio de sus revestimientos de *trencadís*. Asimismo, estas actuaciones favorecieron a reducir los altos valores de resistencia mecánica de dicha dosificación Patrón, hasta valores adecuados para la aplicación de estudio.
- A partir del estudio realizado se concluye que la incorporación de una cuantía 12kg/m³ de fibras plásticas estructurales en la dosificación propuesta es viable, en cuanto a resistencias requeridas y a su fabricación, y permite sustituir el armado de acero actual, reducir el tiempo de producción y coste de las piezas. Además, de evitar posibles fisuraciones y desprendimientos en estas estructuras decorativas.
- La imprimación adicional aplicada en el reverso de las piezas de *trencadís* evaluada en el estudio colaboró en el aumento de la adherencia en la interfase de la base de las piezas, ello especialmente en las piezas de vidrio de Murano. Sin embargo, este buen desempeño no se vio reflejado en el ensayo de arrancamiento, siendo mayor o igual los resultados sin la aplicación de

dicha imprimación. Pese a estos últimos resultados, se cree conveniente la aplicación de esta imprimación dado que siempre será una aportación para aumentar la adherencia y no para provocar su efecto contrario. Además también su uso puede contribuir, en el caso de las piezas de vidrio, a prevenir el contacto entre el vidrio y los álcalis del cemento y por tanto, un posible ataque álcali-sílice.

- A partir de la evaluación del aditivo modificador de la viscosidad incorporado en una de las mezclas producidas con exceso de agua se considera apto para su utilización en obra cuando existan dichas condiciones, dado que permite mantener las capacidades mecánicas.

CAPÍTULO 6

ESTUDIOS DE DURABILIDAD: CAMPAÑA EXPERIMENTAL Y SEGUIMIENTO VISUAL

6.1 INTRODUCCIÓN

El *trencadís* de vidrio de Murano de los pináculos de la Sagrada Familia tiene una clara influencia y similitud con obras de mosaicos históricas como, la Iglesia de Santa Sofía, en Istambul, o la Basílica de San Marco, en Venecia. Sin embargo su aplicación al exterior a gran altura y mediante prefabricados de hormigón no tiene precedentes. En la actualidad se está efectuando la rehabilitación de este tipo de revestimientos. Para ello se utilizan morteros pre-dosificados de alta gama que atienden con holgura los requerimientos de adherencia y envejecimiento impuestos por la normativa vigente. No obstante, dada la singularidad de la obra de la Sagrada Familia, surge el requerimiento de conocer la efectividad y el proceso de degradación de dichos morteros, como también del micro-hormigón desarrollado para las futuras piezas de los pináculos.

Los ensayos de envejecimiento normalizados destinado a la evaluación de revestimientos (*UNE-EN 12004*), están definidos como una referencia indirecta con el objetivo de garantizar una mínima adherencia y no permiten estimar la vida útil o la durabilidad de los mismos. Además, estos contemplan la adherencia en baldosas cerámicas y no en otros materiales como el vidrio, ni tampoco en una aplicación en piezas prefabricadas. La literatura técnica sobre el *trencadís* o revestimientos similares es reducida y la gran cantidad de variables hace difícil su extrapolación.

En base el contexto expuesto, se desarrolló una campaña experimental con el objetivo principal de determinar la evolución de la degradación y/o pérdida de adherencia de los revestimientos de *trencadís* de los pináculos expuestos a condiciones aceleradas. En ella se consideraron las distintas características de estos revestimientos como también diferentes variables de ensayo, con el fin de alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- Aproximarse al comportamiento de los revestimientos de *trencadís* en obra;
- Garantizar la efectividad de los materiales frente a distintos agentes y procesos degradantes;
- Determinar los daños que indican una degradación y/o pérdida de adherencia significativa;
- Evaluar distintos sistemas de seguimiento mediante técnicas no destructivas, para su futura aplicación en las inspecciones de la obra, facilitando su mantenimiento y alargando así su vida en servicio;

El estudio de la durabilidad realizado se expone dividido en los capítulos 6 y 7. El capítulo 6 recoge la configuración de la campaña experimental (apartado 6.2) y la evolución visual de las probetas ensayadas (apartado 6.3). En la configuración de la campaña, se describen las distintas variables consideradas, el tipo de probetas, los ensayos realizados y los distintos métodos de seguimiento mediante técnicas no destructivas de ensayo. Por otro lado, en el seguimiento visual, descrito en el apartado 6.3, se explica primero las condiciones iniciales de las probetas antes de iniciar los ensayos. Con posterioridad, se exponen los principales daños detectados en las probetas y su estado de conservación tras el estudio, diferenciando los cuatro distintos procesos de degradación efectuados. Por último, se muestra una visión global del proceso de degradación de todos los tipos de probetas ensayadas mediante una tabla resumen y se exponen las conclusiones. A continuación, en el capítulo 7, se presentan los resultados y análisis del seguimiento de las probetas mediante técnicas no destructivas de ensayo.

6.2 CAMPAÑA EXPERIMENTAL

6.2.1 Variables de la campaña

En la figura 6.1 se presenta el esquema de las distintas variables consideradas en la campaña experimental que refleja, en la medida de lo posible, las condiciones ambientales de la ciudad de Barcelona, los materiales empleados en el *trencadís* de los pináculos, así como las técnicas de aplicación en la obra de la Sagrada Familia. Para ello se han fabricado dos tipos de probetas, por la misma empresa que actualmente realiza la restauración y la fabricación de las piezas de los pináculos de la obra: a) probetas de restauración y b) probetas de obra nueva (ver figura 6.1).

En ambos tipos de probetas se empleó un *trencadís* de vidrio de Murano y de gres porcelánico, con el fin de examinar el comportamiento de distintos materiales frente a unas mismas condiciones de envejecimiento. Se cree que el gres, respecto al vidrio, puede presentar una mejor compatibilidad con el mortero base y de rejunte, mitigando así parte de las degradaciones recogidas en los capítulos 3 y 4. En las probetas de restauración, además, se utilizó distintas tonalidades de vidrio y gres (blanco, rojo, dorado y marrón), lo cual responde al interés de analizar también la influencia del tipo de material y del color, tal como sucede en la obra. Por otra parte, en la mitad de las probetas de obra nueva se aplicó una

imprimación¹ en el reverso de las piezas, con el objetivo evaluar la mejora de la adherencia entre el *trencadís* y el micro-hormigón.

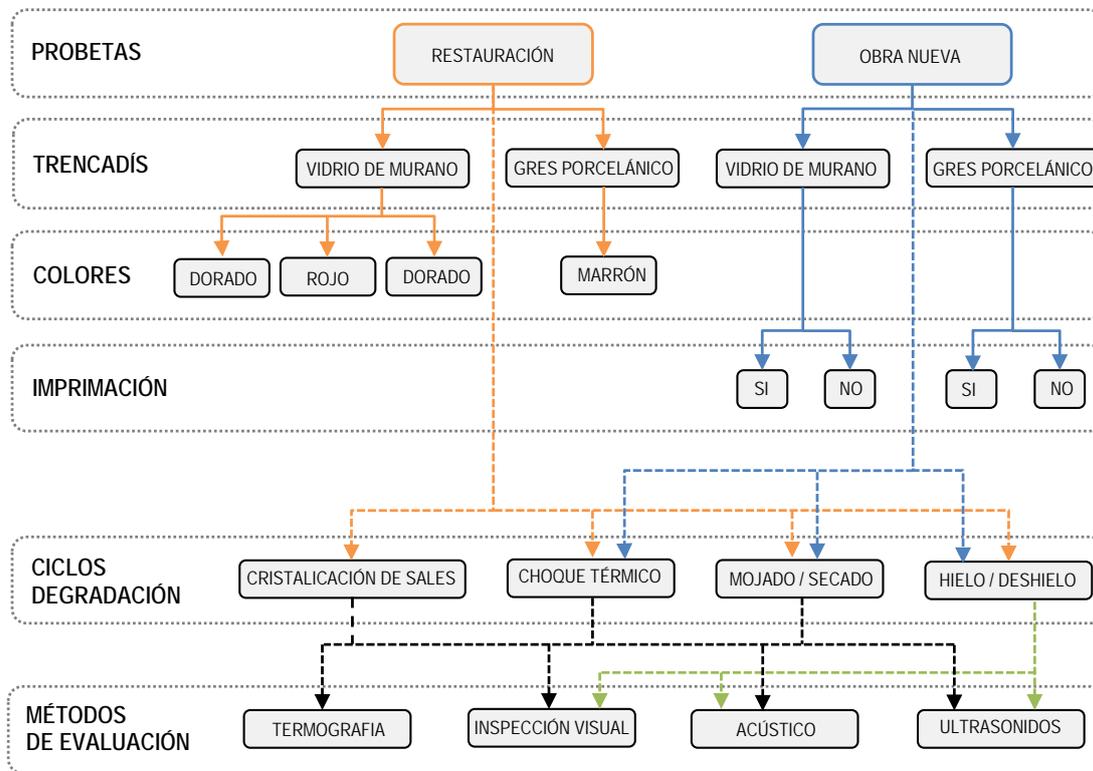


Figura 6.1: Esquema de las variables de la campaña experimental

En el estudio se consideraron cuatro procesos de degradación: choque térmico, secado/mojado, hielo/deshielo y cristalización de sales (ver figura 6.1). Los tres primeros simulaban las condiciones climatológicas aceleradas más significativas de la ciudad de Barcelona. El cuarto y último, se realizó de manera complementaria considerando que la deposición de sales es una de las principales causas del desprendimiento de teselas de vidrio en obras históricas de mosaico (*Dal Bianco et al, 2012*); y en el caso de la Sagrada Familia, al estar expuesta a un ambiente marino (Instrucción EHE-08), este aspecto se consideró oportuno analizar.

Las probetas se sometieron a 80 ciclos de cada uno de estos procesos de degradación. Ello se realizó de manera individualizada, sin combinar procesos, con el fin de aislar las distintas variables y simplificar su análisis. El método de seguimiento y control de la evolución de las probetas se realizó mediante diversos ensayos no destructivos (inspección visual, ultrasonidos, impacto acústico e imágenes termográficas), con el fin de estudiar los procesos de degradación durante un período más largo de tiempo. El estudio de durabilidad realizado comenzó en el mes de junio de 2013 y finalizó en el mes de octubre de 2014.

¹ Imprimación con una base de resinas sintéticas en dispersión acuosa

6.2.2 Definición de las probetas y producción

Todas las probetas empleadas en el estudio tenían una dimensión de 20x20x5 cm, que responden a la necesidad de conseguir probetas manejables en el laboratorio, que al mismo tiempo fueran suficientemente representativas del desempeño del revestimiento de *trencadís*. El método de fabricación empleado fue diferente asociado al tipo de problema a resolver: Probetas de restauración y probetas de obra nueva.

Las probetas de restauración eran bi-capa y estaban compuestas por una base de 4 cm de micro- hormigón reforzado con tres varillas de acero inoxidable, que representan la estructura existente de los pináculos, y un revestimiento de *trencadís*.

En la figura 6.2a se presenta el método de producción de estas probetas. Como puede verse, las piezas de *trencadís* se adhirieron una a una, mediante una capa de mortero cola (ver capítulo 5), con un espesor entre 3 y 6 mm tal y como indica el fabricante (ver figura 6.2b). Una vez realizado el revestimiento, se colocó el mortero de rejuntado de la misma marca comercial, seleccionado por su alta flexibilidad y resistencia.

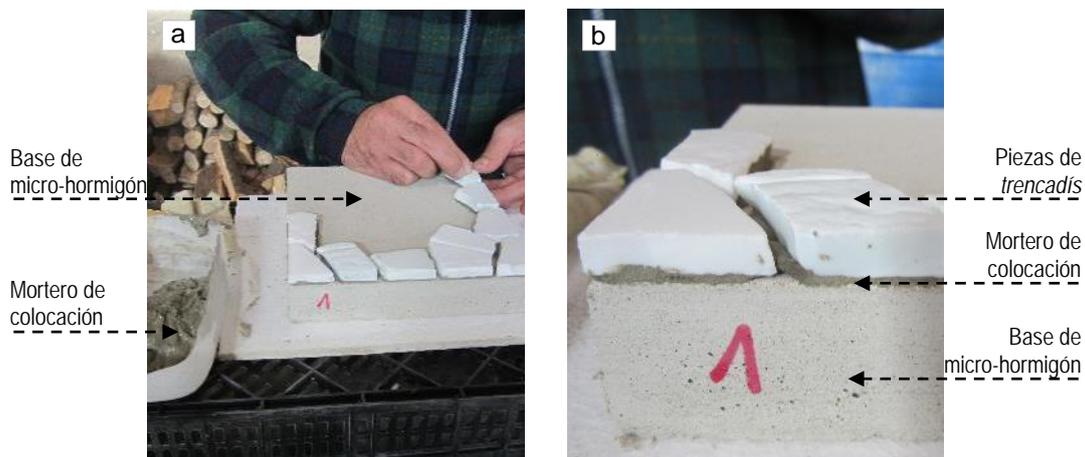


Figura 6.2: a) Fabricación de las probetas de restauración y b) Detalle de las capas de las probetas

Las probetas de obra nueva eran monocapa y se fabricaron siguiendo el mismo procedimiento que las actuales piezas de los pináculos, tal como se describe a continuación:

- 1º) Las piezas de *trencadís* se depositaron en el fondo de un molde de madera, adheridas mediante una capa de silicona de fácil eliminación (ver figura 6.3a);
- 2º) Con el objetivo de mejorar la adherencia micro-hormigón-*trencadís*, en la mitad de las probetas se aplicó una imprimación en el reverso de las piezas (ver figura 6.3a);
- 3º) Se viertió el micro-hormigón auto-compactante reforzado con fibras plásticas (ver capítulo 5), que gracias a su trabajabilidad, relleno las juntas hasta llegar a la base del molde;
- 4º) Se enrasó la parte posterior de las probetas (ver figura 6.3b).

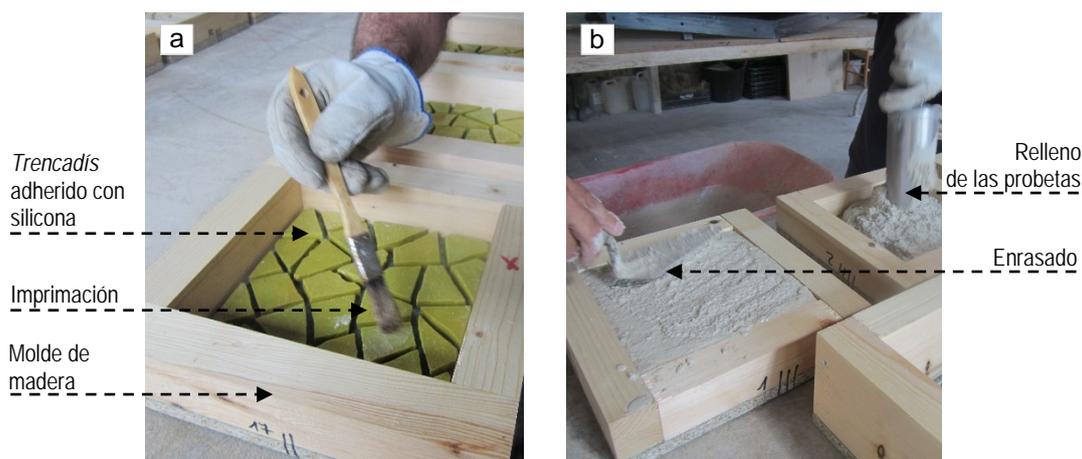


Figura 6.3: a) Aplicación de la imprimación en el reverso de las piezas de *trencadís* y b) Relleno y enrasado de las probetas de obra nueva con el micro-hormigón reforzado con fibras plásticas

En la tabla 6.1 se presenta el número y tipo de probetas del estudio y su distribución en los ciclos de degradación efectuados. En total se ensayaron 70 probetas, 36 de ellas eran probetas de restauración y 34 de obra nueva. La nomenclatura utilizada para distinguirlas, que se seguirá con posterioridad, se definió con 4 letras y de la siguiente manera: la 1ª letra corresponde al tipo de probeta (Restauración: R; obra Nueva: N); la 2ª letra indica el material del *trencadís* (V: Vidrio y G: Gres); la 3ª letra, en las probetas de restauración (R), señala el color del vidrio (B: Blanco, R: Rojo y D: Dorado) o del gres (M: Marrón), mientras que en las de obra nueva (N), indica el tipo de tratamiento dado al soporte (I: Impregnación o S: Sin tratamiento alguno). Finalmente, la 4ª y última letra, corresponde a los diferentes ejemplares de cada tipo probeta que se utilizan según el caso (A, B o C).

CARACTERÍSTICAS				CICLOS DEGRADACIÓN				TOTAL	
Tipo	Material	Color	Impr.	Choque Térmico	Mojado/Secado	Hielo/Deshielo	Cristalización de Sales	Revest.	Probeta
N	V	-	I	A, B y C	A, B y C	A y B	-	17	34
			S	A, B y C	A, B y C	A, B y C			
	G	I	A, B y C	A, B y C	A y B	-	17		
		S	A, B y C	A, B y C	A, B y C				
R	V	B	-	A y B	A y B	A y B	A y B	24	36
		D	-	A y B	A y B	A y B	A y B		
	G	R	-	A y B	A y B	A y B	A y B	8	
		M	-	A y B	A y B	A y B	A y B		
Base Micro-hormigón					BE			4	
TOTAL CICLO				20+BE	20+BE	18+BE	8+BE	-	70

Tabla 6.1: Tipo y número de probetas empleadas en los ciclos de degradación del estudio

Como se puede apreciar en la tabla 6.1, en cada uno de los procesos de degradación y para cada tipo de revestimiento se prepara un número mínimo de 2 probetas. En ellos además, se incluyó una base de micro-hormigón de las probetas de restauración, sin revestimiento alguno, que se identificaron con las letras BE (ver tabla 6.1). Ello permitiría discriminar en los resultados de las probetas de restauración el comportamiento de la base del revestimiento.

6.2.3 Ciclos de degradación

En la tabla 6.2 se describe el procedimiento y las condiciones de los cuatro ciclos de degradación realizados: choque térmico, mojado/secado, hielo/deshielo y cristalización de sales. Cada uno tenía una duración de 48 h/ciclo y constaba de dos partes de 24h en condiciones de ensayo opuestas. Para definir las características de cada ciclo se consideró las normativas de ensayo actuales de los adhesivos cementicios (*UNE-EN 12004*) y los datos meteorológicos de la ciudad de Barcelona (*Observatori Fabra, 2013*), si bien se incorporaron las condiciones extremas dentro del rango.

Todo ello responde a una simulación en unas condiciones más agresivas, en aras de acelerar el tiempo de realización del ensayo y la obtención de resultados. Cabe señalar que en el ciclo de cristalización de sales el contenido de sulfato sódico empleado era muy alto y no correspondía a las condiciones ambientales de la ciudad de Barcelona (*Pey, 2008; Pérez, 2010*). Este fue establecido a partir de la normativa de ensayo para piedra natural (*UNE-EN 12370:1999*).

CICLOS	TIEMPO (h)	TEMP. (°C)	PROCEDIMIENTO
Choque Térmico	0 – 24	70 ± 5	Las probetas se introdujeron en un horno a una temperatura constante de 70° ± 5° C durante 24h;
	24 – 48	-15 ± 5	Pasado ese tiempo, se sacaron y se introdujeron dentro de un congelador a temperatura constante de -15° ± 5° C durante 24 h más
Mojado / Secado	0 – 24	20 ± 5	Dentro de una cámara con temperatura constante de 20° ± 5° C se sumergieron las probetas en agua potable durante 24 h;
	24 – 48	70 ± 5	Pasado este tiempo, se introdujeron dentro de un horno a temperatura constante de 70° ± 5° C durante 24 h más;
Hielo / Deshielo	0 – 24	20 ± 5	Dentro de una cámara con temperatura constante de 20° ± 5° C se sumergieron las probetas en agua potable durante 24 h;
	24 – 48	-15 ± 5	Pasado ese tiempo, se sacaron y se introdujeron dentro de un congelador a temperatura constante de -15° ± 5° C durante 24 h más
Cristalización de sales	0 – 24	20 ± 5	Dentro de una cámara con temperatura constante de 20° ± 5° C se sumergieron las probetas en una solución de sulfato sódico decahidratado (14% p/p en agua desionizada) durante 24 h;
	24 – 48	70 ± 5	Pasado este tiempo, se introdujeron dentro de un horno a temperatura constante de 70° ± 5° C durante 24 h;

Tabla 6.2: Procedimientos de los ciclos de degradación

En la figura 6.4 se presenta un gráfico de una semana tipo de los ciclos de degradación realizados, relacionado con las diferentes temperaturas. Estos se efectuaron en el Laboratorio de Estructuras Lluís Agulló de la UPC. Por motivos de compatibilización con las circunstancias laborales de la universidad, se realizaron dos ciclos de degradación por semana y durante el fin de semana las probetas se almacenaron en el laboratorio a temperatura ambiente, en condiciones protegidas, de manera que ello no influyera a los ciclos de degradación.

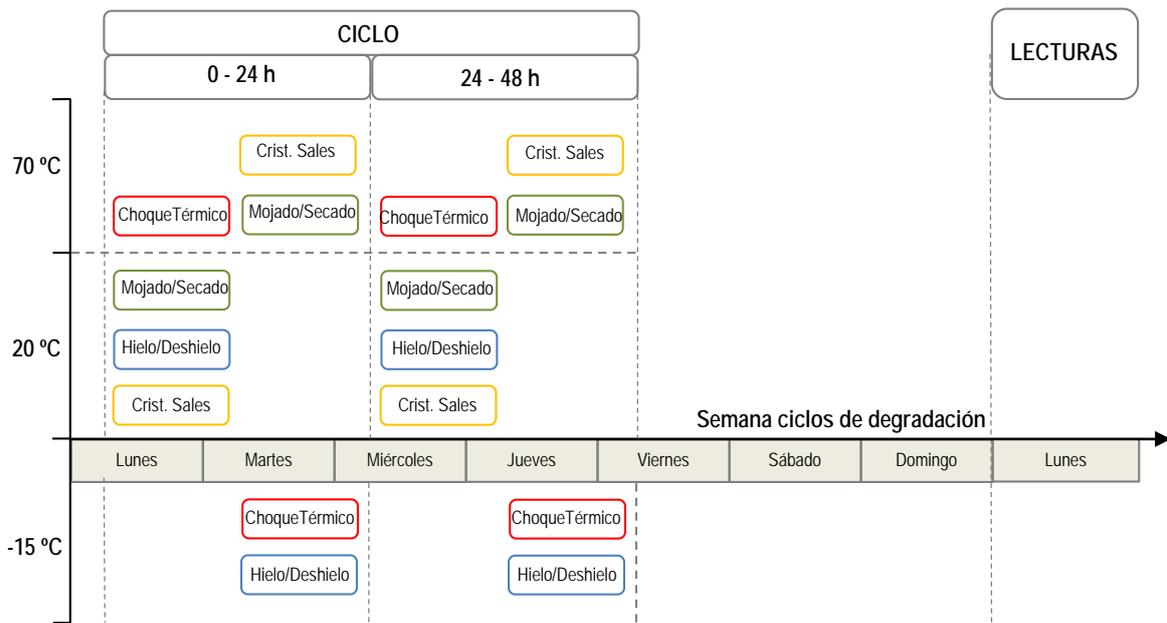


Figura 6.4: Gráfico Temperaturas – Semana tipo de los ciclos de degradación

6.2.4 Métodos de evaluación

El método de seguimiento y control de la evolución de las probetas se realizó mediante diversos ensayos no destructivos (inspección visual, ultrasonidos, impacto acústico e imágenes termográficas), con la secuencia descrita en la figura 6.5. Las lecturas iniciales antes de empezar los ciclos de envejecimiento se realizaron cuando las probetas tenían entre 3 y 4 meses de edad. El motivo de realizarlas a esa edad, fue para que alcanzaran un alto grado de hidratación y minimizar el efecto de este fenómeno en los resultados. Además, se tuvo que diseñar y adaptar los métodos de medición, por lo que se requirió de ese tiempo inicial.

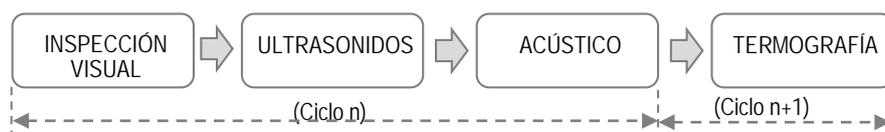


Figura 6.5: Procedimiento de las lecturas de seguimiento y control

Las lecturas de seguimiento, igual que los ciclos de degradación, se efectuaron en el mismo laboratorio de la UPC y pasadas 72 horas tras el último ciclo realizado, para asegurar que las condiciones fueran homogéneas en todos los ciclos y procesos estudiados (ver figura 6.4). El procedimiento de evaluación consistió primero en la inspección visual de las probetas, donde se examinaban, se tomaban fotografías y medidas de sus dimensiones y, posteriormente, se efectuaban los tres tipos de ensayos no destructivos de manera consecutiva: ultrasonidos, impacto acústico e imágenes termográficas, tal y como se muestra en el esquema de la figura 6.5.

La inspección visual y las lecturas de ultrasonidos de las probetas se realizaron a temperatura ambiente, mientras que el ensayo acústico y la termografía se efectuaron en una cámara climática, con

una temperatura y humedad constante de $20^{\circ} \pm 5^{\circ}$ C y 50% respectivamente, dada la necesidad de aislamiento acústico y lumínico para realizar este tipo de ensayos. Las imágenes termográficas siempre se realizaron en último lugar, puesto que requería volver a retomar los ciclos de degradación para calentar las probetas (ver figura 6.5).

Durante los ciclos de degradación, sin contabilizar las medidas iniciales, se efectuaron nueve tandas de lecturas en las probetas de restauración, correspondientes a los ciclos 4, 12, 21, 30, 40, 45, 51, 61 y 81, y siete en las de obra nueva, que correspondían a los ciclos 13, 19, 24, 30, 40, 60 y 80. En la figura 6.6 se presentan los cronogramas de cada tipo de probeta, por los ciclos realizados en el estudio (parte inferior), correlacionado con las lecturas de seguimiento (parte superior). Primero se inició los ciclos de degradación en las probetas de restauración y posteriormente, debido a circunstancias de producción de las mismas, se incorporaron las de obra nueva.

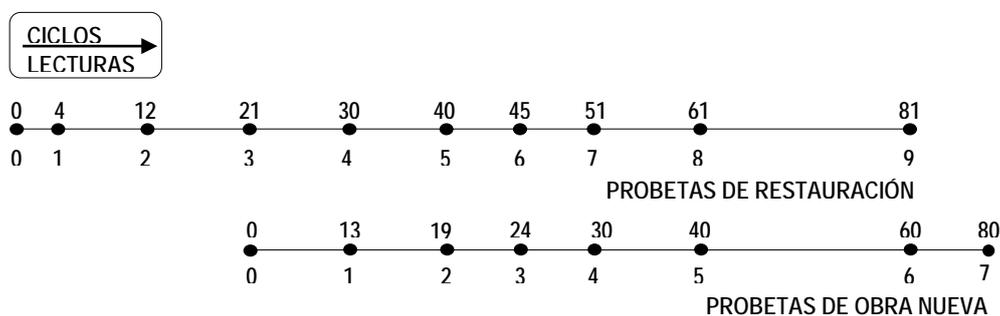


Figura 6.6: Cronograma de los ciclos y las lecturas realizadas en el estudio

Lecturas de seguimiento mediante ultrasonidos

El método de ensayo por ultrasonidos es una de las técnicas no destructivas más utilizadas en la inspección de estructuras de hormigón, dado que se puede realizar de una manera fácil e in situ, proporcionando características sobre la homogeneidad del material, detección de oquedades o imperfecciones (Acebes, 2007). Asimismo, permite establecer una relación con la resistencia a compresión del hormigón y su módulo de elasticidad dinámico (González, 2002). Este método se basa en la medida del tiempo que tarda una onda ultrasónica en recorrer la distancia existente entre un transductor emisor y otro receptor, acoplados al elemento que se está ensayando. Además de ese tiempo de vuelo, también se pueden medir otros parámetros como la atenuación, que aporta información adicional sobre el material.

En la presente investigación se empleó esta técnica de inspección en transmisión, considerando que tanto el tiempo como la amplitud de la onda ultrasónica pueden verse afectadas por la pérdida de adherencia entre el *trencadís* y la base (ver figura 6.7a). La onda ultrasónica es una onda mecánica cuya frecuencia se encuentra por encima de la zona audible del espectro acústico (20 KHz). Esta es capaz de propagarse por todos los medios que existan fracciones de materia capaces de vibrar, realizando siempre el recorrido más rápido por los medios donde transcurre (González, 2002).

Por este motivo, se entiende que cuando la onda ultrasónica atraviese la sección de la probeta, será capaz de detectar y evadir las bolsas de aire en la interfase de los materiales surgidas fruto de un proceso de despegue. En el detalle de la interfase de la figura 6.7b se presenta el recorrido inicial de la onda ultrasónica que traspasaría la probeta con el revestimiento adherido, representado en color rojo y

denominado como R_1 . Si las piezas del revestimiento de *trencadís* empezaran a despegarse, aparecería una bolsa de aire en la interfase de los materiales, tal y como se muestra en el detalle de la figura 6.7b. En esa situación, la onda ultrasónica atravesaría el material bordeando la zona despegada, a través de dos posibles recorridos (R_{2a} y R_{2b}), representados en la figura 6.7b de color azul. Como resultado, se obtendría un tiempo mayor de la onda en traspasar la sección y a su vez, disminuirá la velocidad de propagación de la misma.

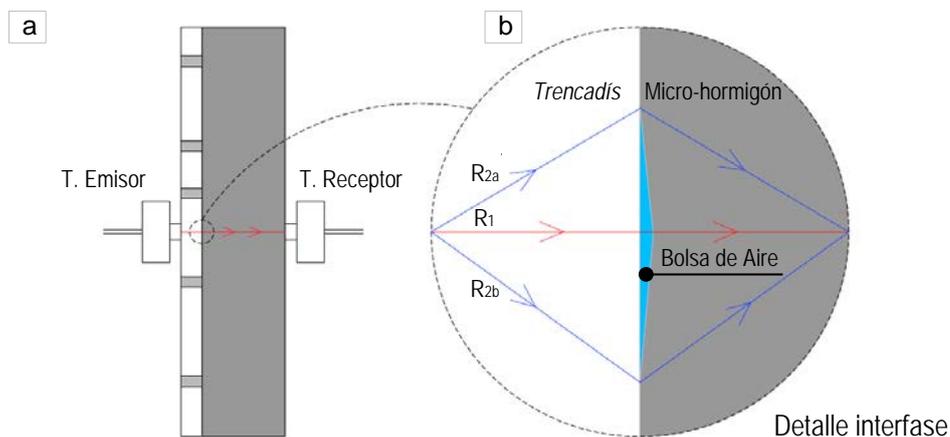


Figura 6.7: a) Inspección por ultrasonidos en transmisión y
 b) Recorridos de la onda ultrasónica en la interfase entre revestimiento y la base

Habitualmente en inspecciones por ultrasonidos en estructuras de hormigón se emplean transductores con frecuencias de 55 kHz. Sin embargo, dado que se analizó la adherencia en un pequeño espesor situado en la interfase entre los materiales, fue necesario emplear transductores con una mayor frecuencia. Concretamente, se utilizaron transductores de 0,5 MHz, gracias a la colaboración del equipo de investigación GSS-Sensor Systems Group del Departamento de Ingeniería Electrónica de la UPC.

En la figura 6.8a se muestra el equipo de ultrasonidos empleado en el estudio que se compone de los siguientes equipos: generador de pulsos eléctricos, amplificador, transductores ultrasónicos, y PC portátil para el registro de la señal. El generador de pulsos envía una señal eléctrica al transductor emisor. Este lo convierte en un impulso mecánico y emite una onda ultrasónica que atraviesa la sección de la probeta. Esta onda es recibida por el transductor receptor y la transforma de nuevo en una señal eléctrica. El amplificador recibe los impulsos eléctricos procedentes del transductor receptor, los registra y los representa en un gráfico (amplitud-tiempo). Finalmente, se registran los datos del amplificador en el PC portátil en formato Excel para su posterior análisis.

Los resultados obtenidos mediante esta técnica de ensayo pueden tener una alta dispersión debido a distintos factores, tales como: el punto de colocación de los transductores, el tipo de acoplamiento de estos con el material y la presión que se aplica al colocarlos. Para disminuir el error del ensayo se realizaron diferentes actuaciones. Como se puede observar en la figura 6.8b, se fabricaron unas pinzas metálicas reguladas por un muelle. En sus extremos se adhirieron los transductores de tal manera que la señal transmitida siempre fuera paralela a la dirección de propagación, asegurando que la presión aplicada fuera similar en todos los casos. En los transductores empleados, además, se adhirieron unos pequeños cilindros de 5 mm de espesor para focalizar la señal emitida en las piezas de *trencadís* facilitando de esta manera la inspección en algunas de las piezas de pequeña dimensión (ver figura 6.7a).

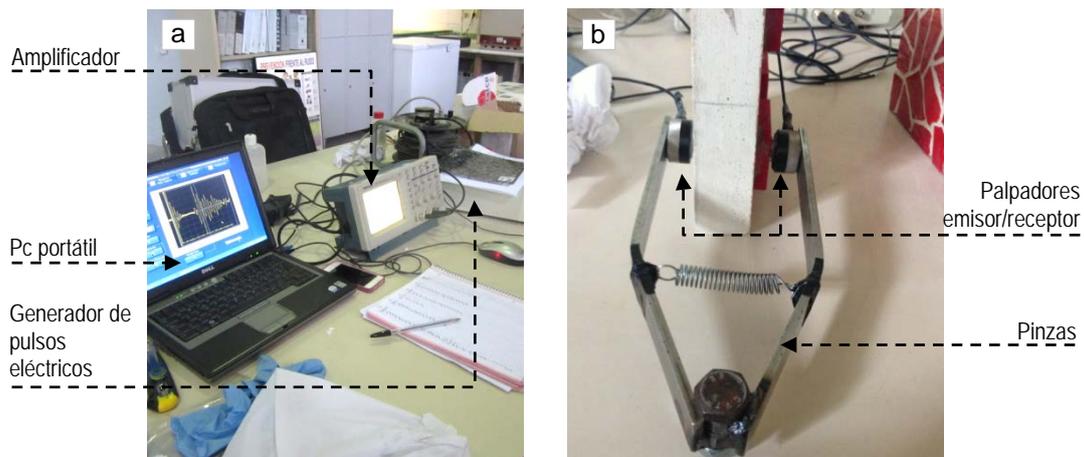


Figura 6.8: a) Equipo de ultrasonidos empleado y b) Sistema de pinzas para los transductores

Asimismo, para favorecer la repetitividad de la medida, se fabricaron unas plantillas del revestimiento de *trencadís* de todas las probetas ensayadas. En ellas se efectuaron diversos agujeros, correspondientes a los puntos de lectura de las probetas, con el mismo diámetro de los cilindros de los transductores (ver figura 6.9a). Mediante esta actuación se aseguraba que durante los distintos ciclos las lecturas fueran realizadas en el mismo punto de medición de la probeta. Finalmente, para asegurar un buen acoplamiento entre el transductor y el material se empleó un gel acoplante transparente específico para el uso en ultrasonidos.

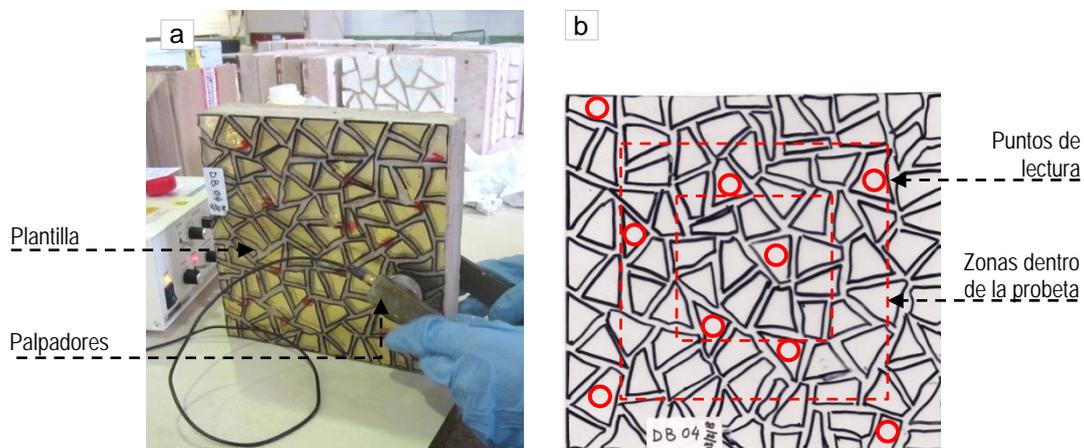


Figura 6.9: a) Realización de las lecturas de ultrasonidos en una de las probetas y b) Plantilla y puntos de lectura por ciclo de una de las probetas

De cada probeta se realizaron nueve lecturas por ciclo en distintos tipos de piezas del *trencadís*, con el objetivo de evaluar su estado de adherencia. La selección de los puntos de lectura de cada probeta fue establecida por la misma autora, dado que la aleatoriedad del revestimiento no permitía una misma matriz. En la selección se establecieron dos criterios: el 1º fue diferenciar las superficies de las piezas de mayor ($\geq 5 \text{ cm}^2$) y menor dimensión ($\leq 5 \text{ cm}^2$); y el 2º criterio, fue el de elegir un número similar de piezas del mismo tamaño en las tres zonas de la probeta: perímetro, intermedio y centro. Se cree que los fenómenos de la degradación pueden influenciar en función del tamaño y la posición de las piezas. En la

figura 6.9b se presenta una de las plantillas de las probetas, donde aparecen marcados los puntos de lectura a través de los criterios de selección descritos.

Lecturas de seguimiento mediante impacto acústico

Este tipo de ensayo no destructivo se basa en el sistema tradicional de detección de fallos por golpeteo, que consiste en evaluar la adherencia de un revestimiento a partir de las diferentes sonoridades obtenidas mediante el golpeteo con los nudillos de una mano o un martillo sobre una superficie (Zamora-Mestre et al, 2008). Las diferentes características de la frecuencia del sonido resultante del impacto pueden indicar las zonas sin adherencia o parcialmente adheridas de un revestimiento (Skłodowski et al, 2013). Intuitivamente se atribuye a un sonido sólido (alta frecuencia) una buena adherencia y, por el contrario, un sonido apagado y reverberante (baja frecuencia) se atribuye a una mala adherencia, dado que indica que existen huecos o bolsas de aire entre el revestimiento y la base (Villela, 2007).

En la presente investigación, el ensayo de control mediante el impacto acústico consistió en registrar el sonido de un pequeño peso esférico de acero de 2,5 g, impactando sobre la superficie de *trencadís* de las probetas desde una altura de 10 cm (ver figura 6.10a). Para ello fue empleado un dispositivo de registro PDA, colocado en todas las lecturas a una distancia entre 2-3 cm del impacto, como se puede apreciar en la figura 6.10b.

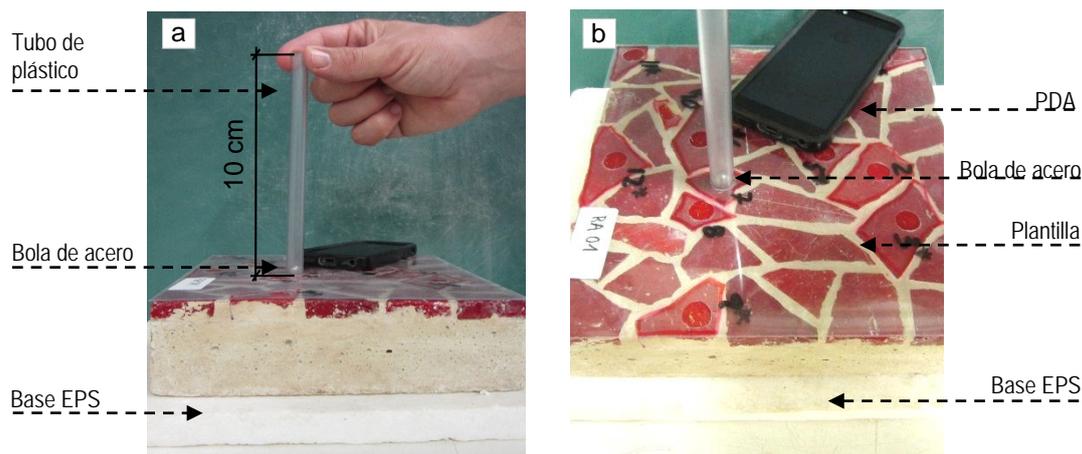


Figura 6.10: Configuración del ensayo de impacto acústico: a) Alzado frontal y b) Detalle de la superficie de ensayo

Del mismo modo que en los ultrasonidos, se efectuaron distintas actuaciones para garantizar que las lecturas se realizaban siempre en las mismas condiciones durante el transcurso de todos los ciclos. Por una parte, se empleó un tubo de plástico con un diámetro ($\varnothing = 9$ mm) ligeramente superior al de la bola de acero ($\varnothing = 7$ mm), con el fin de dejar caer la bola de acero siempre desde la misma altura y perpendicular a la superficie del *trencadís* (ver figura 6.10a). Por otro lado, se fabricaron plantillas del *trencadís* de cada una de las probetas, donde se efectuaron diversos agujeros con el diámetro exacto del tubo de plástico y correspondientes a los mismos puntos de lectura que en ultrasonidos (ver figura 6.10b).

Como se puede observar en la figura 6.10a, durante las lecturas las probetas se colocaron sobre una superficie totalmente plana de poliestireno expandido (EPS), con el fin de evitar reverberaciones y uniformar las condiciones de lectura. Asimismo, el tubo de plástico por donde se dejaba caer la bola de

acero se sujetaba por su extremo superior únicamente con dos dedos y sin ejercer presión sobre el revestimiento.

Lecturas de seguimiento mediante imágenes termográficas

La termografía es un método de ensayo, no destructivo, que se basa en los principios físicos de transmisión de calor a partir de la obtención de la energía emitida por un objeto en el rango de infrarrojos. Mediante una cámara termográfica se registra dicha radiación, que posteriormente es representada mediante mapas térmicos o imágenes termográficas. Cada uno de los colores obtenidos en dichas imágenes refleja la diferente temperatura de una superficie.

Moropoulou empleó esta técnica de inspección para conocer el estado de conservación de los revestimientos de mosaico bizantino de la iglesia de Santa Sofía (*Moropoulou et al, 2013*). Teniendo esto en cuenta, en la presente investigación se decidió emplear la termografía para evaluar la degradación del *trencadís* de las probetas sometida a ciclos de altas temperaturas (choque térmico; mojado/secado y cristalización de sale) durante su enfriamiento; se consideró que las diferencias de energía emitida durante este proceso podían revelar los puntos dónde la superficie perdía más calor y, por lo tanto, dónde estaba empezando a fallar la adherencia del revestimiento.

Las lecturas de seguimiento se realizaron en el interior de la cámara climática del laboratorio, puesto que el ensayo requería la mayor oscuridad posible y que no existieran otras fuentes lumínicas o de calor a la fotografiada que pudieran conducir a errores en la imagen. En este sentido, se fabricó una caja de cartón pluma negro para la toma de las imágenes en el interior de esta sala. Como se puede observar en la figura 6.11a, esta caja de cartón de cuatro lados albergaba en su parte superior una ranura que encajaba con el objetivo de la cámara utilizada en el estudio (FLIR i5) (ver figura 6.11b). De este modo se aseguraba, además, que las imágenes capturadas siempre fueran realizadas desde la misma distancia y ángulo.

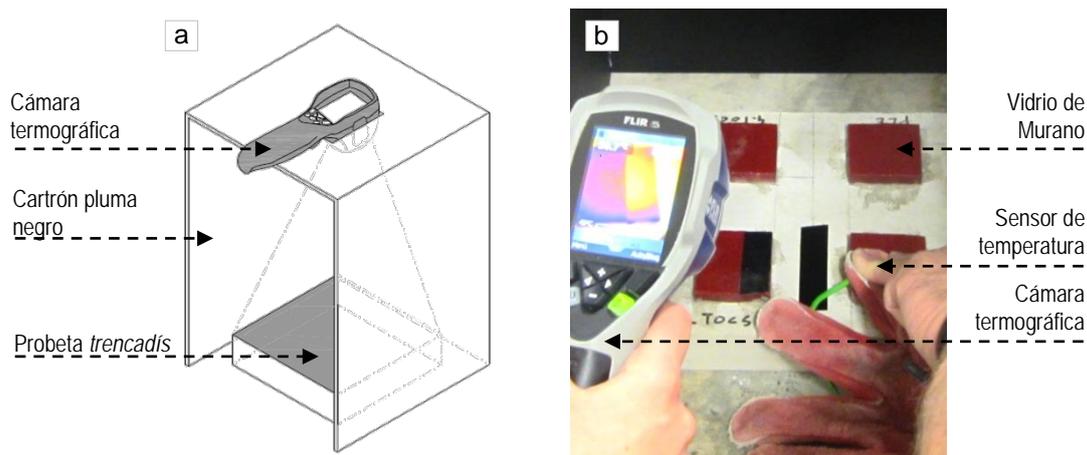


Figura 6.11: a) Esquema del dispositivo para la toma de las imágenes termográficas de las probetas y b) Proceso para detectar la emisividad del vidrio de Murano

6.2.5 Verificación de los métodos de evaluación

Previamente a la realización de la campaña experimental de durabilidad, se efectuaron diversas pruebas con el fin de evaluar la idoneidad de los diferentes métodos de caracterización empleados. Para ello se fabricó una probeta de ensayo con características similares a las utilizadas posteriormente en el estudio de durabilidad.

Esta probeta tenía unas dimensiones de 20x20x5 cm, tal y como se indica en la figura 6.12a, y estaba compuesta por la misma base de micro-hormigón de las probetas de restauración. En una de las caras, se adhirieron cuatro piezas de 5x5 cm de vidrio de Murano, mediante el mortero cola seleccionado (ver figura 6.12b). A dos de ellas se aplicó una capa de mortero cola en toda la superficie de la base para que estuvieran completamente adheridas. A las dos restantes se aplicó cuatro toques de mortero en las puntas, de modo que estaban parcialmente adheridas, dejando en una separación de aire entre los materiales (ver figura 6.12a). En la verificación y puesta a punto de las lecturas mediante ultrasonidos e impacto acústico, se contó con la colaboración de los profesores M. García y J.A. Chávez del Departamento de Ingeniería Electrónica de la UPC.

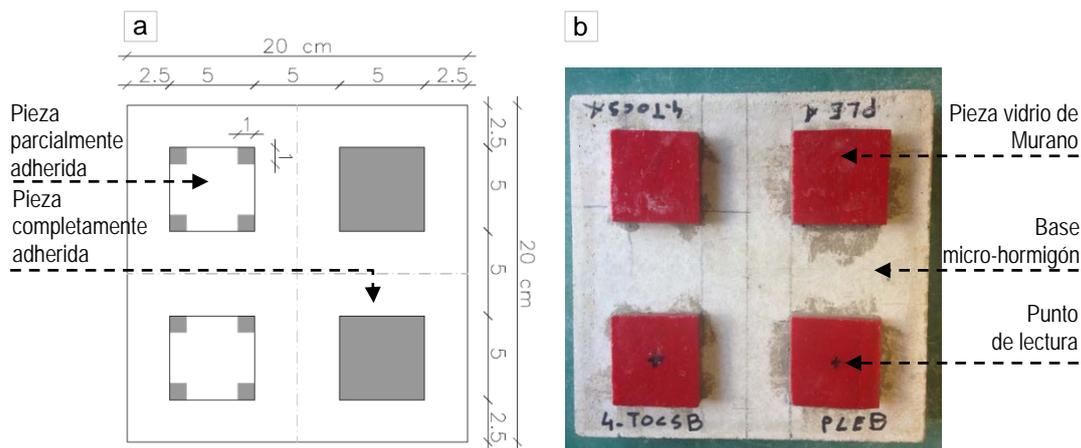


Figura 6.12: Probeta de verificación de las lecturas de seguimiento:
a) Esquema de las medidas y características de la probeta y b) Imagen de los materiales

Lecturas mediante ultrasonidos

Las lecturas de verificación de los ultrasonidos se efectuaron en el centro de cada una de las cuatro piezas de vidrio y usando el mismo equipo y configuración que se emplearía posteriormente en el estudio (ver figura 6.8a y b). A modo de ejemplo, en la figura 6.13a y b se presentan las gráficas de las señales obtenidas de una de las piezas completamente adheridas y parcialmente adheridas, respectivamente.

En ambos gráficos se aprecia un primer grupo de ondas, donde se incluye el pulso de emisión, que alcanza una misma amplitud en ambos casos. Posteriormente, en la pieza completamente adherida (ver figura 6.13a) se observa un grupo de ondas correspondientes a la señal transversal, seguido posteriormente de ecos y rebotes. Por el contrario, en la parcialmente adherida (ver figura 6.13b) dicha señal se atenúa y se disipa en el tiempo. Las claras diferencias entre los resultados obtenidos se

correlacionan con grados de adherencia distintos, se concluyó, por tanto, que era un método válido para el seguimiento de las probetas.

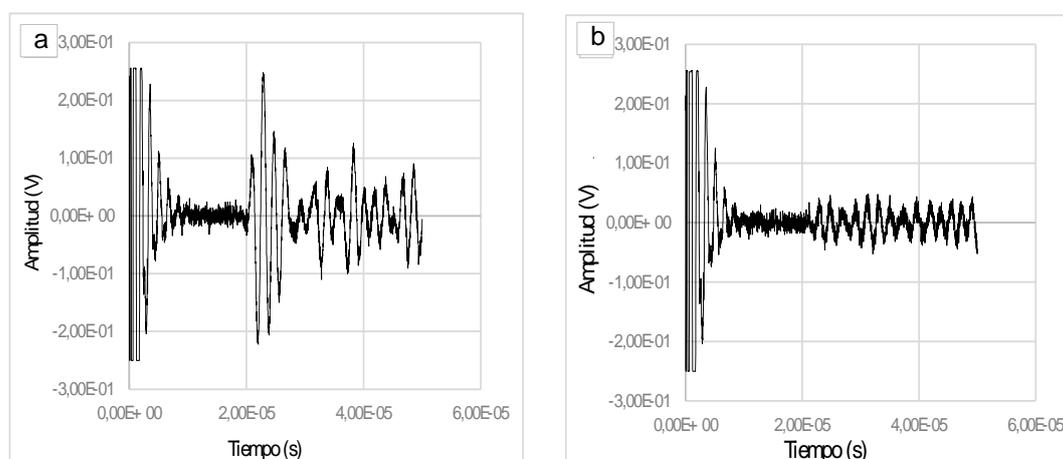


Figura 6.13: Grafico señal ultrasonidos: a) Pieza totalmente adherida y b) Pieza parcialmente adherida

En el mismo periodo de pruebas también se determinó el espesor y las velocidades ultrasónicas medias de la base de micro-hormigón y de las piezas de *trencadís* de vidrio y gres de las probetas de reparación. Para la medición de los materiales se utilizó un pie de rey y se tomaron tres lecturas de cada muestra. En la tabla 6.3 se exponen los resultados obtenidos. Como se puede observar, las distintas piezas de *trencadís* presentan distintos espesores, que van desde 10,22 mm, en el vidrio de color blanco, hasta 7,25 mm, en el vidrio dorado.

Material	Color	Espesor (mm)	Velocidad ultrasonidos (m/s)
Base micro-hormigón	-	40,36	2466
Vidrio de Murano	Blanco	10,22	4171
	Dorado	7,25	4782
	Rojo	9,80	3881
Gres porcelánico	Marrón	8,74	4012

Tabla 6.3: Espesores y velocidades ultrasónicas de los materiales de las probetas de restauración

Cuanto a las velocidades ultrasónicas, la base de micro-hormigón presenta la más baja (2466 m/s) y el resto de materiales del *trencadís* obtienen una media de casi el doble respecto a esta (4211 m/s). El vidrio dorado, presenta la velocidad más elevada (4782 m/s), mientras que el rojo, presenta la velocidad más baja (3881 m/s). Estos resultados indican que existen claras diferencias de composición en los vidrios de Murano con distintas tonalidades.

Lecturas mediante impacto acústico

Del mismo modo que en el caso anterior, las lecturas de verificación del impacto acústico se realizaron en el centro de las piezas de vidrio de la probeta de prueba. Con posterioridad, los sonidos de impacto registrados fueron tratados con un programa de edición de audio para su análisis. En la figura 6.14a y b se presentan, a modo de ejemplo, las señales registradas de una pieza completamente y

parcialmente adherida, respectivamente. Como se puede apreciar, existen diferencias cualitativas entre ambas. En la pieza completamente adherida la amplitud de la señal de los rebotes va perdiendo amplitud a lo largo del tiempo (ver figura 6.14a), mientras que en la pieza parcialmente adherida la señal es prácticamente constante (ver figura 6.14b). Asimismo, la distancia de tiempo entre los primeros rebotes es menor en la pieza de completamente adherida (ver figura 6.14a) respecto a la pieza parcialmente adherida (ver figura 6.14b).

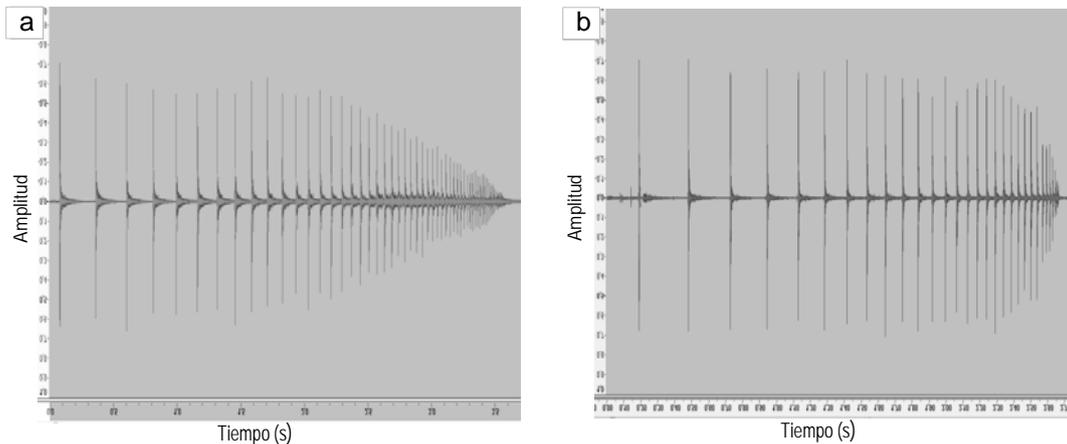


Figura 6.14: Señales temporales de los sonidos de impacto: a) Pieza completamente adherida y b) Pieza parcialmente adherida

En la figura 6.15a y b se presentan los sonogramas (TFFT) obtenidos de las mismas señales acústicas. De manera cualitativa se puede apreciar que en la pieza completamente adherida la mayor densidad espectral se encuentra por encima de los 8000 Hz (ver figura 6.15a), mientras que en la pieza parcialmente adherida se sitúa entre los 1000 y 1500 Hz (ver figura 6.15b). Frente a todas las diferencias detectadas se estableció que el método de lectura por impacto acústico también permitía detectar los distintos grados de adherencia de las piezas de vidrio y, por tanto, era una técnica adecuada para emplearla en el estudio de degradación.

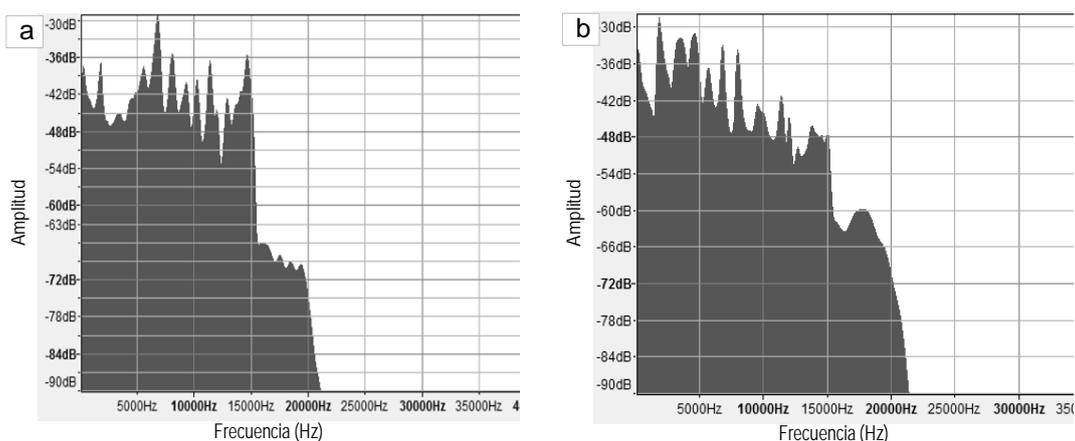


Figura 6.15: Sonogramas de los sonidos de impacto: a) Pieza completamente adherida y b) Pieza parcialmente adherida

Lecturas mediante imágenes termográficas

Para obtener la máxima fidelidad de las imágenes termográficas se calibró la emisividad de la cámara al material que se estaba analizando (Avdelivis et al, 2004), en este caso, vidrio de Murano. Para dicha configuración se empleó un termómetro digital squirrel y la probeta de prueba previamente calentada en un horno durante una hora a 70 °C de temperatura. Tal y como se puede observar en la figura 6.11b, se colocó el sensor de temperatura en contacto con una de las piezas de vidrio y, mientras se observaba la temperatura de su superficie por el visor de la cámara, se varió la emisividad hasta que los valores de temperatura registrados fueron los mismos que los del termómetro digital. Como resultado de este proceso se determinó que la emisividad del vidrio de Murano era de 0,86.

Una vez configurada la emisividad de la cámara se verificó el método de lectura mediante imágenes termográficas. Para ello la probeta de prueba fue calentada de nuevo en el horno a una temperatura de 70 °C durante una hora. Con posterioridad, se realizaron doce lecturas termográficas durante su proceso de enfriamiento. Las dos primeras lecturas se realizaron cada 5 minutos, las nueve siguientes cada 10 minutos y la última a los 20 minutos de la lectura anterior. En cada una de ellas se tomaron cinco termografías, cuatro en detalle en el centro de las piezas de vidrio y una en el centro de la probeta (ver figura 6.16a).

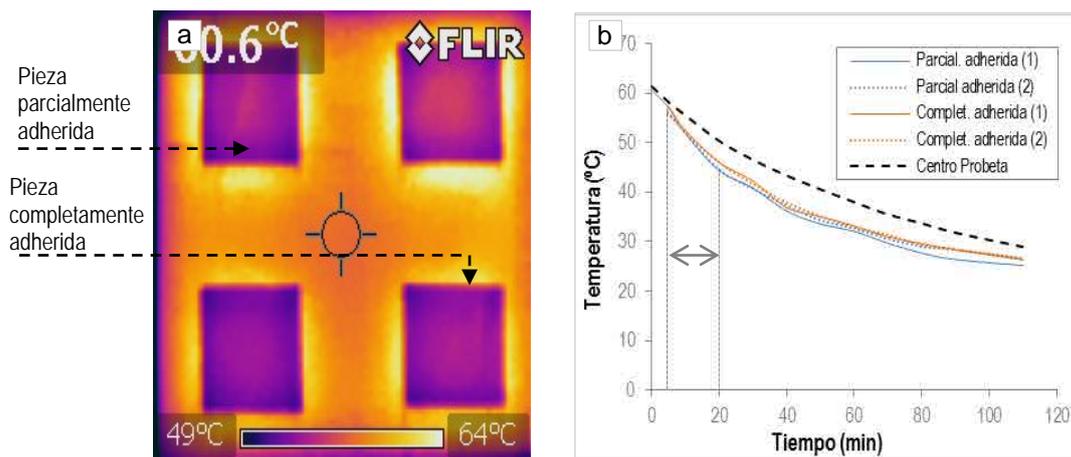


Figura 6.16: a) Termografía de la probeta de prueba y b) Gráfico del proceso de enfriamiento de la probeta de prueba

A modo de ejemplo, en la figura 6.16a, se presenta una de las imágenes termográficas de la probeta de prueba obtenida a los 10 minutos de su proceso de enfriamiento. Como se puede observar, no se aprecian diferencias entre las piezas total o parcialmente adheridas. Todas las partes de la probeta tuvieron una misma tendencia en el descenso de las temperaturas, tal y como se muestra en el gráfico de la figura 6.16b. La temperatura del centro de la probeta se encontró siempre por encima (aproximadamente 4,5 °C) de las piezas de vidrio (ver figura 6.16b) y únicamente se detectó 1 °C de temperatura superior en las piezas totalmente adheridas, respecto a las piezas parcialmente adheridas (ver figura 6.16b).

En base a los resultados obtenidos, se identificó que mediante esta técnica de ensayo era difícil determinar el estado de adherencia de las piezas. Sin embargo, se decidió realizar algunas tandas de

lecturas durante el estudio de degradación para verificarlo en las probetas de *trencadís*. Dichas lecturas se realizarían entre los primeros 5 y 20 minutos después de la extracción de las probetas del horno, puesto que fue en ese periodo, cuando se detectó la pérdida de calor más acentuada en los vidrios de la probeta de prueba y ello, facilitaría la detección de posibles despegues (ver figura 6.16b).

6.3 EVOLUCIÓN VISUAL DEL ESTADO DE CONSERVACIÓN DE LAS PROBETAS

6.3.1 Condición inicial

Antes de iniciar los ciclos de degradación, se llevó a cabo una inspección visual para determinar el estado inicial de las probetas. En esta inspección se verificó una degradación superficial de todas las piezas de vidrio de *trencadís* independientemente de su coloración. Tal y como se presenta en la figura 6.17, las superficies de los vidrios presentaban micro-fisuraciones y en algunos casos, también, manifestaban pequeñas burbujas de aire ocluido e imperfecciones.

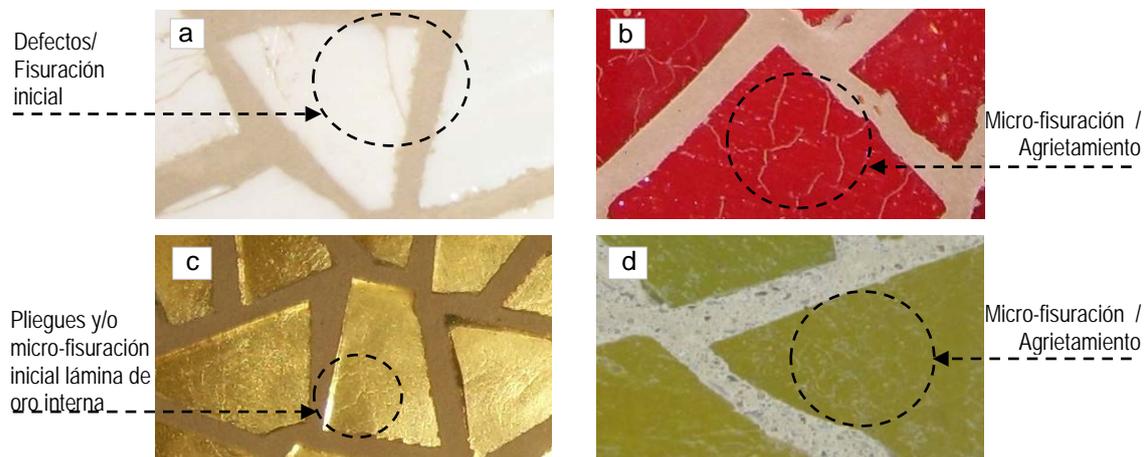


Figura 6.17: Estado inicial de las piezas de vidrio de Murano de color:
a) Vidrio blanco; b) Rojo; c) Dorado y d) Verde

En los vidrios de color blanco se observó un menor porcentaje de micro-fisuras, aunque estas eran de mayor dimensión respecto al resto (ver figura 6.17a). En los vidrios rojos y verdes la micro-fisuración inicial observada fue mayor y similar a un agrietamiento, como se puede apreciar en las figuras 6.17b y d. Los vidrios dorados presentaron un buen aspecto, aunque se detectaron las micro-fisuraciones en la lámina de oro interna (ver figura 6.17c). A diferencia del gres, el vidrio de Murano, es de fabricación artesanal y ello facilitó probablemente la aparición de los estos defectos en el material durante los procesos de producción y secado.

En la inspección inicial también se observaron algunas imperfecciones superficiales en el micro-hormigón de las probetas de obra nueva. Indistintamente del material del *trencadís* (vidrio o gres), se detectó una ligera concavidad o rebaje en el perímetro de las piezas. Esta marca impresa en el micro-hormigón, resaltada en la figura 6.18a con un rectángulo, correspondía a la capa de silicona empleada para adherir las piezas en los moldes durante su proceso de fabricación, tal y como se muestra en el esquema en sección en detalle de la figura 6.18c.

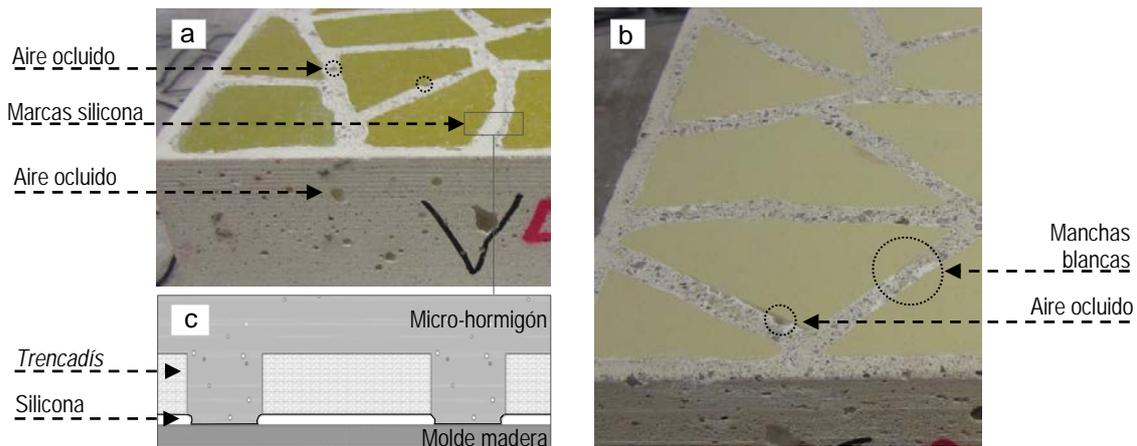


Figura 6.18: Estado inicial de las probetas de obra nueva: a) Probeta NVSA; b) Probeta NGIB y c) Esquema en sección del *trencadís* de las probetas de obra nueva durante su fabricación

Además de ello, el micro-hormigón incorporaba un alto nivel de aire ocluido tanto en el rejuntado como en la base, tal y como se muestra en la figura 6.18a. Durante su producción los trabajadores de la empresa de los prefabricados de los pináculos validaron la fluidez de la mezcla a partir de su experiencia, tal y como se describe en el capítulo 5. Sin embargo, ésta no tuvo la suficiente capacidad para rellenar todos los espacios del *trencadís* de las probetas y liberar el aire retenido en los moldes durante su vertido. En las probetas con un *trencadís* de vidrio se apreció un porcentaje más elevado de aire ocluido en el rejuntado, seguido por las de gres y, finalmente, las probetas con imprimación.

En el rejuntado también se apreciaron algunas manchas blancas que se intensificaban en las probetas donde se había usado la imprimación en el reverso de las piezas (ver figura 6.18b). El producto blanco observado eran restos del aditivo elastificante no disuelto en la mezcla de micro-hormigón. Éste en algunas probetas se había mezclado con la imprimación y ello provocó su apreciación fuera más significativa.

Las imperfecciones observadas en el micro-hormigón de las probetas de obra nueva no invalidaron su utilización en los ensayos de durabilidad, puesto que permitían evaluar el comportamiento del material frente a una situación desfavorable. No obstante, siendo la primera vez que se evaluó el desempeño de la dosificación en piezas prefabricadas de *trencadís*, estas imperfecciones se tendrían en cuenta de cara a una futura producción.

6.3.2 Ciclos de choque térmico

En la tabla 6.4, para las *probetas de restauración* y *obra nueva*, a manera de ejemplo, se presentan dos imágenes correspondientes al inicio y final de los 80 ciclos, para este tipo de ensayo. Asimismo se muestran las características de los materiales ensayados (vidrio de Murano y gres porcelánico), el color de los mismos y si en ellos, se aplicó una capa de imprimación previa. En el anexo C de este documento se presenta en detalle la evolución de todas las probeta de ensayadas.

PROBETAS	TRENCADÍS			ESTADO DE CONSERVACIÓN		
	Material	Color	Imprimación	Inicial	Final	
Restauración	Vidrio de Murano	Blanco	Sin	Micro-fisuración 0 ciclos	81 ciclos	Incremento micro-fisuración
		Dorado	Sin	Micro-fisuración lámina de oro interna 0 ciclos	81 ciclos	Deterioro lámina interna de oro Micro-fisuras rejuantado
		Rojo	Sin	Micro-fisuración inicial 0 ciclos	81 ciclos	Incremento micro-fisuración Micro-fisuras rejuantado
	Gres porcelánico	Marrón	Sin	Rejuantado en buen estado 0 ciclos	81 ciclos	Pieza caída Micro-fisuras paralelas rejuantado
Obra nueva	Vidrio de Murano	Verde	Sin	Micro-fisuración Aire ocluido Marcas de la silicona 0 ciclos	80 ciclos	Marcas silicona Aire ocluido Incremento de la micro-fisuración Aire ocluido vidrio
		Verde	Imprimación	Micro-fisuración inicial Aire ocluido Marcas de la silicona 0 ciclos	80 ciclos	Aire ocluido Marcas de la silicona Incremento de la micro-fisuración Aire ocluido vidrio
	Gres porcelánico	Amarillo	Sin	Manchas blancas interfase Aire ocluido 0 ciclos	80 ciclos	Aire ocluido Marcas de la silicona
		Amarillo	Imprimación	Manchas blancas interfase Aire ocluido 0 ciclos	80 ciclos	Aire ocluido Manchas blancas interfase Marcas de la silicona

Tabla 6.4: Estado de conservación de las probetas sometidas a ciclos de choque térmico

En la tabla 6.4 se observa que, en conjunto, las *probetas de restauración* después de los 80 ciclos de choque térmico, el estado de conservación fue satisfactorio. No obstante cabe reflejar que, en las piezas de *trencadís* de vidrio indistintamente de su coloración (blanco o rojo) aumentó la microfisuración inicial a medida que el número de ciclos fue mayor. Ejemplo de ello, se muestra en el detalle de la figura 6.19 de uno de estos revestimientos, antes (a) y después (b) de los ciclos de degradación. En los vidrios dorados también se detectó un incremento gradual de las microfisuras de la lámina de oro interna y una pérdida de la brillantez de las piezas (ver tabla 6.4). El incremento de la microfisuración en el vidrio observado podría responder a tensiones internas dentro del propio material, como resultado de los ciclos de choque térmico aplicados. Por el contrario, las piezas de gres porcelánico se encontraron en perfecto estado de conservación y sin indicio de fisuración (ver tabla 6.4).

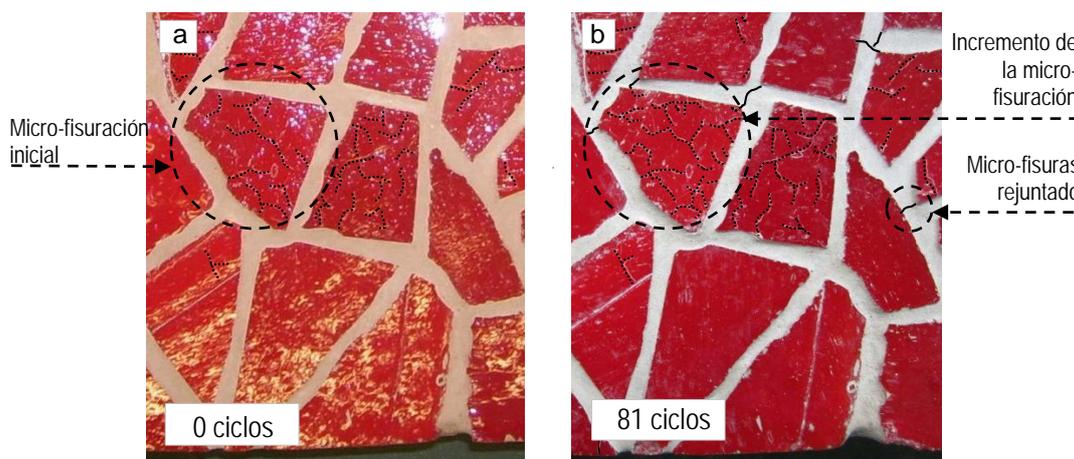


Figura 6.19: Estado de conservación de la probeta RVRB: a) Inicial y b) Después de 81 ciclos de choque térmico

Asimismo, en estas probetas de restauración, entre los 21 y 30 ciclos, se empezaron a apreciar microfisuras transversales en el mortero de rejuntado que coincidían con los vértices de algunas piezas del *trencadís*, tanto de vidrio como de gres porcelánico de color marrón (ver figura 6.19b). En algunas de ellas, como la RVBA o la RVDA, este daño no se reveló hasta los 61 ciclos. Este tipo de fisuras podrían responder a la diferente compatibilidad de deformaciones, entre el material de rejuntado y el *trencadís*, ya fuera de vidrio o de gres. En las probetas de gres se observó la caída de una pieza de la esquina, como consecuencia de esta falta de compatibilidad (ver figura 6.20b).

Además, en estas mismas probetas de gres (RGMA y B) se observó también otras microfisuras paralelas al perímetro de algunas piezas, tal y como se puede apreciar en la figura 6.20a y b. Estas microfisuras surgidas a partir de los 40 ciclos y solamente en este tipo de probetas, podían haberse originado por dos motivos: a) por falta de adherencia en los laterales de las piezas o b) por un efecto de retracción.

El gres, a diferencia del vidrio, obtiene superficies planas en el corte de las piezas. Al existir tensiones tangenciales en el revestimiento por incompatibilidad de deformación, las fisuras surgieron paralelas a estas interfaces entre los dos materiales (gres-rejuntado), dado que tenían menos resistencia a la cizalladura respecto al *trencadís* de vidrio. Por otra parte, también cabe la posibilidad que estas microfisuras paralelas al rejuntado se hubieran producido por un efecto de retracción debido a la pérdida

de agua intersticial de las piezas de gres. El agua que se encuentra entre las partículas minerales del gres, se habría evaporado debido al cíclico secado del material a altas temperaturas (70°C) produciendo una retracción en el material.

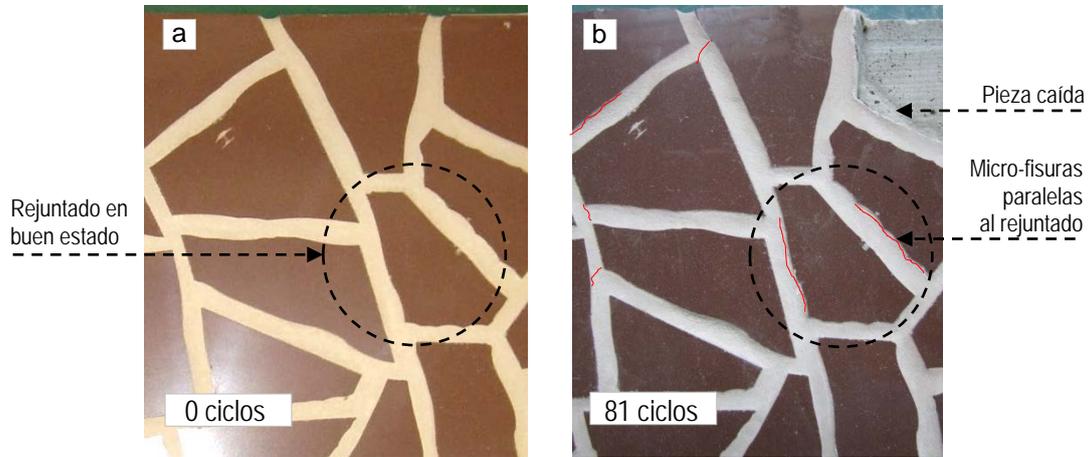


Figura 6.20: Estado de conservación de la probeta RGMA: a) Inicial y b) Después de 81 ciclos de choque térmico

En las bases de micro-hormigón, a partir de los 21 ciclos, también se apreciaron pequeñas fisuras que atravesaban la base de las mismas que, en algunos casos, se extendían hacia los laterales, tal como se puede apreciar en la figura 6.21a y b, marcado en color rojo. Estas fisuras responden a la diferente tendencia de deformación entre los materiales que conformaban las dos capas de las probetas de restauración (base-revestimiento) (ver esquema figura 6.21b).

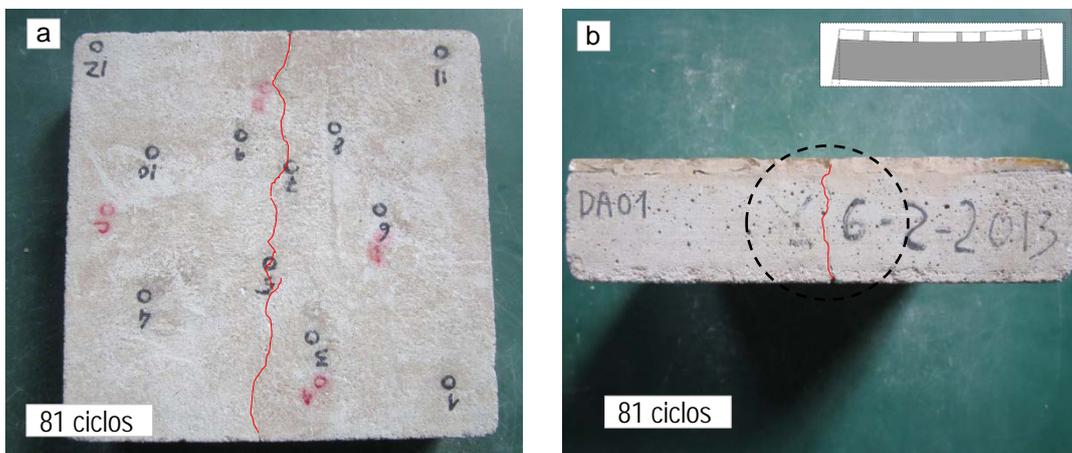


Figura 6.21: Base de micro-hormigón de la probeta RVDA a los 81 ciclos: a) Reverso de la probeta y b) Lateral de la probeta

Las *probetas de obra nueva* presentaron un buen estado de conservación después de los 80 ciclos de degradación y no se detectó ningún indicio de desprendimiento en el revestimiento (ver tabla 6.4). En las piezas de vidrio de Murano de color verde se observó un comportamiento similar al mostrado con anterioridad en las probetas de restauración, es decir, un aumento de la micro-fisuración a medida que transcurría el número de ciclos, tal y como se muestra en las figuras 6.22a y b. Ahora bien, a

diferencia del caso anterior, no se apreciaron micro-fisuraciones en el rejuntable ni en la base de las probetas. No obstante, se observó un mayor número de zonas con presencia de burbujas o separaciones de aire en las interfaces, fruto, como se ha dicho, de las diferencias de compatibilidad entre el rejuntable y el vidrio o el gres, fruto de los ciclos de choque térmico aplicados (ver figura 6.22b).

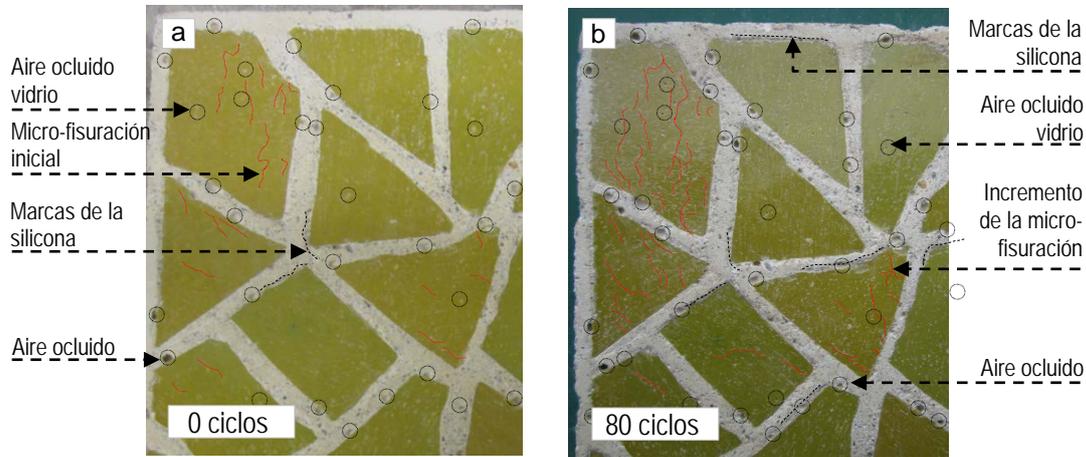


Figura 6.22: Estado de conservación de la probeta NVSA: a) Inicial y b) Después de 81 ciclos de choque térmico

Con el paso de los ciclos, se produjo también una deposición de suciedad en las superficies de las probetas, lo cual favoreció la apreciación visual de las imperfecciones iniciales, como las marcas impresas en el micro-hormigón debido a los procedimientos de fabricación. Ello se puede apreciar en las figuras 6.22 de la probeta obra nueva NVSA antes (a) y después (b) de los ciclos de envejecimiento. En lo que se refiere a la contribución de la capa de imprimación, los resultados no mostraron evidencias de que la misma mejorara la adherencia de los revestimientos, ya que tanto en el *trencadís* de vidrio de color verde como en el gres porcelánico, las apreciaciones visuales fueron similares.

6.3.3 Ciclos de mojado / secado

En la tabla 6.5, se presentan los resultados correspondientes a las probetas de restauración y obra nueva sometidas a ciclos de mojado/secado, siguiendo el mismo esquema que en la tabla anterior. Del mismo modo que en el choque térmico, las *probetas de restauración* presentaron, en general, un buen estado de conservación después de los 80 ciclos de envejecimiento. Asimismo, al finalizar el estudio, las piezas de *trencadís* vidrio de color blanco y rojo manifestaron un incremento de la micro-fisuras inicial, debido a las tensiones internas surgidas en el material por los ciclos aplicados (ver tabla 6.5).

En los vidrios dorados también se apreció un incremento de la micro-fisuración de la lámina interna de oro y una pérdida de la transparencia de las piezas, volviéndose en algunos casos blanquecinas, especialmente en el perímetro, dada la mayor exposición a la entrada y salida del agua (ver figura 6.23a y b). Por el contrario, las piezas del revestimiento de gres porcelánico se encontraron en perfecto estado de conservación y solamente se detectaron algunas ralladuras en la superficie, probablemente por su manipulación.

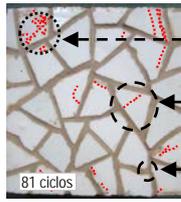
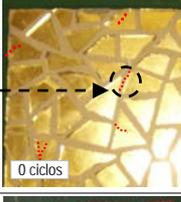
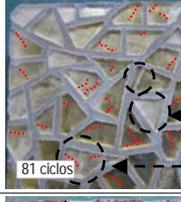
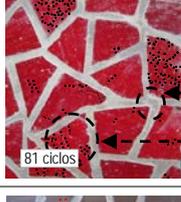
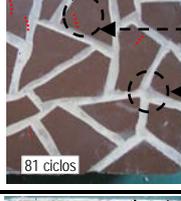
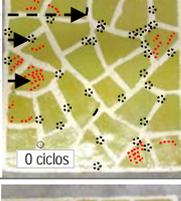
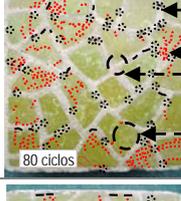
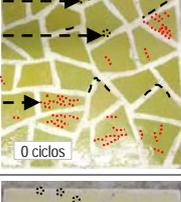
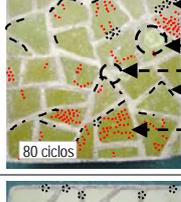
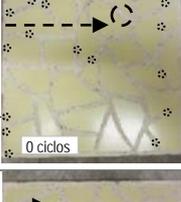
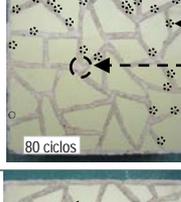
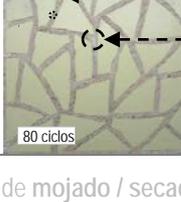
PROBETAS	TRECADÍS			ESTADO DE CONSERVACIÓN			
	Tipo	Material	Color	Impr.	Inicial	Final	
Restauración	Vidrio de Murano	Blanco	Sin	Micro-fisuración			Micro-fisuración Fisuración Cambio de coloración del rejunado
		Dorado	Sin	Micro-fisuras en la lámina interna de oro			Emblanquecimiento Deterioro lámina de oro interna
		Rojo	Sin	Micro-fisuración			Cambio de coloración / manchas en el rejunado Incremento micro-fisuración
	Gres porcelánico	Marrón	Sin				Ralladuras Manchas en el rejunado
Obra nueva	Vidrio de Murano	Verde	Sin	Marcas silicona Aire ocluido Micro-fisuración			Aire ocluido Incremento de la micro- Manchas blancas Delaminación del vidrio
			Impr.	Marcas Aire ocluido Micro-fisuración inicial			Aire ocluido Delaminación del vidrio Manchas Marcas Incremento de la micro-
	Gres porcelánico	Amarillo	Sin	Manchas blancas Aire ocluido			Aire ocluido Manchas
			Impr.	Aire ocluido Manchas blancas interfase			Aire ocluido Manchas blancas

Tabla 6.5: Estado de conservación de las probetas sometidas a ciclos de mojado / secado

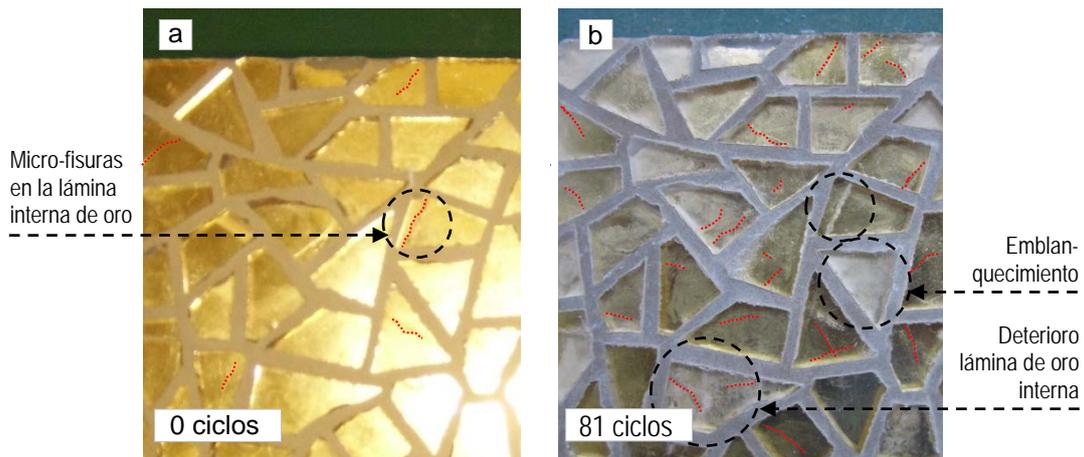


Figura 6.23: Estado de conservación de la probeta RVDB: a) Inicial y b) Después de 81 ciclos

A diferencia del choque térmico, en esta serie de probetas no se observó ninguna microfisuración en el mortero de rejuntao ni en la base de micro-hormigón. Aunque, sí que se apreció un leve cambio de coloración y manchas en las superficies, tal y como se observa en las imágenes de la tabla 6.5. El alto contenido de humedad y temperatura a las que estaban sometidas las probetas de mojado/secado durante el transcurso de los ciclos, favoreció la deposición de microorganismos en la superficie. Además, la repetida entrada y salida del agua también podría haber dado lugar a un fenómeno de disolución de compuestos presentes en el material y su posterior precipitación en las superficies.

Como en el choque térmico, las *probetas de obra nueva* no revelaron ningún despegue y en general, presentaron un buen estado de conservación después de 80 ciclos de mojado/secado. La degradación más significativa observada en esta serie de probetas, respecto al resto, fue el alto incremento de la microfisuración y la delaminación de las piezas de *trencadís* de vidrio de color verde, indistintamente si éstas incorporaban una imprimación, tal y como se observa en la figura 6.24b.

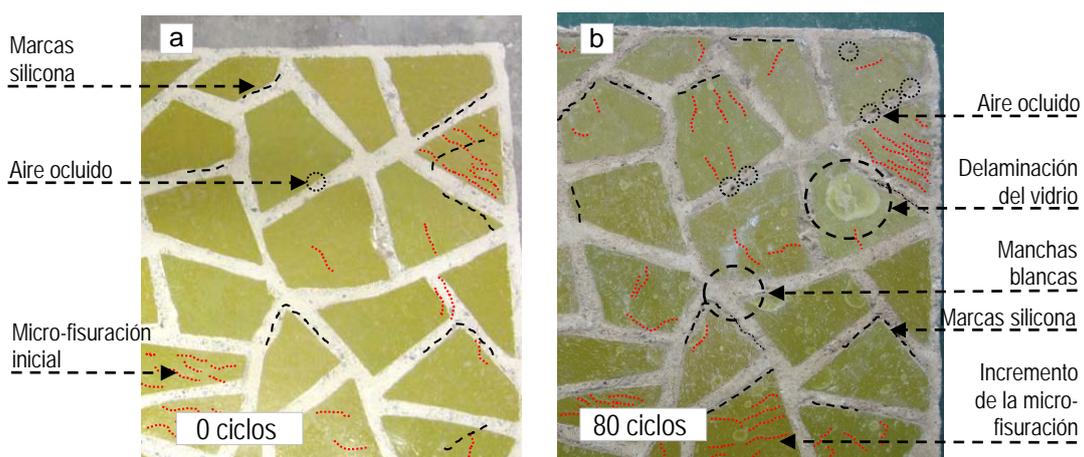


Figura 6.24: Estado de conservación de la probeta NVIA: a) Inicial y b) Después de 80 ciclos de mojado/secado

El proceso de delaminación detectado, favorecido por los ciclos de mojado y posterior secado a 70 °C, dio lugar a burbujas de aire en la superficie de los vidrios después de los ciclos de envejecimiento (ver figura 6.24b). Teniendo en cuenta que este tipo de daño se manifestó únicamente en el vidrio de esta serie de probetas, se planteó la hipótesis que se tratara de un defecto del vidrio de color verde.

El micro-hormigón del rejuntable y la base de las probetas de obra nueva experimentaron una degradación similar a las de choque térmico. En ellas se intensificó la presencia de burbujas o separaciones de aire en la interfaz entre el rejuntable y el *trencadís*, debido a las diferencias de compatibilidad entre ambos materiales. Asimismo, se apreció un incremento visual de los defectos superficiales iniciales y, especialmente en este caso, se observó un aumento de las manchas blancas del rejuntable fruto del aditivo elastificante no disuelto, tal y como se muestra en la tabla 6.5. Ello, como en las probetas de restauración, se debió a la disolución de los compuestos presentes en el material, favorecido por las condiciones de temperatura y humedad de este tipo de ciclo.

6.3.4 Ciclos de hielo / deshielo

En la tabla 6.6, se presentan los resultados correspondientes a las probetas de restauración y obra nueva sometidas a ciclos de hielo/deshielo, siguiendo los mismos esquemas que en las tablas previas. De forma análoga a los anteriores casos, las *probetas de restauración* sometidas a este ciclo se encontraron en buen estado de conservación. Asimismo, se observó un incremento de la micro-fisuración inicial de las piezas de *trencadís* de vidrio de color blanco y rojo, debido a las tensiones internas generadas en el material (ver figura 6.25b). En los vidrios dorados también se apreció un incremento de la micro-fisuración de lámina interna de oro y en algunas de las piezas perimetrales, como en los ciclos de mojado/secado, se observó una pérdida significativa de la transparencia y un emblanquecimiento.

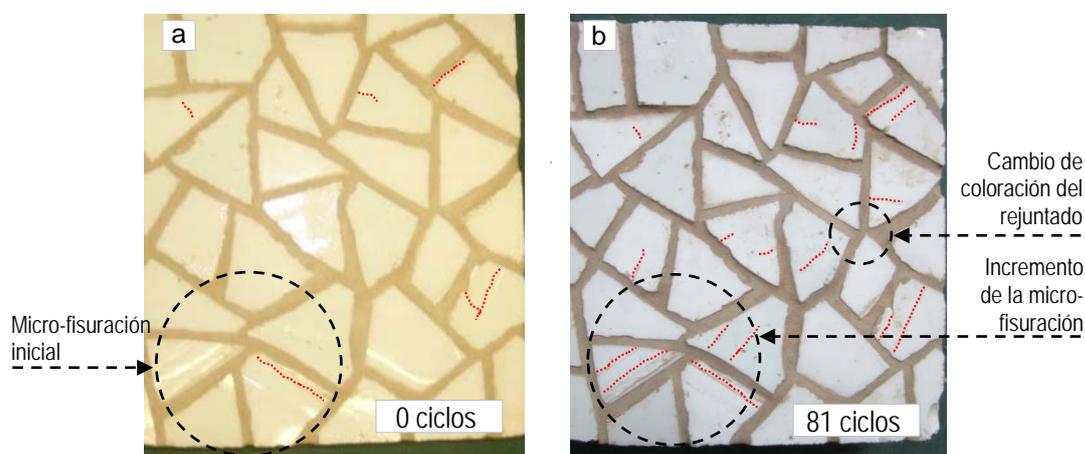


Figura 6.25: Estado de conservación de la probeta RVBB: a) Inicial y b) Después de 81 ciclos de hielo/deshielo

En el mortero de rejuntable se apreciaron algunas manchas, como en las probetas sometidas a mojado/secado. Igual que en éstas últimas, no se mostró ninguna micro-fisuración en el mortero de rejuntable, ni en las base de micro-hormigón. A pesar de ello, en este caso, se detectó la caída de una pieza perimetral de gres, igual que en las probetas sometidas a choque térmico. Ello podría señalar la existencia de incompatibilidades de deformación entre el rejuntable y el *trencadís*.

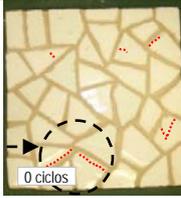
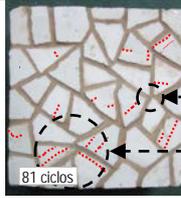
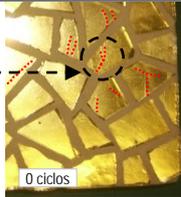
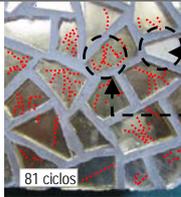
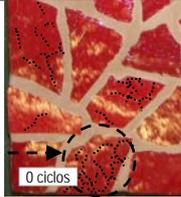
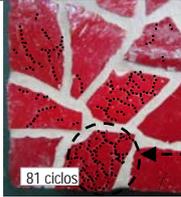
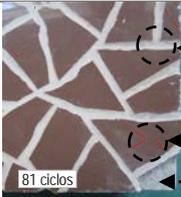
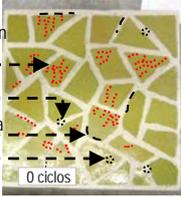
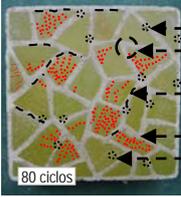
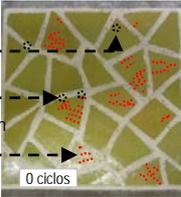
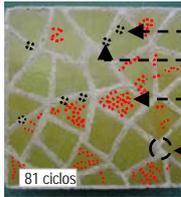
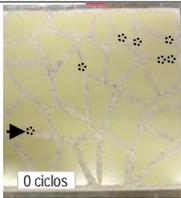
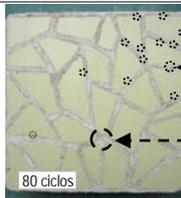
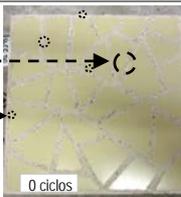
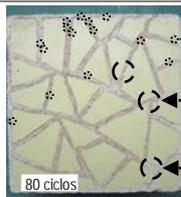
PROBETAS	TRENCADÍS			ESTADO DE CONSERVACIÓN		
	Tipo	Material	Color Impr.	Inicial	Final	
Restauración	Vidrio de Murano	Blanco	Sin	Micro-fisuración 		Cambio de coloración del rejuntable Incremento de la micro-
		Dorado	Sin	Micro-fisuras en la lámina interna de oro 		Emblanquecimiento Incremento micro-fisuración
		Rojo	Sin	Micro-fisuración 		Incremento de la Micro-fisuración
	Gres porcelánico	Marrón	Sin			Manchas Ralladuras Caída pieza
Obra nueva	Vidrio de Murano	Verde	Sin	Micro-fisuración inicial Aire ocluido Marcas silicona Aire ocluido 		Aire ocluido Manchas Marcas silicona Incremento micro-fisuración Aire ocluido vidrio
			Impr.	Aire ocluido vidrio Aire ocluido Micro-fisuración inicial 		Aire ocluido vidrio Aire ocluido Incremento de la micro-fisuración Manchas blancas
	Gres porcelánico	Amarillo	Sin	Aire 		Aire ocluido Manchas blancas
			Impr.	Manchas blancas Aire 		Aire Cambio de coloración Manchas

Tabla 6.6: Estado de conservación de las probetas sometidas a ciclos de hielo / deshielo

Como en los otros procesos de degradación, las *probetas de obra nueva* se encontraron en buen estado después de 80 ciclos y no se detectó ningún indicio de fisuración y/o desprendimiento. Como en el resto de casos, se apreció un incremento de la micro-fisuración inicial de las piezas de vidrio de color verde, indistintamente si incorporaban la imprimación. Sin embargo, a diferencia de las probetas de mojado/secado no se detectó ningún proceso de delaminación en ellas. La degradación del micro-hormigón de las probetas fue muy parecida al resto de procesos, se observó una acentuación de los defectos iniciales (manchas blancas y marcas de la silicona) y un incremento de la presencia de burbujas o separaciones de aire en la interfaz entre el rejuntable y el *trencadís*, señalando también las diferencias de compatibilidad entre ambos materiales (ver figura 6.26b).

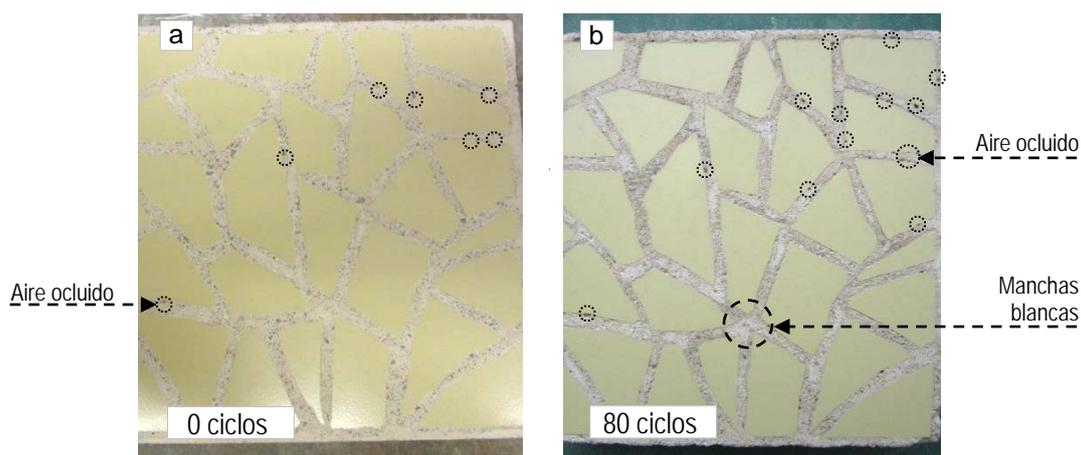


Figura 6.26: Estado de conservación de la probeta NGSA: a) Inicial y b) Después de 80 ciclos de hielo/deshielo

6.3.5 Ciclos de cristalización de sales

En la tabla 6.7 se presentan imágenes de las *probetas de restauración* sometidas a cristalización de sales, en distintos ciclos del estudio, siguiendo el mismo esquema que en las tablas anteriores. A diferencia del resto de casos, esta serie de probetas resultaron altamente degradadas y en todas ellas, exceptuando las dos probetas con un *trencadís* dorado (RVDA y B), se produjo la total separación del revestimiento de la base de micro-hormigón, tras diversos ciclos de envejecimiento.

En la figura 6.27a se presenta la probeta RVRB, con un *trencadís* de vidrio color rojo, donde se produjo el primero de los desprendimientos del estudio. Después de 21 ciclos de degradación se detectó la caída de tres piezas individuales del perímetro de dicha probeta y, posteriormente, a los 30 ciclos se originó el despegue de todo el revestimiento. Concretamente, se localizó en la interfase entre el vidrio y el mortero de colocación.

De manera análoga, se produjeron consecutivamente el desprendimiento del resto de los revestimientos de las probetas (ver figura 6.27b): en la RVRA a los 37 ciclos; en la RGMB a los 46; en la RVBB y RVBA a los 52 y 55 ciclos, respectivamente y finalmente, en la probeta RGMA después de los 80 ciclos. En el caso de las probetas RVDA y B restó únicamente adherido la parte central del revestimiento (ver tabla 6.7).

TRENCADÍS		ESTADO DE CONSERVACIÓN				
Material	Color					
Blanco	Blanco	Micro-fisuración inicial				Fisuración base Fisuración mortero de colocación (interfase) Incremento de la micro-fisuración Fisuración rejuntado Pieza caída
		Fisuración rejuntado y base				Fisuración rejuntado Pérdida mortero de colocación Fisuración base
Vidrio de Murano	Dorado	Mirco-fisuración lámina de oro				Fisuración base Fisuración rejuntado y <i>trencadis</i> Emblanquecimiento
		Fisuración Deposition de sales y emblanquecimiento				Degradación / pérdida del material de la base Fisuración rejuntado Emblanquecimiento piezas
Rojo	Rojo	Micro-fisuración inicial				Despegue revestimiento Fisuración base Incremento de la micro-fisuración inicial
Gres porcelánico Marrón	Marrón					Fisuración base Fisuración rejuntado Pieza caída
		Fisuración rejuntado y base				Fisuración base Fisuración rejuntado Degradación / pérdida de material de la base

Tabla 6.7: Estado de conservación de las probetas de restauración sometidas a ciclos de cristalización de sales

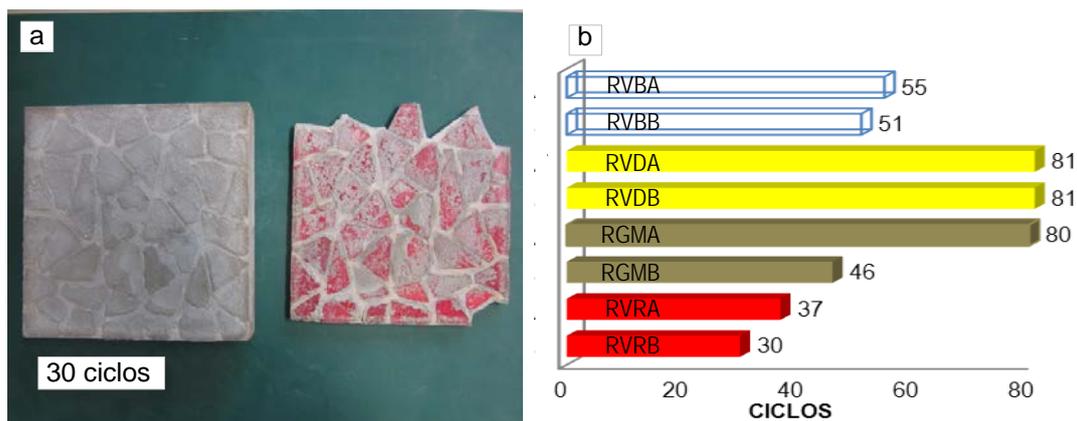


Figura 6.27: a) Despegue del revestimiento con la base de micro-hormigón de la probeta RVRB y b) Desprendimientos del *trencadís* de las probetas durante el estudio

Antes del despegue de los revestimientos, como en el resto de los casos, las piezas del *trencadís* de vidrio de color blanco y rojo presentaron un incremento de la micro-fisuración inicial producidas por las tensiones internas generadas en el material (ver tabla 6.7). Asimismo, los vidrios dorados manifestaron un aumento de la degradación de la lámina interna de oro y las piezas perdieron progresivamente su transparencia y se volvieron blanquecinas (ver tabla 6.7). Este fenómeno se observó primero en las piezas más próximas al perímetro y expuestas a la entrada de la solución de sulfato sódico y, con posterioridad, avanzó hacia las piezas del centro de la probeta. En contraposición, las piezas de gres porcelánico no presentaron ningún signo de degradación y únicamente a los 61 ciclos, se apreció la deposición de sales en las superficies de las piezas (ver tabla 6.7).

Teniendo en cuenta las duras condiciones del ensayo, el mortero de rejuntado de todas las probetas tuvo un buen desempeño, puesto que, tras el despegue de los revestimientos, las piezas del *trencadís* permanecían adheridas entre sí, tal y como se puede apreciar en la figura 6.27a. Sin embargo, la severa degradación y el progresivo agrietamiento y deformación de las bases de micro-hormigón contribuyó a su fisuración, debido a la incompatibilidad de deformación entre los materiales que conformaban las dos capas de las probetas de restauración (base-revestimiento).

Después de 30 ciclos de degradación se apreciaron pequeñas fisuras en el rejuntado, resiguiendo las interfaces con las piezas de *trencadís*. Se empezaron a manifestar pequeñas fisuras en los laterales y en el trasdós de las probetas y, también, en la capa del mortero de colocación, resiguiendo el perímetro y paralelas a los revestimientos (ver tabla 6.7). La degradación de las probetas se aceleró exponencialmente entre los 40 y 45 ciclos. Tal y como se puede observar en las figuras de la tabla 6.7, los daños expuestos fueron más significativos y avanzaron gradualmente hasta la finalización del estudio. Además de dicho incremento de la fisuración, se produjo una desintegración y/o pérdida progresiva de material de la base y la deposición de sales en las superficies.

El tipo de degradación y desprendimiento producido en esta serie de probetas se explica por un ataque de sulfato sódico. Cabe recordar que el contenido de esta sustancia empleado en el proceso de degradación no coincidía con la realidad, siendo bastante más severo. Las condiciones cíclicas de mojado/secado del ensayo facilitaron el transporte de los iones de sulfato sódico hacia el interior de las probetas y al cristalizar, tuvo lugar una reacción expansiva. La penetración fue distinta en la cara de la probeta con el revestimiento de *trencadís* (mucho más impermeable por la presencia del vidrio y gres),

respecto al resto de caras de micro-hormigón (más permeable), por lo que produjeron deformaciones diferenciales. Estas deformaciones dieron lugar a tensiones en las interfaces entre los materiales, causando daños como: las fisuras en el mortero de rejuntado, o bien fisuras en el trasdós y laterales de la base de las probetas, tal y como se muestra en el esquema de la figura 6.28a.

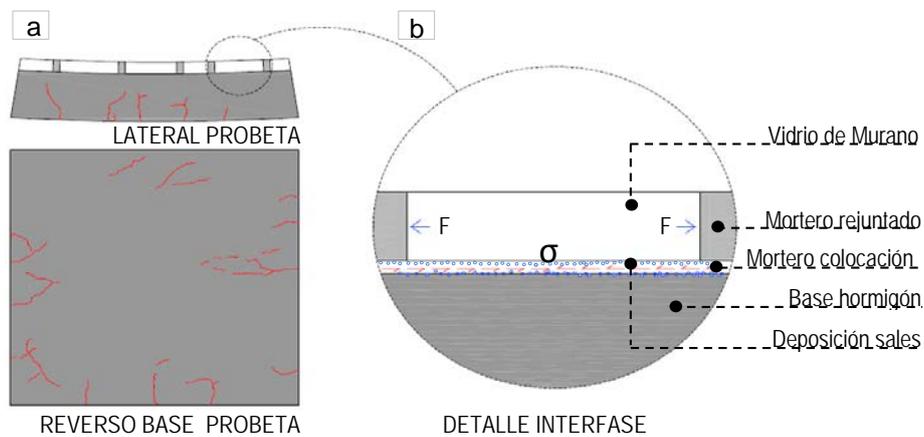


Figura 6.28: a) Fisuración de la base de la probeta RB y b) Detalle de la interfase

En la interfase entre el *trencadís* y el mortero de colocación, mostrado en el detalle de la figura 6.28b, la combinación de las tensiones generadas por la deformación diferencial y por la cristalización de las sales depositadas en ese punto, alcanzaron la resistencia de la interfaz, provocando los despegues de las piezas y/o de todo el revestimiento de las probetas.

6.3.6 Resumen de la daños / incidencias

En la tabla 6.8 se presenta un resumen de las incidencias o daños apreciados en todas las probetas y procesos de degradación del estudio, tras la realización de 80 ciclos de envejecimiento acelerado. Ello pretende mostrar una visión global del proceso de degradación que experimentaron todos los tipos de probetas analizadas. A continuación, se describe la leyenda de la numeración empleada en la tabla 6.8, donde cada número corresponde a un daño y/o incidencia.

Leyenda tabla 6.8:

- (1) Incremento de la micro-fisuración inicial de las piezas de *trencadís* de vidrio;
- (2) Incremento micro-fisuración de la lámina de oro interna de las piezas de vidrio dorado;
- (3) Pérdida de transparencia de las piezas de vidrio dorado;
- (4) Emblanquecimiento de las piezas de vidrio dorado;
- (5) Proceso de delaminación de las piezas de vidrio;
- (6) Micro-fisuras en el rejuntado;
- (7) Micro-fisuras interfase (*trencadís-rejuntado*);
- (8) Cambio de coloración y manchas en la superficie del rejuntado;
- (9) Apreciación de las imperfecciones iniciales en el rejuntado de micro-hormigón;
- (10) Incremento de las separaciones de aire en la interfaz (*trencadís-rejuntado*);
- (11) Fisuras en el rejuntado;
- (12) Fisuras en el trasdós y los laterales de las bases de micro-hormigón;
- (13) Desintegración y/o pérdida de material de las bases de micro-hormigón;

(14) Caída de piezas perimetrales del *trencadís*;

(15) Despegue del revestimiento del *trencadís*;

PROBETAS		CICLOS DE DEGRADACIÓN			
Tipo	Material Col./ Imp.	Choque térmico	Mojado /Secado	Hielo /Deshielo	Cristalización de Sales
R	V	B R	(1); (6);(12)	(1);(8)	(1); (8); (15) = ciclos 51 y 55 (11);(12);(13) (15) = ciclos 30 y 37
		D	(2);(3);(6);(12)	(2); (3); (4); (8)	(2); (3);(4);(8);(11);(12); (13);(14)
	G	M	(6);(7);(12);(14)	(8)	(8);(14) (8);(11);(12);(13);(14); (15) = ciclos 46 y 80
N	V	I S	(1);(9);(10)	(1);(5);(8);(9);(10)	(1);(8);(9);(10)
	G	I S	(9);(10)	(8);(9);(10)	(8);(9);(10)

Tabla 6.8: Resumen de los daños/incidencias de las probetas ensayadas

6.4 CONCLUSIONES

En base el seguimiento del estado de conservación de las probetas se establece las siguientes conclusiones:

- Ante los distintos ciclos de degradación, la cristalización de sales fue el proceso de degradación que resultó más nocivo al revestimiento. Ello se debe a un ataque sulfático que produce una expansión diferencial del micro-hormigón de la base, afectando más la zona no revestida (que expande más) y menos la zona revestida (que expande menos). En la interfaz entre el *trencadís* / mortero de colocación, la combinación de las tensiones generadas por la deformación diferencial de las probetas y por la cristalización de las sales depositadas en ese punto, agotaron su resistencia, provocando los desprendimientos de los revestimientos observados.

En todas las probetas ensayadas, excepto las de *trencadís* dorado, se produjo el despegue de piezas y la total separación del revestimiento de la base de micro-hormigón. En este sentido, la pequeña dimensión de las piezas de vidrio dorado permitió que se depositara un menor porcentaje de sales en su trasdós y que el revestimiento se adaptara mejor a la expansión y deformación de la base.

Cabe recalcar que las condiciones de dicho ensayo (muy extrema en concentraciones de sales) no se ajustan a la realidad atmosférica de la ciudad de Barcelona. Por este motivo, se considera baja la probabilidad de ataque en los revestimientos de la obra por la deposición de sales.

- Las dos técnicas de aplicación del *trencadís*, en las probetas de reparación y las de obra nueva, tuvieron un comportamiento diferido desde el punto de vista global bueno. No obstante, los ciclos de degradación produjeron desperfectos que afectaron sobre todo al aspecto visual de las probetas.

Las probetas de restauración, frente a los ciclos de choque térmico, presentaron fisuraciones en el rejunto y en la base de micro-hormigón, entre los 21 y 61 ciclos, indistintamente del material

del *trencadís*. Este tipo de fisuras señalarían la incompatibilidad de deformación entre el mortero de rejuntado y las piezas del *trencadís*, ya fueran de vidrio o gres. En las probetas de gres de este ciclo y en las de hielo/deshielo, dicha incompatibilidad, se evidenció con la caída de una pequeña pieza de su perímetro.

En cambio, en el micro-hormigón del rejuntado de las probetas de obra nueva no se manifestó ningún tipo de fisuración y/o desprendimiento en los distintos ciclos de degradación realizados. Ahora bien, se observó un incremento de la presencia de burbujas o separaciones de aire en la interfaz entre el rejuntado y el *trencadís*, que señalaría también incompatibilidades de deformación entre los materiales.

- Las piezas de vidrio de Murano presentaron un incremento de la micro-fisuración inicial después de los distintos ciclos de envejecimiento, debido a tensiones internas generadas en el material. Por el contrario, las piezas de gres no mostraron indicios visuales de una degradación, frente a las mismas condiciones de ensayo.
- El grado de micro-fisuración y el comportamiento del vidrio de Murano fue distinto según su coloración. El vidrio de color blanco fue el que reveló menos signos de degradación tras el estudio. En cambio, el vidrio de color rojo presentó un alto grado de fisuración y una menor adherencia. El vidrio dorado fue muy sensible a los ciclos de degradación, se apreció una alta degradación en la lámina interna de oro y una pérdida de transparencia y emblanqueamiento de las piezas, especialmente en los ciclos donde intervenía el agua. Por otra parte, el vidrio de color verde empleado en las probetas de obra nueva presentó un severo proceso de delaminación en los vidrios sometidos a los ciclos de mojado/secado.
- En la evaluación visual de las probetas de obra nueva no se apreciaron diferencias significativas de comportamiento entre los revestimientos con o sin imprimación. Asimismo, no se observó ninguna influencia de dicha imprimación en la adherencia de las piezas respecto a las piezas donde no se aplicó, puestos que en ambos casos se encontraron en perfecto estado.
- Las imperfecciones iniciales detectadas en el micro-hormigón de las probetas de obra nueva no influyeron en la adherencia de los revestimientos, por lo que pese a la situación desfavorable el material tuvo un muy buen desempeño.

CAPÍTULO 7

ESTUDIOS DE DURABILIDAD: EVALUACIÓN MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

7.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se ha expuesto la configuración de la campaña experimental desarrollada para evaluar la degradación y la pérdida de adherencia del *trencadís* de los pináculos de la Sagrada Familia frente a condiciones ambientales extremas. En ella se consideraron distintas variables como los ciclos de degradación, los materiales empleados en el *trencadís*, así como las técnicas de aplicación en la obra de la Sagrada Familia (ver figura 6.1). Todas las probetas fueron sometidas a 80 ciclos de envejecimiento, con una duración de 48 horas cada uno. Durante este periodo se realizó el seguimiento y control de su proceso de degradación a través de diversos ensayos no destructivos (inspección visual, ultrasonidos, impacto acústico e imágenes termográficas).

El seguimiento visual - expuesto también en el capítulo 6 - reveló que frente a los ciclos de choque térmico, mojado/secado y hielo/deshielo las probetas mostraron un buen estado de conservación, si bien se detectaron pequeños daños durante el transcurso de los ciclos. Por el contrario, en los ciclos de cristalización de sales (muy extremo en concentración de sales) las probetas resultaron altamente degradadas, habiendo en la mayoría de los casos la total separación entre el revestimiento y la base de micro-hormigón.

En el presente capítulo se exponen los resultados y el análisis de las lecturas realizadas mediante los ensayos no destructivos de ultrasonidos, impacto acústico e imágenes termográficas. En él se establecen cinco objetivos principales:

- Relacionar los resultados de los ensayos no destructivos;
- Establecer rangos de variación en los resultados de los ensayos no destructivos que sugieran la existencia de una degradación;
- Validar algunas apreciaciones derivadas de la inspección visual mediante los ensayos no destructivos;
- Conocer la información sobre el estado de conservación del material;
- Evaluar las distintas variables establecidas en el estudio de durabilidad y determinar su influencia en el proceso de degradación o pérdida de adherencia del revestimiento;

En vías de alcanzar estos objetivos, en la primera parte del capítulo se exponen las diferentes técnicas de ensayo no destructivos, su interpretación y análisis (apartado 7.2). Para cada técnica empleada, se describe el tratamiento de los resultados obtenidos. Con el fin de evaluar la sensibilidad de las técnicas y establecer los valores críticos de las mediciones que pudieran indicar daños, se llevó a cabo un análisis de las mediciones realizadas en las probetas de restauración sometidas a ciclos de choque térmico y cristalización de sales. Estas han sido seleccionadas debida a la variedad y elevada intensidad de los daños apreciados durante los ciclos. Ello ha servido acotar con mayor precisión los rangos críticos relacionados con la degradación de los materiales.

Una vez establecidos los rangos de referencia, se analizan por separado la influencia de las distintas variables consideradas en el estudio (apartado 7.3). Estas se presentan de forma desglosada en la tabla 7.1. El análisis individualizado de cada una de estas variables permite conocer en profundidad los procesos de degradación y determinar su importancia en la durabilidad de los revestimientos estudiados. En cada una de las variables, que corresponden también a distintos sub-apartados del capítulo, se muestra de forma comparativa los resultados de las técnicas no destructivas empleadas.

VARIABLES ANALIZADAS	1. Ciclos de degradación	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Choque Térmico ▪ Mojado / Secado ▪ Hielo / Deshielo ▪ Cristalización de Sales
	2. Técnicas de aplicación	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Restauración ▪ Obra nueva
	3. Material de las piezas del <i>trencadís</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vidrio de Murano ▪ Gres Porcelánico
	4. Posición de las piezas en el <i>trencadís</i> de las probetas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Centro ▪ Intermedio ▪ Exterior
	5. Tamaño y color de las piezas de <i>trencadís</i> de vidrio de Murano	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Blanco (9 cm²) ▪ Rojo (8 cm²) ▪ Dorado (3 cm²)
	6. Utilización de una imprimación adicional	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Imprimación ▪ Sin imprimación

Tabla 7.1: Variables analizadas en el estudio de durabilidad

7.2 TRATAMIENTO DE LOS RESULTADOS Y SENSIBILIDAD DE LAS TÉCNICAS DE LECTURA

7.2.1 Ultrasonidos

Mediante el equipo de ultrasonidos se obtuvo un gráfico que relaciona la amplitud de la señal ultrasónica con el tiempo (ver figura 7.1a). En ella se aprecia un primer grupo de ondas correspondientes a la señal transversal seguida por ecos y rebotes. Para determinar el tiempo que necesita el pulso de onda en atravesar la sección de la probeta y disminuir el error cometido en la medida del tiempo de vuelo de la señal, se empleó el método del primer cruce por cero. Este consistió en tomar como referencia el inicio del pulso de emisión y medir el tiempo hasta que el primer grupo de ondas realizara el primer cruce por cero, tal y como se muestra en la figura 7.1a. Una vez conocido este valor y el espesor de cada probeta, se determinó la velocidad ultrasónica correspondiente a cada lectura y ciclo.

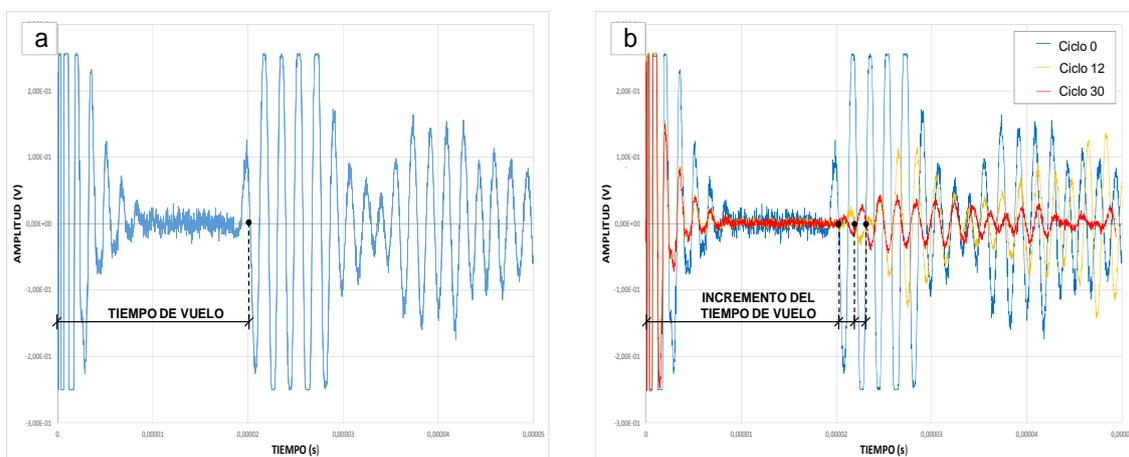


Figura 7.1: a) Relación Amplitud – Tiempo de la señal ultrasónica inicial (0) obtenida en un punto (2) de la probeta RVDA sometida a ciclos de cristalización de sales y b) Señal ultrasónica en los ciclos 0, 12 y 30

En la figura 7.1b se presentan a manera de ejemplo tres señales consecutivas de un mismo punto de una de las probetas RVDA en su estado inicial, después de 12 y 30 ciclos de cristalización de sales. Tal y como se puede apreciar, existe un incremento en el tiempo de vuelo y una atenuación de la señal conforme transcurren los ciclos, lo que implica también la reducción de la velocidad ultrasónica. Dicha disminución de velocidad, podría ser indicio de la mayor dificultad de paso de la señal por la sección de la probeta fruto de la degradación de los materiales o de la pérdida de adherencia del revestimiento de la base de micro-hormigón.

En las figura 7.2, se muestran los resultados que relacionan la velocidad ultrasónica con el número de ciclos de choque térmico y cristalización de sales. Los valores indicados corresponden al promedio de todas las lecturas realizadas en una misma probeta y ciclo. Como se ha descrito en el Capítulo 6, en el estudio se incorporaron bases de micro-hormigón sin revestimiento con el fin de diferenciar entre los daños que se producen en la base y los encontrados en el revestimiento o la interfaz. En ese sentido, se considera que las velocidades de paso en las bases de micro-hormigón deberían ser inferiores a las obtenidas para las probetas con revestimiento, puesto que el vidrio o el gres presentan una velocidad de paso mayor que la del micro-hormigón, aumentando así la velocidad media del conjunto. Por lo tanto, el hecho de que las velocidades de las probetas con revestimiento se reduzcan a valores inferiores al de las bases podría indicar daños en el revestimiento o en la interfaz.

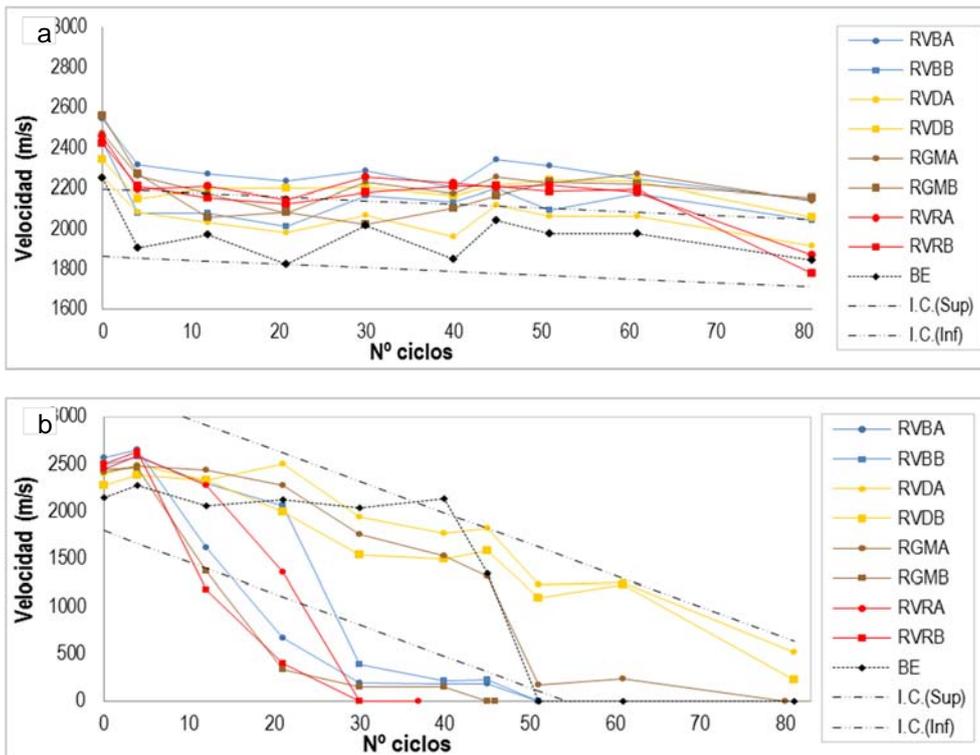


Figura 7.2: Evolución de la velocidad de ultrasonido con los ciclos: Probetas sometidas a choque térmico (a) y cristalización de sales (b)

Dado que también existe una natural dispersión de las mediciones a raíz de factores asociados a la propia técnica de ensayo, conviene establecer intervalos de confianza por debajo de los cuales una reducción de velocidad indicaría, con alta probabilidad, un daño. Este intervalo se calculó únicamente para las bases sin revestimiento a partir de la distancia entre cada lectura realizada y la línea de tendencia que marca la evolución del comportamiento a lo largo de los ciclos para la base. Dada la pequeña cantidad de datos, una vez calculados el promedio y la desviación estándar de las distancias se aplicó la distribución de T de Student (1,18) (Triola, 2004) para calcular el intervalo de confianza. Los intervalos se representan en la figura 7.2 como líneas discontinuas de color negro.

Como se puede apreciar las curvas obtenidas en cada proceso de degradación tiene una tendencia similar. Durante los 4 primeros ciclos, las probetas sometidas a choque térmico presentaron una reducción de la velocidad del 9,8% con respecto a la inicial (ver figura 7.2a), mientras que las de cristalización de sales experimentaron un incremento de la velocidad del 3,7% (ver figura 7.2b). Estas variaciones responden posiblemente a cambios en la condición de saturación de las probetas tras el inicio de los ciclos.

Cabe señalar que originalmente todas las probetas se conservaron en laboratorio con una humedad relativa alrededor de 70%. En el ensayo de choque térmico, tanto el enfriamiento como el calentamiento se realizaron en ambientes con baja humedad. Por consiguiente, en los primeros ciclos, las probetas deberían presentar una pérdida de humedad con respecto a la situación inicial hasta alcanzar una estabilidad con el nuevo medio, lo que explicaría la disminución de la velocidad. En cambio, en el caso del ensayo de cristalización de sales, la sumersión de las probetas en agua desionizada implica un aumento en la humedad y un consecuente incremento de la velocidad ultrasónica. Por lo tanto, hay que tener en cuenta que la humedad de las probetas puede influir en las lecturas realizadas mediante este método.

Entre los ciclos 4 y 51 el valor de la velocidad en las probetas sometidas a choque térmico se mantuvo prácticamente constante con pequeñas fluctuaciones entre el 1% y 3,3%, presentando siempre valores mayores que el límite inferior del intervalo de confianza de la base sin revestimiento (ver figura 7.2a). A partir del ciclo 51, se aprecia una disminución del 9,6% hasta los 81 ciclos. Este comportamiento fue coherente con los resultados de la inspección visual descritos en el capítulo anterior y vino a señalar que después de los 81 ciclos de choque térmico no se produjo despegues, aunque sí una leve degradación en la forma de pequeñas fisuras en el rejunto.

Por el contrario, en las probetas sometidas a cristalización de sales, después de los 4 ciclos iniciales la velocidad disminuyó significativamente (ver figura 7.2b). A los 12 ciclos, la reducción de la velocidad respecto a la inicial osciló entre el 2% y el 52%, alcanzando en algunos casos valores menores que el límite inferior del intervalo de confianza de la base de micro-hormigón (BE). A los 21 ciclos, lo mismo se observó en todas las probetas excepto dos (RVDA y RGMA), lo que indica una pérdida de adherencia o una degradación del revestimiento. Estos datos son consistentes con la inspección visual de las probetas que presentaron los primeros desprendimientos del *trencadís* a partir de los 30 ciclos, empezando por la probeta RVRB que obtuvo las menores velocidades de ultrasonido hasta ese momento. Ello sugiere que la técnica de ultrasonido fue capaz de indicar el despegue del revestimiento con una antelación de varios ciclos antes de que este tuviera lugar.

7.2.2 Impacto acústico

Diferencias en las frecuencias de las señales acústicas fruto del impacto de la bola de acero sobre el revestimiento pueden indicar zonas sin adherencia o parcialmente adheridas. Para cuantificar estas diferencias durante el proceso de degradación y correlacionar con los daños se decidió realizar un análisis de la señal. En primer lugar, se detectó el pico correspondiente a cada rebote empleando para ello una umbralización. Cada pico se procesó individualmente y se determinó el tiempo transcurrido entre rebotes.

A manera de ejemplo, en la figura 7.3 se presenta la evolución del tiempo medio transcurrido entre el primer y el segundo pico para probetas de restauración sometidas a los ciclos de choque térmico y cristalización de sales. En las probetas sometidas a choque térmico se observó un ligero incremento del tiempo entre los rebotes con los ciclos (ver figura 7.3a). Al finalizar el estudio se determinó un aumento del 10,4% respecto al valor inicial. En cambio, en las probetas sometidas a cristalización de sales se produjo el fenómeno contrario. En los primeros ciclos se observó un incremento del tiempo entre los rebotes y al transcurrir los ciclos, los intervalos de tiempo entre los mismos disminuyeron hasta que se produjo el despegue.

Con los intervalos de tiempo y las formulaciones descritas en la normativa ISO 10545-5, se calculó los diferentes coeficientes de restitución medios de todas las probetas sometidas a cada proceso de degradación. Si bien de acuerdo con la ISO 10545-5 el coeficiente de restitución se usa para evaluar la resistencia al impacto de baldosas adheridas, su variación a lo largo de los ciclos podría guardar alguna relación con el estado de adherencia del revestimiento.

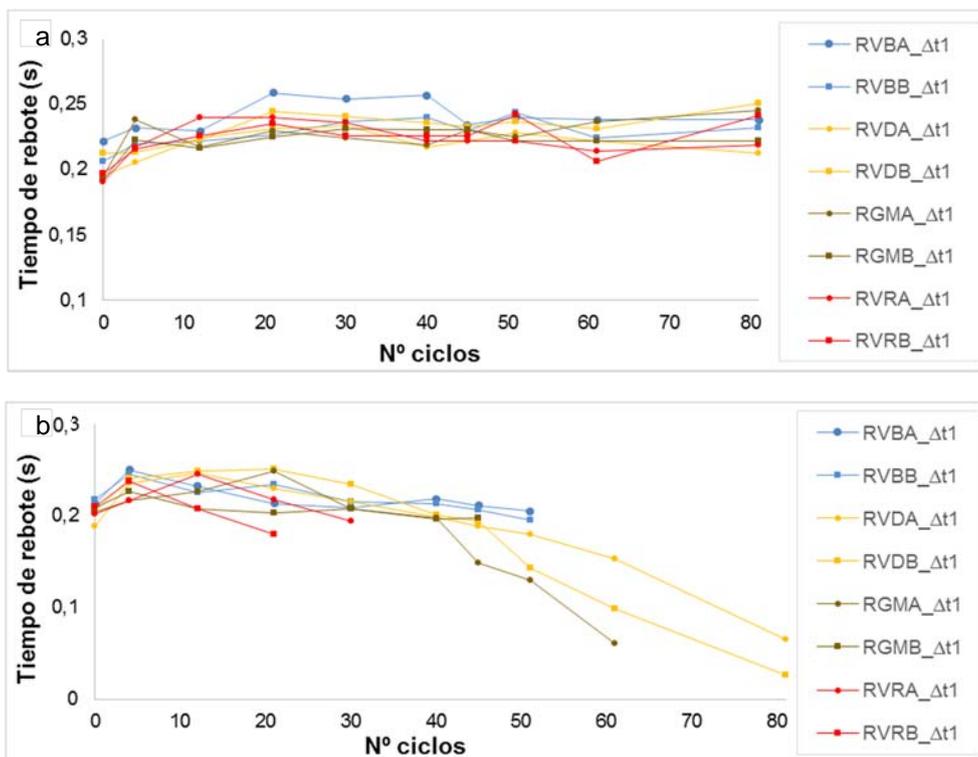


Figura 7.3: Evolución del tiempo entre los rebotes a lo largo de los ciclos de choque térmico (a) y cristalización de sales (b)

En la tabla 7.2 se presentan los resultados medios de todas las probetas en los distintos procesos de degradación. En ella se expone las variaciones de tiempo entre 1er y 2n rebote (Δt_1) y el coeficiente de restitución en su estado inicial (sufijo 0) y al finalizar el estudio (sufijo F). Como se puede observar, de acuerdo con el anterior análisis, en el resto de probetas donde no existió el despegue, el tiempo de rebote incrementa al terminar los ciclos y su coeficiente de restitución final se encuentra siempre por encima de 0,77. Por el contrario, en las probetas sometidas a cristalización de sales, donde hubo despegue de los revestimientos, el coeficiente disminuye hasta valores inferiores a 0,1.

PROBETA	CICLO	Δt_{1_0} (s)	Coef. Rest. ₀	Δt_{1_F} (s)	Coef. Rest. _F
Restauración	Choque Térmico	0,20	0,70	0,22	0,77
	Mojado/Secado	0,18	0,66	0,26	0,91
	Hielo/Deshielo	0,19	0,68	0,26	0,94
	Cristalización Sales	0,20	0,72	0,01	0,03
Obra nueva	Choque Térmico	0,24	0,85	0,25	0,90
	Mojado/Secado	0,24	0,86	0,25	0,89
	Hielo/Deshielo	0,24	0,85	0,25	0,89

Tabla 7.2: Tiempos entre los rebotes de impacto acústico y coeficiente de restitución de las probetas antes (₀) y después (_F) de los ciclos de degradación

Por tanto, el coeficiente de restitución es sensible al despegue de los revestimientos mediante una reducción significativa de su valor. Ahora bien, cuando no existe el despegue pero sí una leve degradación, el incremento que se produce, como por ejemplo en las probetas de restauración sometidas a choque térmico, no permite discriminar el estado de conservación de los materiales. Asimismo, se observa un distinto comportamiento en la variación del coeficiente en los dos tipos de probetas, por lo que los rangos

límite sobre la degradación que se obtuvieran mediante este parámetro no serían extensibles a la evaluación de los estados de conservación.

Asimismo, una vez identificados los picos, se llevó a cabo un análisis frecuencial del sonido mediante la transformada de Fourier (FFT). En la figura 7.4a se muestran las diferentes componentes frecuenciales FFT de los tres primeros rebotes de un punto de lectura de la probeta RVDA, antes del inicio de los ciclos y después de 40 ciclos de envejecimiento por cristalización de sales. Como se puede observar, los tres primeros picos presentan frecuencias FFT muy similares. No obstante, en el primer pico se apreció una mayor energía de la señal y mayores diferencias entre los resultados obtenidos en los diferentes ciclos (ver figura 7.4a). En consecuencia y con el objetivo de simplificar el análisis frecuencial de los rebotes, se optó por estudiar únicamente el primer pico de cada registro.

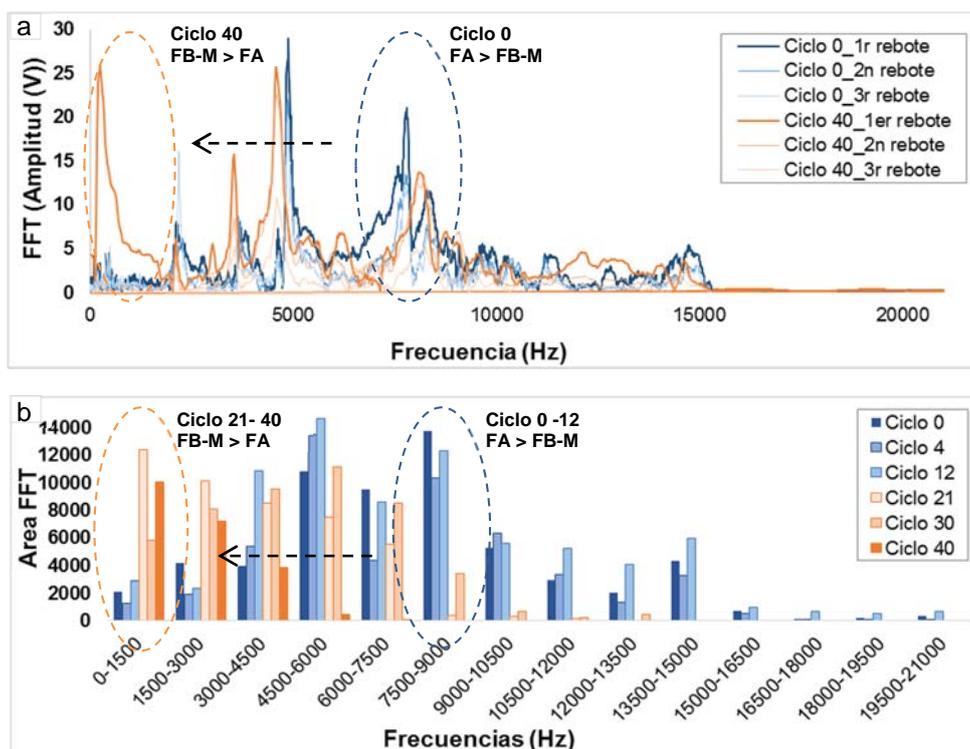


Figura 7.4: FFT de los tres primeros rebotes en probeta RVDA sometida a cristalización de sales (a) y área de las funciones FFT (b)

Para determinar la energía y su variación fruto del proceso de degradación se decidió cuantificar el área de la curva FFT en rangos de frecuencia de 1500 Hz. Las áreas calculadas se presentan en la figura 7.4b. Los resultados indican que a medida que transcurren los ciclos de degradación la energía de las frecuencias bajas-medias correspondientes a un sonido apagado se veían incrementadas (ver figura 7.4b). Al mismo tiempo, la energía de las frecuencias altas relacionadas con un sonido agudo disminuía. Este resultado coincide con la apreciación comúnmente realizada en el método tradicional de inspección por golpeteo, en el que se relaciona un sonido apagado o hueco con un revestimiento mal adherido. Dicho cambio es especialmente notable en las frecuencias bajas-medias (FB-M) entre 0 Hz y 1500 Hz y para las frecuencias altas (FA) entre 7500 Hz y 9000 Hz. Por esta razón, ambos rangos se tomaron como referencia para la evaluación del área FFT en los diferentes análisis realizados.

En la figura 7.5 se presenta la evolución del área FFT correspondiente a las FB-M y FA para las probetas de reparación sometidas a ciclos de choque térmico y cristalización de sales. La media inicial del

área de FB-M se estableció en 6617,8, mientras que la de las FA fue un 36,4 % más elevada, con valor de 9026,8. A partir de los 12 ciclos, tanto en las probetas sometidas a choque térmico como en las de cristalización de sales, se apreció una separación entre las FA y las FB-M¹, tal y como se puede apreciar en las figuras 7.5a y b. Las frecuencias FA, relacionadas con un sonido agudo o sólido, disminuyeron progresivamente durante el transcurso de los ciclos de envejecimiento. Concomitantemente, las FB-M, relacionadas con un sonido apagado o hueco, experimentaron un aumento (ver figura 7.5a y b).

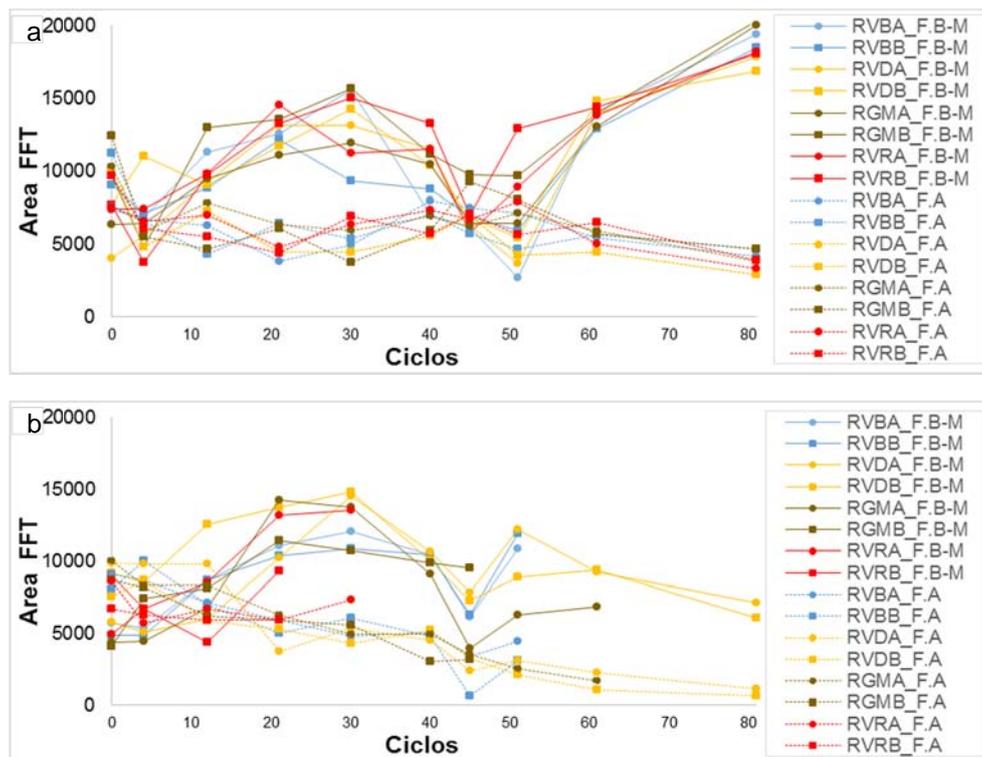


Figura 7.5: Evolución de las áreas de las funciones FFT de las frecuencias bajas-medias (0-1500 Hz) y altas (7500-900 Hz) en función del número de ciclos: a) choque térmico y b) cristalización de sales

El traspaso de la energía (área FFT) de las frecuencias altas (FA) hacia las bajas-medias (FB-M), podría indicar la degradación o pérdida de adherencia de los revestimientos. De este modo, el cambio de tendencia entre frecuencias detectado a los 12 ciclos señalaría el inicio de la degradación tanto frente a choque térmico como frente a ataque por sales. Entre los ciclos 21 y 30 este hecho se ratificó, cuando el valor de las FA pasó a representar aproximadamente el 54% de las FB-M, coincidiendo con la aparición de primeras pequeñas fisuras en el rejuntable de las probetas sometidas a choque térmico y de las fisuras en la base de las probetas sometidas a cristalización por sales. Estas últimas además presentaron las primeras caídas de piezas perimetrales. Ello pone de manifiesto que, si bien el análisis del área FFT indica la existencia de daños, no es capaz de distinguir entre los diferentes tipos apreciados en cada caso.

¹ La mayor variación del área FFT de las FB-M respecto a las FA, observada en los gráficos de las figuras 7.6a y b a lo largo del estudio, se asocia a la propia naturaleza de la onda sonora. La amplitud de la onda, que es el valor que se obtiene del análisis FFT, es inversamente proporcional al de la frecuencia, tal y como señala la ecuación para el cálculo de su energía (E). Por tanto, la mayor frecuencia de las FA implica una menor área FFT respecto a las FB-M y una menor variación.

De los 30 a los 45 ciclos se produjo una reducción de los valores de las FB-M, los cuales se aproximan a los de la FA tanto en el choque térmico como en cristalización de sales. A partir del ciclo 51, las frecuencias FA y FB-M volvieron a distanciarse gradualmente hasta la finalización de los ensayos, reproduciendo el proceso observado al principio del estudio. A los 61 ciclos, en las probetas sometidas a choque térmico, las FA volvieron a ser inferiores respecto las FB-M, coincidiendo con la aparición de nuevas fisuras en el rejuntable y en la base.

La explicación de esta tendencia podría estar relacionada con la zona efectivamente caracterizada por el impacto acústico y por los cambios de rigidez experimentados por las probetas a raíz de los daños. La onda acústica generada por el impacto de la bola de acero depende de la rigidez del elemento en la zona efectivamente inspeccionada. La aparición de fisuras que atraviesan el espesor de la probeta o el despegue de una parte importante del revestimiento podrían modificar considerablemente esta rigidez, afectando así las lecturas obtenidas y propiciando un acercamiento o un alejamiento entre FB-M y FA.

La figura 7.6 muestra un esquema que ilustra dicho fenómeno. En el ciclo 0, la onda acústica alcanza prácticamente toda la extensión de la probeta, reflejando el comportamiento de una zona amplia. Cuando se inicia el proceso de degradación (figura 7.6b), tiene lugar una reducción en la rigidez del sistema que se señala en un aumento de las FB-M respecto las FA. Tras el ciclo 30, la fisuración y el desprendimiento se intensifican, generando sub-sistemas independientes en la misma probeta (figura 7.6c). A partir de este momento, el comportamiento medido no refleja la rigidez de toda la probeta, sino de una zona más reducida de la misma. Como resultado, se reduce la influencia de parte de los daños medidos, por lo que las FB-M podrían acercarse a las FA.

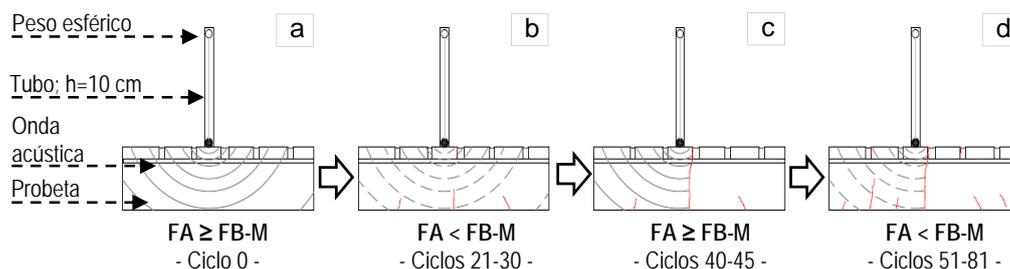


Figura 7.6: Esquema del seguimiento del impacto acústico en las probetas analizadas
a) Estado inicial; b) Ciclos 21-30; c) Ciclos 40-45 y d) Ciclos 51-80

A partir de este momento, los incrementos en los daños en el subsistema caracterizado volverían a producir una reducción de la rigidez, lo que conlleva a un nuevo aumento de las FB-M con respecto a las FA. De alcanzarse un elevado grado de degradación que produjera la formación de nuevos subsistemas, podría darse otra vez más el acercamiento de las FB-M y las FA.

De los parámetros derivados del ensayo de impacto acústico se identificó que el que aporta mayor información al estado de conservación de las probetas es la diferencia de frecuencias entre las FA y las FB-M. Si bien el coeficiente de restitución también permite identificar el indicio de la aparición de los daños, este es menos sensible y requiere un estado de degradación más elevado para que se produzcan variaciones apreciables de este último parámetro. Además, su variación también depende de los distintos sistemas de adherencia de los revestimientos, por lo que los resultados no se pueden aplicar de manera generalizada a todo el estudio. Por estas razones, el análisis de las lecturas obtenidas en el ensayo acústico se centran en el ratio FA/FB-M. Los gráficos correspondientes al coeficiente de restitución se incluyen en el anejo D de este documento.

7.2.3 Imágenes termográficas

A modo de ejemplo en las figura 7.7a y b se presentan las imágenes termográficas de la probeta con un *trencadís* de gres (MB) en las lecturas realizadas a los ciclos 4 y 40 de cristalización de sales, respectivamente. En ambas figuras se observa que la temperatura del *trencadís* difiere de la del rejunto debido a las diferencias en cuanto a las propiedades térmicas del mortero y del gres (ver figura 7.7). Asimismo, se observa un descenso de la temperatura superficial en el transcurso de los ciclos. Aunque esta probeta presentó un desprendimiento del revestimiento a los 46 ciclos, las variaciones apreciadas en las imágenes termográficas están dentro del rango de errores de medición que puede presentar la técnica y el procedimiento de medición adoptado en laboratorio. Esta evaluación sería todavía más difícil si fuera aplicada en obra, lo que dificulta su aplicación a la práctica. Por lo tanto, frente a los mejores resultados en cuanto a sensibilidad observados en las lecturas con ultrasonidos e impacto acústico, en el presente estudio no se ha profundizado en el análisis de la termografía.

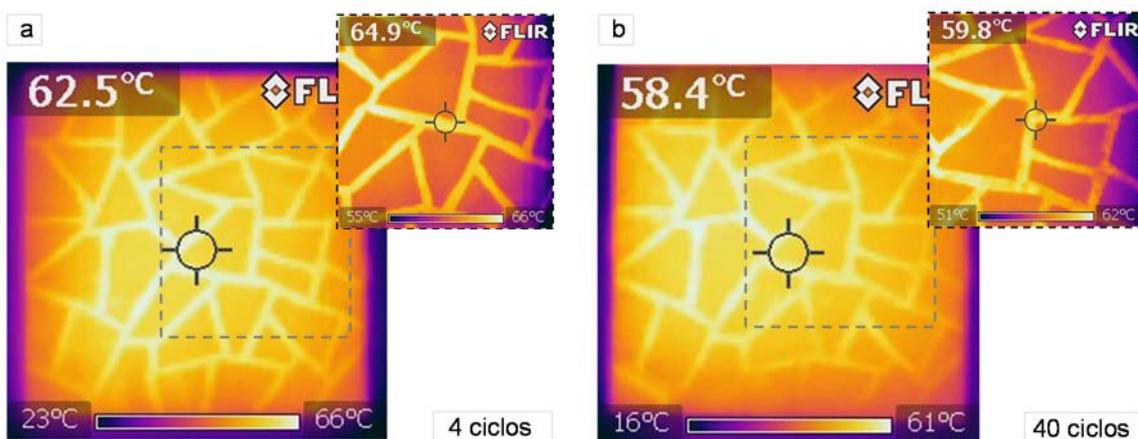


Figura 7.7: Imágenes térmograficas de la probeta MB a) Estado inicial y b) Después de 40 ciclos de degradación a la cristalización de sales

7.2.4 Correlación entre las lecturas de ultrasonidos e impacto acústico con la degradación de las probetas

En la figura 7.8 se presenta un gráfico que correlaciona las lecturas de ultrasonidos e impacto acústico en las probetas de restauración sometidas a choque térmico y cristalización de sales. En el eje x se muestran los resultados de los ultrasonidos, a través del porcentaje de variación de la velocidad ultrasónica respecto a la medida inicial (Δv_{L-0}). Mientras que en el eje y, se representan los resultados de las lecturas de impacto acústico en cuanto al ratio entre FA y FB-M (FA/FB). En este gráfico además, se señalan mediante un círculo las lecturas en las que durante la inspección visual se detectaron desprendimientos o fisuración, bien en el rejunto, bien en la base de las probetas. De esta forma, se pudo correlacionar el daño apreciado con las lecturas obtenidas en los ensayos no destructivos.

Tal y como se puede apreciar, los puntos que marcan la aparición de los daños tienden a concentrarse en la misma zona de los gráficos, presentando valores bajos de Δv_{L-0} y FA/FB. Con el fin de identificar los rangos límites relacionados con la aparición de los daños, se calculó el promedio de estos parámetros cuando se produjo por primera vez algún tipo de daño. En el caso de los ultrasonidos, el límite se determinó cuando la disminución de la velocidad ultrasónica respecto la inicial fuese superior al 35,2% (ver figura 7.8). Por otro lado, en el análisis frecuencial, este límite se estableció cuando las frecuencias FA representaran menos del 50,9% respecto las FB-M (ver figura 7.8).

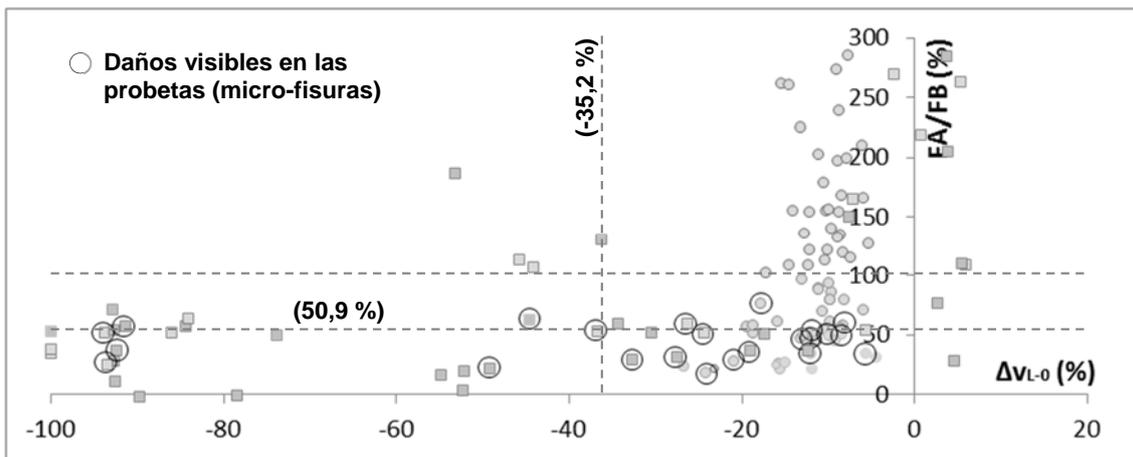


Figura 7.8: Correlación entre las lecturas de ultrasonidos e impacto acústico en las probetas de restauración sometidas a ciclos de choque térmico y cristalización de sales

En la gráfica de la figura 7.9 se marcan dichos rangos y se delimitan los distintos estados de conservación de los materiales en función de las lecturas de ultrasonidos (eje x) e impacto acústico (eje y). Asimismo se definen zonas caracterizadas por un daño intermedio o una ligera degradación. Estas últimas han sido propuestas con base en las apreciaciones de la autora de esta tesis durante la realización de los ensayos y de la inspección visual.

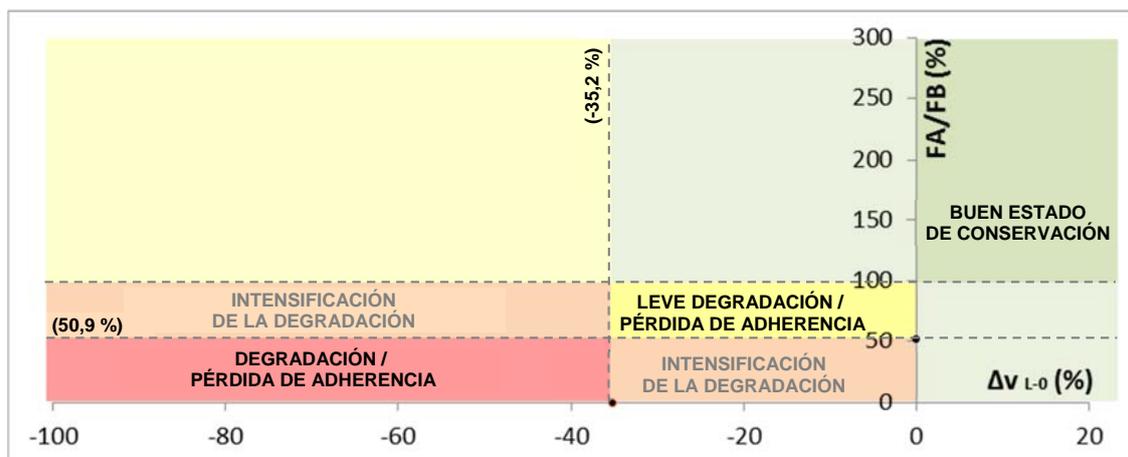


Figura 7.9: Correlación entre las lecturas de ultrasonidos (eje x) e impacto acústico (ejes y) con el estado de conservación de las probetas

En la tabla 7.3 se presentan de forma comparativa los resultados obtenidos mediante ultrasonidos e impacto acústico en todos los casos analizados en el estudio de durabilidad. Con ello se pretende exponer la sensibilidad de cada técnica y de los parámetros de análisis frente a la degradación de las probetas. En la 3ª columna se muestran los gráficos que exponen la evolución de la velocidad ultrasónica en función de los ciclos, mientras que en la 4ª columna, los gráficos muestran la evolución del área FFT de las frecuencias altas (FA) y de las bajas-medias (FB-M). El detalle de todos los resultados expuestos también se encuentran en el anexo D de este documento.

En los gráficos de la tabla 7.3 se marca con un rectángulo los ciclos dónde las probetas obtuvieron un valor medio por debajo del límite de degradación definido en la Figura 7.10. Parece evidente que existe una buena concordancia entre los diferentes ensayos no destructivos para los diferentes procesos de degradación simulados.

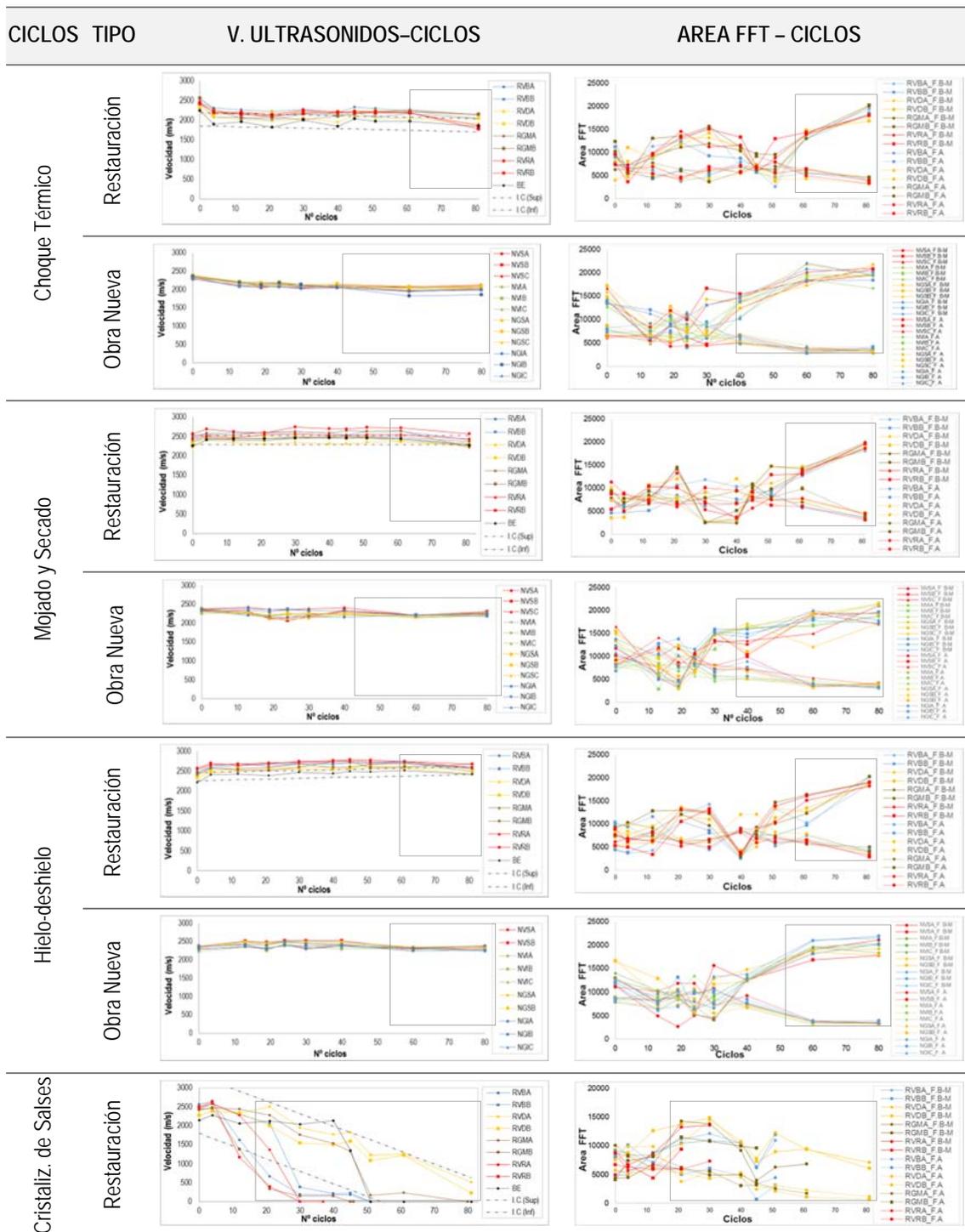


Tabla 7.3: Comparación entre los resultados de las lecturas de ultrasonidos e impacto acústico

Como se puede observar, en todos los casos se evidenció la separación entre frecuencias (FA y FB-M) y, en los últimos ciclos, las FA disminuyeron el límite establecido respecto a las FB-M. Estos resultados coinciden con la degradación superficial observada en las probetas durante los últimos ciclos en el seguimiento visual (ver Capítulo 6).

En los resultados de velocidad ultrasónica, en los mismos ciclos, se apreció una leve disminución en todos los casos, excepto en las probetas de cristalización de sales. En esta última serie de probetas, donde se produjo el despegue de los revestimientos, la separación entre frecuencias (FA y FB-M), coincidió

con una importante reducción de la velocidad ultrasónica que superó ampliamente el límite de pérdida de velocidad establecido como crítico.

Con base en los resultados obtenidos se establece que las dos técnicas de seguimiento (ultrasonidos e impacto acústico) aportan informaciones complementarias sobre el estado de conservación de los materiales. Los ultrasonidos indicaron principalmente la pérdida de adherencia en la interfase con la base de micro-hormigón, mientras que las lecturas de impacto acústico señalan especialmente la degradación superficial de los revestimientos. En ambos casos se constató que los métodos no destructivos son capaces de detectar el proceso de degradación previamente a que se pueda identificar el daño mediante una inspección visual, lo cual supone una aportación en cuanto a la capacidad de prever el daño.

7.3 INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DEL ESTUDIO DE DURABILIDAD

Una vez analizada la sensibilidad y los rangos críticos de los parámetros medidos en los ensayos no destructivos, se lleva a cabo un estudio de la influencia de las principales variables contempladas en el estudio de durabilidad. En este contexto, se evalúa por separado en los siguientes apartados la influencia de cada proceso de degradación, tipo de revestimiento, procedimiento de ejecución de las probetas, posición de las piezas de revestimiento en la probeta y la utilización de una imprimación adicional.

7.3.1 Procesos de degradación

En este apartado se muestra el análisis de la influencia de los distintos procesos de degradación en las probetas ensayadas. El objetivo de este análisis es identificar cuáles de los procesos de degradación tienen un efecto más nocivo en cuanto al comportamiento del *trencadís*. Para ello, se analiza el promedio de todos los parámetros de los ensayos no destructivos para cada proceso de degradación. En ese sentido, se han agrupado los resultados independientemente del tipo de revestimiento, posición de la pieza en la probeta o proceso de ejecución empleado, con lo que se obtiene un promedio general para cada ciclo. Por ejemplo, valor calculado para el ciclo 10* corresponde al promedio global de todas las medidas realizadas en el ciclo 12 en todas las probetas de restauración y en el ciclo 13 en todas las de obra nueva. Lo mismo se aplica de manera análoga para los ciclos 20*, 60* y 80*.

En la figura 7.10 se muestran los valores medios obtenidos para los distintos procesos de degradación en cada ciclo, en función de las lecturas de ultrasonidos (figura 7.10a) e impacto acústico (figura 7.10b). En el caso del porcentaje de variación de la velocidad ultrasónica se muestra también el valor alcanzado en la última lectura a los 80 ciclos. Asimismo se indica a la derecha de cada gráfico y en línea discontinua, los rangos críticos definidos para cada ensayo en el apartado 7.2.4 y que indican buen estado de conservación (B), leve degradación o pérdida de adherencia (L) y degradación notable o pérdida de adherencia (D).

Como se puede observar, en las dos técnicas de lectura se detecta una degradación más intensa y acelerada en las probetas sometidas a ciclos de crystalización de sales. De hecho, a los 20 ciclos aproximadamente todos los parámetros derivados de los ensayos no destructivos ya se encuentran dentro del rango de la zona degradada. Como se puede observar en las figuras 7.10a y b, en los ciclos de choque térmico las probetas mostraron un descenso gradual de la velocidad ultrasónica (ver figura 7.10a) que se encuentra en la zona que marca una leve degradación ya en el ciclo 10. Por otra parte, el porcentaje de las frecuencias FA respecto a las FB-M durante el transcurso del estudio (ver figura 7.10b) indican la presencia de un ligero daño en el ciclo 20 y una degradación elevada en el ciclo 30 en adelante. Por los resultados

obtenidos, parece evidente que el choque térmico ha sido el segundo proceso más nocivo después de la cristalización de sales.

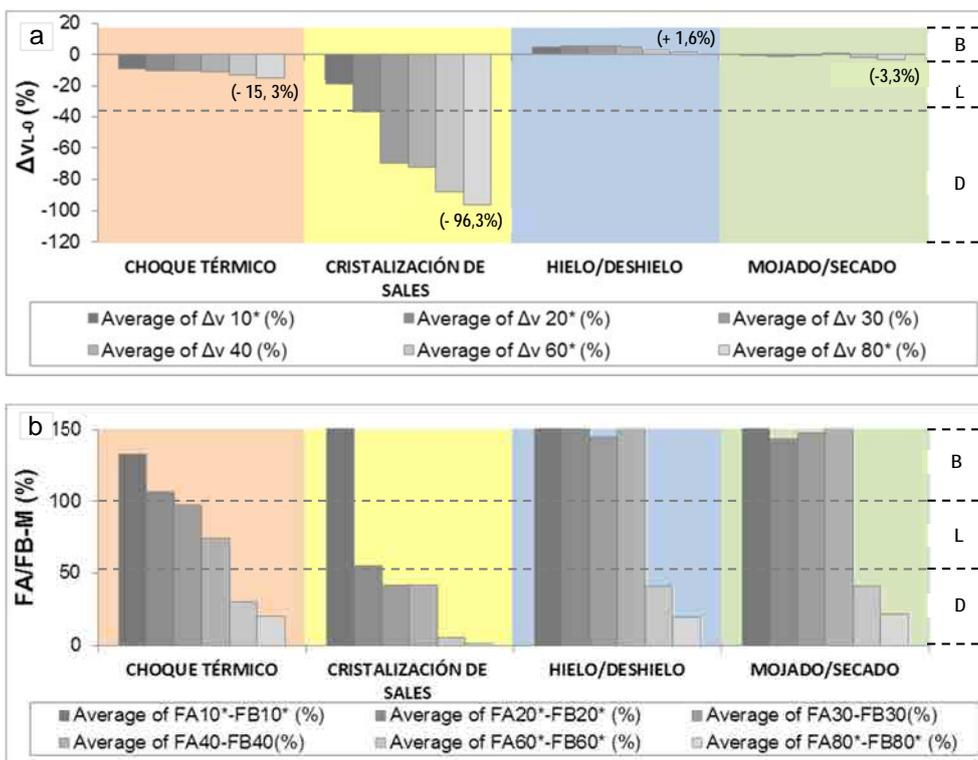


Figura 7.10: Resultados en función del proceso de degradación: variación de la velocidad ultrasónica (a), y del ratio de las áreas FFT (b)

A diferencia de los anteriores, las probetas sometidas a *ciclos de hielo/deshielo* y a *ciclos de mojado/secado* presentan valores de Δv_{L-0} y FA/FB que se mantienen dentro del rango que indica un buen estado de conservación a lo largo de la mayoría de los ciclos. Si bien en los últimos ciclos FA/FB se reducen a valores que indican un proceso de degradación más severo, Δv_{L-0} se mantiene con valores que oscilan entre el buen estado y una ligera degradación.

7.3.2 Técnicas de ejecución

Los dos tipos de probetas empleadas en el estudio de durabilidad (restauración y obra nueva) respondían a los distintos métodos de ejecución del *trencadís* en la obra de la Sagrada Familia. En este apartado se exponen los resultados obtenidos (ver figura 7.11) mediante las lecturas de ultrasonidos e impacto acústico en ambos tipos de probetas frente a los mismos ciclos de degradación (choque térmico; mojado/secado y hielo/deshielo). El análisis se centró exclusivamente en dichas variables y no se consideró los distintos tipos de materiales empleados en el *trencadís* (vidrio o gres), calculándose una vez más un promedio general de todas las mediciones.

Las *probetas de restauración* sometidas a ciclos de *choque térmico* presentaron una leve degradación o pérdida de adherencia de los revestimientos, sin llegar a despegarse, tal y como se ha expuesto en el detalle de las lecturas de ultrasonidos e impacto acústico de los apartados 7.2.2 y 7.2.5, respectivamente. Por el contrario, ante los ciclos de *hielo/deshielo* las probetas se mantuvieron en buen estado de conservación. A los 80 ciclos mostraron un leve descenso de la velocidad ultrasónica, sin alcanzar valores negativos. Este descenso podría indicar el inicio de un proceso de degradación. Un comportamiento similar se apreció en las probetas de restauración sometidas a mojado/secado.

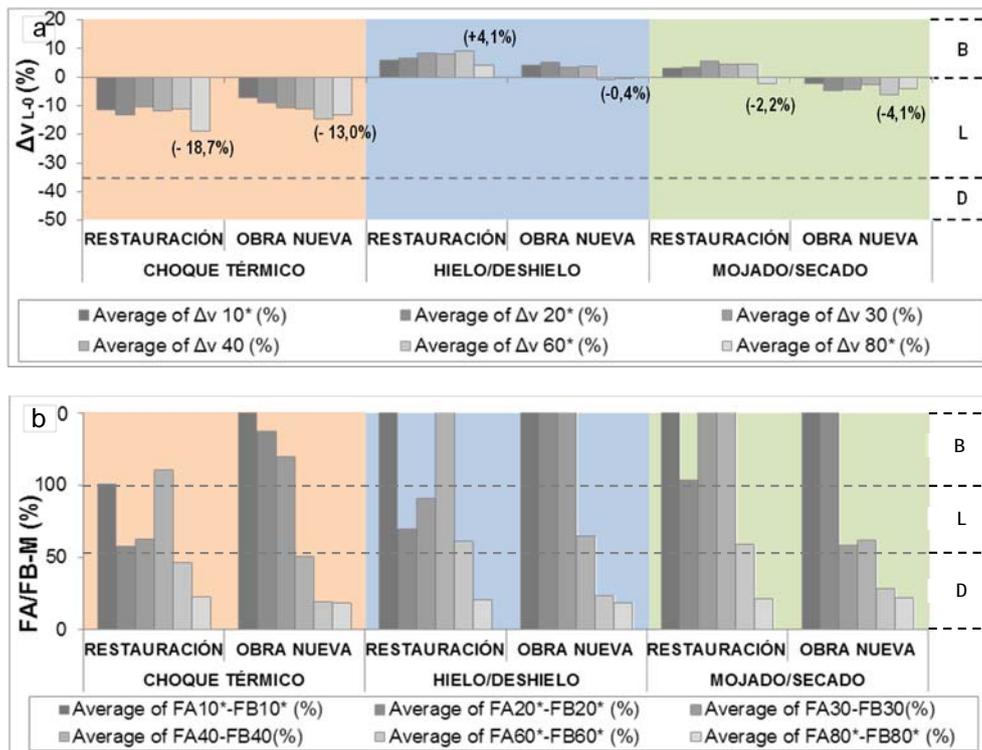


Figura 7.11: Resultados en función del proceso de ejecución: variación de la velocidad ultrasónica (a) y del ratio de las áreas FFT (b)

Del mismo modo, las probetas de restauración sometidas a ciclos de *mojado/secado* mostraron incrementos velocidad, hasta la última lectura que fue negativa pero muy próxima al valor inicial (-2,2%), señalando una leve degradación de los revestimientos (ver figura 7.11a). Igual que en las de hielo/deshielo, a los 60 ciclos, se apreció una reducción del porcentaje de las FA respecto las FB-M (ver figura 7.11b), indicando dicha degradación, que fue principalmente superficial como se constató en la inspección visual.

Las probetas de obra nueva, frente a los ciclos de *choque térmico*, presentaron una reducción de velocidad ultrasónica. Ésta fue algo más pequeña que la de las probetas de restauración (ver figura 7.11a), indicando un mejor estado de conservación. Como se puede apreciar en las figura 7.11b, a los 40 ciclos en las lecturas de impacto acústico se aprecia una reducción significativa del porcentaje de las frecuencias FA respecto a las FB-M evidenciando una posible degradación. La tendencia de los resultados (ultrasonidos e impacto acústico) coincide con las apreciaciones observadas durante el seguimiento visual de estas probetas, donde se detectó un progresivo incremento de las zonas con presencia de burbujas o separaciones de aire en las interfaces (*rejuntado-trencadís*) (ver tabla 6.4).

En las probetas de obra nueva sometidas a ciclos de *hielo/deshielo*, igual que las de restauración, se apreció un incremento de la velocidad ultrasónica en los primeros ciclos (ver figura 7.11a). A partir de los 60 ciclos se alcanzaron valores negativos, pero muy próximos al valor inicial (-0,4%), lo que señaló una leve degradación de los revestimientos. Dicha degradación fue detectada también por las lecturas de impacto acústico incluso antes, por lo que se trataría principalmente de una degradación superficial (ver figura 7.11b), tal y como se apreció en las inspecciones visuales (ver tabla 6.6).

Como se puede observar en la figura 7.11a, las probetas de obra nueva, a diferencia de las de restauración, presentaron un descenso de la velocidad ultrasónica respecto la inicial en todas las lecturas realizadas en los ciclos de *mojado/secado*. En la última lectura dicha pérdida se estableció en un 4,1 %, lo que señaló una leve degradación o pérdida de adherencia de los revestimientos. En los resultados de impacto acústico también se detectó dicha degradación, pero únicamente a partir los 30 ciclos de envejecimiento (ver figura 7.11b).

El hecho de que la degradación fuera detectada antes a través de los ultrasonidos, podría indicar una pérdida de adherencia principalmente en la interfase entre el revestimiento con la base de microhormigón. Además, la progresiva pérdida de velocidad ultrasónica coincidió con el incremento gradual de las separaciones detectadas en las interfaces entre el rejuntado y el *trencadís* durante la inspección visual. Dicha separación probablemente facilitó la entrada de agua en el reverso de las piezas, influyendo así en la leve pérdida de adherencia detectada en estos revestimientos.

De manera general se observa que las probetas de restauración y de obra nueva presenta un comportamiento similar frente a los diferentes ciclos aplicados. Tan solo en el caso de los ciclos de *mojado/secado* se apreció un mejor estado de conservación de las probetas de restauración en comparación con las de obra nueva.

7.3.3 Material del revestimiento del *trencadís*

En las probetas del estudio de durabilidad se analizaron dos tipos de materiales en el *trencadís* (el vidrio de Murano y el gres porcelánico) con el objetivo de comparar su comportamiento frente a las mismas condiciones de ensayo. Hay que recordar que el gres, a diferencia del vidrio de Murano, tiene un coeficiente de dilatación térmica más parecido al mortero (*Marrero et al, 2006*). Como consecuencia se deberían producir menores tensiones tangenciales entre el gres y el mortero fruto de incompatibilidad de deformación térmica.

En este apartado se exponen los resultados obtenidos mediante las lecturas de ultrasonidos e impacto acústico en las probetas con cada uno de en estos dos materiales frente a los mismos ciclos de degradación (choque térmico; mojado/secado y hielo/deshielo). El cálculo del promedio se realiza para todas las probetas con el mismo material y mismo proceso de degradación. Los valores obtenidos se muestran en la figura 7.12.

Cuando expuesto a ciclos de *choque térmico*, el *trencadís de gres* presentó una reducción de velocidad ultrasónica, encontrándose todas las lecturas dentro de la zona de la leve degradación o pérdida de adherencia (ver figura 7.12a). Como se puede observar en la figura 7.12b, esta situación también fue detectada en las lecturas de impacto acústico en el ciclo 30, coincidiendo con una reducción significativa del porcentaje de las frecuencias FA respecto a las FB-M. Las condiciones del ciclo de choque térmico propiciaron a una concentración de tensiones rasantes en la interfaz (*trencadís*-rejuntado), debido a la cíclica variación de dimensión de las piezas. La baja rugosidad superficial de los laterales de las piezas de gres, podría haber influido en esta leve pérdida de adherencia detectada.

Por otro lado, las agresivas condiciones impuestas en el ensayo de *crystalización de sales* comprometió seriamente la adherencia del *trencadís* de gres desde los primeros ciclos. Los dos parámetros derivados de los ensayos no destructivos se encontraron entre los 20-30 ciclos en la zona relacionada con la notable degradación o pérdida de adherencia, anticipándose así al despegue del revestimiento. Por el contrario, en los ciclos de *hielo/deshielo* existió un leve incremento de la velocidad ultrasónica, reflejando

el buen estado de conservación y adherencia. Ahora bien, en las lecturas de impacto acústico se apreció a los 60 ciclos una leve degradación superficial, coincidiendo con los resultados de las inspecciones visuales (ver figura 7.12b).

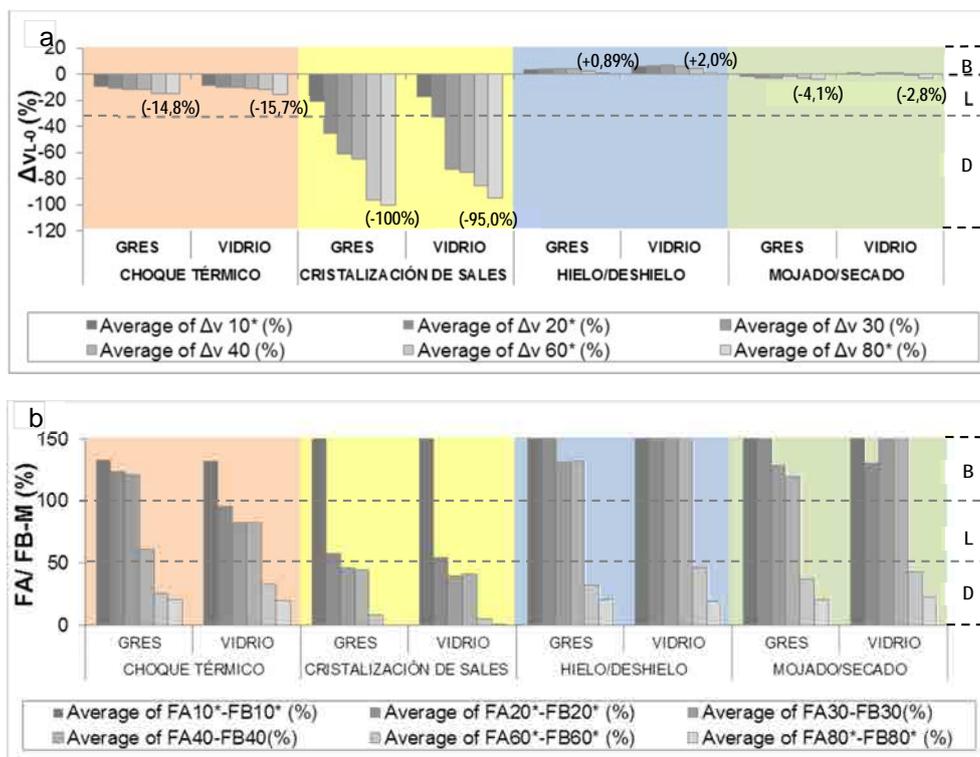


Figura 7.12: Resultados en función del material de las piezas de *trencadís*: variación de la velocidad ultrasónica (a) y del ratio de las áreas FFT (b)

Las probetas de gres sometidas a ciclos de *mojado/secado* experimentaron una leve degradación o pérdida de adherencia, aunque significativamente menor respecto a los ciclos de cristalización de sales y choque térmico. En la última lectura de ultrasonidos se estableció una disminución de la velocidad respecto a la inicial del 4,1% (ver figura 7.12a). Como en el caso de hielo/deshielo, se apreció también una reducción significativa del porcentaje de las FA a partir de los 60 ciclos, que se relacionó con la degradación superficial observada en la inspección visual (ver tabla 6.5).

Las probetas con *trencadís de vidrio* presentaron un comportamiento similar a las de gres en todos los ciclos. En conjunto, se podría establecer que existe un buen estado de conservación de la adherencia entre el *trencadís* de vidrio o de gres en los diferentes ciclos. Ello es fruto de una buena definición de los morteros desarrollados y empleados en cada uno de esos revestimientos.

7.3.4 Posición de las piezas en el *trencadís*

En este apartado se evalúa el estado de conservación en función de la posición de las piezas en el *trencadís*. La figura 7.13a muestran los resultados de las probetas de restauración con un *trencadís* de vidrio de Murano ubicado en la zona central (C) intermedia (I) y perimetral (P) de la probeta. La definición de dichas zonas responde a la establecida en la figura 6.9b.

De manera general, no se identifican diferencias significativas en el estado de conservación en función de la posición en la probeta. La única excepción se aprecia en el caso de los ciclos de cristalización de sales. En estos, tanto los parámetros obtenidos a partir de los resultados de ultrasonidos como de

impacto acústico indican una mayor degradación en los ciclos 60 y 80 para las piezas perimetrales, seguidas de las intermedias y, luego de las centrales.

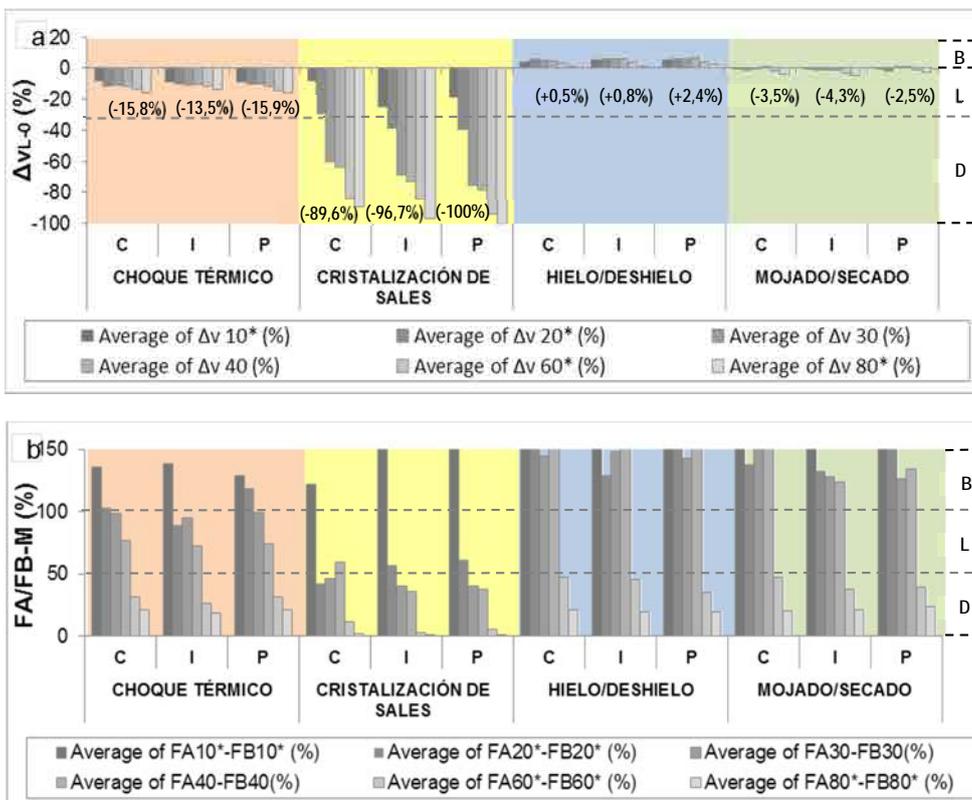


Figura 7.13: Resultados en función de la posición de las piezas en el *trencadís*: variación de la velocidad ultrasónica (a) y del ratio de las áreas FFT (b)

7.3.5 Tamaño y color de las piezas del *trencadís* de vidrio

En este apartado se muestra la influencia del tamaño y del color de las piezas de vidrio de Murano frente a los distintos procesos de degradación. Cabe recordar que cada tonalidad de este material de fabricación artesanal se obtiene mediante la adición de distintos minerales, por lo que ello puede repercutir en su comportamiento. El análisis se realizó en las probetas de restauración que presentaban distintos colores y tamaños de piezas. La evaluación conjunta del color y del tamaño de las piezas es necesaria puesto que ambos parámetros varían de manera simultánea. Por ejemplo, por la manera cómo se rompen los vidrios, las piezas con las menores dimensión (con área de aproximadamente 3 cm²) tienen color dorado, mientras que las mayores tienen color rojo o blanco (con aproximadamente 8 cm² y .9 cm², respectivamente).

En la figura 7.14a se presenta la evolución de la variación de la velocidad ultrasónica de las probetas respecto a la inicial en los distintos procesos de envejecimiento. Asimismo, en la figura 7.14b se presenta la variación del porcentaje de las frecuencias altas (FA) respecto a las bajas-medias (FB-M) de los sonidos de impacto registrados y teniendo en cuenta los mismos aspectos.

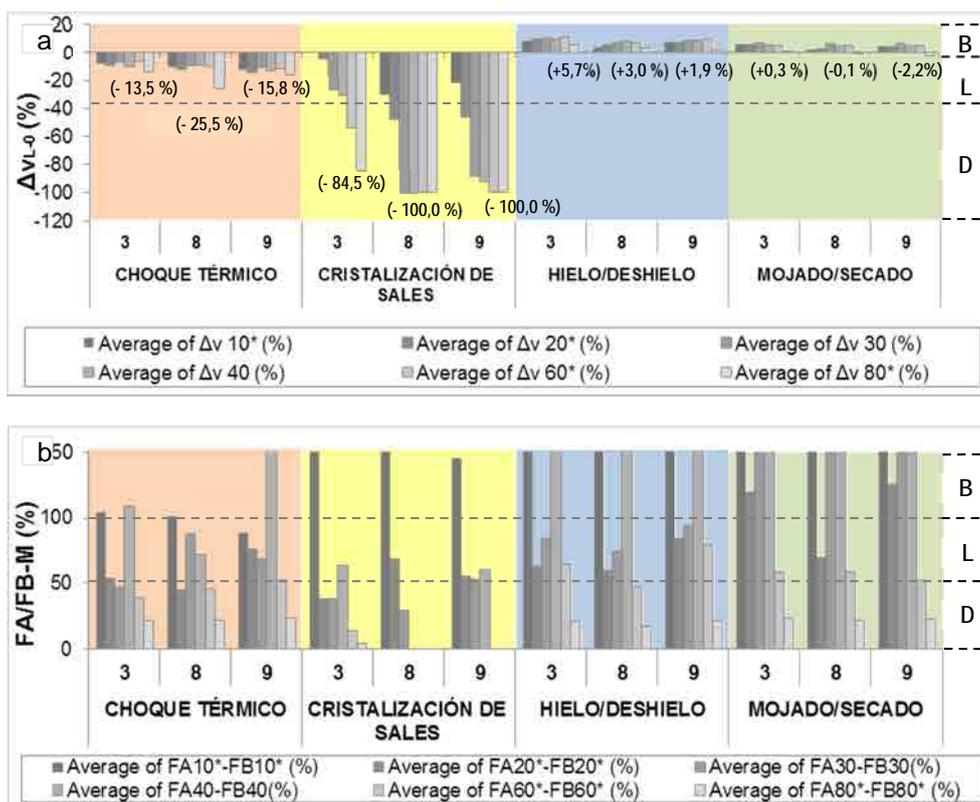


Figura 7.14: Resultados en función del tamaño y del color de las piezas: variación de la velocidad ultrasónica (a) y del ratio de las áreas FFT (b)

En la cristalización de sales se aprecia claramente una degradación más acentuada en las probetas de color rojo con 8 cm² y en las de color blanco con 9 cm². Ambas han presentado valores de Δv_{L_0} y FA/FB que indican un proceso de degradación severo y ya perceptible mediante los ensayos no destructivos a los 30 y 40 ciclos. Si bien la alta degradación a la larga también se produjo en las probetas de color dorado con 3 cm², ésta tardó más en ocurrir. Ello es especialmente evidente en los resultados de variación de velocidad de ultrasonido. Asimismo se observó que las probetas de color rojo presentan una degradación ligeramente más intensa que las de color blanco, a pesar de presentar un tamaño similar.

En los análisis de los resultados de los ciclos de choque térmico, hielo/deshielo y mojado/secado, los resultados son parecidos independientes del color o del tamaño de las piezas. Ello podría deberse al buen estado de conservación presentado por las probetas sometidas a dichos ciclos, las cuales no presentaron daños significativos más allá de la fisuración superficial del vidrio. Por esta razón, posiblemente no ha tenido lugar un daño suficientemente elevado que permitiera diferenciar entre el comportamiento en función del tamaño o del color en estos casos.

7.3.6 Utilización de imprimación

En la figura 7.15a se presenta la variación de la velocidad ultrasónica en las probetas de obra nueva en los distintos ciclos de envejecimiento de gres y de vidrio. La variable principal estudiada es la aplicación o no aplicación de una imprimación en el reverso de las piezas con el fin mejorar el puente de unión entre los revestimientos y las bases. La figura 7.15b presenta la variación del ratio de las áreas FFT para FA y FB-M.

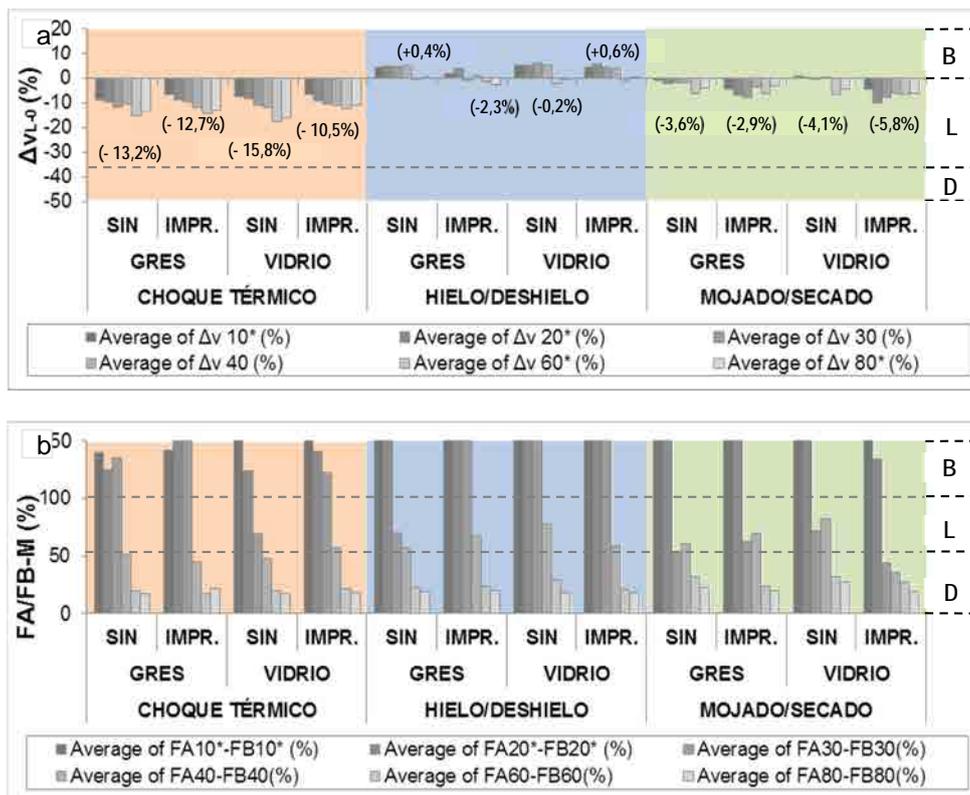


Figura 7.15: Resultados en función de la aplicación o no aplicación de una imprimación: variación de la velocidad ultrasónica (a) y del ratio de las áreas FFT (b)

En general, en lo que se refiere a la contribución de la capa de imprimación adicional, los resultados no mostraron evidencias de que la misma mejorara la adherencia de los revestimientos. Como se puede observar, en las figuras 7.15a y b en los ciclos de *choque térmico* y *hielo/deshielo* los resultados fueron muy parecidos en todos los casos y las diferencias entre las probetas donde se había usado o no la imprimación, no eran suficientemente representativas para confirmar que esta tuviera una contribución positiva en los revestimientos.

En cambio, en los ciclos de *mojado/secado* sí que se detectaron ligeras diferencias que señalaron un mejor desempeño de las probetas sin capa de imprimación. El hecho que se evidenciara únicamente en éste ciclo puede mostrar que el producto aplicado se vio perjudicado por la acción cíclica del agua.

Como se puede observar en la figura 7.15a, las probetas de gres y vidrio con imprimación presentaron una pérdida de velocidad en todas las lecturas, llegando a alcanzar a los 24 ciclos porcentajes del 6,9 y 9,8% respectivamente. Con posterioridad, dichos porcentajes fueron disminuyendo lo que podría indicar una posible pérdida de adherencia en estos revestimientos con imprimación, aunque visualmente no se apreció ningún despegue (ver tabla 6.4). En cambio, en las probetas de gres y vidrio sin imprimación la reducción de la velocidad fue progresiva, alcanzando valores del -5,8 y del -6,4% a los 60 ciclos, respectivamente. En las lecturas de impacto acústico las mayores diferencias se apreciaron en las probetas con un *trencadís* de vidrio. En las que se usó la imprimación los resultados alcanzaron antes la zona que indicaba la degradación o pérdida de adherencia (30 ciclos), respecto a las que no se usó (60 ciclos) (ver figura 7.15b). En las de gres en ambos casos la degradación se evidenció a los 60 ciclos.

7.4 CONCLUSIONES

Las conclusiones derivadas del presente estudio se indican a continuación.

- Los métodos de ensayos no destructivos utilizados en la investigación son sensibles a la degradación o a la pérdida de adherencia de los revestimientos, llegando incluso a indicar el despegue varios ciclos antes de que éste ocurra.
- Los ultrasonidos reflejan, principalmente, la pérdida de adherencia de los revestimientos en la interfaz con la base de micro-hormigón, a través de la reducción de la velocidad respecto a la inicial. Si bien se trata de un sistema de evaluación válido, se considera que su emisión en impulso eco sería más adecuado para su futura aplicación en inspecciones en obra.
- Las lecturas mediante el impacto acústico indican, especialmente, la degradación superficial de los revestimientos o aparición de fisuras, a través del traspaso de energía o área FFT de las frecuencias altas (7500-9000 Hz) a las bajas (0-1500 Hz). Las variaciones entre frecuencia no distinguieron los diferentes grados de adherencia de los revestimientos, sino que refleja el comportamiento global de una zona más amplia de la probeta.
- Fruto del estudio experimental realizado se determinaron los rangos o límites de variación de los parámetros obtenidos a partir de los ensayos no destructivos que indican un posible daño de las probetas. En este sentido, se estableció que podría existir una degradación o pérdida de adherencia en las probetas, cuando la pérdida de la velocidad ultrasónica respecto a la inicial fuera superior al 35,2% y el ratio entre el área FFT de las FA y las FB-M fuera 0,59.
- El sistema de imágenes termográficas y la metodología de medición empleada en el presente estudio no aporta información sobre la degradación o estado de conservación de los revestimientos.
- Los resultados muestran que el ciclo de cristalización de sales es el más agresivo, lo que confirma las apreciaciones fruto de la inspección visual. El de choque térmico fue el que mostró como el segundo más nocivo desde el punto de vista de la conservación de las probetas. Ello confirma que la compatibilidad termo-mecánica de los materiales de la base de micro-hormigón y del revestimiento juega un papel fundamental en la durabilidad del conjunto. En los ciclos de mojado/secado y hielo/deshielo no se han producido variaciones significativas que indicaran una degradación evidente a partir de resultados de los ensayos no destructivos. Por ello, se concluye que en ambos casos las probetas ensayadas se han mantenido en buen estado.
- De manera general se observa que las probetas de restauración y de obra nueva tienen un comportamiento similar frente a los diferentes procesos evaluados. Los ensayos no destructivos indican que tan solo indican un mejor estado de conservación de las probetas de restauración en comparación con las de obra nueva en el caso de los ciclos de mojado/secado.
- Los dos materiales empleados en el *trencadís* de las probetas (vidrio de Murano y gres porcelánico) presentan desempeño muy similares entre sí. Ahora bien, en las inspecciones visuales los dos materiales presentan comportamientos distintos. El vidrio de Murano muestra un incremento del deterioro superficial y una mayor adherencia en la interfase (*trencadís*-rejuntado). Por el contrario el gres, muestra un buen estado de conservación y una mayor adherencia en la

interfase (*trencadís*-base). El hecho de que los métodos no destructivos no indicaran ningún problema evidente en función del material del revestimiento es un indicio de la buena compatibilidad con los nuevos materiales desarrollados y aplicados en las piezas de obra nueva y de restauración.

- Los análisis de piezas de diferente dimensión y color expuestas a cristalización de sales sugieren que el uso de piezas más pequeñas contribuye a ralentizar los desprendimientos. En los ciclos de choque térmico, hielo/deshielo y mojado/secado no se identifican diferencia significativa de los parámetros en función del del color o del tamaño de las piezas. Ello podría deberse al buen estado de conservación presentado por las probetas sometidas a dichos ciclos, las cuales no alcanzaran un estado de degradación elevado que se detectara mediante los métodos no destructivos empleados.
- El empleo de una capa de imprimación adicional en el reverso de las piezas del *trencadís* no ha aportado un mejor comportamiento en cuanto al comportamiento frente a los diversos ciclos si comparado con las probetas sin imprimación.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES FINALES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

8.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se exponen las principales conclusiones que se derivan de los diferentes estudios realizados a lo largo de esta Tesis Doctoral. Estas se presentan divididas en dos apartados titulados conclusiones generales y conclusiones específicas.

Las conclusiones generales responden al cumplimiento de los cuatro objetivos generales, establecidos en el Capítulo 1, relacionados con las cuatro temáticas de investigación propuestas: I) El análisis histórico/constructivo; II) La inspección y diagnóstico de los daños; III) El desarrollo y optimización de los materiales empleados y IV) El envejecimiento del *trencadís* y los sistemas para su evaluación. El planteamiento metodológico seguido, para la resolución de la problemática surgida en los pináculos de la basílica, tiene una visión global (considerando aspectos, históricos, tecnológicos, de compatibilización físico-química de los materiales...) y transversal, integrando distintas disciplinas de análisis y aplicaciones (restauración, obra nueva y futuras inspecciones).

Las conclusiones específicas obedecen a distintos aspectos concretos establecidos en cada una de las cuatro temáticas de investigación y siguen la secuencia lógica de los trabajos realizados. Por último, a manera de perspectivas futuras, se presentan algunas sugerencias para trabajos con los que dar continuidad a las líneas de investigación abiertas en esta Tesis Doctoral.

8.2 CONCLUSIONES GENERALES

En cuanto al primer tema de investigación de análisis histórico/constructivo, se debe destacar, que la presente Tesis Doctoral es un documento recopilatorio con una clara aportación histórico/documental y tecnológica del proyecto. Si bien existen numerosas publicaciones sobre la Sagrada Familia, todavía existen interrogantes en relación con Antoni Gaudí y la construcción de su obra. A partir del estudio realizado, se ha podido conocer los referentes y las razones constructivas que llevaron al arquitecto a concebir la solución constructiva empleada en los pináculos de la basílica. Asimismo, se han determinado los materiales y la evolución del sistema constructivo en la continuación de la obra hasta la actualidad. Cabe señalar, que en el contexto de la investigación se caracterizaron los materiales utilizados en los pináculos de la Fachada de la Pasión de la década de los 70', información hasta el momento desconocida, pero necesaria para su restauración.

En el segundo tema, se inspeccionaron y evaluaron el estado de conservación del *trencadís* de los pináculos de las últimas etapas (Fachada de la Pasión y Sotou), más deteriorados respecto los de la época de Gaudí. Como resultado de la inspección, se determinó que los daños detectados respondían a un mismo patrón de comportamiento en los revestimientos. A partir del análisis químico de diversas muestras, mediante distintas técnicas de ensayo (DRX, ADT, TG, MEB), se concluyó que su acelerada degradación se producía principalmente por mecanismos físico-mecánicos, debido a la incompatibilidad de deformación entre los materiales del revestimiento (vidrio - hormigón). Además, ello se reafirmó con el análisis mediante un modelo numérico simplificado de una pieza de los pináculos, dónde se concluyó que las tensiones normales generadas en la interfaz, entre el *trencadís* y el núcleo de hormigón, podrían ser capaces de inducir el despegue. Ello no descarta la posibilidad de otras causas secundarias, como trazas de reacciones álcali-árido entre el vidrio de Murano y el mortero.

En base a este conocimiento, en el tercer tema, se optimizaron las dosificaciones destinadas a la restauración y construcción de los prefabricados de *trencadís* de los pináculos, para que absorbieran mejor las deformaciones térmicas del revestimiento, mitigando así, posibles problemas de durabilidad. Ello se realizó incidiendo tanto en las propiedades en estado fresco como en endurecido de las dosificaciones. Actuaciones como la redefinición del esqueleto granular de la matriz y la incorporación de elastificantes, permitieron mejorar la trabajabilidad y flexibilidad de estos materiales sin que se vieran perjudicadas, de forma significativa, sus propiedades mecánicas. Asimismo, se buscó que presentaran altas prestaciones frente a ataques químicos o climáticos ya sean de origen internos o externos. En este sentido, los materiales desarrollados fueron evaluados en un estudio de durabilidad más extenso del que establece la normativa y frente a distintos tipos de ciclos de degradación. Por otro lado, los cambios introducidos representaron una mayor racionalización de la ejecución realizada en unas condiciones de espacio muy limitadas.

Además, la incorporación de fibras plásticas en el micro-hormigón para los nuevos prefabricados de los pináculos fue factible, en cuanto a resistencias requeridas, a su fabricación, y permitió sustituir el armado de acero actual, reducir el tiempo de producción y su coste. Ello, también, contribuirá a reducir posibles fisuras y minimizar el riesgo de desprendimientos.

En el cuarto y último tema, el estudio de durabilidad realizado ha permitido evaluar el proceso de degradación y la pérdida de adherencia de los sistemas propuestos frente a distintos ciclos de envejecimiento acelerado (choque térmico; mojado/secado; hielo/deshielo y cristalización de sales). Después de someterlos a 80 ciclos de degradación, se concluye que los materiales propuestos en las dos técnicas de aplicación del *trencadís* (restauración y obra nueva) respondieron satisfactoriamente y tuvieron

un comportamiento diferido global óptimo, considerándolos aptos para su aplicación en la obra. Las lecturas de seguimiento empleadas en la campaña experimental, mediante los ensayos no destructivos de ultrasonidos e impacto acústico, fueron sensibles a la degradación y se anticiparon al despegue, por lo que se concluyó que son técnicas viables para futuras campañas de durabilidad o inspecciones en la obra.

Los avances obtenidos como resultado de la presente Tesis Doctoral, no se han restringido a una contribución teórica en el ámbito académico, sino que se han visto materializados e implementados en la actual restauración y construcción de los pináculos de la Sagrada Familia. Por lo que la implantación de las dosificaciones fue un éxito. El pasado mes de julio de 2014 se finalizó la restauración del primero de los pináculos de la Fachada de la Pasión (Santo Tomás), haciéndose la prensa eco de la noticia (ver figuras 8.1a y b). Ello reflejó el alto valor arquitectónico de estas estructuras decorativas, por lo que la presente investigación tiene una clara aportación en la futura rehabilitación y conservación de la obra.



Figura 8.1: a) Artículo publicado en el Periódico el 10 de junio de 2014 y b) Detalle del pináculo de Santo Tomás rehabilitado

8.3 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

Análisis histórico / constructivo

- El sistema constructivo de los pináculos mediante prefabricados de hormigón revestidos con *trencadís* de vidrio de Murano fue una solución fruto de la experimentación y del conocimiento constructivo adquirido por el Gaudí en el transcurso de su obra. Este responde a una filosofía de diseño integral, donde se tuvo en cuenta las especiales condiciones de contorno y puesta en obra de construcción en altura, además de tener presentes aspectos estéticos y de durabilidad.
- El precedente directo del sistema constructivo de los pináculos se establece en la obra del Parque Güell, durante la construcción del forjado de la sala hipóstila entre 1907 y 1909. En esta parte del proyecto, el arquitecto experimentó con piezas prefabricadas de cerámica armada y revestidas, en su conformación, con un *trencadís* de cerámica esmaltada. A diferencia de otros prefabricados empleados con anterioridad, estos tomaron una función estructural.

- Gaudí seleccionó el vidrio de Murano como material de revestimiento para los pináculos del templo fruto del análisis de obras históricas de mosaico bizantino / veneciano del siglo XII. Aunque el arquitecto experimentó con gran variedad de materiales en la aplicación del *trencadís* al exterior, vio en este material la brillantez deseada y suficientemente durable, para una aplicación en altura. Dentro del marco de la tesis se han localizado la procedencia de algunas imágenes de mosaico que Gaudí tenía colgadas en una pared de su estudio y que probablemente determinaron la elección de este material. En concreto, las obras localizadas son: el mosaico de la cúpula y de la pared frontal del ábside de la Capilla Palatina del palacio real de Palermo y los mosaicos absidiales del Duomo de Monreale y del Domo de Cefalú;
- La evolución del sistema de fabricación y puesta en obra de las piezas prefabricadas de los pináculos no ha variado significativamente desde la época de Gaudí hasta la actualidad. Incluso, a día de hoy, se siguen empleando los vidrios de Murano importados de la misma fábrica veneciana. No obstante, en la continuación del sistema, la evolución de la calidad del cemento repercutió en una mayor rigidez y resistencia del hormigón y en consecuencia, aumentó la incompatibilidad de deformación entre los materiales del revestimiento.
- De los pináculos de la Pasión de la Fachada de la Pasión de la década de los 70', a diferencia del resto, se desconocía el tipo de árido y conglomerante utilizado. A partir de la caracterización de diversas muestras de uno de los pináculos (Sto. Tomas), se concluyó que el árido era de naturaleza silícea y el conglomerante de cemento portland. En el caso del mortero empleado en las juntas constructivas del pináculo, donde se ubican las piedras de basalto negro en voladizo, el conglomerante fue mixto, formado por una parte de cal y cemento. Esta última dosificación se habría empleado para dar mayor flexibilidad y capacidad para absorber las deformaciones de la estructura. Cabe destacar que dicha dosificación también fue identificada en el primer pináculo construido por Gaudí y es razonable pensar que la emplearan también en este caso.

Inspección y diagnóstico

- De la observación del estado de conservación de los pináculos de la obra se concluye que existe una degradación evidente del revestimiento de *trencadís* de estas estructuras y que ésta es más acusada en los construidos más recientemente (Fachada de la Pasión y Sotoo). En el *trencadís* de estos pináculos se detectaron: desprendimientos, fisuras, exfoliaciones de las piezas de vidrio metalizado y algunos fallos de ejecución.
- En base al análisis comparativo de los daños detectados en el *trencadís* de los pináculos de la 2ª y 3ª etapa (Fachada de la Pasión y Sotoo) se concluye que existen daños muy parecidos que responden a un similar patrón de comportamiento y/o fruto de unos mismos procesos de degradación. Estos principalmente tienen su origen en mecanismos de degradación físico-mecánicos por la incompatibilidad de deformación entre los materiales (vidrio-micro-hormigón).
- En evaluación de los daños detectados se establecieron otras 4 causas, no excluyentes, sobre el origen o causas de su aparición. La 1ª de ellas sería por defectos de fabricación, por el uso de un hormigón de consistencia seca en algunas de las piezas, que ocasionó la presencia de aire ocluido y la falta de material en el rejuntado del *trencadís*.

La 2ª de las causas se atribuiría a las deformaciones diferenciales entre revestimientos y/o entre las distintas piezas que conforman los pináculos. Estas habrían provocado, principalmente, la

aparición de fisuras en las juntas constructivas de estas estructuras. La 3ª causa se asignaría a la baja cuantía de armado de algunos volúmenes de los pináculos debido a su geometría particularmente estrecha y de pequeña dimensión. Cualquier sollicitación habría debilitado su sección resistente y, en consecuencia, provocando fisuras capaces de inducir un desprendimiento.

Por último la 4ª causa, sería por la presencia continuada de agua y/o humedad en el interior del revestimiento y de la estructura. Ello provocó la aparición de manchas y presencia de agentes biológicos en las superficies asimismo, la oxidación de la armadura interna, en el caso del pináculo de Santo Tomás (Fachada de la Pasión) y la consecuente fisuración y desprendimiento de algunas partes de su revestimiento. Por otro lado, el agua habría desencadenado de forma puntual la aparición de una reacción álcali-sílice entre las láminas de algunas piezas vidrio, lo que habría ocasionado algunas de las fisuras detectadas o incluso el despegue puntual de alguna pieza. Asimismo, ello habría generado la disolución de los compuestos en el interior de estos pináculos debilitando partes de la estructura. Además de la exfoliación generalizada del vidrio metalizado en los pináculos de las distintas etapas podría responder a un proceso de alteración por acción del agua.

- Las diversas muestras extraídas de pináculo de Santo Tomas (Fachada de la Pasión) y analizadas por DRX y ADT-TG se encontraron en buen estado de conservación y en ellas, no se detectó ningún elemento anómalo o proceso de alteración de origen químico.
- Del estudio del estribo del mismo pináculo (Santo Tomas) se concluye que existe un proceso de oxidación y que se trata de un acero con un contenido de carbono del 0,35 % y, por lo tanto, no es apto para soldaduras con responsabilidad estructural.
- Los resultados de los ensayos de DRX y MEB correspondientes a las muestras procedentes de los pináculos Sotoo son satisfactorios, encontrándose en buen estado de conservación, excepto una pequeña parte de una de ellas, dónde se localizó ocasionalmente el gel resultante de una reacción álcali-sílice. La misma se ubica de manera puntual entre las láminas de la estructura de las piezas de vidrio, puesto que se dio simultáneamente una alta concentración de sílice reactiva (vidrio de Murano) y la presencia de álcalis de sodio y potasio, procedentes del micro-hormigón del pináculo.

El gel detectado podría haber ocasionado algunas de las fisuras localizadas en el *trencadís* de estos pináculos e incluso algún despegue puntual de alguna pieza. Sin embargo, la poca cantidad detectada y la inexistencia de esta sustancia en el interior del micro-hormigón apuntan que ello no fue la causa de los desprendimientos de pequeñas partes de micro-hormigón de estos pináculos. Por tanto, el material de color blanco detectado en el interior del micro-hormigón y en la interfaz, entre éste y las piezas de vidrio de ambas muestras, señalarían algún compuesto presente en el material y disuelto debido a la entrada del agua en el interior del pináculo.

- En base el análisis tensional realizado mediante una simulación numérica de una pieza del pináculo se establece que las diferencias de deformación térmica entre el *trencadís* de vidrio y el núcleo de micro-hormigón puede ser una de las causas de los despegues de piezas y/o partes del revestimiento. Además, las tensiones normales generadas en la interfaz entre ambas capas, fruto de dicha incompatibilidad y capaces de inducir el despegue, pueden verse incrementadas por la mayor geometría esférica de las superficies del revestimiento.

También se concluyó que la época del año cuando se fabrican estas piezas puede repercutir en el estado tensional de las mismas durante la fase en servicio. Siendo en invierno el escenario más crítico de producción debido a las mayores diferencias entre la temperatura ambiente y el fraguado del micro-hormigón de la pieza.

Desarrollo de materiales

- Las dosificaciones de mortero y micro-hormigón empleadas hasta el momento en la restauración y construcción de los pináculos fueron definidas para evitar cualquier tipo de daño de origen químico. A partir de su evaluación, mediante ensayos en estado fresco y endurecido, se concluyó que ambas dosificaciones requerían una mayor trabajabilidad para la aplicación. Asimismo, se determinó que se trataban de materiales de alta resistencia y rigidez, lo que podría repercutir en una mayor incompatibilidad termo-mecánica con el *trencadís*.
- La dosificación propuesta para el mortero de reparación de los pináculos consiguió aumentar su trabajabilidad en fresco (en un 31,2 %), altas capacidades mecánicas y mejorar su flexibilidad, respecto a la dosificación Patrón de referencia. Se mantuvo la resistencia a compresión (14,5 MPa) y aumentó la resistencia a flexión (en un 10,6 %), a la vez que se redujo tanto el módulo de elasticidad dinámico (en un 17,5%) como el estático (en un 6,12%). Asimismo se verificó un incremento de la adherencia (en un 30,7 %) con las piezas de vidrio de Murano respecto a la Patrón. Además, se simplificó el proceso de producción, mediante la reducción del número de materiales, y se redujo su coste, dado que disminuyó un 21,0 % del contenido de cemento respecto a la dosificación Patrón.
- La dosificación propuesta de micro-hormigón destinada a los nuevos pináculos consiguió un aumento significativo de la trabajabilidad en fresco (en un 24,3 %), respecto la empleada hasta el momento en la obra, lo que facilitaría el proceso de producción y mejora en el acabado de las piezas. Asimismo, se redujo los altos valores de resistencia mecánica de dicha dosificación Patrón de referencia (en un 10,7 %), hasta valores adecuados para la aplicación de estudio. Al mismo tiempo, se mejoró su deformabilidad mediante una reducción de su módulo de elasticidad estático (en un 6,3 %), permitiendo disminuir las tensiones por incompatibilidad termo-mecánica con el revestimiento de *trencadís*.

Por otro lado, la incorporación de las fibras plásticas estructurales (12,0 kg/m³) permitió alcanzar en el ensayo a flexotracción (UNE EN 14651) un valor del límite de proporcionalidad (f_L), relacionado con la 1ª fisura, de 3,4 MPa, superaron el valor establecido al inicio del estudio (2 MPa). También, obtener una resistencia residual (f_{R4}) (post-fisuración) de 3,0 MPa cuando el ancho de la fisura (w) fue de 3,4 mm. Ello permitiría substituir el armado de acero actual y evitar cualquier desprendimiento, dado que ante el incidente que fuera, el micro-hormigón quedaría atado por las fibras al resto de la estructura.

- La implantación de las dosificaciones propuestas en la obra de la Sagrada Familia ha sido un éxito. Un claro ejemplo de ello, es que en la actualidad se han empleado los materiales propuestos en la restauración y la nueva construcción de los pináculos de la obra.
- En las campañas experimentales realizadas, de durabilidad y de adherencia in situ, se determinó que los morteros pre-dosificados empleados para la restauración del *trencadís* de los pináculos eran de alta calidad y aptos para la aplicación. A partir de los resultados de adherencia obtenidos in situ

se concluyó que estos morteros atendían con holgura a los requerimientos impuestos por la normativa vigente (1 MPa) como también, los garantizados por el fabricante.

Envejecimiento y sistema de evaluación

- Los ensayos no destructivos (ultrasonidos e impacto acústico) empleados en el estudio de durabilidad, permitieron evaluar los procesos de degradación y/o la pérdida de adherencia de los revestimientos de *trencadís* sometidos a diferentes condiciones de envejecimiento acelerado. Por el contrario, el sistema de evaluación mediante termografías no aportó información sobre el estado de conservación de los revestimientos analizados.
- Los ultrasonidos por transmisión reflejaron, principalmente, la pérdida de adherencia de los revestimientos en la interfaz con la base de micro-hormigón, a través de la pérdida de la velocidad respecto a la inicial.
- Las lecturas mediante el impacto acústico señalaron especialmente la degradación superficial de los revestimientos, a través del traspaso de energía o área FFT de las frecuencias altas (7500-9000 Hz) a las bajas (0-1500 Hz). Esta técnica de evaluación fue más sensible respecto a los ultrasonidos, sin embargo las variaciones entre frecuencia no distinguieron los diferentes grados de adherencia de los revestimientos. Asimismo, las variaciones de tiempo entre los diferentes rebotes del impacto y consecuentemente, los coeficientes de restitución, también señalaron la pérdida de adherencia de los revestimientos, pero también con menos precisión respecto a los ultrasonidos y las variaciones de frecuencia.
- Las dos técnicas de aplicación del *trencadís*, en las probetas de reparación y las de obra nueva, tuvieron un comportamiento diferido desde el punto de vista global bueno, después de someterlas a 80 ciclos de envejecimiento acelerado, por lo que se consideran aptos para su empleo en la obra. Dejando de lado el ciclo de cristalización de sales, muy extremo y no representativo de las condiciones ambientales de Barcelona, el resto de ciclos de degradación (choque térmico, mojado/secado y hielo/deshielo) produjeron desperfectos que afectaron sobre todo al aspecto visual de las probetas.

Entre estos, los 80 ciclos de choque térmico, fue el proceso que más influyó en la degradación y/o la pérdida de adherencia de las probetas. Seguido a este, los ciclos de mojado/secado provocaron también una pérdida de la adherencia de los revestimientos, pero la degradación fue principalmente superficial. Por último, las probetas sometidas a ciclos de hielo/deshielo fueron las que presentaron el mejor estado de conservación, aunque también mostraron una leve degradación superficial parecida a las de mojado/secado.

- El ciclo de degradación por cristalización de sales se configuró a partir de la normativa de piedra natural (*UNE-EN 12370:1999*), lejana a la realidad atmosférica de la ciudad de Barcelona. Las probetas sometidas a este ciclo, debido a la alta concentración de sal, resultaron altamente degradadas, produciéndose el despegue de piezas y en todas, excepto las de *trencadís* dorado, la total separación del revestimiento de la base de micro-hormigón. Si bien la degradación producida no simulaba las condiciones ambientales de la obra, el peor estado de conservación de estas probetas y el despegue del *trencadís*, sirvió como referencia para la evaluación del resto. Por lo que ello, se debe tener en cuenta en futuros estudios de durabilidad.

- Los ensayos no destructivos de ultrasonidos e impacto acústico empleados en el estudio de durabilidad se consideran técnicas de inspección viables para las futuras inspecciones en obra. En el caso de los ultrasonidos, se considera que la emisión en impulso eco será más adecuado para esta futura aplicación, y en transmisión, para campañas experimentales de durabilidad en el laboratorio.
- Fruto del estudio experimental realizado se determinaron los rangos o límites del estado de conservación de los materiales en función de las lecturas de ultrasonidos e impacto acústico. En este sentido, se concluyó que podría existir una degradación y/o pérdida de adherencia en las probetas, cuando la pérdida de la velocidad ultrasónica respecto la inicial fuera superior al 35,2 % y las frecuencias FA, pasaran a representaban menos o igual del 51,5 % respecto las FB-M.

8.4 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Los estudios realizados y los resultados obtenidos en la presente Tesis Doctoral abren caminos a futuras investigaciones centradas en la obra de la Sagrada Familia, tanto en su construcción como en la restauración de la obra existente. No obstante, su aplicación no sólo se limita a ésta obra, o al *trencadís*, sino que también tiene su utilidad en futuros estudios en otras edificaciones con este u otro tipo de revestimiento. A continuación se presentan las posibles líneas de investigación con las que dar continuidad al trabajo realizado en esta Tesis Doctoral.

La finalización de la Sagrada Familia se prevé en el 2026. Para alcanzar esa meta todavía resta por construir gran parte de la obra, de las 18 torres que Gaudí proyectó sólo 8 de ellas están edificadas. La apuesta del arquitecto por la construcción en altura mediante prefabricados de hormigón en los pináculos, dio pie al material y sistema que en la actualidad hace posible la terminación de su obra.

El micro-hormigón reforzado con fibras propuesto, fruto de la presente investigación, es un claro avance esa dirección, puesto que permite reducir los tiempos de construcción y el coste de las piezas. La incorporación de las fibras en el hormigón supone la sustitución parcial o total del armado empleado hasta el momento, además de contribuir en una mejora en el comportamiento del material. Por consiguiente, la aplicación de prefabricados de Hormigón Reforzados con Fibras (HRF) para la construcción de las futuras torres de la basílica es viable y abre una vía de investigación en esa dirección.

Por otro lado, la Sagrada Familia tiene en la actualidad más de 133 años. Los trabajos que se realizaran en un futuro irán, cada vez más, dirigidos hacia la inspección, mantenimiento y rehabilitación de la obra existente. Ello especialmente en las partes exteriores y expuestas a los efectos climatológicos. El inicio de los trabajos de la rehabilitación de los pináculos, que ha originado esta investigación, es un buen ejemplo de este proceso de cambio.

En consecuencia, se inicia, también, un camino hacia futuros estudios más amplios para caracterizar y analizar los materiales existentes en la obra. El más inmediato se presenta en el resto de pináculos de la basílica que todavía quedan por rehabilitar, especialmente en los de la Fachada del Nacimiento declarados Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO. Estos futuros estudios permitirían conocer en profundidad todos los pináculos de la basílica y saber si existe algún otro proceso de alteración en el *trencadís* no contemplado en la Tesis. Asimismo, las investigaciones en este aspecto deben seguir avanzando hacia el desarrollo de sistemas de inspección in situ de estos revestimientos a gran altura. En el estudio de durabilidad realizado se concluyó que los sistemas no destructivos mediante ultrasonidos e

impacto acústico eran viables para esta aplicación. En consecuencia, se debería realizar una campaña experimental más amplia para validar el sistema en obra y mediante dispositivos móviles.

Por último, es importante recalcar, que la configuración experimental definida en el estudio de durabilidad, como los sistemas de evaluación propuestos mediante ensayos no destructivos, posibilitarían su aplicación en la investigación de otro tipo de revestimientos adheridos con mortero o en elementos prefabricados; siendo los resultados obtenidos en la Tesis Doctoral una base de datos de referencia para ello. En las obras en las que emplea un sistema revestimiento adherido (*trencadis*, mosaico, aplacado, etc...) siempre existe un posible riesgo de desprendimiento de las piezas, por lo que en este sentido, todavía existe un largo camino a investigar.

BIBLIOGRAFIA

AGUADO M.L.; RIBAS, A; HOSTA, C;

La restauración de los pabellones de entrada del Park Güell. Informes de la construcción. Diciembre de 2002. Vol. 54, núm. 481-482, p.19-28. ISSN 0020-0883. (2002).

ALEJANDRE, F.J;

Historia, Caracterización y Restauración De Morteros. Textos de Doctorado. Universidad de Sevilla. Secretariado de Publicaciones. Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción. Sevilla, 2002. ISBN 84-472-0773-0. (2002).

ARTIGAS, S;

Pliogo de condiciones de construcción de la columna del Obispado de Barcelona de la Sagrada Familia. Barcelona, 1955. Arxiu Temple Expiatori de la Sagrada Familia (ATESF). (1955).

ATESF. Arxiu del Temple Expiatori de la Sagrada Familia.

AVDELIVIS, N.P; MOROPOULOU, A;

Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures. Journal of Cultural Heritage, 2004. Vol. 5, núm. 1. p.119-197. (2004).

BAKOLASA, A; BISCONTINA, G; MOROPOULOU, A; ZENDRIA, E;

Characterization of Structural Byzantine Mortars by Thermogravimetric Analysis. Thermochemica Acta. Noviembre de 1998. Vol. 321, núm. 1-2. pp. 151-160. ISSN 000-6031. (1998).

BASF. CHEMICAL COMPANY;

Obras. Ciudad de las artes y las ciencias de valencia. Documento Técnico. Productos empleados: PCI.IMPERBETT; PCI.EMULSIÓN; FLEXMORTEL. Mayo, 2000. (2000).

BASSEGODA, J;

Antoni Gaudí, 1852-1926. Centre Cultural de la Caixa de Pensions. Barcelona, 1984. Depósito Legal ISBN 8450506832. (1984).

El Gran Gaudí. Editorial AUSA. Barcelona, 1989. Depósito Legal B-36.309-89. ISBN 84-86329-44-2. (1989).

L'Estudi de Gaudí: Selecció d'articles publicats a la revista Temple entre 1971 i 1994. Junta Constructora del Temple Expiatori de la Sagrada Família. Barcelona 1996. Depósito Legal 16057-1996. (1996).

BASSEGODA, J; GUEILBURT, L; CASANOVAS, M.A;

La Ceràmica en l'obra de Gaudí. Col·legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona. Barcelona, 2002. ISBN 8487104495. (2002)

BELMONTE, C; SALERNO, C.S;

Mosaic glass made in Rome between the sixteenth and seventeenth centuries: Rome glassmakers for the Fabrica di San Pietro. Journal of Cultural Heritage. Diciembre de 2008. Vol. 9. p. 93-96. (2008).

BENTZ, D; HAECKER, C-J; PELTZ, M; SNYDER, K;

X-ray absorption studies of drying of cementitious tile adhesive mortars. Cement and concrete composites. Mayo de 2008. Vol. 30, núm, 5. p. 361-373. (2008).

BERGÓS, J;

Gaudí: El Hombre y la obra. Editorial Lunweg. Barcelona, 1999. ISBN 84-7782-596-3. (1999).

BONET, J; GIRALT- MIRACLE, D; FAULÍ, J;

La Sagrada Família de Gaudí. El Temple Expiatori des dels seus orígens fins avui. Editorial Lunweg. Barcelona, 2010. Dep. Legal B-40.924-2010. ISBN 978-84-9785-685-0. (2010).

BÜHLER, T; ZURBRIGGEN, R; PIELES, R; HUWILER, L; RASO, R.A;

Dynamics of early skin formation of tiling mortars investigated by microscopy and diffuse reflectance infrared Fourier transformed spectroscopy. Cement and Concrete Composites. Mayo de 2013. Vol. 37, núm. 5. p. 161-170. (2013).

CABRERA, F;

Caracterización de las materias primas utilizadas en la fabricación de los vidrios. Técnica industrial. Marzo de 2004. Vol. 252. p. 40-45. (2004).

CARBONELL, M; VENDRELL, M;

Informe sobre los ensayos realizados en unas muestras de mortero de la fachada del nacimiento de la Sagrada Família. Laboratorio Lend Consulting. Barcelona, 1997. Arxiu Temple Expiatori de la Sagrada Família (ATESF). (1997).

CARRASCOSA MOLINER, B; PAÍSES OVIEDO, T;

La conservación y restauración del mosaico. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, 2004. Depósito. Legal V-4955-2004. ISBN 84-9705-673-6. (2004).

- CHAVARRIA, J;
El Mosaico. Editorial Parramón. Barcelona, 2006. ISBN 8434221322. (2006).
- CHEW, M. Y. L;
Factors affecting ceramic tile adhesion for external cladding. Construction and Building Materials. Julio de 1999. Vol. 13, núm. 5. p. 293-296. (1999)
- COMORERA, R;
Trencadís amb mal d'altura. El Periodico, 10 de juny de 2014; pp. 36-37. (2014).
- DAL BIANCO, B; RUSSO, U;
Basilica of San Marco (Venice, Italy/Byzantine Period): Nondestructive investigation on the glass mosaic tesserae. Journal of Non-Crystalline Solids. Enero de 2012. Vol.358, núm. 2. p. 368-378. ISSN 0022-3093. (2012).
- DE RIQUER, B; LLIMARGAS, M;
Modernisme i modernistes. Editorial Lunweg. Barcelona, 2001. DL B. 34095-2001. ISBN 847782777X. (2001).
- ESPEL, R; GRIMA, R; AGUADO, A; GÓMEZ, J;
La evolución de la construcción del templo de la Sagrada Familia. Informes de la Construcción, oct-dic 2009. Vol.61, núm.516. p. 5-20. ISSN 0020-0883. (2009).
- FAULÍ, F;
Composició i continuïtat en les columnes i voltes de les naus del Temple Expiatori de la Sagrada Família: descripció del sistema geomètric i del procés de definició del projecte des de l'anàlisi i interpretació del projecte d'Antoni Gaudí fins a la construcció. Director de tesis: Josep Gómez; Codirectors: Claudi Alsina, Joan Bassegoda. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya UPC. Departament d'Estructures a l'Arquitectura, 2008. (2008).
- FERNÁNDEZ, A; BARECHEA, E; HARO SABATER, J.R;
Historia Art. Editorial Vicens Vives. Barcelona, 1996. ISBN: 84-316-2742-5. (1996).
- FERNÁNDEZ, J.C;
Análisis del proceso de adhesión en el sistema de caucho sintético-adhesivo de poliuretano. Directores: José Miguel Martín y Ángel C. Orgilés. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante. Facultad de Ciencias. Departamento de Química Inorgánica e Ingeniería Química. Marzo, 1991. (1991).
- FERNÁNDEZ, J.M;
El Vidrio. Textos Universitarios. Consejo Superior de Investigaciones Científicas Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Tercera edición, Madrid, 2003. Depósito Legal: M.49074-2003. ISBN: 84-00-08158-7. (2003).
- FIERRO, M;
En torno a la decoración con mosaicos de las mezquitas omeyas. Homenaje al profesor Jacinto Bosch Vilá. Granada, 1991. Vol. 1, p. 131-144. ISBN 84-388-1440-0. (1991).

FONTBONA, F;

El modernisme: a l'entorn de l'arquitectura. Editorial Isards s.l. Barcelona, 2002. DL B. 8623-2002. ISBN 84931224. (2002).

FREIXA, M; MERCADER, L; MOLET, J;

Ruta europea del modernisme. Editorial Mediterrànea. Catàleg Exposició. Barcelona, 2000. DL B. 23063-2000. ISBN 8483341808. (2000).

FIORI, C; VANDERINI, M; PRATI, S; CHIAVARI, G;

Vatèrica in the mortars of a mosaic in the Saint Peter basilica, Vatican (Rome). Journal of Cultural Heritage. Abril-Marzo, 2009. Vol. 10, núm. 2. p. 248-257. (2009).

GOMÀ, F;

Informe sobre la composició del morter de rehabilitació dels pinacles i condicions de la seva posada en obra per a aconseguir durabilitat a llarg termini. Laboratori de Recerca Química. Barcelona, 2006. Arxiu Temple Expiatori de la Sagrada Família (ATESF). (2006).

Instruccions del Dr. Gomà en relació amb el curat de les peces de les escultures dels pinacles dels finestrals. 6 de febrero de 2008. Arxiu Temple Expiatori de la Sagrada Família (ATESF). (2008).

GÓMEZ, J;

L'Obrador de Gaudí. Edicions UPC. Barcelona, 1996. Dep. Legal B.24.329-96. ISBN 84-8301-145-X. (1996).

GÓMEZ-RAMIÓ, J;

Estudi dels morters dels pinacles de la Sagrada Família. Director: César Díaz; Directores externs: Antonio Aguado i Sergio Cavalaro. Tesina Final del Màster Tecnologia a l'Arquitectura. Escola Superior d'Arquitectura de Barcelona de la UPC. Barcelona, 2012. (2012).

GÓMEZ-RAMIÓ, J; Cavalaro, S.H.P; Aguado, A.

The trencadis mosaic on the pinnacles of the Sagrada Família Cathedral. International Journal Architectural Heritage. DOI:10.1080/15583058.2013.834089;

GONZÁLEZ, J.L; CASALS, A;

Gaudí y la razón constructiva: Un legado inagotable. Ediciones Akal. Madrid, 2002. Depósito Legal M-47.172-2002. ISBN 8446019760. (2002).

GONZÁLEZ, A;

Método y criterios en la restauración del Palau Güell de Barcelona (España). Informes de la Construcción, nov. 1993. Vol. 45, núm. 428, p. 19-38. ISSN 0020-0883. (1993).

GONZÁLEZ-RAMIREZ, M.L;

El trazado geométrico en la ornamentación del Alcázar de Sevilla. UNIVERSIDAD DE Sevilla y Consejería de Obras Públicas y Transportes, 1995. ISBN 84-472-0239-9 (1995).

GRIMA, R.M;

La evolución de los elementos de hormigón en la Sagrada Familia. Directores: Antonio Aguado y Josep Gómez. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Departamento de Ingeniería de la Construcción, 2012. (2012).

El Hormigón en el Templo de la Sagrada Familia. Tesina d'especialitat. Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports. Barcelona, 2004. (2004).

GRIMA, R.M; GÓMEZ, J; AGUADO, A;

The Use of Concrete in Gaudi's Sagrada Familia. International Journal of Architectural Heritage, 2007. Vol. 1, núm.4. p. 366-379. (2007).

HATTSTEIN, M; DELIUS, P;

El Islam: arte y arquitectura. Editorial Könemann, 2004. ISBN: 9783833111808. (2004).

JENNI, A; HOLZER, L; ZURBRIGGEN, R; HERWEGHA, M;

Influence of polymers on microstructure and adhesive strength of cementitious tile adhesive mortars. Cement and Concrete Research, 2005. Vol. 35, núm. 1. p. 35-50. (2005).

JENNI, A; ZURBRIGGEN, R; HOLZER, R; HERWEGH, M;

Changes in microstructures and physical properties of polymer-modified mortars during wet storage. Cement and Concrete Research, 2006. Vol. 36, núm. 1, p. 79-90. (2006).

MARTÍNEZ- LAPEÑA, J. A; TORRES, E;

Restauración del Parc Güell de Barcelona. ON Diseño, 1995. Núm. 163. pp. 142-149. ISSN 0210-2080. (1995).

LISEA, F; BILURBINA, L;

Adhesivos industrials. Marcombo, DL, 1990. Depósito legal: B 17 874-1990. ISBN: 84-267-0785-8. (1990).

LOYER, F;

Art Nouveau en Cataluña. Editorial Köln: Taschen, 1991. ISBN 3822885452. (1991).

MAHMUD, G.H; YANG, Z; HASSAN, A.M.T;

Experimental and numerical studies of size effects of Ultra High Performance Steel Fibre Reinforced Concrete (UHPRC) beams. Construction and Building Materials. July, 2013. Vol. 48. P.1027-1034. (2013).

MANSUR, A; NASCIMENTO, O; Luiz, D; MANSUR, H. S;

Physico-chemical characterization of EVA-modified mortar and porcelain tiles interfaces. Cement and Concrete Research. Vol. 39, núm. 12, p. 1199-1208. (2009).

MARTÍN, J; RINCÓN, J; ROMERO, M;

Effect of Firing Temperature on Sintering of Porcelain Stoneware Tiles. Ceramics International, 2008. Vol. 34, núm. 8. P 1867-1873. ISSN 0272-8842. (2008).

MARTÍN, J.M;

Conceptos básicos de adhesión y de uniones adhesivas. Publicaciones de la Universidad de Alicante. Depósito Legal: MU-1778-2000. ISBN: 84-7908-558-4. (2000).

MARTINELL, C;

Gaudí: su vida, su teoría, su obra. Colegio oficial de arquitectos de Cataluña y Baleares. Barcelona, 1967. Depósito Legal B 13417-X. (1967)

MATAMALA, J;

Antoni Gaudí: Mi itinerario con el arquitecto. Editorial Claret, S.A. Barcelona, 1999. Depósito Legal 36424-1999. ISBN 8482973436. (1999).

MENÉNDEZ, E;

Estudio microestructural de productos de reacción álcali-árido en hormigones curados a altas temperatura. Materiales de Construcción, 1993. Vol. 43, núm, 232. p. 21-24. (1993).

METHA, P.K; MONTEIRO, P.J.M;

Concrete. Structure, Properties and Materials. New Jersey: Prentine Hall. (1986).

MOROPOULOU, A; BAKOLAS, A; BISBIKOU, K;

Physico-chemical adhesion and cohesion bonds in joint mortars imparting durability to the historic structures. Construction and Building Materials. Febrero, 2000. Vol. 14, núm 1, p. 35-46, ISSN 0950-0618. (2000).

MOROPOULOU, A; POLIKRETI, K; BAKOLAS, A; MICHAILEDIS, P;

Correlation of Physicochemical and Mechanical Properties of Historical Mortars and Classification by Multivariate Statistics. Cement and Concrete Research. Vol. 33, núm. 6. P. 891-898. ISSN 0008-8846. (2003).

MORSLI, K; DE LA TORRE, A; CUBEROS, A; MOHAMMED, Z; ARANDA, M;

Preparación y caracterización de cementos belíticos blancos activados con dopantes alcalinos. Materiales de Construcción, Abril-Junio, 2009. Vol. 59, núm, 294, p.19-29. DOI: 10.3989/mc.2009.44307. (2009).

MAHABOONPACHAI, T; KUROMIYA, Y; MATSUMOTO, T;

Experimental investigation of adhesion failure of the interface between concrete and polymer-cement mortar in an external wall tile structure under a thermal load. Construction and Building Materials, Vol. 22, núm. 9. p. 2001-2006. (2008).

MARANHÃO, F.L.; VANDERLEY, J;

Bond strength and transversal deformation aging on cement-polymer adhesive mortar. Construction and Building Materials. Vol. 23, núm. 2. p. 1022-1027. (2009).

MARANHÃO, F.L.; LOH, K; VANDERLEY, J;

The influence of moisture on the deformability of cement-polymer adhesive mortar. Construction and Building Materials. Vol. 25, núm 6, p. 2948-2954. (2011).

- MUHAMMAD, B; MOHAMMAD, I; YUSSUF, AA; MHAMMAD, ARB;
Elastomeric influence of natural rubber latex on cement mortar at high temperatures using thermal degradation analysis. Construction and Building Materials. Vol. 25, núm. 5. p 2223-2227. ISSN 0950-0618. (2011).
- NEVILLE, A. M., BROOKS, J.J;
Concrete Technology. Pearson Education. London, 2008. ISBN: 9788131705360. (2008).
- OZKAHRAMAN, H. T.; IŞIK, E. C;
The effect of chemical and mineralogical composition of aggregates on tensile adhesion strength of tiles. Construction and Building Materials. Vol. 19, núm. 4, p. 251-255. (2005).
- PARICIO, I; BASSEGODA, J;
El Park Güell De Barcelona. Una lección de construcción. CAU: Construcción, Arquitectura, Urbanismo, Marzo, 1981. nº 70; p. 46-62; ISSN 0210-4563. (1981).
- PÁEZ, A;
Hormigón armado. Editorial Reverté, s.a. ISBN-13: 978-8429120561. (1986).
- PICO, J; SÁNCHEZ, A; BONDIA, J; ESCUDERO, D; TARREGOSA, A; CORRECHER, C;
Intelligent robotic cell for Trencadís mosaics manufacturing. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C (Applications and Reviews), 2005. Vol. 35, núm. 1, p. 75-86. (2005).
- PÉREZ, N;
Variability of atmospheric aerosols at urban, regional and continental backgrounds in the western mediterranean basin. Directores: Andrés Alastuey y Xavier Querol. Tutora: Montserrat Sarrà. Tesis Doctoral. Institut de la Ciència y Tecnologia Ambiental. Universitat Autònoma de Barcelona. (2010).
- PEY, J;
Caracterización físico-química de los aerosoles atmosféricos en el Mediterráneo Occidental. Directores: Andrés Alastuey y Xavier Querol. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Minera i Recursos Naturals. (2008).
- PORCAR, J.L;
Adhesivos y materiales de rejuntado. Colocación de baldosas cerámicas y otros recubrimientos rígidos modulares. Edición por la Asociación Nacional de Fabricantes de Morteros Industriales (ANFAPA). Barcelona, octubre de 2008.
- PUJADAS, P;
Caracterización y diseño del Hormigón Reforzado con Fibras Plásticas. Directors: Antonio Aguado y Sergio Cavalaro. Doctoral Thesis. Departamento Ingeniería de la Construcción. Universitat Politècnica de Catalunya. (2013)

ROSELL, J.R;

Aportaciones al conocimiento del comportamiento deformacional de pastas de cal: tamaño y formas de las partículas y su viscosidad. Directores: Jaume Avellaneda y Inmaculada Rodríguez. Tesis Doctoral. Departament de Construccions Arquitectòniques. Universitat Politècnica de Catalunya. (2013).

ROVIRA, J;

Aspectos constructivos puestos de manifiesto en la restauración del Park Güell de Barcelona. Informes de la Construcción. Vol. 42; núm. 408. pp. 77-86. Julio-Agosto (1990).

RAMOS, N. M; SIMÕES, ML; DELGADO, JMPQ; DE FREITAS, VP;

Reliability of the pull-off test for in situ evaluation of adhesion strength. Construction and Building Materials. Vol. 31, p. 86-93. (2012).

SÁNCHEZ-RAMOS, S; DOMENECH-CARBOA, A; GIMENO-ADELANTADOA, J.V.; PERIS-VICENTEA, J; VALLE ALGARAA, F.M;

Thermal Decomposition of Chromite Spinel with Chlorite Admixture. Thermochimica Acta, 9/30, Vol. 476, núm. 1-2. P. 11-19. ISSN 0040-6031. (2008).

SAIKIA, B; BORUAH, R.K; GOGOI, P; BARUAH B.P;

Thermal Investigation on Coals from Assam (India). Fuel Processing Technology, 2, Vol. 90, núm. 2. P.196-203. ISSN 0378-3820. (2009).

SEPULCRE-AGUILAR, A; HERNÁNDEZ-OLIVARES, F;

Assessment of phase formation in lime-based mortars with added metakaolin, Portland cement and sepiolite, for grouting of historic masonry. Cement and Concrete Research, 1, Vol. 40, núm. 1. P. 66-76. ISSN 0008-8846. (2010).

SCHULZE, J; KILLERMANN, O;

Long-term performance of redispersible powders in mortars. Cement and Concrete Research, Vol. 31, núm. 3, p. 357-362. (2001).

SKŁODOWSKI, R; DRDÁCKÝ, M; SKŁODOWSKI, M;

Identifying subsurface detachment defects by acoustic tracing. NDT & E International, 2013. Vol. 56. p. 56-64 (2013).

TRIOLA, M;

Estadística. Pearson Educación, 2004. ISBN: 9702605199. (2004).

VACCA, M.C;

Recubrimiento de superficies arquitectónicas con piezas cerámicas. Director: Jaume Avellaneda. Tesis Doctoral Escuela Superior de arquitectura de la UPC. Departamento de construcciones arquitectónicas. (2010).

VOCCOLI, O;

La rinascita dell'arte musiva in epoca moderna in Europa. La tradizione del mosaico in Italia, in Spagna e in Inghilterra. Directora: Mireia Freixa. Tesis Doctoral. Departament d'Història de l'Art. Universitat de Barcelona. (2010).

VALLESPÍN, A;

La luz dibujada en bizancio. EGA. Revista de expresión gráfica arquitectónica, Vol. 17, núm 19, p. 232-241. (2012).

VÁZQUEZ, J;

Adherencia al hormigón de morteros de diferentes bases químicas. Directores: Jaime Fernández y Jesús Rubio. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puentes. Universidad Politécnica de Madrid. (2010).

VICENTE, M;

Avaluació de la qualitat del morter utilitzat en els triangles de les voltes de rajola del temple de la Sagrada Família. Laboratori Formicontrol, s.l. 26 de juny de 2009. (2009).

Avaluació de la qualitat del morter que s'utilitza en els pinacles i símbols eucarístics del Temple de la Sagrada Família. Laboratori Formicontrol, s.l. 4 d'agost de 2009. (2009).

Avaluació de la qualitat del morter que s'utilitza en els pinacles de les pomes del Temple de la Sagrada Família. Laboratori Formicontrol, s.l. 30 de setembre de 2009. (2009).

Descripción de los ensayos físicos realizados en las muestras de vidrio de la casa Orsoni. Laboratori Formicontrol, s.l. 11 de diciembre de 2009. (2009).

VILLELA, J.P;

Análisis de adherencia de revestimientos cerámicos de edificios. Director: Juan Olivares. Tesis Doctoral. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. (2007).

VIO, E;

La Basilique Saint-Marc de Venise. Citadelles & Mazenod. Paris, 2001. ISBN: 2850881775. (2001).

VUK, T.; GABROVŠEK, R; KAUČIČ, V;

The Influence of Mineral Admixtures on Sulfate Resistance of Limestone Cement Pastes Aged in Cold MgSO₄ Solution. Cement and Concrete Research, 6, Vol. 32, núm. 6. p. 943-948. ISSN 0008-8846. (2002).

WETZEL, A.; ZURBRIGGEN, R.; HERWEGH, M;

Spatially resolved evolution of adhesion properties of large porcelain tiles. Cement and Concrete Composites, Vol. 32, núm. 5, p. 327-338. (2010).

WETZEL, A; HERWEGHA, M R. ZURBRIGGEN; WINNEFELD,F;

Influence of shrinkage and water transport mechanisms on microstructure and crack formation of tile adhesive mortars. Cement and Concrete Research, Vol. 42, núm 1, p. 39-50. (2012).

WETZEL, A; ZURBRIGGEN,R; HERWEGH, M; GREMINGER, A; KAUFMANN,J;

Long-term study on failure mechanisms of exterior applied tilings. Construction and Building Materials, Vol. 37, p. 335-348. (2012).

WINNEFELD, F; KAUFMANN, J; HACK, E; HARZER, A; WETZEL, A; ZURBRIGGEN,R;

Moisture induced length changes of tile adhesive mortars and their impact on adhesion strength. Construction and Building Materials, Vol. 30, p. 426-438. (2012).

YIU, C. Y.; HO, D. C. W.; LO, S. M;
Weathering effects on external wall tiling systems. Construction and Building Materials, Vol. 21, núm 3, p. 594-600. (2007).

ZAMORA - MESTRE, J. LI; GARCIA, M.J;
Evaluación de la aplicación de la técnica de percusión, registro de señal sonora y posterior análisis espectral para la verificación de la adherencia de aplacados de piedra como revestimiento encolado en fachadas urbanas en altura. II Jornadas de Investigación en Construcción. IETcc. 30 de mayo de 2008. (2008).

NORMATIVAS

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN

UNE-EN 12004:2008. Adhesivos para baldosas cerámicas. Requisitos, evaluación de la conformidad, clasificación y designación.

UNE-EN 12370:1999. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales.

UNE-EN 12350-7:2010. Ensayos de hormigón fresco. Parte 7: Determinación del contenido de aire. Métodos de presión.

UNE-EN 12390-13:2014. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión.

UNE-EN 196-1:2005. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas.

UNE-EN 1348:2008. Adhesivos para baldosas cerámicas. Determinación de la resistencia a la tracción de los adhesivos cementosos.

UNE-EN 1936:2007. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.

UNE-EN 1015-3:2000. Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas).

UNE-EN 1770:1999. Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación del coeficiente de dilatación térmica.

UNE-EN 12504-4:2006. Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos.

UNE EN 12002. Determinación de la deformación transversal de adhesivos y materiales de rejuntados cementosos.

UNE-EN 14651:2007. Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual).

COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN MINISTERIO DE FOMENTO.

EHE-08 Instrucción del Hormigón Estructural. ISBN: 978-8449808258.2008.

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT

Chiers du CSTB 2626-4-A3:2. Certification CSTB des enduits monocouches d'imperméabilisation. Modalités d'essais. Juillet- Aout 1993.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION

ISO 10545-5:1996. Ceramic tiles -- Part 5: Determination of impact resistance by measurement of coefficient of restitution.

ASTM INTERNATIONAL

ASTM E3-01. Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens.

SITIOS WEB

CIDM. CENTRO INTERNAZIONALE DI DOCUMENTAZIONE SUL MOSAICO.

Banca Dati Mosaico. (en línea). Consulta: 2012-2014

Disponible: <http://www.mosaicoravenna.it/>

OBSERVATORI FABRA

Meteorología. Dades climàtiques i efemèrides meteorològiques. (en línea) Consulta: 2013.

Disponible: <http://www.fabra.cat/meteo/dades/dades.html>

IECA. INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO Y SUS APLICACIONES

Historia del cemento. (en línea). Consulta: 23 de octubre de 2014.

Disponible: https://www.ieca.es/reportaje.asp?id_rep=5

METMUSEUM. THE METROPOLITAN MUSEU OF ART OF NEW YORK

Helibrunn Timeline of the history. Uruk: the first city (en línea). Consulta: 2014.

Disponible: <http://www.metmuseum.org/toah/works-of-art/l.1995.48.2>

TRENCADÍS INNOVACIÓN

Obras emblemáticas. (en línea). Consulta: 2014

Disponible: <http://www.trencadis.es/esp/emblematicas.html>

