
Diseño de una piel arquitectónica de fachada bio-receptiva: Mortero aligerado colonizado por un briófito tapizante

Tesis doctoral

Autor	Daniel Garabito López
Director	Eduardo Montero García
Codirector	Javier Garabito López



Universidad de Burgos
Burgos, mayo 2017



A mis padres y hermanos

A Celia

Agradecimientos

A mis directores de tesis, Eduardo y Javier, por su inestimable orientación, apoyo y cercanía

A Javier, por haberme dado el gran empujón para lanzarme por este sendero gracias a su conocimiento y entusiasmo contagioso

A todo el Departamento de Materiales de Construcción, por las facilidades que me han brindado, en especial a Ángel, Verónica, Pablo y José Luis

A Presen y Maitane de la empresa Magnesitas Navarras por suministrarme material y conocimiento sin el que hubiera estado perdido

A Carlos y Jorge por su constante colaboración y ayuda

A todos aquellos a los que he acribillado a preguntas y que tan amablemente me han atendido: Jaume, Aline, Milagros, Matthias, Sandra, Anne, Patxi, el equipo de briosistema...

Y por supuesto, y de forma muy especial a Roberto, compañero de aventuras y desventuras en todo este embrollado parto académico

Resumen

Una estrategia para mejorar la calidad medio-ambiental de nuestras ciudades es la creación de nuevas áreas verdes, pero la cantidad de espacio susceptible de transformarse en ajardinado es limitada, y varía substancialmente de unas ciudades a otras.

Las superficies exteriores de los edificios constituyen una opción para aumentar la superficie ajardinada, pero, en el caso de las fachadas, este aprovechamiento es más complicado que en las cubiertas debido a la dificultad asociada a disponer vegetación en vertical. Los jardines verticales, en los que las plantas crecen en complejos sistemas constructivos dispuestos en las fachadas, son caros de implementar y mantener por el momento.

Una alternativa al empleo de estos jardines verticales es que los mismos componentes materiales de la fachada sean capaces de ser colonizados por micro-organismos, plantas criptógamas o incluso plantas superiores, del mismo modo en que son colonizadas las cortezas de los árboles.

Los materiales de construcción son propensos a ser colonizados por vegetación y /o bio-films a lo largo de su vida útil. Este fenómeno ha sido visto como una patología en las edificaciones, especialmente cuando se trata de edificaciones históricas.

La probabilidad de un material de ser bio-colonizado está determinada por su bio-receptividad, característica que puede ser definida como la totalidad de las propiedades de dicho material que contribuyen al establecimiento, anclaje y desarrollo de fauna y/o flora.

Sin embargo, potenciar en condiciones controladas esta característica abre la vía para disponer vegetación sobre las fachadas de un modo que implique bajos o nulos costes de mantenimiento. De manera incipiente, pero constante, se están abriendo nuevas líneas de investigación sobre el empleo de materiales de fachada bio-receptivos.

Esta tesis doctoral, pues, recoge un diseño de "piel" de fachada bio-receptiva, entendiendo como "piel" la capa más externa de la envolvente vertical de los edificios.

Se trata de un sistema constructivo consistente en dos componentes: una capa de mortero bio-receptivo sobre la que se ha cultivado una especie tapizante de briófito (musgo).

La tesis contempla el desarrollo de dicho sistema constructivo, desde su base teórica a su materialización mediante la fabricación de muestras prototipo para evaluar su viabilidad técnica.

Índice

Definición y objetivos de la tesis doctoral	1
a) Contexto del empleo de vegetación en fachadas.....	1
b) Objetivos concretos de la presente tesis doctoral	3
c) Referencias	4
Introducción	1
a) Contexto general de la sostenibilidad en la edificación.....	1
Definición de sostenibilidad	1
Historia de la sostenibilidad en la edificación	6
Unión Europea: Legislación para mejorar la sostenibilidad de los edificios	7
España: Legislación para mejorar la sostenibilidad de los edificios.....	8
Construcción Sostenible.....	8
b) Panorámica de la relación entre arquitectura y vegetación	9
Introducción.....	9
Uso especies vegetales vivas en construcción	10
Cubiertas ajardinadas.....	12
c) Estructura de la tesis.....	12
d) Referencias	13
1. Sistemas de fachadas verdes.....	17
1.1. Introducción: breve historia	17
1.2. Problemática	18
Dificultad de plantar en vertical.....	18
1.3. Descripción de los principales sistemas existentes	20
Fachadas verdes con plantas trepadoras o arbustos colgantes. Green façades	20
Living wall systems. Jardines verticales.....	22
1.4. Síntesis de lo expuesto en el capítulo.....	25
1.5. Referencias	26
2. Componentes del sistema propuesto: Briófito tapizante	27
2.1. Briófitos: definición y principales características	27
Principales características	27
El papel ecológico de los briófitos.....	29
Los briófitos y la contaminación urbana	30
2.2. Razones para escoger un briófito como especie vegetal pionera para el sistema propuesto	31
Capacidad de colonizar medios verticales bio-receptivos.....	31
Capacidad de adaptación a entornos hostiles	31
Bajo mantenimiento.....	31
Capacidad para la reviviscencia	31

Ciclo de vida	31
Capacidad de prosperar en soportes compactos	31
Otras razones	31
2.3. Historia del uso briófitos en la edificación	32
2.4. Sistemas constructivos con briófitos. Sistemas comerciales	33
Sistema comercial Codra system, moss catch system.....	33
Sistema comercial Enka-moss	37
Sistema comercial Pre-vegetated mats Xeroflor.....	38
Sistema comercial Geo-moss.....	39
Sistema comercial Moos machine	42
Sistema comercial Moss Wall, Verde perfilo.....	43
2.5. Sistemas constructivos con briófitos. Otros sistemas	43
Prototipos de panel elaborados por Annie Martin.....	43
Uso de briófitos en cubiertas verdes.....	45
Briosistema. Euroestudio	46
Bryophyte Building Project/Materialized: protonemata	47
2.6. Características necesarias de la especie	48
2.7. Especie escogida. Caracterización	49
Hypnum cupressiforme	49
Método de recolección para la fase experimental.....	51
2.8. Síntesis de lo expuesto en el capítulo.....	56
2.9. Referencias	57
3. Bio-receptividad.....	61
3.1. Factores intrínsecos que determinan la bio-receptividad	62
Porosidad	62
Rugosidad.....	62
Composición química	63
pH	63
3.2. Materiales de construcción bio-receptivos	63
3.3. Investigaciones en curso sobre desarrollos de materiales y sistemas constructivos con bio-receptividad mejorada	64
Conjunto multicapa en base cemento, aplicable como soporte biológico para fachadas de edificios	65
Proyectos desarrollados en BiotA Lab, The Bartlett School of Architecture.....	67
Bio Ceramic System	73
Paneles porosos bio-receptivos elaborados a partir de vidrio reciclado	75
Texturas bio-colonizables, mancha natural.....	76
3.4. Síntesis de lo expuesto en el capítulo.....	77
3.5. Referencias	78

4.	Componentes del sistema propuesto: Mortero aligerado bio-receptivo.....	83
4.1.	Características del soporte resistente necesarias para un sistema como el propuesto	83
	Alta bio-receptividad	83
	Durabilidad	84
	Sostenibilidad	84
	Aporte de nutrientes.....	84
	Viabilidad técnica y económica	84
4.2.	Posibles soportes resistentes analizados y descartados.....	85
	Fibras vegetales/madera	85
	Bloques de tierra compactada	86
	Espumas cerámicas	86
	Espumas plásticas/aislantes térmicos	87
	Enka drain y otros geo compuestos.....	87
4.3.	Morteros: descripción, composición, propiedades.....	88
	Composición del mortero de cemento.....	89
	Propiedades de los morteros	89
4.4.	Morteros aligerados.....	91
	Introducción de aire ocluido en su interior.....	91
	Mediante adición de cargas ligeras.....	91
4.5.	Razones para escoger como soporte resistente un mortero	92
	Bio-receptividad de los morteros	92
	Durabilidad	94
	Sostenibilidad	95
	Aporte de nutrientes.....	95
	Viabilidad técnica y económica	95
4.6.	Parámetros de referencia	96
4.7.	Composición del mortero escogido como sustrato	98
	Aglomerante.....	98
	Áridos	100
	Agua de amasado	102
	Aditivos	102
4.8.	Aumento de la bio-receptividad del mortero escogido como sustrato.....	103
	Aumento de la porosidad del mortero	103
	Aumento de la rugosidad del mortero	103
	Reducción del pH del mortero	104
4.9.	Ensayos preliminares del empleo de PU	105
4.10.	Síntesis de lo expuesto en el capítulo	109
4.11.	Referencias.....	110

5.	Elaboración del mortero bio-receptivo propuesto	119
5.1.	Cemento de fosfato magnesio (MPC)	119
	Dihidrógeno fosfato de amonio $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$, MAP	119
	Óxido de magnesio, MgO	120
	Bórax de alta pureza ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)	124
	Cuadro resumen componentes aglomerante MPC	125
5.2.	Áridos	125
	Caracterización de los residuos de espumas rígidas de poliuretano (PU).....	126
5.3.	Diseño de experimentos	126
	Formulación preliminar del MPC basada en la bibliografía.....	126
	Protocolo de elaboración propuesto en la bibliografía	127
5.4.	Elaboración de muestras prototipo preliminares de mortero	128
	Protocolo de elaboración empleado.....	128
	Muestra prototipo con MgO 83%, tamaño de partícula impalpable y sin árido	128
	Muestra prototipo con MgO 83%, tamaño de partícula impalpable y con árido PU. Primera amasada.....	132
	Muestra prototipo con árido PU. Empleo de subproducto PC	135
	Muestra prototipo sin árido. Empleo de subproducto PC	138
	Muestra prototipo sin árido. Empleo de subproducto PC	139
	Cuadro resumen de dosificaciones empleadas	141
5.5.	Optimización de la dosificación	141
	Muestras sin árido.....	141
	Muestras con árido: adición de poliuretano	144
	Optimización del protocolo de elaboración	146
5.6.	Síntesis de lo expuesto en el capítulo.....	146
5.7.	Referencias	147
6.	Conjunto soporte+ briófito.....	149
6.1.	Reproducción de la especie de briófito	149
	Introducción y problemática	149
	Métodos de cultivo de la bibliografía consultada	150
	Tasa de crecimiento de los briófitos.....	154
6.2.	Pruebas preliminares de reproducción de la especie de briófito	155
	Cultivo de ejemplares maduros.....	155
	Batidos de musgo	157
	Cultivo de brotes embrionarios	157
	Resultado de las pruebas preliminares	159
6.3.	Método de enraizamiento	159
6.4.	Síntesis de lo expuesto en el capítulo.....	160
6.5.	Referencias	161

7.	Experimental muestras MPC.....	165
7.1.	Ensayos mecánicos	165
	Determinación de la resistencia a flexión del mortero endurecido	165
	Determinación de la resistencia a compresión del mortero endurecido	169
7.2.	Ensayos físicos	171
	Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido	171
	Determinación de la porosidad abierta	173
	Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido ..	174
	pH y conductividad eléctrica.....	175
7.3.	Ensayos de durabilidad.....	176
	Ensayo de heladicidad.....	176
7.4.	Síntesis del capítulo y conclusiones parciales	181
	Comparativa respecto a parámetros de referencia descritos en el apartado 4.6	181
	Otros valores a considerar.....	183
7.5.	Referencias	184
8.	Experimental bio-receptividad	185
8.1.	Método escogido para evaluar la bio-receptividad del mortero MPC	185
8.2.	Bio-receptividad: mortero MPC+batido de musgo	186
	Primera fase experimental	186
	Segunda fase experimental.....	188
	Tercera fase experimental	194
	Cuarta fase experimental	199
8.3.	Bio-receptividad: mortero MPC+ejemplares adultos de briófito	202
	Muestras adultas sujetas a soporte con tejido	202
	Muestras adultas desmenuzadas insertadas en mortero MPC	205
8.4.	Bio-receptividad: mortero MPC+microalgas	209
	Proceso de obtención del inóculo de microalgas autóctonas empleado en el canal.....	210
	Resultado del experimento	211
8.5.	Análisis condiciones climáticas.....	214
8.6.	Síntesis del capítulo y conclusiones parciales	217
	Cultivos con la especie de briófito Hypnum Cupressiforme.....	218
	Cultivos con especies de briófitos autóctonas.....	218
	Cultivos con microalgas.....	219
8.7.	Referencias	220
	Conclusiones finales. Líneas de investigación futuras	223
a)	Conclusiones finales.....	223
b)	Líneas de investigación futuras	225

Apéndice: Producción científica directamente relacionada con esta tesis doctoral
..... **227**

a) Patentes de invención 227

b) Becas obtenidas 227

c) Artículos publicados 227

d) Congresos nacionales e internacionales 228

Definición y objetivos de la tesis doctoral

a) Contexto del empleo de vegetación en fachadas

En nuestros días se está generando urgencia por mejorar la calidad medio-ambiental de nuestras ciudades. Una estrategia tradicional es la creación de áreas verdes en el entorno urbano; pero la cantidad de espacio susceptible de transformarse en ajardinado es limitada, y varía substancialmente de unas ciudades a otras.

Las superficies exteriores de los edificios constituyen una opción extra de lograr superficie ajardinada¹. Empieza a existir regulación normativa que, en determinadas ciudades, promueve o incluso en ciertos casos obliga, al aprovechamiento de las cubiertas de los edificios como superficies ajardinadas².

En el caso de las fachadas, este aprovechamiento es más difícil debido a la complicación inherente a disponer vegetación en vertical. Los jardines verticales, en los que las plantas crecen en sistemas constructivos dispuestos en las fachadas de los edificios, han probado, hasta el momento, ser caros de implementar y mantener³.

Una alternativa al empleo de estos jardines dispuestos en vertical, que está cobrando cada vez mayor interés, es que los mismos componentes materiales de la fachada sean capaces de ser colonizados por micro-organismos, plantas criptógamas (algas, hongos, líquenes, musgos...) o incluso otras plantas superiores, de la misma manera en que son colonizadas las cortezas de los árboles⁴.

Asimilar la piel de un edificio a la corteza de un árbol, o "*Architectural bark*", tal y como han acuñado el término Cruz M. y Beckett R., es una estrategia de diseño inspirada en la naturaleza, de igual modo que, a lo largo del siglo XX, han aplicado principios estructurales y formales basados en la naturaleza arquitectos como Antonio Gaudí, Eero Saarinen o ingenieros como Pier Luigi Nervi y Frei Otto⁵.

Los materiales de construcción son, generalmente, propensos a ser colonizados por vegetación y /o bio-films en algún momento a lo largo de su vida útil, especialmente por especies criptógamas, micro-organismos como microbios, bacterias y hongos. El modo en que diversas comunidades de micro-organismos establecen sinergias o compiten en los materiales de construcción está todavía en proceso de ser bien comprendido⁶.

Este fenómeno, generalmente ha sido visto como una patología en las edificaciones, especialmente cuando se trata de edificaciones históricas⁷. Evitar que las superficies de acabado de los edificios sean colonizadas por vegetación y /o bio-films es una constante preocupación en el mantenimiento del patrimonio histórico edificado⁸, pero también en el caso de materiales de construcción usados en las edificaciones convencionales⁹.

Sin embargo, también hay que tener en cuenta que el período del Romanticismo del siglo XIX explotaba imágenes de ruinas de los edificios, en las que la Naturaleza progresivamente integraba en su seno las construcciones realizadas por la mano humana. La construcción colonizada por vegetación se erigía como un hito estético, que inspiraba las pinturas de Caspar David Friedrich (Ilustración 1), Turner, o los poemas de Wordsworth¹⁰.



Ilustración 1: Las ruinas de Eldena, Caspar David Friedrich

Con este apunte, se pretende reflejar que una piel arquitectónica colonizada por vegetación puede ser valorada positivamente por los usuarios mediante un diseño adecuado.

La probabilidad de un material de ser bio-colonizado está determinada por su bio-receptividad; el bio-ingeniero Guillitte O. ha definido la bio-receptividad como "la aptitud de un material (o cualquier otro objeto inanimado) para ser colonizado por uno o varios grupos de organismos vivos sin experimentar necesariamente ningún bio-deterioro"¹¹.

Esta tesis doctoral recoge un diseño de "piel" de fachada bio-receptiva, entendiendo como "piel" la capa más externa de la envolvente vertical de los edificios.

Se trata de un sistema constructivo de revestimiento de fachadas consistente en dos componentes: El primer componente es una capa de mortero bio-receptivo sobre la que se ha cultivado el segundo componente, una especie tapizante de briófito (musgo).

La tesis contempla el desarrollo de dicho sistema constructivo, desde su base teórica a su materialización mediante la fabricación de mortero en laboratorio y el cultivo sobre el mortero de la especie vegetal seleccionada.

Para ello se ha realizado un proceso de pruebas empíricas a diversos prototipos fabricados, para evaluar la viabilidad técnica de la piel de fachada propuesta.

El desarrollo de estos prototipos permite comprobar experimentalmente:

- La idoneidad por separado de los componentes escogidos
- La dosificación idónea para un mortero como el propuesto
- La compatibilidad entre la especie biológica y el soporte resistente
- Las diversas técnicas de implantación de la especie biológica en el soporte

Por último, se analizan los resultados obtenidos, se refieren unas conclusiones finales sobre el trabajo realizado en la tesis doctoral y se proponen líneas de investigación futuras.

b) Objetivos concretos de la presente tesis doctoral

- Explorar una vía para construir un tipo de fachada verde que implique bajos o nulos costes de mantenimiento, en contraposición a los elevados costes de implantación y mantenimiento que tienen los sistemas actualmente existentes
- Revisar el estado del arte en cuanto a sistemas de fachadas verdes, empleo de briófitos en la edificación e investigaciones sobre materiales y sistemas constructivos con bio-receptividad mejorada
- Proponer una especie de briófito, en función de sus características teóricas, apropiada para un sistema constructivo como el propuesto; posteriormente, evaluar su idoneidad a través de una fase experimental
- Valorar una técnica de cultivo apropiada de la especie vegetal en el soporte
- Ampliar las investigaciones existentes sobre materiales de construcción bio-receptivos, en concreto la que versa sobre el empleo de morteros con bio-receptividad mejorada fabricados a partir de aglomerante MPC (del inglés "Magnesium phosphate cement"), un cemento de fosfato magnesio:
 - Para explorar la posibilidad de abaratar el coste económico de la fabricación de un mortero MPC mediante el empleo de sub-productos industriales, en vez de reactivos químicos de gran pureza
 - Para mejorar la puesta en obra del mortero MPC mediante su aligeramiento empleando residuos de espuma de poliuretano
 - Mejorar la sostenibilidad del diseño propuesto mediante el empleo de sub-productos industriales y residuos de la industria del automóvil
 - Para establecer la dosificación apropiada para el mortero aligerado MPC según el uso propuesto
- Analizar la bio-receptividad del mortero MPC fabricado, estudiando su compatibilidad con la especie de briófito escogida

c) Referencias

-
- 1 Marc Ottelé,
The Green Building Envelope: Vertical Greening
(2011) PhD thesis: Technical University of Delft, p. 2.
 - 2 El Mundo
(2015) Jardines en los cielos franceses
<http://www.elmundo.es/>
 - 3 Marc Ottelé,
The Green Building Envelope: Vertical Greening
(2011) PhD thesis: Technical University of Delft, p. 2
 - 4 Cruz, M., Beckett, R.
Bioreceptive design: A novel approach to biodigital materiality
(2016) Architectural Research Quarterly, 20 (1), pp. 51-64
 - 5 Ibid.
 - 6 Miller, A.Z., Sanmartín, P., Pereira-Pardo, L., Dionísio, A., Saiz-Jimenez, C., Macedo, M.F., Prieto, B.
Bioreceptivity of building stones: A review
(2012) Science of the Total Environment, 426, pp. 1-12
 - 7 Warscheid, Th., Braams, J.
Biodegradation of stone: A review
(2000) International Biodegradation and Biodegradation, 46 (4), pp. 343-368
 - 8 Griffin, P.S., Indictor, N., Koestler, R.J.
The biodegradation of stone: a review of deterioration mechanisms, conservation case histories, and treatment
(1991) International Biodegradation, 28 (1-4), pp. 187-207
 - 9 Coutinho, M.L., Miller, A.Z., Macedo, M.F.
Biological colonization and biodegradation of architectural ceramic materials: An overview
(2015) Journal of Cultural Heritage, 16 (5), pp. 759-777
 - 10 García A.
Paisajes de ruinas en la pintura del Romanticismo español: un breve recorrido
(2015) Mito, Revista Cultural, 39
<http://revistamito.com/paisajes-de-ruinas-en-la-pintura-del-romanticismo-espanol-un-breve-recorrido/>
 - 11 Guillitte, O.
Bioreceptivity: a new concept for building ecology studies
(1995) Science of the Total Environment, 167 (1-3), pp. 215-220

Introducción

a) Contexto general de la sostenibilidad en la edificación

Definición de sostenibilidad

Es necesario clarificar a qué nos referimos cuando hablamos de sostenibilidad, puesto que el adjetivo sostenible, ha pasado a ser un lugar común que se usa para caracterizar como bueno y beneficioso cualquier campo de actividad del ser humano, lo que en la mayor parte de las ocasiones termina por vaciar de significado el término.

Si acudimos al diccionario de la RAE¹:

Sostenible: *adjetivo. Dicho de un proceso: Que puede mantenerse por sí mismo, como lo hace, por ejemplo, un desarrollo económico sin ayuda exterior ni merma de los recursos existentes.*

En ecología, la sostenibilidad se refiere al equilibrio de una especie con los recursos de su entorno. Por extensión se aplica a la explotación de un recurso por debajo del límite de renovación del mismo

Por tanto denominamos desarrollo sostenible a aquel que nos permite satisfacer nuestras necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas².

El marco general en que se desarrolla esta tesis es el de un sector, el de la construcción, que no solo es un gran consumidor de energía, sino que además es un gran generador de residuos, contribuyendo a agravar la problemática medio-ambiental existente.

Según el Parlamento Europeo, el 40% del consumo total de energía en la Unión Europea corresponde a los edificios³. En Alemania, casi el 60% de todos los residuos son generados por el sector de la construcción, ya que en la construcción el uso de materiales y métodos constructivos respetuosos con el reciclado tan sólo acaba de comenzar⁴.

A lo largo de la historia la humanidad ha erigido infinidad de construcciones, pero es al hilo de la explosión demográfica que se genera a mediados del siglo XX⁵, y en la que todavía estamos envueltos, cuando el sector de la edificación ha crecido mundialmente a un ritmo nunca visto antes.

Por ejemplo, en el sector de la edificación de nuestro país, si en 1950 existían en España 6.687.200 viviendas para aproximadamente 28.000.000 habitantes, en 2009 el número de viviendas alcanzaba las 26.768.715 viviendas para 45.000.000 habitantes. Es decir, el número de viviendas existentes se ha cuadruplicado en 60 años, aunque el número de habitantes no ha llegado a doblarse⁶.

Como vemos, los edificios llevan aparejados un enorme consumo energético, de recursos, y materias primas. Para evaluar adecuadamente el impacto ambiental que genera un edificio hay que evaluar todo su ciclo de vida; aunque el foco de atención está puesto todavía en caracterizar y legislar sobre la fase de uso de los edificios, también habría que considerar los impactos que se producen en:

- La obtención y transporte de materias primas
- La obtención y transporte de materiales constructivos
- El proceso de construcción
- Los residuos que se generan cuando termina su vida útil⁷

Sobre este último aspecto la comunicación *Towards a thematic strategy on the prevention and recycling of waste*⁸ pone de relieve que los residuos de construcción y demolición aumentan de año en año, tanto en volumen como en complejidad, hecho este último que limita la posibilidad de reutilización y reciclado de los mismos.

En general, desde los primeros asentamientos estables humanos hasta la Revolución Industrial el uso que se hacía de los recursos naturales no sobrepasaba la capacidad de la naturaleza para producirlos, así como tampoco se sobrepasaba la capacidad de la naturaleza para asimilar los residuos generados. Los materiales de construcción usados se producían localmente y las necesidades de los ocupantes de las viviendas eran mínimas si las comparamos con las actuales.

La historia de la construcción nos enseña que hasta que el ser humano desarrolló las complejas tecnologías actuales para climatizar el interior de los edificios, siempre había tenido muy en cuenta el entorno en el que se asentaba. La arquitectura vernácula propia de cada localización desarrollaba características propias⁹; por ejemplo, mientras que en zonas frías se buscaba la radiación solar, la luz y el calor, abriendo grandes huecos al sur, en zonas más cálidas los huecos se construían de menor dimensión para guarecerse del sol. La arquitectura se adaptaba a las características socio-económicas, culturales y físicas del entorno, usando materiales locales y desarrollando técnicas constructivas distintas en cada lugar.

Las sociedades pre-industriales tenían acceso a una cantidad muy limitada de fuentes de energía, ya fuera energía calorífica procedente de la combustión de la madera, o energía mecánica procedente del trabajo muscular humano o animal, por lo que su nivel máximo de productividad tenía que ser forzosamente bajo¹⁰.

A partir de la revolución industrial se transformó el poder productivo de las sociedades, a través de un vasto incremento de la productividad individual basado en el consumo de nuevas fuentes de energía. Este incremento de la productividad también se aplicó a los materiales empleados en la construcción, ya que estos se producen o se transportan empleando energía.

Los combustibles fósiles como fuente de energía han causado que durante décadas haya sido posible relegar el ahorro energético en la arquitectura como criterio determinante de diseño. El consumo de combustibles fósiles alimentó la ilusión de una energía barata y aparentemente inagotable. En Arabia Saudí, por ejemplo se estima que se emplea un tercio de su producción de petróleo para cubrir sus necesidades energéticas domésticas, porcentaje que, de no cambiar sus patrones de consumo, aumentará hasta el 50% hacia el año 2030¹¹.

Y en ese punto estamos actualmente: La economía globalmente se desarrolla a partir de un crecimiento sostenido en el consumo de recursos y en la generación de residuos. En esta sociedad industrial la mayor parte de los materiales extraídos de la litosfera son procesados y acaban degradados y vertidos sobre la delgada capa de la biosfera que recubre el planeta, condicionando la continuidad de la vida.

Pero dicho funcionamiento lineal está alcanzando sus límites, ya que se empieza a vislumbrar el agotamiento de algunos recursos naturales y de los combustibles fósiles¹².

Empieza a ser imperativo optimizar los recursos existentes, y acercarse al esquema circular imperante en la naturaleza, que es la gran máquina de reciclar, en el que los residuos de unos procesos son las materias primas de otros. A este efecto, en la Unión Europea se están empezando a implementar directrices políticas¹³.

El sector de la construcción tradicionalmente ha reproducido el esquema de funcionamiento lineal imperante en la economía actual: extraer, fabricar, utilizar y eliminar. Pero ahora está empezando a ser consciente de la necesidad de empezar a cambiar dicho esquema, así como de la oportunidad implícita en el concepto de economía circular¹⁴.

Como observamos en el siguiente gráfico (Ilustración 2), la población mundial del planeta ha aumentado vertiginosamente desde 1800, fecha que coincide con el apogeo de la primera revolución industrial^{15,16}.

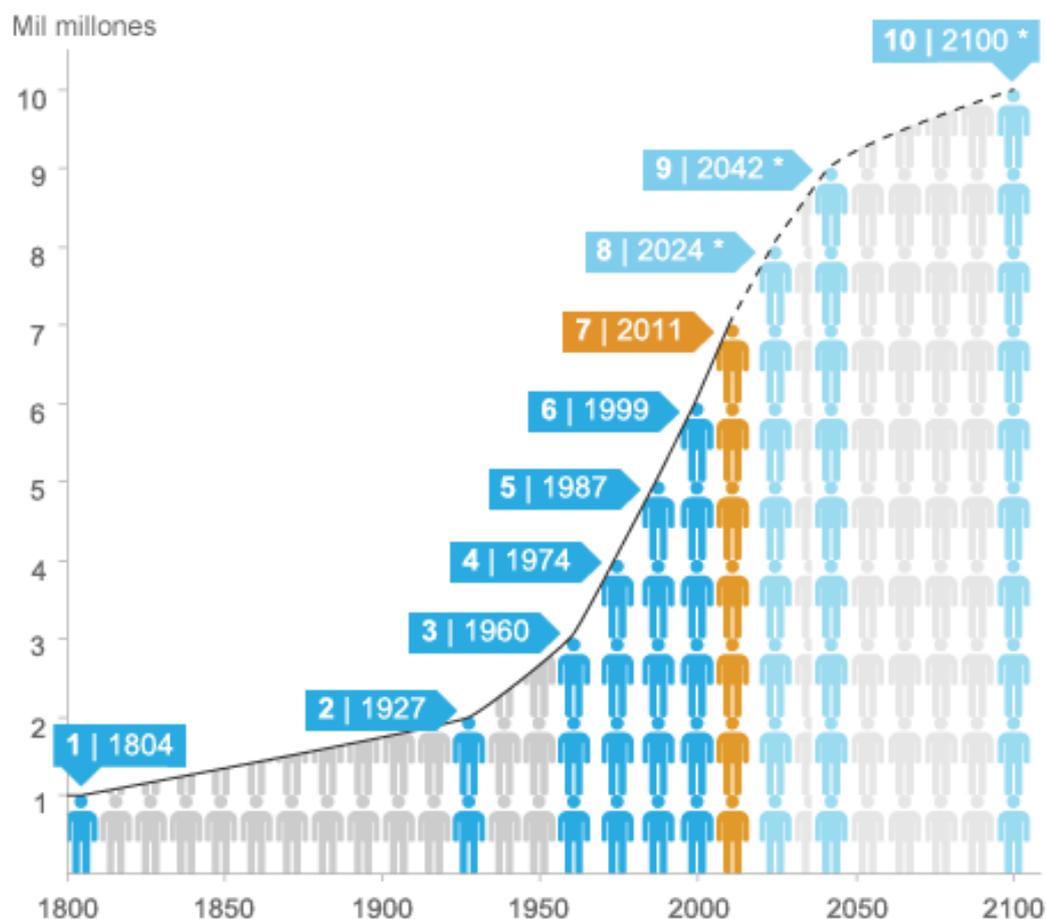


Ilustración 2: Cifras poblacionales futuras basadas en las predicciones de la ONU con una variante media Fuente: United Nations Population Fund, (UNFPA) <http://www.unfpa.org/>

En el momento de escribir estas líneas, 10 de Octubre de 2016, la población mundial asciende a 7.344.816.775 habitantes según el Reloj de la Población, un servicio ofrecido por la Oficina del Censo de los Estados Unidos¹⁷.

Independientemente de la exactitud del dato concreto, lo reseñable es que, en apenas 200 años, la población mundial se ha multiplicado por 7; y esta expansión no se ha estabilizado todavía, ya que la previsión es que la población de nuestro planeta seguirá creciendo hasta alcanzar los 10.000.000.000 de habitantes; no hay que obviar que, además, la tendencia natural de las personas es a intentar vivir cada vez mejor, lo que implica que de no implementarse un cambio de los hábitos de consumo, no sólo seremos cada vez más habitantes en el planeta, sino además habitantes más exigentes en cuanto al consumo de recursos materiales.

El rápido crecimiento demográfico no ha sido uniforme por todo el planeta; actualmente el mayor crecimiento se produce en las áreas planetarias más deprimidas. Mientras que la tasa de fertilidad en el período de 2010-2015 es de 1,7 para las mujeres de las áreas más desarrolladas del mundo, para las mujeres de las regiones menos desarrolladas es de 4,3¹⁸.

Dichas áreas, consumían pocos recursos comparadas con las zonas más prósperas del planeta debido a su retraso tecnológico, pero la situación está cambiando, como muestran los casos del consumo de agua en China y en la India¹⁹. El incremento del nivel de vida que se está produciendo hace que grandes bolsas de seres humanos, que antes practicaban una economía de pura subsistencia, ahora demanden bienes de consumo, lo que aumenta la presión sobre los recursos naturales.

Para valorar el nivel de exigencia medio-ambiental al que estamos sometiendo al planeta podemos recurrir al concepto de huella ecológica; La huella ecológica es un indicador que estudia el impacto ambiental generado por la demanda humana de los recursos existentes en los ecosistemas del planeta, y lo relaciona con la capacidad ecológica de la Tierra de regenerar dichos recursos.

Según la organización Global Footprint Network²⁰ ya en el año 2003 la huella ecológica de la humanidad era un 25 % mayor que la capacidad del planeta para producir estos recursos. Esto quiere decir que a la Tierra le llevaba 15 meses regenerar los recursos que gastábamos en 12 meses. Y esta brecha está aumentando.

Por otro lado, se tiene la certeza de que el clima del planeta está cambiando a un ritmo inusualmente rápido: Desde que la revolución industrial arrancó a lomos de la máquina de vapor y el consumo de energías fósiles, la concentración de CO₂ atmosférico ha ido aumentando a un ritmo que solo se explica teniendo en cuenta la influencia antropogénica. Este fenómeno recibe normalmente el nombre de "calentamiento global".

La concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera ha alcanzado una cifra récord a nivel mundial, 401 partes por millón (ppm) según las mediciones realizadas en septiembre de 2016 desde el Observatorio Mauna Loa²¹, en Hawai (Estados Unidos). Esto significa un crecimiento de casi el 40 por ciento desde la revolución industrial y la cifra más alta de los últimos 650.000 años.

Las consecuencias de esta alteración climática han sido ya muy considerables, y sin un cambio de rumbo, son potencialmente catastróficas. Según el Portal de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático²²:

- El efecto neto medio a nivel mundial de las actividades humanas desde 1750 ha sido el calentamiento, con un forzamiento radiativo de +1,6 W/m²
- La extensión media anual del hielo del Océano Ártico se ha reducido un 2,7 % por decenio.
- La superficie terrestre máxima que se llega a congelar cada año ha disminuido en cerca de un 7% en el hemisferio Norte desde 1900; esta disminución llega a ser hasta de un 15% en primavera. Las temperaturas en la parte superior de la capa de permafrost han aumentado hasta 3°C desde el decenio de 1980.
- Si las temperaturas durante milenios son entre 1,9 y 4,6°C más cálidas que en el período preindustrial, causarán el derretimiento de la capa de hielo de Groenlandia, lo que elevará el nivel del mar significativamente.
- Aun cuando las concentraciones de todos los gases de efecto invernadero y de los aerosoles se mantuviesen constantes en los niveles del año 2000, cabe esperar un calentamiento de cerca de 0,1°C cada decenio.
- Lejos de disminuir su ritmo de crecimiento, las emisiones y el calentamiento global se están acelerando

Al detectar el problema del cambio climático mundial, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) crearon el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en 1988.

El 5º informe de evaluación Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) concluye, con un 95 % de certeza, que la influencia humana sobre el clima es clara, y se evidencia a partir de los incrementos en las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, el incremento de la radiación, el calentamiento observado y el entendimiento del funcionamiento global del clima²³.

La función del IPCC consiste en analizar, de forma exhaustiva, objetiva, abierta y transparente, la información científica, técnica y socioeconómica relevante para entender los elementos científicos del riesgo que supone el cambio climático provocado por las actividades humanas, sus posibles repercusiones y las posibilidades de adaptación y atenuación del mismo.

El Informe Especial del IPCC sobre escenarios de emisiones (IEEE, 2000) proyecta un aumento de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI) de entre 25% y 90% (CO₂-eq) entre 2000 y 2030. Sus previsiones se recogen en la siguiente gráfica (Ilustración 3):

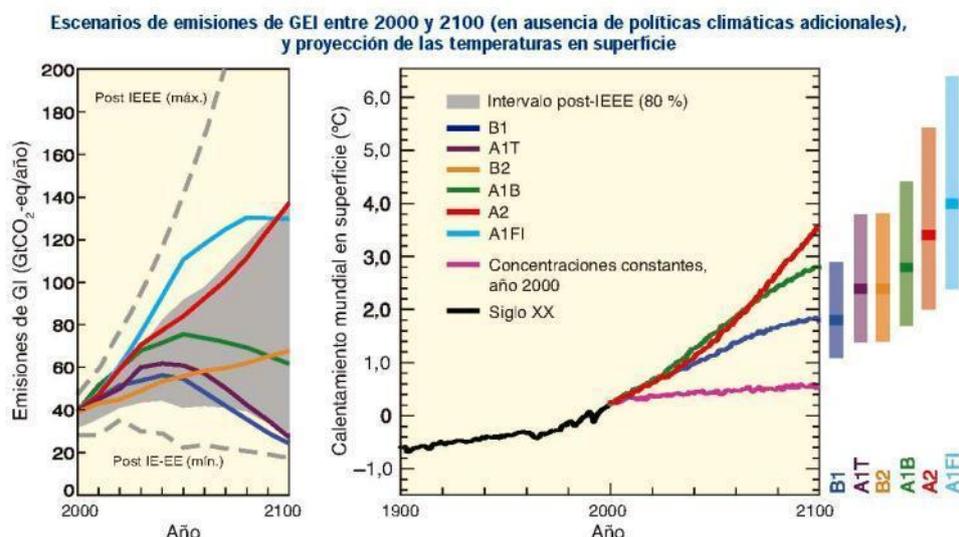


Ilustración 3:

Figura RRP-5. **Gráfica izquierda:** Emisiones mundiales de GEI (CO₂-eq) en ausencia de políticas climáticas: seis escenarios testimoniales IEIE ilustrativos (líneas de color), junto con el percentil 80 de escenarios recientes publicados desde el IEIE (post IEIE) (área sombreada en gris). Las líneas de trazos representan la totalidad de los escenarios mundiales post IEIE. Las emisiones abarcan los gases CO₂, CH₄, N₂O y F. **Gráfica derecha:** las líneas continuas representan promedios mundiales multimodelo del calentamiento en superficie para los escenarios A2, A1B y B1, representados como continuación de las simulaciones del siglo XX. Estas proyecciones reflejan también las emisiones de GEI y aerosoles de corta permanencia. La línea rosa no es un escenario, sino que corresponde a simulaciones de MCGAO en que las concentraciones atmosféricas se mantienen constantes en los valores del año 2000. Las barras de la derecha indican la estimación óptima (línea continua dentro de cada barra) y el intervalo probable evaluado para los seis escenarios testimoniales IEIE en el periodo 2090-2099. Todas las temperaturas corresponden al periodo 1980-1999. Fuente: Informe de síntesis IPCC 2007

A continuación (Ilustración 4) se muestra un resumen de los impactos asociados con el cambio anual medio mundial de la temperatura²⁴.

Ejemplos de impactos asociados con el cambio anual medio mundial de la temperatura (los impactos variarán en función del grado de adaptación, de la tasa del cambio de la temperatura y de la vía socioeconómica)

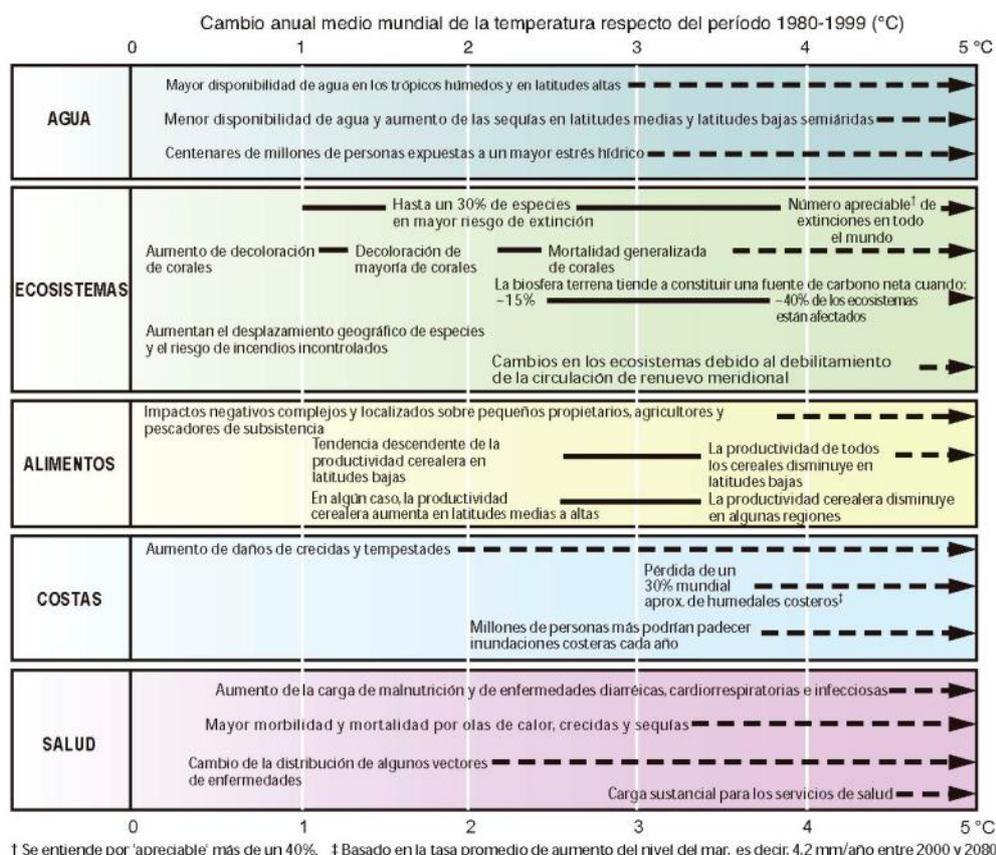


Ilustración 4: Fuente: Informe de síntesis IPCC 2007

Como se ve, estos escenarios hipotéticos indican la necesidad de actuar de manera rotunda para atenuar el impacto de las actividades humanas en el clima del planeta. El sector de la edificación parece todavía reticente a la necesidad de cambiar el modelo vigente por otro modelo más sostenible²⁵, pero alguna de las virtudes de los edificios sostenibles, como su mayor eficiencia energética, empiezan a ser demandados por la sociedad²⁶.

Historia de la sostenibilidad en la edificación

En los años setenta del siglo pasado comenzó a cuajar la preocupación latente sobre las consecuencias ambientales de la llamada Sociedad Industrial; de 1971 data el informe encargado por el Club de Roma "The Limits to growth (Los Límites al crecimiento)"²⁷, cuya tesis principal es que, "en un planeta limitado, las dinámicas de crecimiento exponencial (población y producto per cápita) no son sostenibles".

Posteriormente, en 1973, se produjo la primera crisis del petróleo, que generalizó la necesidad del ahorro energético. Los gobiernos se plantearon la búsqueda de fuentes de energía más seguras para reducir la dependencia de combustibles importados.

En los años ochenta se popularizó el concepto de "Desarrollo Sostenible", aparecido dentro del marco de las Naciones Unidas, en el Informe Brundtland. Este informe, cuyo nombre original es "Nuestro Futuro Común"²⁸ postulaba que la protección ambiental ya no era una tarea nacional o regional sino un problema global.

Producto de esta concienciación, progresivamente se han ido desarrollando esfuerzos notables en todos los campos, articulados mediante la aparición de documentos y normativas específicas; si bien es cierto que, estos esfuerzos son manifiestamente insuficientes y están muy irregularmente asumidos como para revertir la situación a corto plazo. Alguno de los documentos más importantes que están articulando a nivel internacional la lucha contra el cambio climático y por un desarrollo sostenible son:

- Carta de Aalborg, resultado de la Conferencia Europea de Ciudades y Pueblos Sostenibles realizada en 1994 en Dinamarca,
- Protocolo de Kioto, resultado del Convenio sobre el cambio climático del año 1997.

También es importante reseñar la importancia que han tenido las Conferencias de Naciones Unidas sobre el Medio ambiente y el Desarrollo, también conocidas como las Cumbres de la Tierra, como puntos de inflexión en el desarrollo de la política internacional del medio ambiente. Las cumbres se han celebrado en Estocolmo en 1972, Río de Janeiro en 1992, Johannesburgo en 2002, y de nuevo Río de Janeiro en 2012 (Conferencia de desarrollo sostenible Río+20).

Unión Europea: Legislación para mejorar la sostenibilidad de los edificios

En las últimas décadas la Unión Europea (UE) ha desarrollado un amplio rango de legislación ambiental. Como resultado de la aplicación de esta legislación, la contaminación en su agua, aire y suelo ha sido reducida significativamente, eliminándose el uso de muchos productos tóxicos o peligrosos para el medio ambiente²⁹.

En el informe de 2007 “Una Política energética para Europa”³⁰ la UE ha adoptado para 2020 los siguientes compromisos, en lo que se conoce como iniciativa 20-20-20:

- 20% de reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) sobre las cifras de 1990.
- 20% de reducción en el consumo de energía, también con referencia a 1990, promoviendo mayor eficiencia energética.
- 20% de la energía primaria consumida ha de proceder de fuentes renovables

El consumo de energía en los edificios residenciales y comerciales representa aproximadamente el 40% del consumo total de energía final y el 36% de las emisiones totales de CO₂ de la Unión Europea. Por este motivo, la Unión Europea ha ido desarrollado legislación para reducir esta demanda:

Directiva 2002/91³¹: Esta directiva, inspirada por el protocolo de Kyoto, estaba dirigida a mejorar la eficiencia energética de los edificios, y comprometía a la Unión Europea a reducir las emisiones de CO₂.

Directiva 2010/31³²: También relativa a la eficiencia energética de los edificios. Sus principales disposiciones pretenden:

- Proporcionar la metodología de cálculo para evaluar la eficiencia energética de los edificios
- Introducir el concepto de objetivo de edificios de consumo de energía casi nulo
- Desarrollar los Certificados de eficiencia energética.
- Desarrollar metodología para el control de los sistemas de climatización.

Directiva 2012/27³³: Aunque contiene directrices generales relativas a la eficiencia energética, también tiene directrices de aplicación en el caso de los edificios:

- Concreta las obligaciones ejemplarizantes de las Administraciones
- Obliga a los Estados miembros a renovar un porcentaje de edificios públicos
- Promueve la eficiencia en la calefacción y la refrigeración.
- Promueve establecer estrategias a largo plazo para movilizar inversiones en la renovación de edificios públicos y privados

España: Legislación para mejorar la sostenibilidad de los edificios

En este momento, y como consecuencia del deber de ir adaptando la legislación española a las directivas europeas, se han desarrollado diversas normativas relacionadas con la sostenibilidad y la eficiencia energética en el sector de la edificación:

- Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación, en particular el Documento Básico Ahorro de Energía
- Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.
- Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios.
- Real Decreto 233/2013, de 5 de abril, por el que se regula el Plan Estatal de fomento del alquiler de viviendas, la rehabilitación edificatoria, y la regeneración y renovación urbanas, 2013-2016.
- Ley 8/2013, de 26 de junio, de rehabilitación, regeneración y renovación urbanas.
- Otras normativas autonómicas y ordenanzas municipales.

Construcción Sostenible

La función general de un edificio es la protección del ser humano respecto de su entorno, por lo que un edificio, en general, debe cumplir las siguientes condiciones:

- Debe ser resistente y seguro
- Debe aislar al usuario frente a los agentes exteriores
- Debe estar preparado para resolver los problemas para los que ha sido diseñado.

La construcción sostenible cumple estas condiciones partiendo de un compromiso de respeto con el medio ambiente, y haciendo un uso responsable de la energía que se emplea en todas las fases de vida de las edificaciones. Tiene que considerar los efectos que los materiales de construcción, los sistemas constructivos y el diseño arquitectónico tienen en la salud humana.

Algunos principios que caracterizan la construcción sostenible son:

- Busca la integración con las características ambientales del entorno
- Es competitiva económicamente respecto a la construcción tradicional
- Ahorra recursos mediante el uso preciso de los materiales según sus características
- Usa materiales y técnicas constructivas locales
- Ahorra energía limitando la demanda de energía y aumentando la eficiencia energética de las instalaciones

- Estudia y utiliza de manera óptima las fuentes de energía (renovables y no renovables) disponibles en el sitio
- Prevé y minimiza la adecuada gestión de los residuos generados en fase de construcción y uso
- Incrementa la calidad a nivel de confort de los usuarios
- Genera construcciones fácilmente reciclables cuando termina su vida útil, maximizando la reutilización de los materiales usados

Partiendo de estas premisas concluimos que un edificio será sostenible si es capaz de:

- Consumir una mínima cantidad de energía y agua a lo largo de todo su ciclo de vida
- Usar como materias primas materiales que no perjudican el medio ambiente, renovables y caracterizados por su desmontabilidad
- Minimizar la energía gris usada en su construcción
- Minimizar los residuos generados a lo largo de su vida
- Utilizar un mínimo de terreno e integrarse correctamente en el ambiente natural
- Adaptarse a las necesidades actuales y futuras de los usuarios
- Generar un ambiente interior saludable para sus usuarios

Una vez que hemos enfocado la problemática general de la sostenibilidad, y hemos enunciado las características que definen el marco de lo que se considera construcción sostenible, pasaremos a concretar el ámbito de sistemas constructivos en el que se encuadra esta tesis.

b) Panorámica de la relación entre arquitectura y vegetación

Introducción

Existe en la arquitectura, entendida como disciplina histórica, un gran debate acerca de la relación del edificio con su emplazamiento. A lo largo de los años han cohabitado estrategias diferentes, encarnadas en los extremos que suponen la arquitectura vernácula y los primeros pasos del movimiento moderno. La arquitectura vernácula siempre ha surgido como una respuesta a las condiciones del entorno, variando sus características en función de su emplazamiento; la arquitectura que el Movimiento Moderno promulgó en los primeros años de la década de 1920 era internacional, las viviendas se entendían como “máquinas de habitar” que, al igual que el recién popularizado automóvil, podían ser fabricadas industrialmente, iguales para cualquier entorno³⁴.

Pero incluso entre estrategias tan opuestas ante el hecho de construir un edificio, se mantiene una constante: la relación con la vegetación y la naturaleza es deseable. La arquitectura vernácula siempre se ha organizado desde una adecuada simbiosis con su entorno; por el otro extremo, Le Corbusier, uno de los principales impulsores del movimiento Moderno, dedica uno de sus famosos “cinco puntos de una nueva arquitectura” a la terraza-jardín: la superficie ocupada a la naturaleza por la vivienda debía de ser devuelta en forma de jardín en la cubierta del edificio, convirtiendo el espacio sobre la vivienda en un ámbito aprovechable para el esparcimiento, que además permitía mantener condiciones de aislamiento térmico sobre las nuevas losas de hormigón.

Si atendemos al urbanismo de nuestro entorno, veremos que no hay un instrumento de ordenación de un municipio que no incluya un porcentaje de suelo reservado para zonas verdes, normativa respecto a parques, jardines, prescripciones sobre arbolado...

Aunque el ser humano, al evolucionar y volverse sedentario, ha abandonado el contacto continuo que hasta entonces mantenía con la naturaleza, necesita vivir en entornos en los que la naturaleza esté presente.

Por eso, desde el origen de la civilización urbana, existe una tendencia a buscar soluciones constructivas que incorporen a nuestras ciudades vegetación y naturaleza. Pensemos que una de las Maravillas de mundo antiguo eran los jardines colgantes de Babilonia³⁵.

Uso especies vegetales vivas en construcción

Hasta la llegada de la revolución industrial, el ser humano ha desarrollado técnicas de construcción basadas en el material local del que dispusiera en abundancia en su entorno; si en el entorno existían canteras de piedra, desarrollaba técnicas de construcción con piedra; si no disponía de canteras de piedra, pues desarrollaba técnicas para construir con paja y barro y construía con adobes; obviamente, los humanos hemos usado como material de construcción cualquier especie vegetal para la cual hemos sido capaces de encontrar utilidad, ya fuera madera como elemento estructural y componente de cerramientos, paja para techos y fachadas...³⁶

Hemos desarrollado, así mismo, estrategias de simbiosis con especies vegetales vivas. No nos vamos a detener aquí en el uso que se hace de la vegetación en el urbanismo, sino solo en el uso de la vegetación en cuanto elemento constituyente de un sistema constructivo. El uso de especies vegetales vivas en construcción tiene las siguientes ventajas:

- Protección frente a la radiación solar; algunas plantas incorporadas a la envolvente de una edificación proporcionan protección contra una excesiva radiación solar, lo que incide en importantes ahorros sobre el sistema de climatización en los períodos cálidos³⁷
³⁸.
- Aislamiento térmico: dependiendo de la disposición constructiva, la especie vegetal o el sustrato sobre el que se dispone la especie, proporciona un incremento del aislamiento térmico de la envolvente de la construcción mediante la creación de una cámara de aire. Además, el follaje reduce el flujo de viento sobre los cerramientos del edificio, disminuyendo así las pérdidas energéticas por convección³⁹.
- Aislamiento acústico: Incorporar vegetación a la envolvente de un edificio incrementa su aislamiento acústico⁴⁰.
- Reducción del efecto de isla de calor en las ciudades: La disposición de fachadas vegetales mitiga el efecto isla de calor en los entornos urbanos, aumentando la humedad relativa y disminuyendo la temperatura del aire⁴¹. A través de la evaporación del agua que retienen las plantas generan enfriamiento evaporativo, y disminuye la radiación que emiten las fachadas respecto a la que emiten las superficies de los cerramientos de edificios usuales¹⁸.
- Reducción de la radiación ultravioleta incidente sobre la envolvente del edificio, lo que aumenta la vida útil de aquellos materiales especialmente sensibles a este tipo de radiación (plásticos, pinturas...)⁴²
- Mejoran la calidad del aire: Las envolventes vegetales en los edificios son capaces de reducir la contaminación del aire, a través de la absorción de dióxido de carbono y la liberación de oxígeno en el proceso de la fotosíntesis, pero también reduciendo otros contaminantes contenidos en el aire, como óxidos de nitrógeno, componentes orgánicos volátiles y polvo^{43 44}

- Efectos positivos para el bienestar de los usuarios de los edificios: Los usuarios de edificios con envolvente vegetal consideran que esta solución constructiva aporta una mejora estética, una adecuada integración entre medio urbano y naturaleza, efectos beneficiosos sobre su bienestar y su medio-ambiente⁴⁵.
- Mejorar la gestión del agua en el medio urbano: El uso de especies vegetales permite mejorar la gestión de las precipitaciones atmosféricas en el medio urbano, ralentizando la llegada de agua a los sistemas de alcantarillado, actuando como un tanque de tormentas natural, mejorando la escorrentía en el medio urbano, y permitiendo la instalación de sistemas de almacenamiento de aguas procedente de precipitaciones en el edificio para su propio abastecimiento⁴⁶.
- Incrementan la biodiversidad urbana: Según la solución constructiva empleada una envolvente vegetal proporciona un hábitat adecuado para algunas especies animales, como pájaros⁴⁷.

No todos los sistemas constructivos que generan una envolvente vegetal en el edificio aportarán todas estas ventajas, puesto que existen muchas variantes y disposiciones posibles, cada una con sus peculiaridades. Además, no se puede obviar que el uso de vegetación como un componente de los cerramientos de los edificios tiene también inconvenientes:

- No todos los sistemas de incluir vegetación en la envolvente de un edificio son sostenibles en cualquier circunstancia o clima. A través del análisis del ciclo de vida de varios sistemas se concluye que hay sistemas que no compensan a lo largo de su vida útil los gastos energéticos o la contaminación generados durante su ciclo de vida. Muchos sistemas, especialmente de fachadas, son técnicamente complicados y caros de mantener, necesitando además de cuidados de jardinería intensivos y gran aporte hídrico. Muchas instalaciones de estos sistemas obedecen más a criterios de marketing que a criterios de sostenibilidad⁴⁸.
- Implantar vegetación en la envolvente de un edificio tiene un coste económico elevado; ya sea en cubierta o en fachada, la disposición de vegetación implica la disposición de un sustrato, lo que puede repercutir en mayores cargas transmitidas a la estructura, redes de riego, necesidades de mantenimiento generalmente elevadas... La repercusión económica que esto genera retrae mucho la demanda de estos sistemas, puesto que los gastos económicos que generan tienen mucha visibilidad, pero los beneficios económicos no tanta. Los ahorros económicos que genera la mejora de la envolvente han de ser cuantificados adecuadamente mediante una auditoría energética para poder ser apreciados.
- Un porcentaje, no elevado pero no desdeñable, de los usuarios de los edificios aprecian como no deseable los ecosistemas animales asociados (pájaros, arañas, "bichos"...) a las envolventes edificatorias que incorporan especies vegetales⁴⁹.

Los sistemas constructivos que emplean vegetación como componente de la envolvente edificatoria se pueden dividir en dos grandes grupos:

- Sistemas constructivos horizontales: Cubiertas verdes o cubiertas ajardinadas; son cubiertas horizontales (cubiertas planas) o con una determinada inclinación, en España normalmente por debajo del 40-45% (cubiertas inclinadas) que incorporan como capa de acabado una especie vegetal sobre un sustrato.
- Sistemas constructivos verticales: Fachadas verdes, fachadas vegetales, jardines verticales; son sistemas que disponen vegetación en vertical mediante tipologías constructivas muy heterogéneas y con funciones muy diversas, desde la puramente ornamental hasta constituir parte básica de la envolvente térmica del edificio.

Cubiertas ajardinadas

Las cubiertas verdes o ajardinadas son una tipología arquitectónica consolidada, con numerosísimos ejemplos construidos y una bien asentada estructura industrial y comercial. A tal efecto esto es así, que en la actualidad las ciudades de Toronto y Copenhague han legislado obligando a realizar cubiertas con vegetación en algunos supuestos. No procede extenderse sobre sus características puesto que, por su disposición básicamente horizontal, su problemática se aleja del objeto de estudio de esta tesis.

El tema de esta tesis se encuadra dentro del grupo de los sistemas constructivos verticales.

c) Estructura de la tesis

La tesis doctoral se ha organizado en una introducción, 8 capítulos, y unas conclusiones finales; cada capítulo desarrolla una parte específica:

- **Capítulo 1**, "Sistemas de fachadas verdes": tras una breve introducción histórica, se describen los principales sistemas de fachadas verdes existentes, reflejando la problemática relacionada con disponer vegetación en superficies verticales
- **Capítulo 2**, "Componentes del sistema propuesto: Briófito tapizante": Se recogen diversos motivos para escoger un briófito frente a otros vegetales en el sistema propuesto, se describen las principales características generales de los briófitos, se revisa el empleo de briófitos en construcción y se propone y caracteriza una especie adecuada para su empleo en la tesis
- **Capítulo 3**, "Bio-receptividad": Se explica el concepto de material bio-receptivo, y se recogen las diversas líneas de investigación en curso
- **Capítulo 4**, "Componentes del sistema propuesto: Mortero aligerado bio-receptivo": Tras definir las características deseables en el material a emplear como soporte resistente del sistema descrito en la tesis, se razona la elección de un mortero frente a otros materiales analizados, y como se aumenta su bio-receptividad mediante el empleo de morteros tipo MPC
- **Capítulo 5**, "Elaboración del mortero bio-receptivo propuesto": Se caracterizan los componentes del mortero MPC propuesto, y se explica el proceso que lleva a una optimizar una dosificación a emplear en la fase experimental
- **Capítulo 6**, "Conjunto soporte+briófito": Se detallan diversos métodos de cultivo de los briófitos, reflejando su problemática, y se propone un método preferente para ser empleado en la tesis
- **Capítulo 7**, "Experimental muestras MPC": Se describen diversos ensayos efectuados sobre muestras de mortero MPC con el fin de caracterizar el material fabricado
- **Capítulo 8**, "Experimental bio-receptividad": Se describen los ensayos realizados para evaluar la bio-receptividad del mortero MPC fabricado

Cada capítulo de la tesis contiene, al final de su redacción, un apartado detallando las referencias bibliográficas consultadas.

Basándonos en el contenido de los diferentes capítulos, al final de la presente tesis se incluye un capítulo final que recoge las conclusiones más relevantes obtenidas, así como posibles líneas de investigación futuras.

Por último se incluye un apéndice en el que se describe la producción científica relacionada con la tesis doctoral.

d) Referencias

-
- 1 Real Academia Española
(2014) Diccionario de la lengua española
 - 2 World Commission on Environment and Development
Our Common Future.
(1987) Oxford. Oxford University Press
 - 3 Parlamento Europeo, Consejo de la Unión Europea
Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición)
(2010) Diario Oficial nº L 153 de 18/06/2010 p. 13-35
 - 4 Sobek, W., Brenner, V., Michaely, P.
El edificio como almacén de recursos: Práctica en la construcción reciclada
(2012) Detail Green, edición española, 07/2012, pp.670-673
 - 5 Reher, D., Requena, M.
The mid-twentieth century fertility boom from a global perspective
(2015) History of the Family, 20 (3), pp. 420-445.
 - 6 Banco de España
Indicadores del Mercado de la Vivienda
(2015) Síntesis de Indicadores
 - 7 Zeumer, M., John, V., Haetwig, J.
Uso sostenible de los materiales. Energía gris en el ciclo de vida útil
(2009) Detail Green, edición española, 07/2012, pp.808-812
 - 8 European Commission´s Enviroment
Towards a thematic strategy on the prevention and recycling of waste
(2003) Official Journal C 76
 - 9 Pérez, J
¿Qué es la arquitectura vernácula? Historia y concepto de un patrimonio cultural específico
(2016) Valladolid. Universidad de Valladolid
 - 10 Wrigley, E.A.
Energy and the English industrial revolution
(2015) Energy and the English Industrial Revolution, pp. 1-272.
 - 11 Elgendy, K.
Sostenibilidad en el desierto
(2012) Detail Green, edición española, 02/2012, pp.130-135
 - 12 Haas, W., Krausmann, F., Wiedenhofer, D., Heinz, M.
How circular is the global economy?: An assessment of material flows, waste production, and recycling in the European union and the world in 2005
(2015) Journal of Industrial Ecology, 19 (5), pp. 765-777
 - 13 Comisión Europea
Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones hacia una economía circular: un programa de cero residuos para Europa
(2014) * COM/2014/0398 final */
 - 14 Smol, M., Kulczycka, J., Henclik, A., Gorazda, K., Wzorek, Z.
The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy
(2015) Journal of Cleaner Production, 95, pp. 45-54
 - 15 Beard, C.A., Powell, F.Y.
The industrial revolution
(2013) The Industrial Revolution, pp. 1-106.
 - 16 Fondo de Población de la ONU, UNFPA
(2011) Cifras poblacionales futuras basadas en las predicciones de la ONU con una variante media

-
- 17 Oficina del Censo de los Estados Unidos
Reloj de la población
(2016) <http://www.census.gov/popclock/>
- 18 United Nations Population Fund
World Population Dashboard. ICPD Goals and Demographic Indicators 2015
<http://www.unfpa.org/world-population-dash-board>
- 19 Tortajada, C.
Policy dimensions of development and financing of water infrastructure: The cases of China and India
(2016) *Environmental Science and Policy*, 64, pp. 177-187.
- 20 Global Footprint Network
Special Announcement: Living Planet Report 2006 outlines scenarios for humanity's future
(2006) *Footprint Network News: The newsletter of the Global Footprint Network*
- 21 Earth System Research Laboratory
Atmospheric CO2 at Mauna Loa Observatory
(2016) <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/obop/mlo/>
- 22 Portal de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
A Strong Scientific Consensus
(2013) <http://www.un.org/climatechange/es/the-science/>
- 23 La ONU y el cambio climático
A Strong Scientific Consensus
<http://www.un.org/climatechange/es/the-science/>
(2013) IPCC, 2013: Cambio climático 2013: Informe de síntesis
- 24 Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático PNUMA
Ejemplos de impactos asociados con el cambio anual medio mundial de la temperatura
(2007) IPCC, 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis, pp. 10
- 25 Tatari, O., Kucukvar, M.
Sustainability assessment of U.S. construction sectors: Ecosystems perspective
(2012) *Journal of Construction Engineering and Management*, 138 (8), pp. 918-922.
- 26 Berardi, U.
Sustainability Assessment in the Construction Sector: Rating Systems and Rated Buildings
(2012) *Sustainable Development*, 20 (6), pp. 411-424.
- 27 DH Meadows, DL Meadows, J Randers
The Limits to Growth
(1972) *Universe Book*
- 28 World Commission on Environment and Development
Our Common Future.
(1987). Oxford: Oxford University Press
- 29 European Commission
General Union Environment Action Programme to 2020
(2014) <http://ec.europa.eu/environment/newprg/>
- 30 Comisión Europea
Comunicación de la Comisión al Consejo Europeo y al Parlamento Europeo, de 10 de enero de 2007, "Una política energética para Europa"
(2007) * COM/2007/0001 final */
- 31 Parlamento Europeo, Consejo de la Unión Europea
Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2002, relativa a la eficiencia energética de los edificios
(2002) *Diario Oficial n° L 001 de 04/01/2003 p. 0065-0071*
- 32 Parlamento Europeo, Consejo de la Unión Europea
Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición)
(2010) *Diario Oficial n° L 153 de 18/06/2010 p. 13-35*

-
- 33 Parlamento Europeo, Consejo de la Unión Europea
Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética, por la que se modifican las Directivas 2009/125/CE y 2010/30/UE, y por la que se derogan las Directivas 2004/8/CE y 2006/32/CE (2012) Diario Oficial n° L 315 de 14/11/2012 p. 1-56
- 34 Montaner, J.M.
Ensayo sobre arquitectura moderna y lugar
(1993) Conferencias impartidas en 1993 en la Universidad Menéndez Pelayo de Santander
- 35 Zhiqiang Zhai, Jonathan M. Previtali
Ancient vernacular architecture: characteristics categorization and energy performance evaluation
(2010) *Energy and Buildings*, 42, pp. 357-365.
- 36 Zhiqiang Zhai, Jonathan M. Previtali
Ancient vernacular architecture: characteristics categorization and energy performance evaluation
(2010) *Energy and Buildings*, 42, pp. 357-365.
- 37 Touceda, M.I., Olivieri, F., Neila, J.
Energy efficiency of a pre-vegetated modular facade prototype
(2011) PLEA 2011 - Architecture and Sustainable Development, Conference Proceedings of the 27th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, pp. 733-738.
- 38 Haggag, M.A., Elmasry, S.K., Hassan, A.
Design with nature: Integrating green façades into sustainable buildings with reference to Abu Dhabi
(2012) *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 160, pp. 37-47.
- 39 Ottelé, M., Perini, K., Fraaij, A.L.A., Haas, E.M., Raiteri, R.
Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems
(2011) *Energy and Buildings*, 43 (12), pp. 3419-3429.
- 40 Van Renterghem, T., Hornikx, M., Forssen, J., Botteldooren, D.
The potential of building envelope greening to achieve quietness
(2013) *Building and Environment* 61, pp. 34-44.
- 41 Olivieri, F., Vidal, P., Guerra, R., Chanampa, M., García, J., Bedoya, C.
Green façades for urban comfort improvement : Implementation in a extreme continental mediterranean climate
(2012) Proceedings - 28th International PLEA Conference on Sustainable Architecture + Urban Design: Opportunities, Limits and Needs - Towards an Environmentally Responsible Architecture, PLEA 2012, 6 p.
- 42 Ottelé, M., Perini, K., Fraaij, A.L.A., Haas, E.M., Raiteri, R.
Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems
(2011) *Energy and Buildings*, 43 (12), pp. 3419-3429.
- 43 Berardi, U., GhaffarianHoseini, Am., GhaffarianHoseini A.
State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs
(2014) *Applied Energy* 115, pp. 411-428.
- 44 Jacob Thottathil, V., Balamuralikrishna, C., Ghosh, S.
Role of green facades in creating sustainable environments: Comparing chemical analyses and Sem images to quantify the atmospheric cleansing by green creepers
(2011) *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 77, pp. 343-346.
- 45 Valesan, M., Fedrizzi, B., Sattler, M.A.
Residential buildings with green walls: Advantages, disadvantages and symbols evoked by the use of ficus pumila and parthenocissus tricuspidata species
(2011) PLEA 2011 - Architecture and Sustainable Development, Conference Proceedings of the 27th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, pp. 727-732.
- 46 Lee, J.Y., Moon, H.J., Kim, T.I., Kim, H.W., Han, M.Y.
Quantitative analysis on the urban flood mitigation effect by the extensive green roof system
(2013) *Environmental Pollution*, 181, pp. 257-261.
- 47 Koehler, M.
Plant survival research and biodiversity: lessons from Europe
(2003) *Greening rooftops for sustainable communities*, pp. 313-22.
- 48 Feng, H., Hewage, K.
Lifecycle assessment of living walls: air purification and energy performance
(2014) *Journal of Cleaner Production*, 69, pp. 91-99.

49 Valesan, M., Fedrizzi, B., Sattler, M.A.

Residential buildings with green walls: Advantages, disadvantages and symbols evoked by the use of ficus pumila and parthenocissus tricuspidata species

(2011) PLEA 2011 - Architecture and Sustainable Development, Conference Proceedings of the 27th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, pp. 727-732.

1. Sistemas de fachadas verdes

1.1. Introducción: breve historia

El artículo "Green facades, a view back and some visions" de Manfred Köhler ¹ es un estudio retrospectivo de las fachadas verdes, con especial énfasis en su evolución histórica en Alemania. Según dicho artículo, la integración de vegetación viva en las fachadas de los edificios no es ninguna novedad; a lo largo de la historia han existido múltiples ejemplos de la integración de vegetación en las fachadas de las edificaciones.

Desde hace 2000 años, hay constancia del uso de vides integradas en las fachadas de edificaciones como una forma temprana de jardines verticales. Proporcionaban sombreado, enfriamiento evaporativo y se podían recolectar sus frutos.

Hace 500 años, en Europa central, fueron muy populares vides, rosales trepadores y emparrados de frutales. En muchas zonas rurales existía la tradición de realizar decoración vertical con flores de temporada, y en muchas zonas urbanas era muy habitual ver plantas trepadoras en fachadas.

La importancia de las plantas trepadoras en la arquitectura de los albores del siglo XX está bien documentada; de esa época existe una abundante bibliografía disponible sobre fachadas verdes, mucho más importante que la que existe sobre cubiertas verdes. Mucha de esta bibliografía específica versaba sobre nuevas especies de plantas trepadoras, tanto para desarrollos urbanísticos de viviendas para la clase media como para barracones para las clases más desfavorecidas, donde se ponía el acento en la total cobertura verde de sus fachadas. Las especies de plantas trepadoras, como la hiedra, eran a menudo una opción preferible para los propietarios antes que las fachadas ornamentadas de ladrillo.

Hacia finales de la década de 1970, la aportación de artistas como "Hundertwasser" y diversos urbanistas originó la concepción de las fachadas verdes como un medio de hacer más amable el entorno urbano y mejorar la calidad de las ciudades (Ilustración 5). Esto derivó, por ejemplo, en la existencia de un programa de incentivos para instalar fachadas verdes en Berlín durante las décadas de 1980 y 1990. Las fachadas verdes dejaron de usarse por motivos básicamente estéticos, la fachada verde como ornamento, para pasar a ser consideradas elementos constructivos que aportan valores ecológicos y económicos, como ahorros energéticos, mejora de la biodiversidad urbana, mejora del clima urbano...²



Ilustración 5: Hundertwasserhaus (1983) Viena, Kegelgasse 34-38, fuente página web información turística de Viena

En la actualidad, en la compleja situación medio-ambiental en la que estamos inmersos, se ha popularizado el desarrollo de fachadas verdes. Existen muchas investigaciones en marcha para valorar las virtudes ecológicas de estos sistemas, algunas de las cuales se emplean como bibliografía en la presente tesis. Se realizan estudios sobre el efecto de sombreado que producen sobre las fachadas, la climatización que generan a través del enfriamiento evaporativo... pero, es importante señalar que los estudios que implican el uso de vegetación son complicados, debido a la dependencia de los factores climáticos, las diferentes especies usadas³...

De todos modos, estos estudios están paliando uno de los principales problemas asociados al uso de fachadas vegetales: la bibliografía existente hasta hace unos años estimaba una serie de beneficios que las fachadas verdes aportaban, pero no los cuantificaban.

1.2. Problemática

Los sistemas de fachadas verdes pueden emplearse tanto en obra nueva como en rehabilitación de envolventes. En ambas situaciones es posible alcanzar una elevada integración de la fachada verde en la envolvente del edificio mediante la combinación adecuada de las funciones de cada sistema. En obra nueva, una fachada verde constituye el elemento de acabado que protege el resto de los componentes de la fachada de las inclemencias meteorológicas. En rehabilitación, es muy fácil implementar aislamiento térmico como componente del sistema de fachada verde.

La novedad de este tipo de sistemas hace que, en consecuencia, su utilización generalmente no esté prevista por los instrumentos de planeamiento urbanístico; a modo de ejemplo, en nuestro país, las normas subsidiarias de planeamiento municipal en el ámbito provincial de Burgos, especifican una serie de requerimientos estéticos que implican el uso de materiales análogos a los tradicionales (piedras naturales, revocos...)⁴. Dadas estas especificaciones, al técnico supervisor del proyecto le resulta conflictivo la aprobación del uso de sistemas de fachadas verdes.

Este ejemplo es extrapolable, al menos en España, al resto de la normativa técnica de edificación vigente, que no suele recoger en sus enunciados la utilización de estos sistemas.

Dificultad de plantar en vertical

Plantar especies vegetales en un sustrato vertical altera las condiciones (sustratos sensiblemente horizontales) en las que normalmente se desempeñan dichas especies.

Según la empresa urbanarbolismo⁵, especializada en la integración de arquitectura y naturaleza, parte fundamental de la clave el éxito de un jardín vertical reside en el medio de plantación (sustrato) y en lograr su equilibrio químico y biológico.

Toda la vida vegetal depende de las interacciones entre el agua y el sustrato. En la naturaleza, el sustrato contiene elementos que ayudan a mantener estable el pH, el suelo está estructurado con microorganismos, micorrizas (simbiosis establecidas entre familias de hongos y las raíces de las plantas)...

Estos elementos realizan funciones específicas dentro de una compleja red de sistemas auto-regulados, lo que crea unas condiciones estables para la vida. Cuando situamos un sustrato en vertical, tal y como se describe en el blog especializado de la citada empresa, este equilibrio se trastoca y tenemos que solucionar los siguientes problemas:

- La resistencia mecánica del sustrato, con el fin de evitar desplazamientos y erosión.
- La desaparición de la interacción microbiana a lo largo de todo el sustrato, que sucede cuando este está compartimentado en celdas.
- El agotamiento de los nutrientes del sustrato.
- La aparición gradual de un exceso de sales minerales debido a la interacción iónica entre el sustrato y los nutrientes de la fertirrigación.

Teniendo en cuenta estos problemas, se pueden considerar unas propiedades que permiten evaluar la idoneidad de un jardín vertical; según los especialistas en jardines verticales de urbanarbolismo, dichas propiedades son:

- La resistencia mecánica del sustrato. Es la capacidad del sustrato de conservar su estructura a lo largo del tiempo y está directamente relacionado con la durabilidad del jardín vertical. Determinados sustratos pierden la estructura más rápidamente, se "lavan".
- La durabilidad química. Es la vida útil del sustrato cuando es sometido a las condiciones de fertirrigación necesarias para su funcionamiento. Determinados sustratos se colmatan de sales más rápidamente que otros.
- La retención de agua. Es la capacidad de un jardín vertical de sobrevivir sin necesidad de riego. En general, los jardines hidropónicos (hay excepciones) requieren una circulación continua de riego que, en caso de fallo, conduce al fracaso del jardín vertical en un periodo muy corto de tiempo.
- La retención de nutrientes. Es la capacidad de un jardín vertical de sobrevivir sin aportación de nutrientes a través de fertirrigación. Los sistemas con sustrato tienen esta capacidad, los hidropónicos puros no.
- La facilidad de sustitución de la plantación. La capacidad para sustituir fácilmente las plantas que han fallado es de vital importancia; en algunos sistemas de jardinería vertical, esta sustitución se realiza planta a planta; otros sólo permiten sustituir paneles o macetas; en otros sistemas, la sustitución puede suponer un problema por caída de sustrato, suciedad...
- Facilidad en la sustitución de riego. El riego en un sistema de jardinería vertical debe ser perfectamente accesible y reemplazable en caso de fallo sin afectar al jardín. En algunos sistemas las conducciones de riego quedan ocultas en la parte trasera de los paneles y son difícilmente accesibles.
- Complejidad del sistema de riego y fertirrigación. Unos sistemas de jardinería vertical solo requieren sencillos sistemas de abonado y control de riego, otros necesitan complejos sistemas de filtrado, control de los parámetros de riego (conductividad, pH, humedad...) y tele-gestión.
- Variedad de plantación. Unos sistemas permiten una amplia gama de especies vegetales mientras que otros solo permiten determinadas variedades que deben adaptarse a situaciones específicas (climáticas, del sustrato, de humedad, tolerancia a la acidez o a la variación de pH...).
- Resistencia al frío. En climas fríos, algunos sistemas presentan problemas de congelación de las raíces; por regla general, conforme más grueso y mejor aislado está el sustrato mejor comportamiento tiene el jardín vertical.
- Peso. El peso del sistema es una variable muy importante a considerar sobre todo en la actuación sobre fachadas ya existentes.

1.3. Descripción de los principales sistemas existentes

En este apartado de la presente tesis doctoral se describen los principales sistemas existentes a nivel mundial.

Un problema a la hora de hablar de fachadas verdes, o de jardines verticales, o de fachadas vegetales, entendidas como sistemas constructivos que disponen especies vegetales en vertical, es su gran heterogeneidad. Bajo estos conceptos se engloban sistemas con disposiciones muy distintas que responden a diversas funciones. Pasaremos a describir ahora los principales tipos de sistemas existentes, tomando como referencia la clasificación propuesta en el artículo "Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review".⁶

Fachadas verdes con plantas trepadoras o arbustos colgantes. Green façades

Normalmente, la denominación *green façade* se refiere a la disposición de plantas trepadoras sujetas directamente por sí mismas a las fachadas o a través de una sub-estructura.

Como ya se ha señalado antes, el uso de plantas trepadoras en la fachada de los edificios es habitual en la historia de la arquitectura.

La práctica más antigua, consiste en el crecimiento de plantas trepadoras directamente sobre la fachada terminada de un edificio. Estas plantas enraízan directamente en la tierra, y crecen colonizando la fachada, utilizándola como soporte (Ilustración 6). Normalmente se usan plantas como la hiedra, en variedades de hoja perenne o caduca.

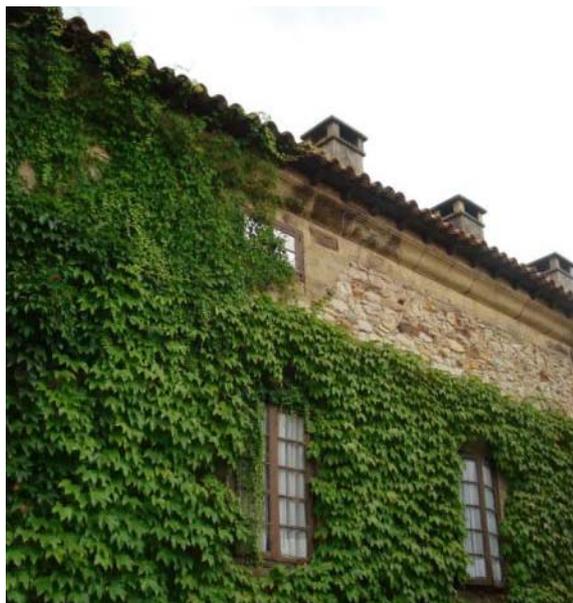


Ilustración 6: Fachada colonizada por plantas trepadoras. Fuente desconocida

En un acercamiento más contemporáneo, se han empleado las cortinas vegetales, una variedad de fachadas de doble piel; en las cortinas vegetales se separan las plantas de la superficie de la fachada, con el objeto de evitar potenciales problemas derivados de conectar el edificio a organismos vivos. Se emplean estructuras secundarias, como mallas, estructuras de cables... que constituyen el soporte necesario para el crecimiento de las plantas, generando a su vez una cámara de aire entre la especie vegetal y la superficie de la fachada del edificio (Ilustración 7). También se usan hiedras, aunque debido a la variedad de soportes que se pueden emplear existen muchas otras especies de plantas trepadoras que igualmente son adecuadas.



Ilustración 7: Fachada, *Our Mercy College*, Sidney, Australia. Fuente "Green walls, green roofs", Images Publishing

Otro enfoque diferente es el empleo de maceteros perimetrales de los que cuelgan arbustos constituyendo otra variedad de cortina vegetal alrededor del edificio. Se puede emplear un amplio rango de especies de arbustos.

Por otro lado, es posible que las plantas no crezcan directamente desde el suelo, sino desde macetas con el sustrato adecuado. La interposición de estas macetas a diversas alturas de la fachada elimina uno de las limitaciones asociadas al empleo las plantas trepadoras, cuya fisiología solo les permite crecer hasta una determinada altura (desde 5 metros hasta 20-25 metros máximo según especies).

El empleo de plantas trepadoras o arbustos colgantes puede exigir un mantenimiento que varía desde muy bajo o bajo, en el caso de las plantas creciendo desde la tierra, o más elevado si hay macetas elevadas en altura que necesiten de un sistema de irrigación para aporte de agua y nutrientes.

Las principales ventajas de este tipo de sistemas son:

- Son sistemas de escasa complejidad y mantenimiento.
- Son sistemas socialmente aceptados y percibidos como bellos.⁷
- Es el sistema más barato.⁸

Los principales inconvenientes son:

- La colonización biológica que se produce. Muchas tipologías de especies vegetales que se pueden emplear constituyen un hábitat adecuado para diversas especies animales, lo cual, pese a mejorar la bio-diversidad de las ciudades, es percibido por un porcentaje no desdeñable de los usuarios de los edificios como un inconveniente.
- Su lenta colonización del medio. El proceso de crecimiento y tapizado de la superficie de la fachada por la especie vegetal empleada es progresivo y se dilata a lo largo de varios años.
- Los beneficios ecológicos, como ahorro energético, aislamiento térmico y protección del edificio son menores que los obtenidos con otros sistemas.⁹

Living wall systems. Jardines verticales

Por jardín vertical entendemos una instalación vertical, cubierta de plantas de diversas especies vegetales, que son cultivadas en una estructura con un sistema integrado de aporte de agua y nutrientes, dando la apariencia de ser un jardín dispuesto en vertical.

Esta tipología se ejecuta, la mayor parte de las veces, por motivos ornamentales en edificios o espacios urbanos representativos (Ilustración 8). Por tanto el criterio de elección de las especies de plantas usadas predominante es la estética, teniendo en cuenta siempre que hay especies que se adaptan mejor a esta implantación vertical que otras. Lo habitual es que los ejemplos construidos mezclen especies diversas para conseguir el deseado efecto estético, aunque los valores ecológicos inherentes a este sistema están haciendo que, en no pocos casos, se empiece a supeditar los valores estéticos a la consecución de envolventes edificatorias más eficientes.



Ilustración 8: Jardín vertical, Caixa-Forum, Madrid, España. Fuente página web espacio madrid

Por otra parte, el término inglés *living wall* se refiere sobre todo a esta disposición de vegetación en la que predominan los valores ecológicos sobre los ornamentales. Por tanto, en un *living wall system* lo usual es que se emplee una sola especie vegetal, escogida por su capacidad de aportar algún valor añadido a la envolvente edificada (Ilustración 9). Ahora mismo no existe una denominación en castellano concreta que se corresponda con este concepto. La bibliografía consultada habla de jardines verticales, fachadas verdes o fachadas vegetales indistintamente.



Ilustración 9: Living wall, ubicación desconocida

Existen diversas técnicas para construir estos sistemas, que derivan del medio en el que crecen las plantas.

Sistemas hidropónicos:

Se entiende por hidropónico los sistemas en los que las raíces crecen en un medio inerte, y todos los nutrientes necesarios para la planta son aportados por una solución nutritiva vía riego (Ilustración 10). Estos sistemas hidropónicos usan medios inertes como:

- Filtros no tejidos, geotextiles (poliamida, polietileno, poliéster...) (Ilustración 11). Una tipología popularizada por el botánico Patrick Blanc. Este sistema está muy asociado a una práctica de la jardinería intensiva, con un componente artístico muy acentuado, alejado de los objetivos de ahorro energético y mejora de la sostenibilidad. Normalmente, la denominación de jardín vertical se corresponde con un sistema de este tipo.¹⁰
- Lana de roca
- Espumas técnicas (poliuretano, poliurea...)



Ilustración 10: Sustrato inerte para cultivo hidropónico



Ilustración 11: Sistema de filtros según tipología patentada por Patrick Blanc

Sistemas con sustrato:

Son sistemas en las que las raíces de las plantas empleadas crecen en un medio granular con un porcentaje de materia orgánica elevado (Ilustración 12). Esto disminuye la necesidad de nutrientes a aportar vía riego, pero normalmente no la elimina; las mezclas de sustrato utilizadas suelen ser ligeras, incluyendo materiales como arlita, perlita, musgo de turbera (*Sphagnum*), espumas técnicas... lo que disminuye el peso del sistema, que normalmente se compone de paneles montados en una subestructura. Además, estos componentes añadidos al sustrato aportan la capacidad de retención de agua, aireación y drenaje.



Ilustración 12: Ejemplo de paneles contenedores de sustrato

Tanto los sistemas con sustrato, como sistemas hidropónicos, necesitan de una instalación de irrigación y drenaje, así como de un mantenimiento elevado que incluya la reposición de las plantas cada cierto tiempo, control de los nutrientes aportados en la solución nutritiva, podas, control anti-plagas... Las plantas empleadas necesitan de un período de aclimatación.

A excepción de los sistemas que emplean fieltros, estos sistemas se construyen con paneles modulares (Ilustración 13); se están desarrollando muchos sistemas diferentes en los últimos años, y suelen emplear plantas perennes que no crecen en vertical naturalmente, de tipo arbustivo o herbáceo.



Ilustración 13: Ejemplo de panel modular

Las principales ventajas de este tipo de sistemas son:

- Se implantan con rapidez en su ubicación, produciéndose el efecto deseado en corto espacio de tiempo.
- Correctamente planteados y ejecutados producen elevados beneficios ecológicos en la envolvente edificatoria sobre la que se ejecutan.
- Son sistemas socialmente aceptados y percibidos como bellos.¹¹

Los principales inconvenientes son:

- Son sistemas de elevada complejidad y mantenimiento, con un elevado consumo de agua y nutrientes. Los análisis del ciclo de vida efectuado en casos concretos no son terminantes sobre si son sistemas realmente sostenibles o no. Es necesario estudios más exhaustivos para caracterizar la sostenibilidad de estos sistemas. De todos modos, hay que considerar que estos sistemas están en una fase embrionaria de desarrollo, por lo que es de esperar que con el tiempo sean capaces de consumir menos recursos.
- Son sistemas caros de mantener y de ejecutar debido a la complejidad de su diseño, que implica varias capas de materiales, subestructuras, instalaciones...
- Su vida útil es más limitada, de 10 a 50 años en función del sistema escogido.¹²
- También, en función de las especies empleadas, son sistemas susceptibles de sufrir una elevada colonización biológica.

El propósito de esta tesis es estudiar la viabilidad de un sistema en el que un soporte vertical es colonizado por especies vegetales, con un coste operativo y de mantenimiento sensiblemente inferior al de los sistemas descritos, mediante el empleo de especies vegetales de requerimientos mucho menores implantadas sobre un sustrato convencional (un mortero aligerado con residuos industriales) cuya bio-receptividad ha sido aumentada.

1.4. Síntesis de lo expuesto en el capítulo

En el presente capítulo se ha realizado una breve introducción histórica del empleo de fachadas verdes, analizando, a continuación, la problemática inherente a disponer vegetación en vertical.

A continuación se han descrito los principales sistemas existentes de fachadas verdes que se emplean en el mundo (plantas trepadoras, living wall systems...). De cada sistema se indica sus principales ventajas, así como sus principales inconvenientes.

1.5. Referencias

-
- 1 Köhler, M.
Green facades-a view back and some visions.
(2008) *Urban Ecosyst*, 11, pp. 423–436.
- 2 Pérez, G., Coma, J., Martorell, I., Cabeza, L.F.
Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review
(2014) *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, pp. 139-165.
- 3 *Ibíd.*
- 4 Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del territorio de la Junta de Castilla y León
Normas Subsidiarias de Planeamiento Municipal en el ámbito provincial de Burgos
(2011) *Boletín Oficial de Castilla y León* de 9 de mayo de 1996 y modificaciones posteriores
- 5 Urbanarbolismo
(2014) [http:// www.urbanarbolismo.es/blog/](http://www.urbanarbolismo.es/blog/)
- 6 Pérez, G., Coma, J., Martorell, I., Cabeza, L.F.
Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review
(2014) *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, pp. 139-165.
- 7 White, E.V., Gatersleben, B.
Greenery on residential buildings: Does it affect preferences and perceptions of beauty?
(2011) *Journal of Environmental Psychology*, 31, pp. 89-98.
- 8 Perini, K., Ottelé, M., Hass, E.M., Raiteri, R.
Greening the building envelope, façade greening and living wall systems
(2011) *Open journal of ecology*, 1, pp. 1-8.
- 9 Weinmaster, M.
Are Green Walls as "GREEN" as they look? An introduction to the various technologies and ecological benefits of Green Walls
(2009) *Journal of Green Building*, 4, pp. 3-18.
- 10 Pérez, G., Coma, J., Martorell, I., Cabeza, L.
Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review.
(2014) *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, pp. 139-165.
- 11 White, E.V., Gatersleben, B.
Greenery on residential buildings: Does it affect preferences and perceptions of beauty?
(2011) *Journal of Environmental Psychology*, 31, pp. 89-98.
- 12 Perini, K., Ottelé, M., Hass, E.M., Raiteri, R.
Greening the building envelope, façade greening and living wall systems
(2011) *Open journal of ecology*, 1, pp. 1-8.

2. Componentes del sistema propuesto: Briófito tapizante

En climas templados, muchos tipos de plantas criptogámicas (que no poseen flores), como pueden ser algas, hongos, musgos y líquenes, poseen beneficios frente a otras especies vegetales superiores cuando se usan en la piel de los edificios¹. Se propagan con esporas, y como no tienen sistemas de raíces, se pueden desarrollar en las envolventes de los edificios sin causar deterioros. Son más duras y necesitan mucho menos mantenimiento para establecerse y mantenerse, y pueden absorber grandes cantidades de elementos contaminantes².

El sistema propuesto plantea el uso de una especie vegetal pionera como primer colonizador de un soporte bio-receptivo; esta especie pionera facilita la posterior colonización del soporte por otras especies al generar un entorno más favorable para su desarrollo.

Dadas las especiales características que dicha especie vegetal ha de tener para poder prosperar en un soporte vertical, y con la condición de reducir el mantenimiento al mínimo, esta tesis doctoral va a evaluar como especie vegetal pionera un briófito.

2.1. Briófitos: definición y principales características

Los briófitos, en un sentido amplio, son las plantas terrestres no vasculares. Son mucho más antiguos que las plantas con flores y semillas, puesto que se han encontrado fósiles que se remontan al período Ordovícico, hace 475 millones de años³.

Según la división tradicional los briófitos son de tres tipos muy diferentes: *Antocerotas*, *Hepáticas*, y los musgos propiamente dichos⁴.

Aunque tenemos asociado el musgo a hábitats en sombra y húmedos, existen en torno a 24.000 especies de briófitos, adaptadas a entornos muy diferenciados, incluso al desierto. No existe un tipo de musgos, sino muchos, lo que les lleva a estar presentes en casi todos los ambientes terrestres y de aguas continentales. Para lograr esa adaptación desarrollan mecanismos diversos; por ejemplo, un carácter único en musgos de hábitat desérticos, es la presencia de lamelas, filamentos y otras prolongaciones de la hoja. Su citología revela células pequeñas o estrechas, con un denso contenido de pequeñas vacuolas.

Estas adaptaciones justifican que el hábitat de los musgos se extienda a ámbitos tan diferentes como montañosos, sub-antárticos, dunas, prados de estepa...⁵

A pesar de su amplia distribución, rara vez son dominantes debido a dos importantes limitaciones:

- Presentan un pequeño tamaño (no suelen superar los 10 cms, y algunos son microscópicos)
- Son incapaces de evitar la pérdida de agua⁶

Principales características

Los briófitos tienen tejidos poco diferenciados y no poseen vasos de conducción, no presentan raíces, tallos ni hojas verdaderas, sino un cuerpo vegetativo con estructuras muy primitivas. Sus estructuras análogas son *rizoides*, *caulidios* y *filidios* y estas absorben por toda su superficie la humedad ambiental y las partículas disueltas. La parte más llamativa de los briófitos es de color verde gracias a la clorofila, y se encarga de cumplir las funciones vegetativas de la planta

Los musgos no son capaces de producir lignina salvo en situaciones evolutivas muy incipientes, lo que explica su carencia de sistema vascular

Los musgos presentan capacidad fotosintética activa. Los cloroplastos de los musgos contienen, además de sus carotenoides característicos, clorofilas de los tipos a y b, metabólicamente fabrican almidón como material de reserva energética, y para las paredes celulares, celulosa. Las tasas de absorción de CO₂ usuales en las especies de musgos son inferiores a las de las plantas vasculares, pero aunque también, inferiores, asimilables a las del césped⁷.

Carecen de un mecanismo para regular el contenido hídrico y prevenir la desecación; esta característica se denomina *poiquilohidria*, e implica para la planta una dependencia directa del agua y, por lo tanto, su desecación cuando no dispone de ella⁸.

A pesar de su incapacidad para evitar la pérdida de agua, los briófitos poseen la facultad de la reviviscencia: pueden sobrevivir incluso años en estado deshidratado, ya que al volver a humedecerse, recuperan sus funciones vitales en tan sólo unos minutos⁹.

Muchos briófitos toleran sin problemas grandes adversidades ambientales. Para empezar, el frío, pues algunos soportan la congelación en nitrógeno líquido a -196 °C; también el calor, ya que en algunas especies los tejidos pueden alcanzar 70°C sin sufrir daños; también situaciones extremas de escasez o exceso de luz; la carencia de nutrientes minerales... Estas peculiares características les permiten colonizar ambientes casi prohibidos para otros organismos: rocas desnudas, suelos de bosque donde apenas llega luz, profundidades de lagos¹⁰...

Los musgos pueden tener diferentes formas:

- Acrocárpico: Si crecen de forma perpendicular al suelo; es un crecimiento ortótropo.
- Pleurocárpico. Crecen paralelos al sustrato.

Reproducción de los musgos

Para fecundarse, la mayor parte de los musgos emplean el agua como medio de transporte. Se pueden reproducir sexual y asexualmente, ya que la vida de un musgo consta de dos fases: una verde, denominada gametófito, ya que es la que produce gametos, y otra no clorofílica, denominada esporófito, que es la que produce las esporas. La fase verde de su ciclo tiene una dotación genética sencilla, es decir, haploide (n), contrariamente a las plantas con flores, que la tienen doble, es decir, diploide (2n). Esta fase verde constituye el ciclo biológico dominante, por lo que las células de los musgos son haploides durante la mayor parte de su ciclo vital. Sin embargo, y al objeto de rejuvenecer su contenido genético, los musgos tienen, dentro de su ciclo vital, períodos en los que la información genética está duplicada, que es la fase que hemos denominado esporófito¹¹.

Una espora de musgo puede germinar como protonema, algo distinto a la planta adulta. El así llamado protonema normalmente consiste en filamentos de células, que se desarrollan y expanden. De estos filamentos surgen brotes.

La planta adulta eventualmente generará células masculinas y femeninas en pequeñas floraciones, que se desarrollan en la punta de los brotes (musgos acrocárpicos) o en sus lados (musgos pleurocárpicos).

El protonema puede realizar la fotosíntesis o permanecer en estado latente, incluso por años, antes de germinar cuando las condiciones son adecuadas.

Un aspecto singular de estas plantas es que sus estructuras son intercambiables...Cualquier fragmento de un musgo que contenga una sola célula en buenas condiciones (un fragmento de hoja, de protonema...) puede actuar como un propágulo, produciendo nuevos brotes, nuevo protonema o incluso rizoides directamente.

Aparte de la capacidad de reproducirse a partir de protonema, o regenerarse a partir de pequeños fragmentos de cualquier tejido, muchas especies de musgos producen pequeños brotes que funcionan al modo de las semillas, cayendo de la planta adulta para germinar.¹²

El papel ecológico de los briófitos

Los briófitos desarrollan una gran variedad de interacciones con otros seres vivos (de tipo competitivo, parasítico, simbiótico...). Las efectúan con plantas vasculares, algas, hongos, líquenes, bacterias autotróficas y heterotróficas...A continuación describimos algunos de los papeles que desarrollan los briófitos en la naturaleza:

Sumideros de CO₂

Los musgos están presentes en cualquier lugar del mundo, pero son mucho más abundantes en entornos con gran humedad ambiente y baja evaporación. En este tipo de ámbitos la capacidad fotosintética activa localizada en las partes verdes del musgo es muy relevante respecto al conjunto total.¹³

Según el Catedrático de la Universidad de la Rioja y presidente de la Sociedad Española de Briología Javier Martínez Abaigar, respecto a la tasa de fotosíntesis hay pocos trabajos comparativos, y menos en los que se incluyan briófitos. Esto ocurre por dos razones básicas:

- Cada trabajo utiliza unas condiciones determinadas de radiación, temperatura, concentración de dióxido de carbono, estado hídrico, etc., y todos esos factores influyen sobre la tasa de fotosíntesis
- En cada trabajo se utilizan unas unidades determinadas (básicamente, moles o gramos de oxígeno o dióxido de carbono por peso seco o superficie de la muestra), y a veces es difícil o directamente imposible interconvertirlas

Si recurrimos a las tablas empleadas por Larcher, W., en su libro *Ecofisiología vegetal*¹⁴, que evalúan los valores medios de tasa de fotosíntesis neta para distintas especies vegetales en condiciones naturales de presencia de CO₂, intensidad lumínica saturada y óptima temperatura y suministro de agua, observamos que las tasas que adjudican a los musgos son de las más bajas que se han medido, o las más bajas, y se equiparan a las hojas de sombra de algunas plantas leñosas.

Por otra parte, también hay que considerar que estos valores de fotosíntesis se miden con el musgo hidratado, pero en condiciones naturales el tiempo en que está hidratado puede ser corto en relación con el tiempo en que está deshidratado (y por tanto sin fotosíntesis activa). Esto dependerá de las condiciones meteorológicas, lógicamente, si el tiempo es lluvioso o neblinoso o seco...

Control de la erosión y creación de suelo

Su gran capacidad de retención de agua, derivada de su biomasa residual, les convierte en activos agentes creadores de suelo, a la vez que conservan la humedad ambiental. Su elevada densidad vegetal permite detener la erosión, al desarrollarse en pequeños cojines, disipando la energía cinética de las gotas de lluvia¹⁵.

En los bosques templados y templado-fríos, los briófitos en general, y los musgos en particular, forman extensas comunidades en el suelo y sobre los árboles. Las acumulaciones masivas de musgos se comportan como reguladores térmicos de extraordinario interés¹⁶.

Su protagonismo en el funcionamiento del ecosistema es muy significativo, ya sea como agentes activos de retención de agua, como colonizadores y como estabilizadores del suelo. Los musgos son, a menudo, los primeros habitantes de suelos expuestos, rocas desnudas y otras superficies¹⁷.

En cuanto a la fijación de nitrógeno, las costras de briofitas, dotadas de cianobacterias fijadoras de nitrógeno, contribuyen con considerables cantidades de nitrógeno al suelo, particularmente en tierras secas de pastoreo¹⁸.

Regulan la humedad del ecosistema

Los briófitos influyen en la composición del ecosistema creando un ambiente con un mayor grado de humedad, pues **almacenan gran cantidad de agua**.

También mejoran la retención de nutrientes minerales disueltos en el agua de lluvia, incorporándolos a sus tejidos. Sin ellos, en muchas zonas esta agua se perdería rápidamente por drenaje, cosa que desafortunadamente está sucediendo en muchos lugares que presentan importantes problemas de erosión hídrica¹⁹.

Bioindicadores

El uso de briófitos como bio-indicadores de contaminación ambiental, especialmente por metales pesados, está muy extendido. También se emplean como bio-indicadores del aumento de radiación ultravioleta B en la biosfera causada por la degradación de la capa de ozono.

La carencia de una cutícula significativa, y la presencia de hojas de una sola capa de células, hacen a musgos y hepáticas particularmente buenos bio-indicadores o bio-monitores. Debido a esta arquitectura, y a la falta de un verdadero sistema vascular bien desarrollado, la mayoría de los briófitos absorben tanto nutrientes como contaminantes directamente desde la atmósfera. Es por esto que los efectos no son aminorados por el suelo como es el caso en las plantas vasculares.

Además, el hábito perenne de la mayoría de los briófitos permite la acumulación en periodos en que la mayoría de las plantas vasculares se encuentran inactivas. Las briofitas poseen una gran variedad de medios por los cuales pueden capturar sustancias que son tóxicas para muchas plantas superiores y animales. No obstante, su capacidad de capturar partículas pesadas de contaminantes es limitada, puesto que se saturan rápidamente²⁰.

Los briófitos y la contaminación urbana

En la atmósfera contaminada de las ciudades existen varias sustancias tóxicas para los briófitos, siendo la principal el anhídrido sulfuroso (SO₂). Se pueden distinguir cuatro categorías de toxisensibilidad para los briófitos²¹:

- Especies toxífilas: prefieren las áreas urbanas e industriales
- Especies toxitolerantes: aunque resultan afectadas por la polución, resisten niveles muy altos de SO₂
- Especies medianamente toxitolerantes: son tolerantes porque en las ciudades se refugian en lugares protegidos de la polución o bien adoptan hábitos que les confieren mayor resistencia
- Especies sensibles: tienen poca capacidad de adaptación al medio urbano y se refugian en lugares donde el efecto de la polución es muy escaso

Hay evidencias que apoyan la tesis de que la polución del aire merma las especies de musgos y hepáticas en zonas urbanas. Las investigaciones realizadas en ciudades de Europa o América del Norte demuestran que los contaminantes del aire afectan el crecimiento y reproducción de briofitos y líquenes²².

2.2. Razones para escoger un briófito como especie vegetal pionera para el sistema propuesto

Capacidad de colonizar medios verticales bio-receptivos

Muchas especies de musgos son capaces de colonizar medios verticales²³; de hecho, el crecimiento de musgo sobre materiales de construcción bio-receptivos es considerado tradicionalmente una patología a erradicar en los elementos constructivos, siendo un caso paradigmático los tratamientos herbicidas que se dan en los paramentos verticales de edificios históricos para eliminar la colonización de musgos, líquenes y otros organismos fotótrofos²⁴.

Sin embargo, en condiciones controladas de crecimiento, la carencia de un sistema radicular desarrollado hace que los briófitos no puedan producir daños de importancia al soporte constructivo sobre el que se desarrollan²⁵.

Capacidad de adaptación a entornos hostiles

Las características de los briófitos les permiten colonizar ambientes casi prohibidos para otros organismos, y es precisamente en estos ambientes hostiles donde sacan partido de su sencillez estructural y economía de crecimiento. De hecho, en condiciones más favorables, los briófitos son fácilmente desplazados por otros organismos que crecen más deprisa²⁶.

Bajo mantenimiento

Los musgos son capaces de prosperar únicamente con agua y una cantidad mínima de sales minerales²⁷, gracias a la absorción directa por las células del gametofito de los nutrientes desde el sustrato o desde el agua²⁸.

Capacidad para la reviviscencia

A pesar de su incapacidad para evitar la pérdida de agua, los briófitos pueden sobrevivir incluso años en estado deshidratado. Al volver a humedecerse, recuperan sus funciones vitales en tan sólo unos minutos²⁹.

Ciclo de vida

En el medio natural los tapices de briófitos son "eternos". Sobre el sustrato se va superponiendo sucesivamente una capa fotosintética a una capa "muerta".

Capacidad de prosperar en soportes compactos

Debido a la morfología de sus rizoides, los musgos tienen la posibilidad de instalarse en sustratos duros y compactos, impenetrables a las raíces de los vegetales superiores³⁰.

Otras razones

Como ya hemos comentado en el punto anterior "el papel ecológico de los briófitos", estas especies desarrollan diversos papeles en el ecosistema que les hacen adecuados para un sistema como el propuesto, entre los cuales destacamos:

- Capacidad fotosintética
- Regulación de la humedad
- Hábitat para otras especies animales

2.3. Historia del uso briófitos en la edificación

El uso de los briófitos en la construcción ha sido habitual en la arquitectura vernácula de los climas extremos de las áreas polares y en zonas remotas, pero siempre asociado a un rol muy secundario. Una utilidad muy habitual es su uso para rellenar las juntas de otros elementos constructivos, bien colmando las juntas con musgos, bien con musgos mezclados con arcilla. Algunas especies que se han usado con esta finalidad son:

- *Bryum argenteum*
- *B. pseudotriquetrum*
- *Hennediella heimii*
- *Homalothecium sericeum*
- *Isothecium myosuroides*
- *Pleurozium schreberi*

Incluso se ha utilizado la especie *Fontinalis antipyretica* en el Norte de Europa como elemento aislante contra incendios entre las chimeneas y los cerramientos de los edificios, de aquí su nombre.

En la actualidad, en las Islas Filipinas se siguen usando musgos como relleno entre postes de madera, tejas, en Alaska y en el Himalaya para rellenar grietas... Para hacer estos rellenos de juntas y grietas los musgos se introducen en las cavidades a rellenar mediante presión ejercida con los dedos o con algún otro instrumento y se dejan secar, permaneciendo comprimidos y aún verdes dentro de las cavidades³¹.

Existen ejemplos contemporáneos del uso de musgos para decorar y aislar edificios; la sede del Ayuntamiento de Reykjavik (Ilustración 14) está decorada con musgos asociados a una lámina de agua.



Ilustración 14: Sede del Ayuntamiento de Reykjavik

Otro ejemplo, en este caso fallido, es la sede de una aseguradora en Munich, Alemania. Se planteó realizar un cerramiento de piedra cubierto con musgo. La piedra era toba calcárea, un tipo de roca caliza muy porosa, y la especie de musgo empleada era *Aloina ambigua*. Se cultivó el musgo sobre los bloques de piedra (Ilustración 15), que después se dispusieron sobre su ubicación definitiva. Sin embargo, el musgo terminó secándose, al parecer debido al contenido en cobre del agua que se usaba para su riego. La especie se adaptaba bien a vivir sobre un soporte calizo (Ilustración 16), pero no soporta la presencia de cobre.



Ilustración 15: Musgos cultivados sobre piedra para ser usados como cerramiento, fotografía por Michel Chiaffredo



Ilustración 16: Aloina ambigua creciendo sobre toba calcárea, fotografía por Michel Chiaffredo

2.4. Sistemas constructivos con briófitos. Sistemas comerciales

Sistema comercial Codra system, moss catch system

La empresa Ilsong³², localizada en Corea del Sur, comercializa dos sistemas que utilizan diversas variedades de musgos. Dicha empresa promociona el uso de los musgos como una manera de generar una eco-ciudad, mejorando el medio ambiente.

Codra system

El sistema de estabilización de terrenos Codra system es un método que utiliza una planta a modo de especie pionera (en concreto, un musgo), para mejorar el microclima y las condiciones del terreno, regenerando la vegetación en un plazo corto de tiempo. Está concebido para estabilizar el terreno de una manera ecológicamente respetuosa con el entorno. La cobertura de musgos controla la erosión del terreno, amortigua el ruido del tráfico y logra retener humedad.

El sistema consiste en la instalación de una red estructural (Ilustración 17) sobre la pendiente mediante la disposición de especies de musgos autóctonos dispuestos sobre láminas geotextiles, en combinación con resinas de polímeros que proporcionan una dureza apropiada para prevenir la erosión del terreno y permitir el crecimiento de la vegetación (Ilustración 18).

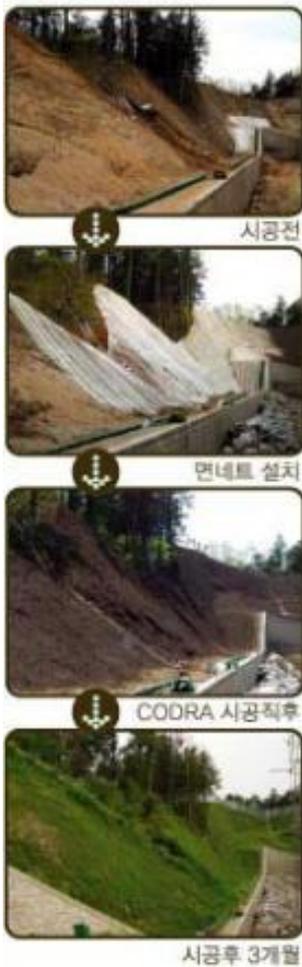


Ilustración 17: Fases de instalación del sistema Codra system, fuente página web de Ilsong

Los materiales usados son biodegradables, y el sistema generado permite la retención de nutrientes y de humedad



Ilustración 18: Resultado final sistema Codra system, fuente página web de Ilsong

Moss Catch system

El sistema Moss Catch consiste en planchas (Ilustración 19) y rollos (Ilustración 20) de espesor variable con sustrato en el que se han dispuesto a la vez dos especies de musgos en fase temprana de desarrollo. El sistema emplea diversas especies de musgos resistentes a la luz, al sombreadamiento... en función de la aplicación a que se vayan a destinar.



Ilustración 19: Fases del Moss Catch system, fuente página web de llsong



Ilustración 20: Rollos, Moss Catch system, fuente página web de llsong

Este sistema está diseñado para generar en cualquier entorno la primera etapa de un ecosistema que facilite la implantación de otras especies. Se trata de un sistema muy ligero (de 2,7 a 6,5 kg/m² en el caso de máxima retención de agua) pensado para no ocasionar grandes sobrecargas en las estructuras sobre las que se instale, fácilmente manipulable y fácil de instalar mediante adhesivos.

Hay variedades del sistema diseñadas específicamente para ser utilizadas como:

Paneles y planchas

- Para recubrimiento de superficies inclinadas en presas, diques, muros de contención, orillas de ríos...
- Para recubrimiento de fachadas exteriores en edificación
- Para recubrimiento horizontal de suelos de hormigón en cubiertas

Rollos

- En creación de jardines de musgo, recubrimiento de cubiertas, superficies inclinadas...



Ilustración 21: Ejemplo de uso del Moss Catch System, fuente página web IIsong



Ilustración 22: Ejemplo de uso del Moss Catch System, fuente página web IIsong



Ilustración 23: Ejemplo de uso del Moss Catch System, fuente página web IIsong



Ilustración 24: Ejemplo de uso del Moss Catch System, fuente página web IIsong



Ilustración 25: Ejemplo de uso del Moss Catch System, fuente página web IIsong



Ilustración 26: Ejemplo de uso del Moss Catch System, fuente página web IIsong

En cualquier caso ambos sistemas, Codra system y Moss Catch system, requieren en sus primeras fases de implantación un mantenimiento que asegure suficiente suministro de agua hasta que los briófitos se hayan estabilizado. Después no se contempla mantenimiento.

Sistema comercial Enka-moss

La empresa Colbond ha desarrollado en el pasado reciente (año 2009) un producto denominado Enka-moss, producto que no ha llegado al mercado por razones desconocidas.



Ilustración 27: Enka-moss, fuente Colbond

Enka-moss era un material muy ligero con forma de esterilla (Ilustración 27) compuesta por dos capas, un tejido sintético para retener agua y una estructura tridimensional de filamentos enrollados conteniendo brotes de una especie de musgo. Se preveía su comercialización en rollos.

Tan pronto como las condiciones atmosféricas hubieran sido propicias los brotes se desarrollarían; la adherencia del briófito al sistema se basaba en la sujeción de los rizoides del briófito a la estructura de filamentos.

Enka-moss era el resultado de la estrecha colaboración entre la empresa Colbond con el profesor Jan-Peter Frahm, del Instituto Ness para la biodiversidad de la Universidad de Bonn.

La principal aplicación comercial prevista de Enka-moss consistía en generar cubiertas verdes en edificios existentes, puesto que el sistema es muy ligero. Hay que tener en cuenta que una cubierta verde tradicional necesita de una capa de sustrato (generalmente tierra) que genera una sobrecarga considerable. La práctica totalidad de las estructuras de las cubiertas de edificios existentes no están dimensionadas para asumir sobrecargas de peso como las necesarias para disponer una cubierta verde tradicional.

Otra utilidad comercial prevista para el producto era servir como aislante acústico dispuesto sobre fachadas.

Sistema comercial Pre-vegetated mats Xeroflor

La empresa Xeroflor³³, relacionada con Colbond, ha desarrollado un sistema denominado provisionalmente XF 321, que sustituye al anterior Enka-moss. El sistema, muy similar al sistema Enka-moss, incluye diferentes especies autóctonas de musgo completamente desarrolladas y verdes, adaptadas, por tanto, al clima del Norte de Europa.

Un representante de la empresa contactado manifiesta serias dudas acerca de la viabilidad del sistema en el clima español. La empresa nos ha proporcionado muestras, que hemos emplazado en dos espacios interiores distintos.

Una muestra A (Ilustración 28) está depositada en una habitación de una vivienda, con una temperatura estable en torno a 20º, y sin incidencia directa de luz solar; está siendo sometida a riegos por aspersión frecuentes. Esta muestra ha empeorado sensiblemente su pigmentación transcurridos dos meses (Ilustración 29):



Ilustración 28: Muestra A, estado inicial



Ilustración 29: Muestra A, estado a los dos meses

Una muestra B fue depositada en un laboratorio del área de Edafología y Química Agrícola de la Universidad de Burgos, en unas condiciones similares: una temperatura estable en torno a 20°, y sin incidencia directa de luz solar; esta muestra no empeoró su pigmentación en seis meses, mientras su mantenimiento fue adecuado, (se efectuaron riegos por aspersion frecuentes y se procedió periódicamente a empapar la bandeja donde estaba depositada).

Sistema comercial Geo-moss

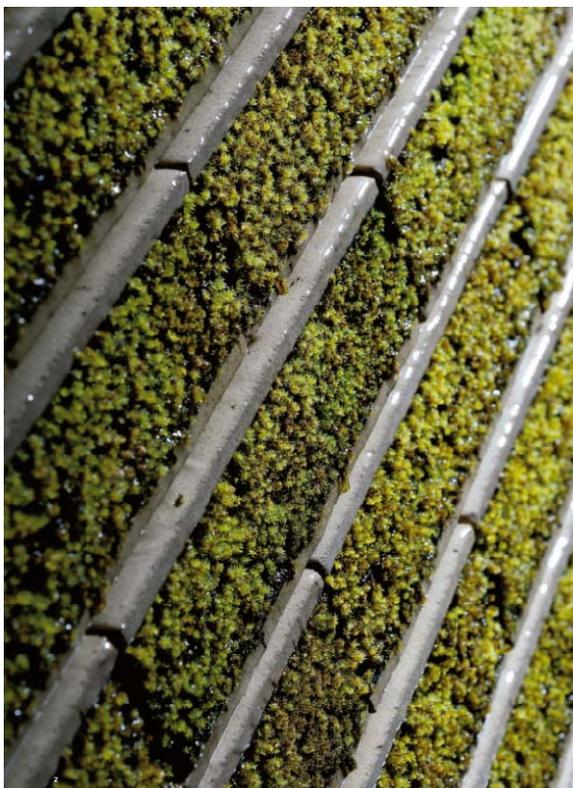


Ilustración 30: Geo-moss, fuente Geobois

Diseñado por la empresa Geobois, Géomoss (Ilustración 30) es un sistema modular de revestimiento de fachadas compuesto de piezas de cerámica de pequeño formato, provistas de un revestimiento de espuma celular que hace las funciones de sustrato para el crecimiento de musgo.

El sistema se instala sobre una sub-estructura de perfiles de aluminio fijado a la pared soporte. Cuenta con una instalación de riego de goteo integrada en la parte superior de la pared, sin necesitar añadido de fertilizantes. Teóricamente su consumo de agua es muy bajo, entre 0 y 400 litros de agua anuales para cada m² de sistema, dependiendo de la orientación, y el sistema no necesita mantenimiento.

La empresa afirma que el sistema contribuye a la mejora de aislamiento térmico y acústico de la fachada y a mejorar la calidad del ambiente mediante la absorción de gases de efecto invernadero. Sin embargo, no se ha podido localizar estudios o ficha técnica del sistema en las que se cuantifique estas afirmaciones.

En la actualidad, la página web del producto no está operativa y remite directamente a la página web de la empresa matriz, donde no aparece el sistema geo-moss entre la lista de productos disponibles; por esta razón se desconoce si se ha abandonado su comercialización.

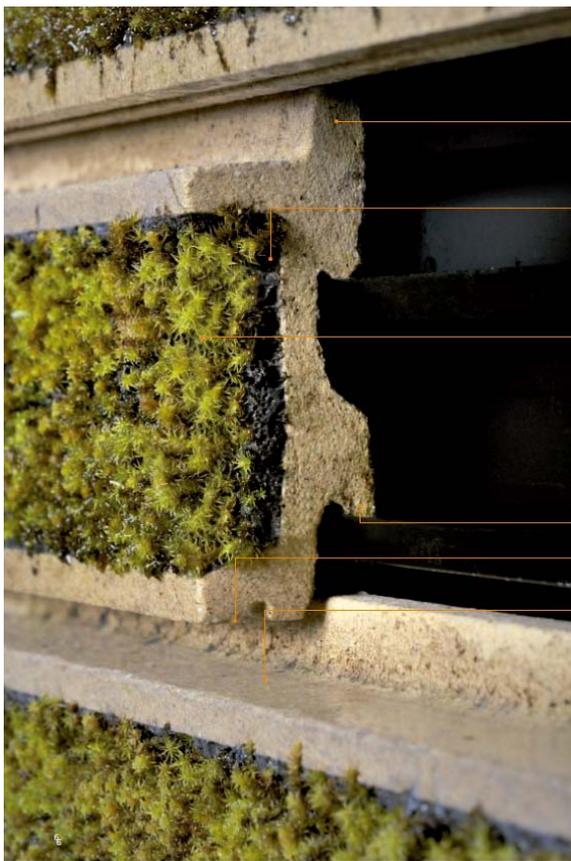


Ilustración 31: Geo-moss, fuente Geobois

Los componentes del sistema son:

- **Base de cerámica:** inerte y no porosa
- **Espuma cerámica:** material neutro, ligero, inerte, no inflamable e inalterable que sirve de sustrato para la especie de briófito.
- **Briófito:** de la familia Racomitrium, resistente a las condiciones climáticas extremas, sin necesidad de aporte de agua según orientación. No necesita mantenimiento ni aporte de fertilizantes.
- **Sistema de anclaje:** a base de perfiles y raíles de aluminio
- **Sistema de riego:** a base de goteo
- **Deflector:** la pieza modular cerámica incluye una moldura que actúa como un deflector, para mejor reparto del agua aportada por el sistema de riego o por las precipitaciones atmosféricas.

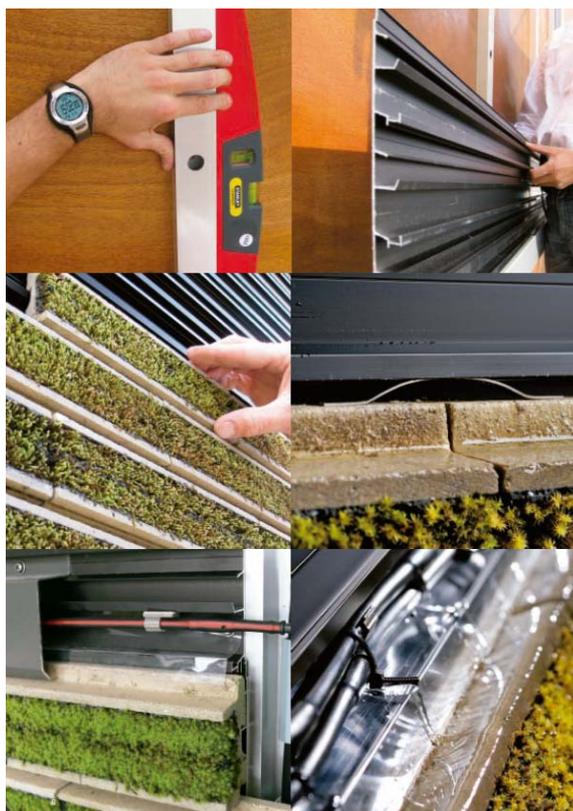


Ilustración 32: Fases del montaje del sistema Geo-moss, fuente Geobois

El sistema se ha instalado primordialmente en Japón, pero existen ejemplos en otras partes del mundo (Ilustración 33).



Ilustración 33: Ejemplo de sistema Geo-moss instalado, fuente Geobois

Sistema comercial Moos machine

El sistema Moos Machine ha sido diseñado, bajo patente, por el Dr Günter Haese, en colaboración con la empresa alemana Gartenheim³⁴ y el briólogo alemán Jan-Peter Frahm, recientemente fallecido.

Se trata de un sistema publicitado en 2013 como “la primera máquina de musgo en el mundo” (Ilustración 34). Se trata de un elaborado sistema de riego para exterior o interior, compuesto por dos componentes:

- El primero es un equipo que se encarga de crear una solución nutriente adecuada para el briófito.
- El segundo es un componente que riega la superficie del briófito (Ilustración 35) con la solución nutriente con la frecuencia adecuada.

Los dos componentes son gobernados por un software de control diseñado por el Dr Günter Haese. No ha sido posible conseguir más información que la recogida en su vídeo promocional de 2013. En la actualidad, en la página web de la empresa matriz no existe más información sobre el sistema que dicho vídeo.



Ilustración 34: Instalación de prototipo, fuente Gartenheim



Ilustración 35: Sistema de riego en funcionamiento, fuente Gartenheim



Ilustración 36: Prototipo con iluminación nocturna, fuente Gartenheim

Sistema comercial Moss Wall, Verde profilo

La empresa italiana Verde Profilo³⁵ comercializa un sistema denominado Moss Wall (Ilustración 37). El sistema reproduce el aspecto de un paramento vertical cubierto de musgos; sin embargo la empresa afirma emplear en este sistema un líquen estabilizado sin necesidad de mantenimiento, no un musgo. La web de la empresa es muy ambigua, pero tras estudiar dicha web, los vídeos de montaje del sistema y las características del producto, se deduce que el sistema consiste en paneles con una especie vegetal desecada y teñida con el fin de que parezca estar viva.



Ilustración 37: Sistema comercial Mooss Wall, fuente catálogo de la empresa Verde Profilo

El sistema se presenta con la posibilidad de acabado en varios colores, y no necesita mantenimiento, más allá de que requiere ausencia de luz solar y una humedad ambiental relativa por encima del 40 o 50%, suponemos que para que la especie vegetal conserve un aspecto vivo.

Este sistema, por tanto, no reviste mayor valor para la presente tesis que el poner de manifiesto el interés comercial que existe en productos que puedan implantar vegetación de una manera sencilla en la edificación.

2.5. Sistemas constructivos con briófitos. Otros sistemas

Prototipos de panel elaborados por Annie Martin

Annie Martin es una experta en jardinería con briófitos reconocida a nivel mundial a través de su actividad empresarial como especialista en jardinería con musgos³⁶, o a su actividad divulgativa en diversos foros especializados, especialmente Bryonet, un grupo de discusión patrocinado por la organización "International Association of Bryologists" (IAB)³⁷.

Ha elaborado prototipos de paneles ligeros de revestimiento de fachadas con briófitos disponiendo pequeños brotes de musgo sobre un geocompuesto, que comercialmente se usa en la construcción de drenajes.

El geocompuesto usado como sustrato tiene la denominación comercial "Enkadrain" (Ilustración 38), y es fabricado por la empresa Colbond³⁸. Se trata de un sistema de drenaje vertical y horizontal que, a partir de un material flexible compuesto por materiales geosintéticos (materiales sintéticos utilizados para mejorar, cambiar o mantener las características del suelo con el que interactúan), genera una malla tridimensional de filamentos de polipropileno reciclado que hace las veces de núcleo de drenaje, y dos geotextiles que actúan como filtro del drenaje.

La especie de musgo usada es *Entodon seductrix*.

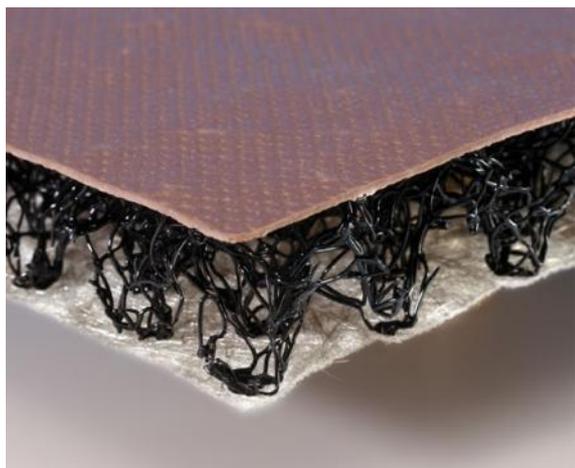


Ilustración 38: Geocompuesto Enkadrain, fuente Colbond

En primer lugar, Annie Martin ha diseminado diversos brotes de *Entodon seductrix* sobre el sustrato Enkadrain dispuesto en posición horizontal. Una vez que el musgo ha prosperado y sus rizoides están adecuadamente sujetos, ha instalado el conjunto en un espacio exterior, en posición vertical (Ilustración 39).

Desde que se ubicó el conjunto al exterior, en mayo de 2012, el espesor de los musgos se ha incrementado.

El sistema no ha recibido más mantenimiento que riegos breves pero frecuentes desde primavera hasta otoño.



Ilustración 39: Prototipos de panel elaborados por Annie Martin, fuente Moss Gardening

Uso de briófitos en cubiertas verdes.

En fecha tan temprana como 1584 ya existe constancia del pago de un cargamento de musgo en la ciudad de Carlisle (Reino Unido) para proteger los tejados de pizarra de las inclemencias atmosféricas³⁹. De hecho, en el Norte de Europa, pese a que es una práctica habitual eliminar el musgo que crece espontáneamente en los tejados, muchas veces no se retira pues proporciona una protección adicional contra el frío, mejorando las prestaciones térmicas de la cubierta.

Empieza a existir una tendencia que busca el aprovechamiento comercial del musgo en cubiertas ajardinadas o verdes (Ilustración 40). Esta idea se basa en la capacidad de los musgos para colonizar diferentes sustratos naturalmente, sin aporte de agua ni otros fertilizantes⁴⁰.



Ilustración 40: "Lámina" de musgo para cubiertas verdes, prototipo de Jan-Peter Frahm. Fuente Jan-Peter Frahm

Michel Chiaffredo y Franck-Olivier Denayer han patentado un sistema para producir vegetación a partir del musgo, que ha sido ya aplicado en varios casos (Ilustración 41 e Ilustración 42), con la finalidad de aunar las cualidades estéticas y ecológicas de los briófitos. Su patente consiste en un sistema que crea en un sustrato, en un corto plazo de tiempo, las condiciones para generar vegetación que de otro modo a la naturaleza le ocupa un largo periodo de tiempo establecer.

A partir de ese punto la vegetación evoluciona a su ritmo natural, sin necesitar mantenimiento ni el aporte de fertilizantes.



Ilustración 41: Cubierta verde con briófitos según sistema de Chiaffredo y Olivier, fuente Michel Chiaffredo



Ilustración 42: Cubierta verde con briófitos según sistema de Chiaffredo y Olivier, fuente Michel Chiaffredo

No hay que obviar que, sin embargo, existe controversia acerca de qué mantenimiento es el adecuado para cubiertas ajardinadas con musgos⁴¹, puesto que un alto porcentaje de los ejemplos construidos parecen estar deteriorándose.

Briosistema. Euroestudio

Desde 2013, la Universidad Politécnica de Madrid está desarrollando un proyecto de I+d+i denominado Briosistema, con el objetivo de desarrollar una envolvente briófito bio-sostenible en la edificación. El área de investigación es "Producción vegetal".

Según la descripción que versa en la página web del observatorio de I+d+i UPM⁴², el proyecto tiene por objeto el diseño de una envolvente inteligente constituida por material vegetal (briófitos) en su parte externa apoyado en un soporte textil y una estructura metálica que soporta los elementos de mantenimiento y motorización de la envolvente vegetal (riego, sensores, etc.), con objeto de incrementar la eficiencia térmica de los edificios en cualquier época del año.

El proyecto ha recibido una ayuda del Programa Nacional de Cooperación Público-Privada, subprograma INNPACTO, dentro de la Línea Instrumental de Articulación e Internacionalización del Sistema, en el marco del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011. Además está financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER)

La entidad privada es la empresa Euroestudios SL. Según la página web de la empresa⁴³, se persiguen los siguientes fines:

"El proyecto BRIOSISTEMA pretende aportar conocimiento sobre los sistemas de cubiertas y fachadas vegetales buscando solucionar los problemas que hacen que soluciones de este tipo sean desechadas en su uso habitual en la edificación. En particular el proyecto pretende:

- *Conseguir un producto estándar de fácil cálculo y aplicación*
- *Aumentar la eficiencia energética*
- *Conseguir un producto indicador de contaminación*
- *La sostenibilidad*
- *La utilización de materiales reciclables que no generan residuos en su obtención*
- *La optimización en el consumo de recursos monitorizando en tiempo real las estructuras permitiendo mantenerlas en condiciones óptimas".*

Dadas las similitudes entre el objetivo de esta tesis doctoral y el proyecto Biosistema se mantuvo una vídeo-conferencia con el grupo investigador, que en ese momento estaba en las últimas fases de desarrollo del proyecto, habiendo construido un prototipo en el centro urbano de Madrid. Según el grupo investigador:

- El proyecto se basa en la diseminación de un musgo por un medio tipo textil, para constituir la envolvente verde, a semejanza de los desarrollos comerciales ya comentados.
- El planteamiento de base era mantener siempre verde la especie vegetal. Para ello se practicaba un riego constante.
- Se realiza un monitoreo constante del prototipo mediante el uso de sistemas comerciales de control.
- Los resultados obtenidos han sido mucho mejores en las condiciones controladas del laboratorio que en las condiciones exteriores a las que está sometido el sistema en el prototipo, en el que se han constatado problemas de aclimatación de la especie vegetal.

*Bryophyte Building Project/Materialized: protonemata*⁴⁴

Se trata de un proyecto de investigación desarrollado por el estudio de arquitectura Faulders Studio en colaboración con la investigadora Sarah Eppley, de la Portland State University, con el objeto de desarrollar un proceso para visualizar las distintas fases del crecimiento de un briófito. La especie estudiada es *Ceratodon Purpureus*, y el estudio se centra en el desarrollo del protonema del briófito a partir de esporas cultivadas en agar (Ilustración 43).



Ilustración 43: Desarrollo de protonema del briófito, fuente Sarah Eppley

Se trata de un estudio preliminar para diseñar la piel arquitectónica de un edificio proyectado en Irán (Ilustración 44) por el estudio del arquitecto Thom Faulders, el Bryophyte Building⁴⁵



Ilustración 44: Bryophyte Building, fuente Faulders Studio

2.6. Características necesarias de la especie

Una vez revisado el estado del arte de los sistemas constructivos que emplean briófitos, enumeramos las características necesarias que debería poseer la especie de briófito escogida para el sistema constructivo propuesto en esta tesis:

- Ha de ser una especie de alto espectro, capaz de prosperar en situaciones diversas
- Ha de ser una especie no anual
- Ha de ser una especie fácilmente cultivable, para no tener que cosecharla de los ecosistemas existentes
- Ha de ser resistente a la desecación
- Ha de soportar el soleamiento directo
- Sus rizoides han de poder agarrarse a un soporte vertical
- Ha de ser resistente a la contaminación urbana
- Hay que tener en cuenta un factor estético; en el medio urbano, el aspecto estético de la especie tiene importancia
- Preferentemente ha de ser una especie pleurocárpica (de crecimiento paralelo al sustrato) para que forme un tapiz de musgo, no acrocárpica (de crecimiento perpendicular al sustrato). Sin embargo, hay también que valorar que según el briólogo Patxi Heras, en general, las especies acrocárpicas tienden a tener menos necesidades hídricas

Teniendo en cuenta estas características, se ha realizado un estudio comparativo de las especies pleurocárpicas autóctonas disponibles que a priori mejor se adaptan a estas características necesarias:

Especie	Fuente: Ficha BBS ¹				Fuente: Larcher ²	Fuente: Profesor Abaigar ³	Conclusión	
	Características físicas		Características referente al hábitat natural		Absorción CO ₂	Comentario		
	Tamaño	Estética	Soleamiento	Comentario	Hábitat	Crece sobre		
1 <i>Hedwigia stellata</i>	3-10 cms	Irregular, parches	Soporta el sol; prefiere orientación sur y oeste		Páramos, brezales, lagos	Rocas ígneas, silíceas o ácidas	Muy resistente a la desecación, aguanta orientación Sur	Estética peculiar, disponibilidad incierta
2 <i>Leucodon sciuroides</i>	4-5 cms	En tallos como arcos	Se rehidrata rápidamente	No común		Árboles con corteza, monumentos	Es grande, crece bien sobre madera	Viable
3 <i>Antitrichia curtipendula</i>	<20 cms	Masas de brotes			Elevaciones, lagos, y más raramente, praderas, dunas	Rocas elevadas, acantilados, árboles y arbustos	Tapices muy grandes, masas sin rizoides, pero muy compacta	Posible inconveniente en el agarre
4 <i>Thuidium tamariscinum</i>	5-25 cms	Alfombras de brotes	Necesita humedad, condiciones neutras		Bosques, setos, césped	Tierra, barro	Estética pero muy delicada necesita sombra y humedad	Demasiado delicada
5 <i>Homalothecium lutescens</i>	1-2 cms	Matas sueltas, o unido a rocas	Todo terreno		Praderas calizas, espacios abiertos, dunas	Rocas, valles calizos	Autóctona en los pinares, Villalonguejar	Muy viable
6 <i>Brachythecium rutabulum</i>	1-2 cms	Estética muy variada	Muy común		Muy amplio, especialmente rocas y bosques	Árboles, praderas, rocas... En la sombra o en espacios abierto	Tolerante a la contaminación	Muy viable
7 <i>Pseudoscleropodium purum</i>	10 cms	Muy reconocible. Robusto, apariencia "gorda"	Necesita algo de soleamiento, no soporta total sombreado		Muy variado, especialmente en praderas ácidas, aunque también soporta suelos calizos	Praderas, orillas, entre rocas...	Problemas con la fijación, (sin rizoides), es una masa laxa; crecimiento rápido, con cápsulas de color estético	Necesita algo de soleamiento
8 <i>Hypnum cupressiforme</i>	2 cms	Ramas irregulares, hojas muy curvadas	Muy extendido		Muy común en rocas silíceas o corizas ácidas o ligeramente básicas	Rocas, corizas, madera	Gran candidata, todo terreno, por lo que se usa como bio-indicador	Muy viable
9 <i>Rhytidiadelphus triquetrus</i>	5-20 cms	Muy grande, con apariencia de arbusto, tallos rojos, hojas en muchas direcciones			Suelos calcáreos, bosques, tierras ácidas, pinos	Bosques, praderas abiertas, dunas	Muy, muy robusta	Su aspecto arbustivo puede resultar inadecuado
10 <i>Hylocomium splendens</i>	10-20 cms	Brillante, tallos rojos, robusto, ramas dispuestas regularmente en dos planos	Muy común		Brezales, páramos, bosques ácidos	Hierba, brezos,	Crece mucho, muy tapizante	Su aspecto puede resultar inadecuado

Ficha BBS¹: Fichas elaboradas por la British Bryological Society

Larcher²: Larcher, W. Ecofisiología vegetal (1999)

Abaigar³: Profesor Javier Martínez Abaigar, presidente de la Sociedad Española de Briología

	No viable
	Viabilidad problemática
	Viable
	Muy viable

Tabla 1: Estudio comparativo de de las especies pleurocárpicas autóctonas disponibles

2.7. Especie escogida. Caracterización

Hypnum cupressiforme

Se ha decidido emplear para esta tesis doctoral la especie de briófito *Hypnum Cupressiforme* (Ilustración 45), una de las especies analizadas que mejor se adaptan a las características necesarias para el fin propuesto.



Ilustración 45: *Hypnum Cupressiforme*, fotografía por Fred Rumsey

La principal razón para su elección es su disponibilidad en el entorno.

Se trata de una de las especies pleurocárpica más comunes y extendidas; en realidad, bajo la denominación de *Hypnum Cupressiforme* se agrupan distintas variedades, hasta 8 o 9, ahora ya reconocidas como diversas especies, con características comunes⁴⁶, como una morfología común, crecimiento en sustratos ácidos, alta resistencia a la desecación, tolerancia a la luz solar...

Las variedades se diferencian sobre todo en tamaño; sus características morfológicas comprenden brotes esbeltos de alrededor de 2 cms de largo, hojas sin nervatura central de 1 a 2 mm de longitud que están notoriamente curvadas y que disminuyen gradualmente hasta terminar en punta⁴⁷; los brotes son verdes, teñidos con tonalidad marrón en sus partes más viejas. Frecuentemente presentan cápsulas de 2,5 mm de largo cuya tapa es picuda.

El *Hypnum Cupressiforme* es muy común en suelos ácidos o ligeramente básicos, cortezas de árboles y rocas silíceas.⁴⁸

Es un buen bio-monitor, ya que acumula tres veces más zinc, cobre y cadmio que los niveles registrados para líquenes o plantas vasculares⁴⁹.

En cuanto a su sensibilidad a SO₂ presente en la contaminación atmosférica la especie se clasifica como sensible-toxitolerante⁵⁰.

Método de recolección para la fase experimental

Muestras adquiridas por internet

Para familiarizarnos con la especie se recurre a la compra online de muestras de *Hypnum Cupressiforme*. Se solicita a la empresa Viserje, una empresa de decoración de exteriores especializada en venta de musgo, el envío de una caja conteniendo tapices de dicha especie.

La empresa informa de que el musgo del que dispone es musgo natural, limpio, seco y desinfectado, con todos los permisos fitosanitarios correspondientes en vigor. Tras consulta a la empresa, ésta confirma que, aunque el musgo está seco, tras la pertinente hidratación es capaz de revivir. La empresa afirma que no han probado a cultivarlo ni tienen constancia de que lo haya hecho ninguno de sus clientes, pero que en cuanto han humedecido un poco los tapices, han revivido. De hecho a veces observan brotes nuevos.

Se considera adecuado comprobar, como un estudio previo de la especie de briófito, si este musgo así tratado para su venta como elemento ornamental, es capaz de revivir tras ser hidratado.

El 14 de abril de 2014 se recibe la caja conteniendo el briófito; contiene tapices de musgo apilados unos contra otros y cubiertos por un film de plástico. Esta caja se deposita en un patio interior de un edificio, sin recibir luz directa del sol ni aporte hídrico durante 4 semanas. Cuando posteriormente se retira el film plástico protector se comprueba que, aunque el color de los tapices es verde no se observa humedad en ellos. No tienen ningún tipo de sustrato, presentando la cara inferior del tapiz de briófito los rizoides sin sustrato adherido (Ilustración 46).



Ilustración 46: *Hypnum Cupressiforme*, estado de las muestras el 02/09/2014

Se procede a emplazar las muestras en dos localizaciones diferentes, sin acceso a la luz natural y con diversos grados de hidratación.

Unas muestras se emplazan en un espacio interior y son escasamente hidratadas. Como vemos en las ilustraciones Ilustración 46 y Ilustración 47, entre las que transcurren 5 semanas, las muestras terminan perdiendo la pigmentación verde.



Ilustración 47: *Hypnum Cupressiforme*, estado de las muestras el 08/10/2014

Otras muestras, por el contrario, son sometidas a un riego por inundación muy abundante (Ilustración 48):



Ilustración 48: *Hypnum Cupressiforme*, estado de las muestras el 31/07/2014

Sin embargo, el excesivo aporte de agua deriva en la pudrición de las muestras (Ilustración 49):



Ilustración 49: *Hypnum Cupressiforme*, estado de las muestras el 01/09/2014

Muestras recogidas in situ

Con el objeto de obtener tapices de musgo en buen estado que garanticen la viabilidad de la fase experimental, el 10 de octubre de 2014 se procede a recolectar muestras de la especie *Hypnum Cupressiforme* en su emplazamiento natural.

La recolección se realiza bajo la supervisión y dirección del Doctor en Ciencias Biológicas Javier Martínez Abaigar, profesor de Universidad de La Rioja y presidente de la Sociedad Española de briología. El profesor Martínez Abaigar tiene autorización en vigor para la recogida de dichas especies en su emplazamiento.

El emplazamiento de los briófitos es el Parque Natural de la Sierra de Cebollera⁵¹. El parque se encuentra localizado al sur de la Comunidad Autónoma de la Rioja en su límite con la provincia de Soria, y forma parte del Sistema Ibérico. Su flora y fauna están especializadas para soportar condiciones ambientales adversas, frío, hielo y fuertes vientos. Las formaciones propias de estas cumbres son las praderas higroturbosas, los pastizales de alta montaña y las asociaciones de matorrales de altura, achaparrados por los vientos dominantes y el peso de la nieve⁵².

Las muestras se recolectan en una ladera boscosa (Ilustración 50) emplazada en el entorno del embalse de Pajares. La presencia de un curso de agua genera una elevada humedad ambiente en el entorno. Durante los días anteriores ha habido precipitaciones elevadas, por lo que los briófitos del entorno presentan un elevado grado de humectación.



Ilustración 50: Fotografía del emplazamiento donde se recogen las muestras

En dicho entorno existe una abundante presencia de tapices de musgo de las especies seleccionadas, así como de otras que no se consideran adecuadas para su estudio en esta tesis, principalmente por su morfología; se descartan especies ortótropas, cuyo crecimiento no es tapizante, sino vertical, formando tapices por agregación.

Las muestras se recolectan tras ser identificadas por el Profesor Abaigar. Se recogen en su mayor parte de pequeñas rocas salientes, tras una limpieza superficial de otros restos de biomasa depositados en su superficie. Se procura escoger muestras uniformes, no colonizadas por otras especies de briófitos, ya que es habitual encontrar dos especies solapadas, o formaciones puntuales de una especie dentro de un tapiz mucho mayor de otra (Ilustración 51).



Ilustración 51: Tapices mezclados de *Hypnum Cupressiforme* y *Artitrichia Curtipendula*

Las muestras recolectadas están situadas en lugares sombríos, pero también en lugares soleados, recibiendo la incidencia directa del sol durante buena parte del día (Ilustración 52).



Ilustración 52: Tapices de briófitos bajo luz solar directa

El profesor Martínez Abaigar informa que el pico de crecimiento diario de un tapiz de musgo se produce al amanecer, cuando coincide la incidencia de luz directa de poca intensidad con la presencia de humedad de rocío. El proceso de crecimiento se atenúa cuando la luz solar aumenta su intensidad a lo largo del día desecando el tapiz de musgo, y vuelve a aumentar según las condiciones se tornan favorables.

La recolección se realiza a mano, intentando arrancar suavemente el briófito de su sustrato, al objeto de obtener tapices de la mayor superficie posible. Las muestras, húmedas por las precipitaciones atmosféricas de las últimas jornadas, se almacenan en bolsas de plástico para su transporte; cuando los tapices de briófito tienen una dimensión suficiente se pliegan sobre su dorso para almacenarlos con los rizoides en contacto con otros rizoides.

Como es característico de la especie, los tapices recolectados tienen 20-30 cms de longitud, y presentan una cierta adherencia al soporte (Ilustración 53).



Ilustración 53: Tapiz característico de la especie recolectada

Se observa en los tapices la presencia de cápsulas para su reproducción, si bien no están maduras en el momento de la recolección.

Se recolecta 0,60 m² de tapiz de musgo aproximadamente.

La recolección, así efectuada, produce un impacto sobre el entorno insignificante, puesto que la presencia de briófitos es muy abundante. No obstante, para que un sistema como el presentado en la tesis pudiera tener una aplicación industrial y fuera realmente sostenible, es imprescindible desarrollar un sistema de cultivo del briófito fuera de su entorno natural; en la actualidad, la explotación del musgo *Sphagnum* está provocando el expolio de su medio natural, las turberas de Chile y Argentina⁵³.

A lo largo de las 24 horas posteriores los tapices se depositan en bandejas semi-rígidas de aluminio sobre una capa humectada de 2 a 3 cms de sustrato universal de jardinería (Ilustración 54 e Ilustración 55), en un espacio exterior (Ilustración 56), un patio interior de una edificación; debido a sus dimensiones, este patio siempre es iluminado con luz difusa y nunca incide luz solar directa, lo que es conveniente para que los tapices trasplantados al nuevo sustrato sobrevivan, puesto que en esta fase en la que las muestras no han enraizado en el nuevo sustrato son muy vulnerables a la desecación. La experiencia del profesor Martínez Abaigar es que una vez los tapices han enraizado, pueden revivir tras ciclos de desecado.



Ilustración 54: Sustrato universal



Ilustración 55: Muestras sobre sustrato



Ilustración 56: Ubicación al exterior de las muestras

Posteriormente parte de las muestras se han trasladado a una habitación interior sin apenas climatización donde se han cubierto con un film de plástico transparente (Ilustración 57) a fin de retener la humedad un mayor tiempo, pero siempre procurando que el cierre no sea hermético para que se pueda producir un intercambio de gases con el entorno.



Ilustración 57: Muestras cubiertas con film transparente

2.8. Síntesis de lo expuesto en el capítulo

En el presente capítulo se describen las principales características generales de los briófitos, indicando su papel ecológico, y su comportamiento frente a la contaminación urbana.

A continuación, se recogen diversas razones para escoger un briófito frente a otros vegetales en el sistema propuesto (capacidad de colonizar medios verticales, bajo mantenimiento, ciclo de vida...)

Se revisa el estado del arte del empleo de briófitos en construcción, asociados a la arquitectura vernácula, o en sistemas constructivos contemporáneos comerciales o actualmente en investigación.

Se definen las características necesarias del briófito a emplear, y en función de dichas características, se propone y caracteriza la especie *Hypnum Cupressiforme*, como la adecuada para su empleo en la tesis.

2.9. Referencias

-
- 1 Marc Ottelé,
The Green Building Envelope: Vertical Greening
(2011) PhD thesis: Technical University of Delft, p. 2.
 - 2 Cruz, M., Beckett, R.
Bioreceptive design: A novel approach to biodigital materiality
(2016) Architectural Research Quarterly, 20 (1), pp. 51-64
 - 3 Martínez, J., Núñez, E.
Los briófitos: plantas diminutas al borde del masoquismo
(2004) Páginas de información ambiental, 17, pp. 24-28.
 - 4 Rams, S.
¿Para qué sirven los musgos después de navidad? Primera parte. El papel ecológico de los briófitos
(2008) Eubacteria, 20, pp. 15-18.
 - 5 González S.
Los musgos, una reliquia colonizadora, activa y protegida
(2007) <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/>
 - 6 Martínez, J., Núñez, E.
Los briófitos: plantas diminutas al borde del masoquismo
(2004) Páginas de información ambiental, 17, pp. 24-28.
 - 7 Larcher, W.
Ecofisiología vegetal
(1999) ISBN: 9788428202893
 - 8 Montenegro, L.C.
Caracterización de algunos aspectos fisiológicos y bioquímicos del musgo pleurozium schreberi relacionados con su capacidad de tolerancia a la deshidratación
(2011) Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Colombia
 - 9 Rams, S.
¿Para qué sirven los musgos después de navidad? Primera parte. El papel ecológico de los briófitos
(2008) Eubacteria, 20, pp. 15-18.
 - 10 *Ibíd.*
 - 11 *Ibíd.*
 - 12 Fletcher, M.
Moss grower's handbook
(1991) ISBN 0 951 71760 X
 - 13 González S.
Los musgos, una reliquia colonizadora, activa y protegida
(2007) <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/>
 - 14 Larcher, W.
Ecofisiología vegetal
(1999) ISBN: 9788428202893
 - 15 González S.
Los musgos, una reliquia colonizadora, activa y protegida
(2007) <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/>
 - 16 *Ibíd.*
 - 17 *Ibíd.*
 - 18 Glime, J. M.
Economic and Ethnic Uses of Bryophytes.
(2007) Flora of North America Editorial Committee, eds

-
- 19 Martínez, J., Núñez, E.
Los briófitos: plantas diminutas al borde del masoquismo
(2004) Páginas de información ambiental, 17, pp. 24-28.
- 20 Glime, J. M.
Economic and Ethnic Uses of Bryophytes.
(2007) Flora of North America Editorial Committee, eds
- 21 Soria, A. Ron, E.
Datos para el conocimiento de la flora briológica urbana de la ciudad de Logroño.
(1987) Comunicación del VII Simposio Nacional de Botánica Criptogámica. Madrid
- 22 Glime, J. M.
Economic and Ethnic Uses of Bryophytes.
(2007) Flora of North America Editorial Committee, eds
- 23 Fletcher, M.
Moss grower's handbook
(1991) ISBN 0 951 71760 X
- 24 Jiménez, C., Ariño, X.
Biological colonization and deterioraíon of mortars by phototrophic organisms
(1995) Materiales de construcción, vol. 45, nº 240, pp. 5-16.
- 25 Manso, S., Mestres, G., Ginebra, M.P., De Belie, N., Segura, I., Aguado, A.
Development of a low pH cementitious material to enlarge bioreceptivity
(2014) Construction and Building Materials, 54, pp. 485-495.
- 26 Martínez, J., Núñez, E.
Los briófitos: plantas diminutas al borde del masoquismo
(2004) Páginas de información ambiental, 17, pp. 24-28.
- 27 Jiménez, C., Ariño, X.
Biological colonization and deterioraíon of mortars by phototrophic organisms
(1995) Materiales de construcción, vol. 45, nº 240, pp. 5-16.
- 28 Heras, P., Soria, A.
Musgos y hepáticas urbanos de la ciudad de Vitoria-Gasteiz
(1990) Naturzale. Cuadernos de Ciencias Naturales, 7, pp. 75-116.
- 29 Rams, S.
¿Para qué sirven los musgos después de navidad? Primera parte. El papel ecológico de los briófitos
(2008) Eubacteria, 20, pp. 15-18.
- 30 Heras, P., Soria, A.
Musgos y hepáticas urbanos de la ciudad de Vitoria-Gasteiz
(1990) Naturzale. Cuadernos de Ciencias Naturales, 7, pp. 75-116.
- 31 Glime, J. M.
Economic and Ethnic Uses of Bryophytes.
(2007) Flora of North America Editorial Committee, eds
- 32 Ilsong co.
[http:// www.ilsong.co.kr](http://www.ilsong.co.kr)
- 33 Xero Flor America (XFA).
<http://www.xeroflora.com>
- 34 Gartenheim.
<http://www.gartenheim.de>
- 35 Verde Perfil
<https://verdeperfil.com/en/>
- 36 Mountainmoss
<http://mountainmoss.com/>

37 International Association of Bryologists (IAB)
<http://iab-bryologists-website.blogspot.com.es/>

38 Colbond
<http://www.colbond-usa.com/>

39 Woodward, D
Survival in a harsh environment: Life in Tudor and Stuart England.
(1996) The University of Hull Press

40 Glime, Janice M.
Bryophyte Ecology. Volume 5. Uses.
(2008) Ebook sponsored by Michigan Technological University and the International Association of Bryologists

41 Koehler, M.
Plant survival research and biodiversity: lessons from Europe
(2003) Greening Rooftops for Sustainable Communities: Chicago

42 Observatorio de I+d+i UPM
<http://www.upm.es/observatorio/vi/>

43 Euroestudios I+D+i
<http://www.euroestudios.es/>

44 Faulders Studio, Eppley Lab
Materialised:protonemata by thom faulders
(2014) Syntethic Design Biotopes
<http://syndebio.com/contaminant/>

45 Faulders Studio
(2009) BRYOPHYTE BUILDING
<http://faulders-studio.com/BRYOPHYTE-BUILDING>

46 Fletcher, M.
Moss grower's handbook
(1991) ISBN 0 951 71 760 X, pág 21

47 Ibíd.

48 : Atherton, I.; Bosanquet, S.; Lawley M.
Mosses and Liverworts of Britain and Ireland. A Field Guide.
(2010) British Bryological Society. ISBN: 978-0-9561310-1-0.

49 Glime, J. M.
Economic and Ethnic Uses of Bryophytes.
(2007) Flora of North America Editorial Committee, eds

⁵⁰ Heras, P., Soria, A.
Musgos y hepáticas urbanos de la ciudad de Vitoria-Gasteiz
(1990) Naturzale. Cuadernos de Ciencias Naturales, 7, pp. 75-116.

51 Parque Natural de la Sierra de Cebollera
<http://www.sierradecebollera.com/>

52 Gobierno de la Rioja
<https://www.larioja.org/>

53 Glime, J. M.
Economic and Ethnic Uses of Bryophytes.
(2007) Flora of North America Editorial Committee, eds

3. Bio-receptividad

El bio-ingeniero Guillitte O. ha definido la bio-receptividad como la aptitud de un material (u otro objeto inanimado) a ser colonizado por uno o varios grupos de organismos vivos sin, necesariamente, experimentar ningún bio-deterioro. Además, la bio-receptividad puede también ser definida como la totalidad de las propiedades de un material que contribuyen al establecimiento, anclaje y desarrollo de fauna y/o flora¹.

El mismo material puede ser colonizado de manera diferente según su localización geográfica, o incluso según su orientación. El grado de colonización de su superficie depende no solo de sus propiedades inherentes sino también de las condiciones medio-ambientales del entorno en que se ubica. Su bio-colonización no va a ser un fenómeno estático, sino cambiante, dependiendo de los cambios estacionales, las modificaciones físico-químicas que sufrirá el material a lo largo de los años²...

Las condiciones climáticas determinan, dependiendo de la posición geográfica, la humedad y las condiciones de luz incidentes sobre una superficie edificada, es decir, su micro-clima, que es el principal factor medio-ambiental que influencia la bio-colonización³. Si la humedad es alta y las condiciones de luz y temperatura son las adecuadas, la colonización de las superficies de los nuevos edificios puede ocurrir muy rápidamente⁴.

A este efecto, Warscheid and Braams concluyen, en el caso de la bio-receptividad de la piedra, que esta está descrita por su estructura física y composición química, mientras que la intensidad de la colonización microbiana está determinada por las condiciones climáticas y la eutrofización antropogénica de la atmósfera⁵.

También Barberousse *et al* consideran en su estudio que factores como la amplitud térmica, las precipitaciones, la higrometría, la distancia al mar y la proximidad a la vegetación son factores que influyen en la colonización de las fachadas de los edificios por algas y bacterias⁶.

O. Guillitte distingue entre bio-receptividad primaria, secundaria y terciaria⁷:

- Cuando un material no ha sido todavía expuesto a la colonización, la bio-receptividad se refiere al potencial inicial de colonización de dicho material por parte de organismos. En tanto las propiedades del material permanecen muy similares o idénticas a las de su estado inicial, Guillitte propone hablar de bio-receptividad primaria
- Las propiedades del material pueden evolucionar en el tiempo por la acción de los organismos colonizadores u otros factores, ocasionando un nuevo tipo de bio-receptividad denominado secundaria
- Cuando una actividad humana afecta al material modificando sus características iniciales o secundarias (por ejemplo, la aplicación de una pintura) Guillitte propone hablar de bio-receptividad terciaria

Guillitte también define una "bio-receptividad extrínseca", que es la que no está relacionada con las condiciones iniciales del material, sino que se debe a depósitos sobre el mismo, tales como depósitos de tierra, polvo, u otras partículas orgánicas que se acumulan sobre la superficie del material, proporcionando un sustrato sobre el que las especies pueden prosperar. En el caso de la arquitectura este tipo de bio-receptividad es de especial importancia, ya que afecta al comportamiento a largo plazo de cubiertas y fachadas de las edificaciones, especialmente a aquellas con texturas muy rugosas y topologías muy variables⁸.

También es importante considerar para valorar la bio-receptividad de un material las distintas capas que lo conforman; a este efecto, Vacher *et al* concluyen en su estudio que, en cuanto a la colonización por hongos, la capa de acabado de los materiales es tan importante como el sustrato sobre el que se aplica⁹.

3.1. Factores intrínsecos que determinan la bio-receptividad

La bio-receptividad de un material está determinada por diversos factores intrínsecos:

Porosidad

A priori, una alta porosidad del sustrato permite una mayor retención de humedad en su microestructura¹⁰, lo que favorece su bio-receptividad.

D´Orazio *et al* establecen una correlación entre la porosidad total y la bio-receptividad de dos materiales de construcción, ladrillos de arcilla y sistemas de fachada SATE¹¹. Sin embargo, en comparación con otros factores analizados, no consideran que la porosidad sea un factor clave. Además, dicha correlación tiene mayor importancia en las muestras realizadas ubicadas al exterior que a las chequeadas en condiciones de laboratorio.

Coutinho *et al* afirman, tras revisar el estado del arte, que tanto la porosidad como la rugosidad juegan un papel clave en la bio-receptividad de los materiales cerámicos¹².

En el caso de los morteros, Tran *et al* no detectaron influencia de la porosidad en las pruebas de laboratorio en cuanto a la tasa de colonización por algas¹³.

En el caso de los hormigones, Dubosc *et al* correlacionan el contenido de humedad en el hormigón con su porosidad, determinando que por este motivo, una mayor porosidad del hormigón causa una mayor bio-colonización por algas¹⁴.

Estas diferencias en los resultados de las investigaciones indica la complejidad de valorar la influencia de la porosidad en la bio-receptividad sin valorar, además, la distribución de los poros en función de su tamaño.

La distribución de los poros en función de su tamaño tiene gran importancia; es necesario diferenciar entre macroporosidad y microporosidad. La macroporosidad, se refiere a la porosidad formada por poros de un tamaño que no permiten el desplazamiento de agua por presión capilar.

Una alta macroporosidad del sustrato implica una desventaja para la bio-receptividad del sustrato, puesto que facilita la evaporación del agua contenida en el sustrato, dificultando el crecimiento de la especie vegetal.

Una alta microporosidad, unida a una red capilar abierta permite el rápido desarrollo de organismos colonizadores gracias al agua de capilaridad retenido dentro del sustrato.

Rugosidad

Los sustratos con mayor rugosidad facilitan que la colonización vegetal empiece a mayor velocidad. La rugosidad facilita la división de los flujos de agua incidentes en la superficie del sustrato; así, las esporas, semillas, u otros tejidos propagadores de las especies vegetales se sedimentan con mayor facilidad. Las superficies rugosas favorecen la retención de materia orgánica, polvo y gotas de lluvia. Por ello, existe un interés en desarrollar herramientas que permitan establecer un vínculo entre la rugosidad de la superficie de un material de construcción como el cemento y su colonización por microorganismos¹⁵.

La correlación entre la rugosidad superficial de un material y su bio-receptividad ha sido establecida para distintos materiales de construcción, como piedra¹⁶, materiales cerámicos¹⁷, morteros¹⁸...

Una vez que las primeras especies colonizan la superficie del sustrato, la rugosidad deja de ser un factor determinante. La diferencia entre la colonización sufrida por los sustratos de superficies rugosas y la colonización sufrida por los sustratos de superficies menos rugosas se atenúa, debido a la bio-receptividad extrínseca al material que originan las especies vegetales pioneras; esta bio-receptividad extrínseca está causada, o bien por el aumento de la superficie de asentamiento que suponen las especies pioneras ya implantadas, o bien por la alteración de las condiciones químicas de la superficie del sustrato a través de los productos metabólicos liberados por dichos organismos¹⁹.

Composición química

La composición química de la capa exterior de un material también es uno de los factores que determina su bio-receptividad²⁰. La composición química determina el pH, y también el aporte de nutrientes por parte del sustrato para la especie vegetal colonizadora, aunque también exista aporte exógeno de nutrientes²¹.

pH

El pH es un valor determinante para la bio-receptividad de un material²². Por ejemplo, un mortero fresco está caracterizado por un valor de pH de 12 o superior, y bajo condiciones tan alcalinas la mayoría de los micro-organismos son incapaces de desarrollarse. Sin embargo, el proceso de carbonatación del mortero, en el que el hidróxido cálcico del cemento reacciona con el dióxido de carbono atmosférico, hace que el pH del mortero baje hasta valores entre 8-9²³, creando condiciones más favorables para la propagación de microbios²⁴, hongos²⁵....

A este efecto, Tran *et al* consideran que el Ph uno de los factores más determinantes para caracterizar la bio-receptividad, de un material, en su estudio en concreto un mortero²⁶.

3.2. Materiales de construcción bio-receptivos

Los materiales de construcción son, generalmente, propensos a ser colonizados por vegetación y /o bio-films en algún momento a lo largo de su vida útil²⁷. Denominamos bio-film al desarrollo de comunidades microbianas en las superficies de los materiales, que tienden a ganar complejidad gradualmente²⁸.

Los organismos que componen un bio-film (algas, cianobacterias, bacterias heterotróficas, hongos, líquenes, protozoos, artrópodos y briófitos²⁹) producen moléculas metabólicas como ácidos y polisacáridos que contribuyen al proceso de deterioro de los materiales³⁰.

Colonias de microbios y organismos fotosintéticos actúan como colonizadores primarios en superficie de los edificios, generando condiciones físico-químicas más adecuadas para su colonización por posteriores organismos³¹.

El modo en que diversas comunidades de micro-organismos establecen sinergias o compiten en los materiales de construcción está todavía en proceso de ser bien comprendido^{32 33}.

Este fenómeno, generalmente ha sido visto como una patología en las edificaciones³⁴, especialmente cuando se trata de edificaciones históricas³⁵.

Evitar que las superficies de acabado de los edificios sean colonizadas por vegetación y /o bio-films es una constante preocupación en el mantenimiento del patrimonio histórico edificado³⁶, pero también en el caso de materiales de construcción usados en las edificaciones convencionales³⁷. La colonización de los acabados de edificios puede generar inconvenientes tales como daños físico-químicos a los distintos materiales de construcción³⁸, deteriorar la superficie reflectante de cubiertas aumentando las ganancias solares³⁹, perjuicios estéticos⁴⁰...

Existe abundante bibliografía que explora la bio-receptividad de materiales tradicionales de construcción, como las distintas clases de piedras^{41 42 43 44}, materiales cerámicos⁴⁵, hormigón^{46 47}, placas de yeso⁴⁸, morteros^{49 50 51}, cementos⁵², sistemas de aislamiento térmico por el exterior (SATE)⁵³...

Generalmente, esta bibliografía investiga las causas de la bio-receptividad de un material con el objeto de evitar su bio-colonización, entendida como una patología constructiva⁵⁴.

Sin embargo, potenciar la bio-receptividad de los materiales para que sean bio-colonizados, en condiciones controladas, es una estrategia para lograr áreas extra de superficie ajardinada⁵⁵ en las fachadas de las edificaciones.

3.3. Investigaciones en curso sobre desarrollos de materiales y sistemas constructivos con bio-receptividad mejorada

Tal y como Cruz y Beckett recogen en su artículo "Bioreceptive design: A novel approach to biodigital materiality"⁵⁶, el diseño de cualquier sistema de construcción basado en materiales bio-receptivos requiere de la implementación de equipos de trabajo inter-disciplinarios.

Es necesario contar con expertos en materias que abarcan conocimientos en campos científicos y técnicos tan diversos como arquitectura, construcción, biología, edafología, botánica, técnicas de laboratorio, fabricación (robótica, impresión 3D) herramientas informáticas (de simulación energética, análisis medio-ambiental)...

El diseño bio-receptivo, según dichos autores, es específicamente arquitectónico en su aplicación, determinado por los materiales empleados y dependiente de métodos muy sofisticados de computación tanto para la fabricación como para realizar complejas simulaciones⁵⁷.

En el diseño de sistemas constructivos bio-receptivos es muy importante implementar simulaciones medio-ambientales que permitan optimizar el diseño en función de los factores climáticos, incluyendo, por supuesto, la humedad y la temperatura⁵⁸.

Cruz y Beckett sostienen que, mientras que en el campo de la arquitectura sostenible es suficiente con analizar la influencia del clima a una escala "macro" (la de un edificio), en el diseño de sistemas constructivos bio-receptivos es necesario manejar varias escalas simultáneamente, tanto para analizar el diseño efectuado, como para el clima en el que se va a implantar el sistema constructivo:

- Escala "macro": se puede analizar con diverso software (Ecotect, Diva plug-in for Rhino, Ladybug...) las orientaciones y superficies de las distintas fachadas y su exposición al clima
- Escala "meso": es necesario evaluar más específicamente la textura y morfología de los componentes del sistema de fachada para medir los distintos "microclimas" generados en cada superficie. Existe software para realizar análisis numérico de la retención de humedad y su movimiento a través de los distintos componentes del sistema

- Escala “micro”: El comportamiento del sistema de fachada diseñado depende, en última instancia, de las propiedades de cada componente material, como el Ph de su interfase con la especie vegetal, la porosidad y otras propiedades analizadas a escala micro mediante porosímetros, tomografías de rayos X...

La combinación de todos estos factores materiales y medio-ambientales analizados a diversas escalas permite un mayor entendimiento del diseño realizado⁵⁹.

El trabajo en las condiciones controladas de un laboratorio es fundamental, en especial en todo lo relativo al estudio del crecimiento de la especie; sin embargo, los prototipos fabricados han de ser exitosos implantados en condiciones reales, al exterior.

Hay, en la actualidad, una variedad de componentes de la envolvente de los edificios así como elementos de fachada que están siendo diseñados para ser bio-receptivos, usando como principio un adecuado diseño de las propiedades físico-químicas del material.

Los materiales bio-receptivos así diseñados constituyen un “andamiaje” con las condiciones adecuadas para que micro-organismos, algas, líquenes y briófitos se establezcan y prosperen sobre ellos⁶⁰, mediante el empleo de valores óptimos de rugosidad, pH, porosidad y absorción de agua.

El diseño bio-receptivo de elementos de construcción es un campo que está en sus primeros pasos de desarrollo, por lo que es fundamental evaluar los resultados obtenidos con cada nuevo prototipo. En muchos casos el crecimiento de vegetación es monitorizado en todas sus fases para aprender a distinguir qué factores aceleran o ralentizan dicho crecimiento⁶¹.

A continuación se realiza una descripción del estado del arte de las investigaciones en curso sobre el desarrollo de materiales y sistemas constructivos con bio-receptividad mejorada.

Conjunto multicapa en base cemento, aplicable como soporte biológico para fachadas de edificios

La investigadora Sandra Manso y un equipo de la Universidad Politécnica de Cataluña han desarrollado⁶² un sistema constructivo en base a un conglomerante hidráulico de bajo pH, cuya función principal es la de servir como soporte biológico para el crecimiento y desarrollo de determinados organismos biológicos (Ilustración 58), concretamente ciertas familias de cianófitos, clorófitos y briófitos.

Se trata de potenciar las propiedades de bio-receptividad de los materiales de construcción cementosos para implementarlos como elemento ornamental⁶³ en las zonas que interesen de un edificio o construcción.

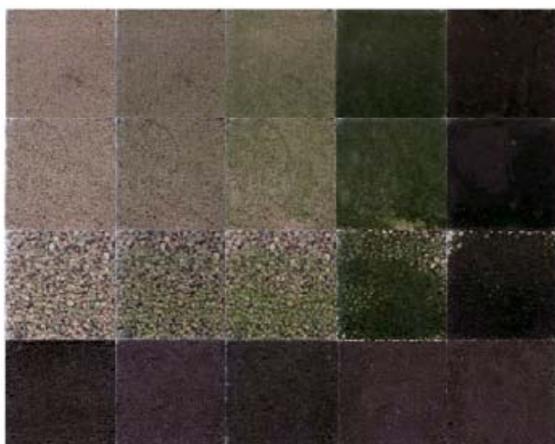


Ilustración 58: Evaluación visual del crecimiento biológico en las muestras, fuente Sandra Manso

Tal y como reza la memoria de este proyecto:

"Dicho soporte está especialmente diseñado para controlar el crecimiento de los organismos biológicos citados en las zonas que revistan interés, para lo cual se configura como un conjunto constituido por varias capas que permiten captar el agua de lluvia, almacenarla en la microestructura interna del material junto con el aporte nutritivo para los organismos biológicos y controlar la superficie que colonizarán y en la que crecerán dichos organismos, siendo de gran importancia el procedimiento y material empleado para evitar la pérdida de agua de la estructura y delimitar las zonas de crecimiento de los organismos.

El conjunto comprende las siguientes capas:

- Una estructural (1) que corresponde a la capa con función de soporte estructural del edificio o construcción correspondiente, la cual cumplirá con los requisitos especificados en proyecto en cada caso.
- Una capa de anclaje e impermeabilización (2) que, situada sobre la anterior actúa como interfase o capa intermedia y, cuyas funciones serán las de anclaje y/o impermeabilización. Más concretamente, esta interfase deberá mejorar, en caso necesario, el anclaje entre las capas estructural y biológica y, además, servir de protección frente al paso de agua hacia la capa estructural para evitar que pueda provocar deterioro de dicha capa por corrosión de las armaduras u otras patologías, realizando por tanto también una función impermeabilizante.
- Una capa biológica de colonización, adhesión, así como de retención de agua (3) para favorecer el crecimiento biológico por parte de diversas familias de organismos. Esta capa tiene función de soporte biológico así como de retención hídrica, permitiendo así disponer de un reservorio de agua para los organismos que se cultiven en su superficie. Por ello, el material con el que está realizada, tal como se describirá más adelante, deberá cumplir con los requisitos de pH, rugosidad superficial y porosidad que se consideren necesarios.
- Y, finalmente, una capa de revestimiento e impermeabilización (4) que actúa de manera selectiva, permitiendo la entrada de agua al material pero no su salida. Esta capa es pues, una capa de transferencia, cuyas funciones se centran en la absorción, ayuda a la retención y direccionamiento de la salida del agua desde la capa biológica. Es importante destacar que esta última capa cuenta con la particularidad de ser discontinua y no cubrir por completo la capa biológica, es decir, presenta una serie de huecos (5) que dejan al descubierto la capa inmediatamente inferior a ella que es la capa biológica. De esta manera, la captación de agua se realizará por toda la superficie redirigiendo su salida por las zonas en que la capa biológica está en contacto directo con el ambiente, ayudando a su retención y que serán las zonas en las que se favorecerá el crecimiento biológico."

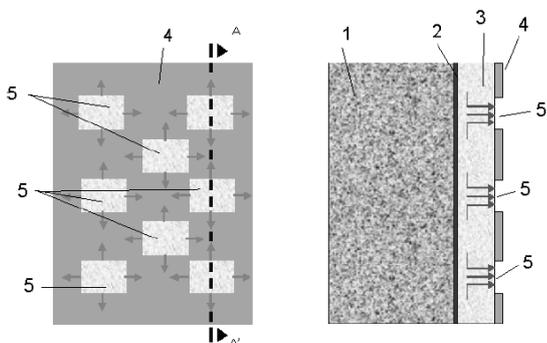


Ilustración 59: Capas del conjunto, fuente Sandra Manso

La principal aportación de este sistema es la capa biológica, la más importante del conjunto. Se proponen dos posibilidades para el material de esta capa:

- El conglomerante hidráulico es un cemento convencional con aditivos que permitan la reducción del pH sin afectar a las propiedades físico-químicas y mecánicas.
- El conglomerante hidráulico es diferente al convencional, un cemento de fosfato de magnesio, conocido como MPC, del inglés "Magnesium phosphate cement".

Este sistema presenta un acercamiento a la problemática de las fachadas verdes muy relacionado con el objetivo de estudio de la presente tesis, sin embargo existen diferencias de criterio entre este estudio y la presente tesis:

- El sistema descrito pretende la colonización espontánea del soporte, la cual puede suceder, o no, como se puede comprobar en las propias conclusiones del artículo publicado por la misma investigadora Manso, S.⁶⁴, evaluando la colonización natural de muestras del soporte desarrollado. La investigadora concluye que si se pretende una rápida colonización vegetal de la superficie del sistema son indispensables medidas extras. En esta tesis se propone una primera colonización vegetal forzada que actúe como especie pionera
- El sistema descrito en este punto es un sistema multicapa, mientras que el que se estudia en esta tesis va a ser monocapa. La colonización se reserva a determinadas áreas en las que no existe la capa (4) de revestimiento
- El sistema descrito en este punto y en la presente tesis parten del uso de un cemento MPC, pero las materias primas y dosificaciones difieren, por lo que el sustrato final resultante bio-receptivo va a ser distinto
- El cemento MPC empleado en la presente tesis doctoral se aligera mediante el empleo de residuos industriales empleados como áridos

Proyectos desarrollados en BiotA Lab, The Bartlett School of Architecture

En torno al cemento bio-receptivo desarrollado por Sandra Manso se están desarrollando varios proyectos en el BiotA Lab de la Escuela de Arquitectura Bartlett, en la University College London.

BiotA Lab se define como una plataforma de diseño e investigación multi-disciplinar que mezcla biología, arquitectura e ingeniería⁶⁵. A continuación reproducimos la descripción de las principales características de dichos proyectos recogida en el artículo redactado por Cruz y Beckett "Bioreceptive design: A novel approach to biodigital materiality"

Prototipo de panel de fachada⁶⁶

A partir de la patente de Sandra Manso se ha desarrollado un prototipo de panel de fachada (Ilustración 60). Esta investigación examina la potencial bio-colonización de la capa superficial del panel.

El panel está diseñado como panel de acabado de fachada, que proporciona la necesaria protección al edificio, pero que además es capaz de actuar como sustrato para el crecimiento de plantas criptógamas.



Ilustración 60: Prototipo de panel de fachada, fuente BiotA Lab

Para su fabricación se han empleado técnicas de fabricación y diseño digital que pretenden explorar como una determinada geometría 3D puede aumentar su bio-receptividad y mejorar sus prestaciones.

Los paneles están concebidos para su empleo en orientación noroeste y se fabrican mediante el empleo de distintas capas de material cementoso en moldes de fraguado mecanizados.

El diseño se basa en la observación de las cortezas de los árboles, generando geometrías que en combinación con el empleo de distintas capas de material (Ilustración 61) determinan en qué áreas puede generarse vegetación y en cuáles no.

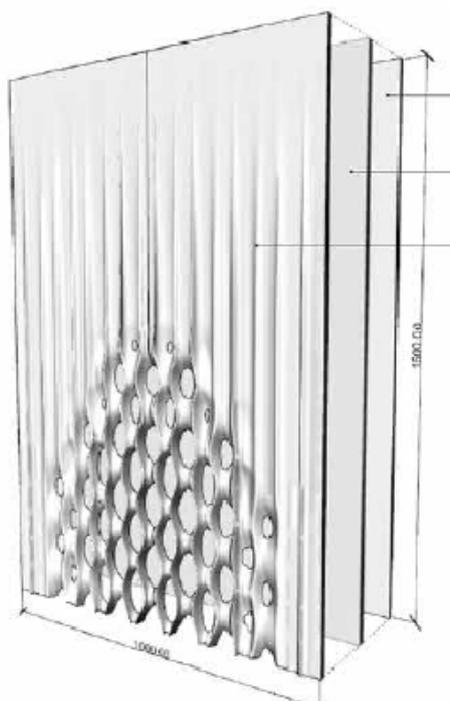


Ilustración 61: Capas del prototipo de panel de fachada, fuente BiotA Lab

La geometría del panel presenta diversas depresiones, acanaladuras y estrías para generar las distintas áreas de crecimiento de vegetación y, a su vez, guiar el agua procedente de las precipitaciones hacia ellas. Se generan áreas expuestas al soleamiento y otras, más protegidas en sombra.

Los autores también incluyen en su diseño un componente estético, basado en motivos emparentados con el vocabulario del Art Nouveau y el Art Deco, con el objeto de mejorar la apreciación del panel por parte del usuario.

Una evolución importante respecto al anterior sistema patentado por Sandra Blanco es que, en las zonas previstas para la bio-colonización vegetal, se disemina una mezcla de esporas de briófito y células de algas mediante un nuevo procedimiento robótico que permite una disposición muy precisa de dicho material orgánico.

Esta mejora permite, en teoría, solventar uno de los principales problemas que Sandra Manso detectó en el sistema patentado por ella: La necesidad de incentivar el crecimiento vegetal para que la bio-colonización sea más rápida y efectiva.

Actualmente, estos prototipos están siendo testados y monitorizados durante un período de 12 meses en una ubicación exterior para evaluar su comportamiento.

Según sus diseñadores, el crecimiento de organismos vegetales en el panel tiene como objeto:

- Mejorar las propiedades térmicas del panel
- Proporcionar absorción solar
- Absorber CO₂ y otros contaminantes de la atmósfera

Ladrillos bio-receptivos para crecimiento de briófito⁶⁷

Estos ladrillos están diseñados a partir de complejas geometrías (Ilustración 62) concebidas para aumentar la superficie disponible para el crecimiento microbiano dentro de los límites del volumen virtual que genera la geometría.



Ilustración 62: Ladrillos bio-receptivos para crecimiento de briófito, fuente BiotA Lab

Se inspiran en la observación, en un paraje cerca de Londres, de rocas areniscas bio-colonizadas por líquenes, musgos y algas. A partir de un estudio de materiales se ha desarrollado una mezcla de mortero MPC y roca arenisca que busca imitar la composición química y el pH de las rocas observadas.

Este composite se ha diseñado para tener un Ph con valores entre 7-8, los considerados óptimos para la proliferación de las especies de briófitos deseadas, *Atrichum Undulatum* y *Hedwigia Ciliata*.

Se ha optimizado el tamaño de los agregados y la dosificación de agua para obtener unos valores adecuados de porosidad y otras propiedades, incluyendo retención de agua, rugosidad superficial y red capilar, además de crear un material adecuado para su impresión en 3D.

Para la impresión de los ladrillos se ha empleado una impresora 3D ZCorp 510, que imprime en capas de 0,25 mm de espesor usando un aglomerante orgánico en distintas cantidades y tasas de deposición.

Los ladrillos, una vez impresos, se han secado a 30° y han sido diseminados con diversas clases de bacterias para encontrar nuevas formas de estabilizar estructuralmente el MPC.

El diseño de los ladrillos emplea un sistema estructural de ramificaciones, basado en la geometría de los corales, para incluir elementos estructurales primarios y secundarios; este sistema está desarrollado mediante simulaciones por ordenador con distintos algoritmos, siguiendo un método por el que entre cada línea (rama) estructural se deja suficiente espacio intersticial para el crecimiento de la especie de musgo deseada.

Bio-andamiaje para el crecimiento de micelio en superficies arquitectónicas⁶⁸

Los bio-andamiajes permiten el crecimiento de células y tejidos en geometrías complejas. En, y, sobre ellos, las células pueden crecer y proliferar, pero la geometría general del conjunto es la determinada por el bio-andamiaje.

El concepto de bio-andamiaje proviene de la investigación realizada en ingeniería de tejidos, cuyo objetivo es el desarrollo de sustitutos biológicos que sean funcionales para restaurar o reemplazar tejidos biológicos dañados⁶⁹.

En el campo del diseño arquitectónico, el concepto de un bio-andamiaje está ligado a materiales bio-receptivos empleados como huéspedes para las especies vegetales, con el objeto de hacerlas crecer en predeterminadas geometrías no factibles en la naturaleza.

Dicho material ha de poseer las propiedades adecuadas para potenciar su bio-receptividad. Las técnicas de fabricación contemporáneas permiten un catálogo de geometrías casi ilimitado: En concreto, la impresión en 3D posibilita la creación de complejas geometrías que potencian o limitan el crecimiento vegetal en determinadas áreas.

Una posibilidad es que el mismo material que forma el bio-andamiaje aporte nutrientes a las células en desarrollo, degradándose a la par que los tejidos vegetales se desarrollan. En este caso se trata de bio-andamiajes temporales.

La otra posibilidad es que el bio-andamiaje esté diseñado como una estructura permanente que estimula, a través de sus propiedades, el crecimiento de la especie vegetal, permaneciendo como parte del sistema a través de todo su ciclo de vida, aportando la resistencia mecánica del conjunto.

El proyecto en investigación en BiotA Lab se basa en la extrusión robótica de materiales composite basados en celulosa, que actúan como un bio-andamiaje que aporta soporte físico y nutrientes para el crecimiento de micelio.

Se trata de un intento de incluir hongos de manera ordenada en la envolvente arquitectónica. El micelio es la masa de filamentos unicelulares (hifas) que constituye el cuerpo vegetativo de un hongo.

En este proyecto, el crecimiento del micelio está confinado a determinadas áreas dentro de paneles arquitectónicos (Ilustración 63). El proyecto intenta coordinar escalas diferentes de trabajo: la escala de la biología, en la que se ha abordado el diseño microscópico, y la escala macro de la arquitectura.



Ilustración 63: Pantalla de composite de celulosa para potenciar el crecimiento de micelio, fuente BiotA Lab

Estas pantallas de micelio se han fabricado con un brazo robótico dotado de una cabeza de extrusión que permite controlar diversas variables de la deposición de material, entre ellas la altura y la velocidad.

La geometría se ha determinado con un patrón algorítmico de crecimiento, de tal modo que se ha aumentado la porosidad y bio-receptividad de los canales para el crecimiento de micelio. Los distintos gradientes de porosidad, definidos por la propia permeabilidad del material y la geometría generada, en combinación con la variación en el porcentaje de celulosa empleada, permiten potenciar o restringir el crecimiento de micelio.

Las esporas de micelio se han diseminado manualmente en el bio-andamiaje filamentososo generado y se han incubado en condiciones óptimas de laboratorio durante una semana.

A partir de los patrones de crecimiento del micelio así incubado se han desarrollado nuevos algoritmos de crecimiento, para fabricar nuevas geometrías, que se disponen sobre las ya fabricadas. Estas piezas son de nuevo incubadas y el ciclo se ha repetido, generando un material composite compuesto de muchas capas

Pantallas de gel para el crecimiento de algas⁷⁰

Este proyecto explora la bio-receptividad de un nuevo gel bio-receptivo, elaborado a partir de la impresión en 3D de un hidro-gel semi-sólido que contiene células de algas (Ilustración 64); el hidro-gel es un composite de diversas sustancias, entre ellas "curran" (un nuevo material basado en nanofibras de celulosa) y ácido algínico.

Este proyecto se pretende emplear en paneles de fachada, con el objeto de que puedan albergar especies de algas, a las que el gel proveería de nutrientes. La finalidad de este prototipo puede ser estética, o destinarse para la producción de biomasa y el tratamiento de los residuos contenidos en el agua.

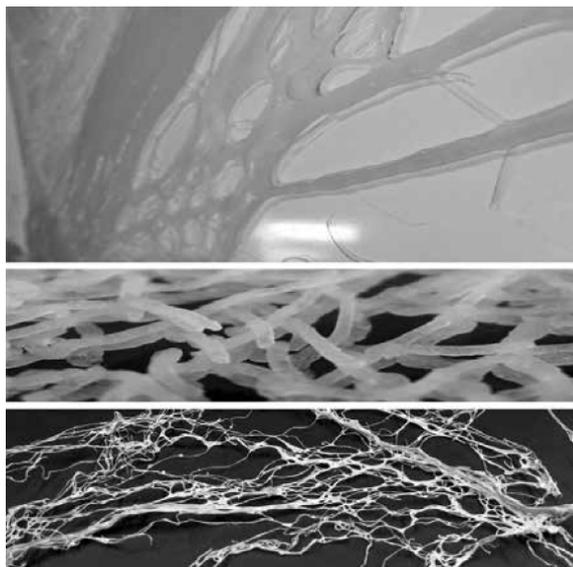


Ilustración 64: Pantallas de gel para el crecimiento de algas, fuente BiotA Lab

El diseño del material utiliza una cierta cantidad de agua para proporcionar un medio de desarrollo para el alga *Chlorella Sorokiniana*, pero de tal modo que el gel resultante tenga la viscosidad apropiada.

Se trata de un enfoque distinto al empleado hasta la fecha cuando se ha intentado integrar algas en la envolvente edificatoria; los acercamientos hasta ahora se han basado en confinar cultivos de algas en bio-reactores que se integraban en la fachada, bien con forma de tubos o bien con forma de paneles, como en el caso de la fachada diseñada por Arup/SSC/Colt para el edificio BIQ⁷¹.

Este diseño a base de bio-reactores ocasiona una sobrecarga estructural debido a la cantidad de agua necesaria implicada, así como un elevado gasto energético para hacer funcionar el sistema de bombas de circulación necesarias; se trata de sistemas caros, de complicado mantenimiento.

La propuesta de pantallas receptoras de gel no se basa en contenedores, sino que intentan generar crecimiento de algas en la misma superficie del gel. Al tratarse de un gel impreso en múltiples capas, las inferiores pueden estar más deshidratadas para aportar la rigidez necesaria a las capas superiores, que se humedecen en función de la humedad del aire o las precipitaciones atmosféricas.

El objetivo es lograr grandes superficies de crecimiento de biomasa, que no originen un gran aumento de peso en la fachada y que requieran poco mantenimiento; potencialmente, se trata de un sistema constructivo reciclable.

La geometría de estas pantallas está inspirada por las formaciones de algas en medios acuáticos naturales; se trata de geometrías lineales que generan una red de canales para irrigar el panel a partir de las precipitaciones atmosféricas.

Los patrones se han impreso con un brazo robótico, que permite su control digital.

Componentes de fachada de hormigón aligerado para crecimiento de criptógamas

Ese proyecto consiste en el diseño y fabricación de elementos de fachada de hormigón aligerado que actúan como un bio-andamiaje sobre el que se aplica una capa exterior bio-receptiva (Ilustración 65).

Se trata de elementos dispuestos a modo de mosaico en diversos emplazamientos de una fachada, diseñados para ser montados y desmontados periódicamente. Los elementos son sembrados, incubados hasta que se desarrollan especies vegetales, e instalados sobre una fachada, permitiendo por su diseño ser fácilmente desinstalados para ser re-incubados, limpiados o sustituidos por otros componentes.



Ilustración 65: Componentes de fachada de hormigón aligerado para crecimiento de criptógamas, fuente BiotA Lab

El diseño de su geometría ha sido desarrollado a partir de algoritmos que predicen la división celular, para definir las áreas de crecimiento, e incluye canales para que el agua fluya hasta estas áreas. Se tiene en cuenta análisis de soleamiento y vientos predominantes.

El material se somete a un riguroso control de diseño para definir el tamaño de los áridos empleados, generando una gradación entre superficies de alta bio-receptividad, con gran rugosidad y porosidad, hasta áreas de baja bio-receptividad, lisas y de baja porosidad.

Bio Ceramic System

Bio Ceramic System⁷² es una investigación realizada dentro del programa Open Thesis Fabrication⁷³, desarrollado por el IaaC, Institute for advanced architecture of Catalonia⁷⁴.

La investigación desarrolla un experimento desarrollado por Iker Luna, tutorizado por Luis Fraguada, que explora la bio-receptividad de un material cerámico, aprovechando su porosidad para retener agua, en combinación con fibras naturales para mejorar otras propiedades.

La especie usada para testar la bio-receptividad es un briófito, de una especie no especificada.



Ilustración 66: Bio ceramic system, fuente Open Thesis Blog

El material cerámico investigado es la arcilla de bentonita, debido a sus valores de contenido de humedad. Se incorpora serrín de pino a la arcilla en distintas proporciones con el fin de producir un acabado rugoso que mejora el proceso de crecimiento de la especie vegetal. A la mezcla resultante también se le añaden chamotte (grog clay), una materia prima cerámica, con el fin de mejorar sus propiedades, especialmente en cuanto a rotura.

Para estimular el crecimiento de la especie de briófito escogida, el autor usa lo que se conoce como un "batido de musgo", método de enraizamiento que se explicará con detenimiento en el capítulo 6. Básicamente, consiste en mezclar brotes de musgos con productos que favorezcan su crecimiento, al proporcionarle nutrientes y un pH adecuado (en este caso cerveza, azúcar y yogur).

El crecimiento del briófito en las muestras es analizado mediante Near infrared/Normalized Difference Vegetation Index (NIR/NVDI), tecnología que, en condiciones controladas, permite detectar las áreas con fotosíntesis activa mediante una cámara digital modificada.

El prototipo desarrollado está constituido por dos capas de cerámicas con distintas propiedades (Ilustración 67). La capa preparada para acoger el organismo vegetal está diseñada con una textura geométrica para evitar roturas, mayor porosidad, y tiene incorporada lana de roca. La segunda capa está esmaltada, y es menos porosa, para aumentar la rigidez del sistema, aunque está moldeada con alveolos que puedan almacenar agua.

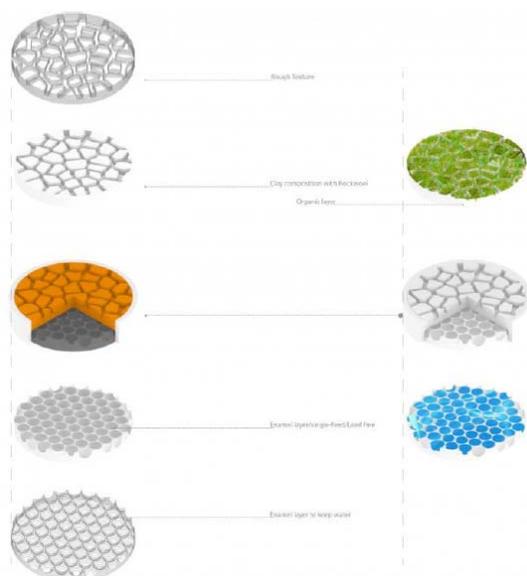


Ilustración 67: Diferentes capas del prototipo Bio ceramic system, fuente Open Thesis Blog

El prototipo que mayor bio-receptividad muestra es uno con una absorción de agua moderada. Otros prototipos con mayor absorción de agua tienen el inconveniente de desecarse a mayor velocidad también. El prototipo más favorable tiene incorporado chamotte y lana de roca, lo que mejora su comportamiento mecánico ante roturas.

Los autores de la investigación afirman que el crecimiento del briófito sobre la cerámica origina una amortiguación de la transferencia de calor, debido al agua que retiene el briófito para mantenerse vivo.

También advierten que, debido a las características inherentes al material cerámico usado, éste puede sufrir daños ocasionados por las condiciones climáticas del medio o el aumento de humedad que ocasiona la implantación del briófito.

Paneles porosos bio-receptivos elaborados a partir de vidrio reciclado

Se trata de un sistema constructivo actualmente en investigación, destinado a desarrollar paneles porosos bio-receptivos elaborados a partir de vidrio reciclado sinterizado⁷⁵.

Se trata de potenciar las propiedades de bio-receptividad de un material de construcción fabricado con vidrio reciclado, en vez de emplear materiales cementosos.

Según los investigadores Ferrándiz-Mas V. et al, el principal objetivo de esta investigación es el desarrollo de un material que pueda ser empleado en las fachadas de las edificaciones con las propiedades óptimas para promover su bio-colonización por microalgas.

Para ello, han desarrollado un método de fabricación de paneles de vidrio reciclado; parten de restos machacados de vidrios fabricados con carbonato de sodio (Na_2CO_3), caliza (CaCO_3) y arena de sílice (SiO_2) que son reducidos a polvo, ligados con un aglomerados con un aglutinante orgánico y agua y posteriormente prensados con una prensa hidráulica para dar la forma deseada; Las muestras resultantes se someten a un proceso de sinterización a distintas temperaturas comprendidas en un rango de 680 a 740^a C.

Ferrándiz-Mas V. et al han analizado la bio-receptividad de las distintas muestras intentando establecer una correlación entre esta y la variación, en función de la temperatura a la que ha sido fabricada cada muestra, de las siguientes propiedades del material:

- Porosidad
- Absortividad
- Ph
- Transmitancia lumínica

Para analizar la bio-receptividad de las muestras han inoculado en ellas el alga *C. Vulgaris*, y han determinado la cantidad de biomasa generada a lo largo del tiempo en cada muestra mediante el método de extracción de la clorofila-a (Ilustración 68), método cuya idoneidad ha sido contrastada en numerosas investigaciones^{76 77}.



Ilustración 68: Apariencia de los paneles porosos tras 1,2 y 3 semanas de estudio de su bio-receptividad, fuente Ferrándiz-Mas V. et al

La conclusión de esta investigación es que los paneles sinterizados a 700°C son los que han mostrado mejor bio-receptividad, lo que los investigadores atribuyen a que en ese rango de temperaturas, las muestras presentan los valores más altos de absortividad y porosidad.

En este caso, la transmitancia del material parece influir negativamente en la bio-receptividad del material, pero los autores lo atribuyen a que las muestras con mayor transmitancia luminosa son las que presentan valores más bajos de absortividad y porosidad, características intrínsecas de los materiales de las que numerosas investigaciones han determinado que presentan una correlación positiva con la bio-receptividad^{78 79 80}.

Texturas bio-colonizables, mancha natural

El diseñador Martín Azúa ha desarrollado dos prototipos que aprovechan la capacidad de los musgos y otras especies vegetales de colonizar distintos sustratos.

Texturas bio-colonizables

Según la página web del diseñador⁸¹, este proyecto consiste en “revestimientos arquitectónicos para suelos y fachadas capaces de acoger vida vegetal: mohos, líquenes, musgos, etc. Los edificios construidos con estos materiales se mimetizarán con el entorno artificial”. No hay más información disponible, pero de las fotografías de la web (Ilustración 69 e Ilustración 70) se deduce que se emplearían materiales cerámicos.



Ilustración 69: Proyecto texturas bio-colonizables, fuente Martín Azúa



Ilustración 70: Proyecto texturas bio-colonizables, fuente Martín Azúa

Mancha natural



Ilustración 71: Proyecto mancha natural, fuente Martín Azúa

El diseñador presenta el proyecto mancha natural (Ilustración 71) como una reflexión sobre la ornamentación natural. Según su página web, *“una serie de jarrones de cerámica blanca y muy porosa se depositaron en lugares singulares en plena naturaleza y durante un año fueron colonizados por musgos y líquenes creando micropaisajes que evidencian el poder de la naturaleza para apropiarse de lo artificial”*

3.4. Síntesis de lo expuesto en el capítulo

En el presente capítulo se define el concepto de bio-receptividad y material bio-receptivo. Se indica los diversos factores que inciden en la bio-receptividad de un material (porosidad, rugosidad, pH...)

A continuación se describe el estado del arte en cuanto a investigaciones en curso sobre desarrollos de materiales y sistemas constructivos con bio-receptividad mejorada, introduciendo el concepto de mortero MPC, del inglés “Magnesium phosphate cement”.

3.5. Referencias

-
- 1 Guillitte, O.
Bioreceptivity: a new concept for building ecology studies
(1995) *Science of the Total Environment*, 167 (1-3), pp. 215-220
- 2 Cruz, M., Beckett, R.
Bioreceptive design: A novel approach to biodigital materiality
(2016) *Architectural Research Quarterly*, 20 (1), pp. 51-64
- 3 Ariño, X., Gomez-Bolea, A., Saiz-Jimenez, C.
Lichens on ancient mortars
(1997) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 40 (2-4), pp. 217-224
- 4 Wee, Y.C., Lee, K.B.
Proliferation of algae on surfaces of buildings in Singapore
(1980) *International Biodeterioration Bulletin*, 16, pp. 113-117
- 5 Warscheid, Th., Braams, J.
Biodeterioration of stone: A review
(2000) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 46 (4), pp. 343-368
- 6 Barberousse, H., Lombardo, R.J., Tell, G., Couté, A.
Factors involved in the colonisation of building façades by algae and cyanobacteria in France
(2006) *Biofouling*, 22 (2), pp. 69-77
- 7 Guillitte, O.
Bioreceptivity: a new concept for building ecology studies
(1995) *Science of the Total Environment*, 167 (1-3), pp. 215-220
- 8 Cruz, M., Beckett, R.
Bioreceptive design: A novel approach to biodigital materiality
(2016) *Architectural Research Quarterly*, 20 (1), pp. 51-64
- 9 Vacher, S., Hernandez, C., Bärtschi, C., Poussereau, N.
Impact of paint and wall-paper on mould growth on plasterboards and aluminum
(2010) *Building and Environment*, 45 (4), pp. 916-921
- 10 Martínez, S., Puertas, F., Palomo, A., Blanco-Varela, M.T.
Morteros en el Patrimonio: conservación y reparación
(2008) *Novena Reunión RTPHC: Avances recientes en la investigación sobre patrimonio*, pp. 81-82
- 11 D'Orazio, M., Cursio, G., Graziani, L., Aquilanti, L., Osimani, A., Clementi, F., Yéprémian, C., Lariccia, V., Amoroso, S.
Effects of water absorption and surface roughness on the bioreceptivity of ETICS compared to clay bricks
(2014) *Building and Environment*, 77, pp. 20-28
- 12 Coutinho, M.L., Miller, A.Z., Macedo, M.F.
Biological colonization and biodeterioration of architectural ceramic materials: An overview
(2015) *Journal of Cultural Heritage*, 16 (5), pp. 759-777
- 13 Tran, T.H., Govin, A., Guyonnet, R., Grosseau, P., Lors, C., Damidot, D., Deves, O., Ruot, B.
Influence of the intrinsic characteristics of mortars on their biofouling by pigmented organisms: Comparison between laboratory and field-scale experiments
(2014) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 86, pp. 334-342
- 14 Dubosc, A., Escadellas, G., Blanc, P.J.
Characterization of biological stains on external concrete walls and influence of concrete as underlying material
(2001) *Cement and Concrete Research*, 31 (11), pp. 1613-1617
- 15 Apedo, K.L., Montgomery, P., Serres, N., Fond, C., Feugeas, F.
Geometrical roughness analysis of cement paste surfaces using coherence scanning interferometry and confocal microscopy
(2016) *Materials Characterization*, 118, pp. 212-22
- 16 Miller, A.Z., Rogerio-Candelera, M.A., Dionísio, A., Macedo, M.F., Saiz-Jiménez, C.
Assessing the influence of surface roughness on the epilithic colonisation of limestones by non-contact techniques [Evaluación de la influencia de la rugosidad superficial sobre la colonización epilítica de calizas mediante técnicas sin contacto]
(2012) *Materiales de Construcción*, 62 (307), pp. 411-424

-
- 17 Coutinho, M.L., Miller, A.Z., Macedo, M.F.
Biological colonization and biodeterioration of architectural ceramic materials: An overview
(2015) *Journal of Cultural Heritage*, 16 (5), pp. 759-777
- 18 Tran, T.H., Govin, A., Guyonnet, R., Grosseau, P., Lors, C., Damidot, D., Deves, O., Ruot, B.
Influence of the intrinsic characteristics of mortars on their biofouling by pigmented organisms: Comparison between laboratory and field-scale experiments
(2014) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 86, pp. 334-342
- 19 Guillitte, O., Dreesen, R.
Laboratory chamber studies and petrographical analysis as bioreceptivity assessment tools of building materials
(1995) *Science of the Total Environment*, 167 (1-3), pp. 365-374
- 20 Miller, A.Z., Dionísio, A., Laiz, L., MacEdo, M.F., Saiz-Jimenez, C.
The influence of inherent properties of building limestones on their bioreceptivity to phototrophic microorganisms
(2009) *Annals of Microbiology*, 59 (4), pp. 705-713
- 21 Guillitte, O., Dreesen, R.
Laboratory chamber studies and petrographical analysis as bioreceptivity assessment tools of building materials
(1995) *Science of the Total Environment*, 167 (1-3), pp. 365-374
- 22 Warscheid, Th., Braams, J.
Biodeterioration of stone: A review
(2000) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 46 (4), pp. 343-368
- 23 Manso, S., De Muynck, W., Segura, I., Aguado, A., Steppe, K., Boon, N., De Belie, N.
Bioreceptivity evaluation of cementitious materials designed to stimulate biological growth
(2014) *Science of the Total Environment*, 481 (1), pp. 232-241
- 24 Tran, T.H., Govin, A., Guyonnet, R., Grosseau, P., Lors, C., Damidot, D., Deves, O., Ruot, B.
Influence of the intrinsic characteristics of mortars on their biofouling by pigmented organisms: Comparison between laboratory and field-scale experiments
(2014) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 86, pp. 334-342
- 25 Shirakawa, M.A., Beech, I.B., Tapper, R., Cincotto, M.A., Gambale, W.
The development of a method to evaluate bioreceptivity of indoor mortar plastering to fungal growth
(2003) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 51 (2), pp. 83-92
- 26 Tran, T.H., Govin, A., Guyonnet, R., Grosseau, P., Lors, C., Garcia-Diaz, E., Damidot, D., Devès, O., Ruot, B.
Influence of the intrinsic characteristics of mortars on biofouling by *Klebsormidium flaccidum*
(2012) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 70, pp. 31-39
- 27 Cruz, M., Beckett, R.
Bioreceptive design: A novel approach to biodigital materiality
(2016) *Architectural Research Quarterly*, 20 (1), pp. 51-64
- 28 Ferrari, C., Santunione, G., Libbra, A., Muscio, A., Sgarbi, E., Sillgardi, C., Barozzi, G.S.
Review on the influence of biological deterioration on the surface properties of building materials: Organisms, materials, and methods
(2015) *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, 10 (1), pp. 21-39
- 29 Gaylarde, C.C., Gaylarde, P.M.
A comparative study of the major microbial biomass of biofilms on exteriors of buildings in Europe and Latin America
(2005) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 55 (2), pp. 131-139
- 30 Tomaselli, L., Lamenti, G., Bosco, M., Tiano, P.
Biodiversity of photosynthetic micro-organisms dwelling on stone monuments
(2000) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 46 (3), pp. 251-258
- 31 De Belie, N., Wang, J., De Muynck, W., Manso Blanco, S., Seguro Pérez, I.
Microbial interactions with mineral building materials
(2014) *Kuei Suan Jen Hsueh Pao/Journal of the Chinese Ceramic Society*, 42 (5), pp. 563-567
- 32 Miller, A.Z., Sanmartín, P., Pereira-Pardo, L., Dionísio, A., Saiz-Jimenez, C., Macedo, M.F., Prieto, B.
Bioreceptivity of building stones: A review
(2012) *Science of the Total Environment*, 426, pp. 1-12
- 33 Prieto, B., Sanmartín, P., Silva, C., Vázquez-Nion, D., Silva, B.
Deleterious effect plastic-based biocides on back-ventilated granite facades
(2014) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 86, pp. 19-24

-
- 34 Martínez, T., Bertron, A., Escadeillas, G., Ringot, E.
Algal growth inhibition on cement mortar: Efficiency of water repellent and photocatalytic treatments under UV/VIS illumination
(2014) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 89, pp. 1150-125
- 35 Warscheid, Th., Braams, J.
Biodeterioration of stone: A review
(2000) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 46 (4), pp. 343-368
- 36 Griffin, P.S., Indictor, N., Koestler, R.J.
The biodeterioration of stone: a review of deterioration mechanisms, conservation case histories, and treatment
(1991) *International Biodeterioration*, 28 (1-4), pp. 187-207
- 37 Coutinho, M.L., Miller, A.Z., Macedo, M.F.
Biological colonization and biodeterioration of architectural ceramic materials: An overview
(2015) *Journal of Cultural Heritage*, 16 (5), pp. 759-777
- 38 *Ibíd.*
- 39 Ferrari, C., Santunione, G., Libbra, A., Muscio, A., Sgarbi, E., Sillgardi, C., Barozzi, G.S.
Review on the influence of biological deterioration on the surface properties of building materials: Organisms, materials, and methods
(2015) *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, 10 (1), pp. 21-39
- 40 Prieto, B., Sanmartín, P., Silva, C., Vázquez-Nion, D., Silva, B.
Deleterious effect plastic-based biocides on back-ventilated granite facades
(2014) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 86, pp. 19-24
- 41 Warscheid, Th., Braams, J.
Biodeterioration of stone: A review
(2000) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 46 (4), pp. 343-368
- 42 Prieto, B., Silva, B.
Estimation of the potential bioreceptivity of granitic rocks from their intrinsic properties
(2005) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 56 (4), pp. 206-215
- 43 Miller, A.Z., Dionísio, A., Laiz, L., MacEdo, M.F., Saiz-Jimenez, C.
The influence of inherent properties of building limestones on their bioreceptivity to phototrophic microorganisms
(2009) *Annals of Microbiology*, 59 (4), pp. 705-713
- 44 Miller, A.Z., Sanmartín, P., Pereira-Pardo, L., Dionísio, A., Saiz-Jimenez, C., Macedo, M.F., Prieto, B.
Bioreceptivity of building stones: A review
(2012) *Science of the Total Environment*, 426, pp. 1-12
- 45 Coutinho, M.L., Miller, A.Z., Macedo, M.F.
Biological colonization and biodeterioration of architectural ceramic materials: An overview
(2015) *Journal of Cultural Heritage*, 16 (5), pp. 759-777
- 46 Dubosc, A., Escadeillas, G., Blanc, P.J.
Characterization of biological stains on external concrete walls and influence of concrete as underlying material
(2001) *Cement and Concrete Research*, 31 (11), pp. 1613-1617
- 47 Giannantonio, D.J., Kurth, J.C., Kurtis, K.E., Sobecky, P.A.
Effects of concrete properties and nutrients on fungal colonization and fouling
(2009) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 63 (3), pp. 252-259
- 48 Vacher, S., Hernandez, C., Bärtschi, C., Poussereau, N.
Impact of paint and wall-paper on mould growth on plasterboards and aluminum
(2010) *Building and Environment*, 45 (4), pp. 916-921
- 49 Bur, N., Roux, S., Delmas, L., Géraud, Y., Feugeas, F.
Mortar porosity and bioreceptivity [Porosité des mortiers et bioréceptivité]
(2010) *Materiaux et Techniques*, 98 (1), pp. 31-40
- 50 Tran, T.H., Govin, A., Guyonnet, R., Grosseau, P., Lors, C., Garcia-Diaz, E., Damidot, D., Devès, O., Ruot, B.
Influence of the intrinsic characteristics of mortars on biofouling by *Klebsormidium flaccidum*
(2012) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 70, pp. 31-39

- 51 Tran, T.H., Govin, A., Guyonnet, R., Grosseau, P., Lors, C., Damidot, D., Deves, O., Ruot, B.
Influence of the intrinsic characteristics of mortars on their biofouling by pigmented organisms: Comparison between laboratory and field-scale experiments
(2014) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 86, pp. 334-342
- 52 Wiktor, V., Grosseau, P., Guyonnet, R., Garcia-Diaz, E., Lors, C.
Accelerated weathering of cementitious matrix for the development of an accelerated laboratory test of biodeterioration
(2011) *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 44 (3), pp. 623-640
- 53 D'Orazio, M., Cursio, G., Graziani, L., Aquilanti, L., Osimani, A., Clementi, F., Yéprémian, C., Lariccia, V., Amoroso, S.
Effects of water absorption and surface roughness on the bioreceptivity of ETICS compared to clay bricks
(2014) *Building and Environment*, 77, pp. 20-28
- 54 Ferrari, C., Santunione, G., Libbra, A., Muscio, A., Sgarbi, E., Sillgardi, C., Barozzi, G.S.
Review on the influence of biological deterioration on the surface properties of building materials: Organisms, materials, and methods
(2015) *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, 10 (1), pp. 21-39
- 55 Marc Offelé,
The Green Building Envelope: Vertical Greening
(2011) PhD thesis: Technical University of Delft, p. 2.
- 56 Cruz, M., Beckett, R.
Bioreceptive design: A novel approach to biodigital materiality
(2016) *Architectural Research Quarterly*, 20 (1), pp. 51-64
- 57 *Ibíd*
- 58 *Ibíd*
- 59 *Ibíd*
- 60 *Ibíd*
- 61 *Ibíd*
- 62 Manso S, Segura I, Aguado A,
Conjunto multicapa en base cemento, aplicable como soporte biológico para fachadas de edificios u otras construcciones, Patent PCT/ES2013/070438, 28 July 2013.
- 63 Manso, S.; De Muynck, W.; Segura, I.; Aguado, A.; Steppe, K.; Boon, N.; De Belie, N.
Bioreceptivity evaluation of cementitious materials designed to stimulate biological growth.
(2014) *Science of the Total Environment*, 481, pp. 232-241
- 64 Manso, S., Calvo-Torras, M.T., De Belie, N., Segura, I., Aguado, A.
Evaluation of natural colonisation of cementitious materials: Effect of bioreceptivity and environmental conditions
(2015) *Science of the Total Environment*, 512-513, pp. 444-453
- 65 BiotA Lab, Bartlett School de Architecture, University College London
<http://www.biota-lab.com/>
- 66 Cruz, M., Beckett, R.
Bioreceptive design: A novel approach to biodigital materiality
(2016) *Architectural Research Quarterly*, 20 (1), pp. 51-64
- 67 *Ibíd*
- 68 *Ibíd*
- 69 Levenberg, S., Langer, R.
Advance in Tissue Engineering
(2004) *Current Topics in Developmental Biology*, PP. 61, 113
- 70 Cruz, M., Beckett, R.
Bioreceptive design: A novel approach to biodigital materiality
(2016) *Architectural Research Quarterly*, 20 (1), pp. 51-64
- 71 Splitterwerk Architects, ARUP, Colt International, Strategic Science Consult
(2015) *Building with Bio-Intelligent Quotient (BIQ)*
<http://www.buildup.eu/en/practices/cases/biq-house-first-algae-powered-building-world>

72 Bio Ceramic System
<http://www.iaacblog.com/openthesis/category/iker-luna/>

73 Open Thesis Fabrication
<http://www.iaacblog.com/openthesis/about/>

74 Institute for advanced architecture of Catalonia
<http://www.iaac.net/>

75 Ferrándiz-Mas, V., Bond, T., Zhang, Z., Melchiorri, J., Cheeseman, C.R.
Optimising the bioreceptivity of porous glass tiles based on colonization by the alga *Chlorella vulgaris*
(2016) *Science of the Total Environment*, 563-564, pp. 71-80

76 Görs, S., Schumann, R., Häubner, N., Karsten, U.
Fungal and algal biomass in biofilms on artificial surfaces quantified by ergosterol and chlorophyll a as biomarkers.
(2007) *Int.Biodeterior. Biodegrad.* 60 (1), 50–59

77 Miller, A.Z., Dionísio, A., Macedo, M.F.
Primary bioreceptivity: a comparative study of different Portuguese lithotypes.
(2006) *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 57 (2), 136–142

78 Coutinho, M.L., Miller, A.Z., Macedo, M.F.
Biological colonization and biodeterioration of architectural ceramic materials: an overview.
(2015) *J. Cult. Herit.* 16 (5), 759–777

79 D'Orazio, M., Cursio, G., Graziani, L., Aquilanti, L., Osimani, A., Clementi, F., Yéprémian, C., Lariccia, V., Amoroso, S.
(2014) Effects of water absorption and surface roughness on the bioreceptivity of ETICS compared to clay bricks. *Build. Environ.* 77, 20–28

80 Graziani, L., Quagliarini, E., Osimani, A., Aquilanti, L., Clementi, F., D'Orazio, M.
The influence of clay brick substratum on the inhibitory efficiency of TiO₂ nanocoating against biofouling. *Build.*
(2014) *Environ.* 82, 128–134

81 Martín Azúa
<http://www.martinazua.com/es/>

4. Componentes del sistema propuesto: Mortero aligerado bio-receptivo

4.1. Características del soporte resistente necesarias para un sistema como el propuesto

El soporte resistente ha de aunar una serie de características para resultar adecuado para un sistema como el expuesto en esta tesis.

Alta bio-receptividad

El componente del sistema que va a actuar como sustrato de la especie de briófito ha de poseer una alta bio-receptividad. Ha de favorecer, o al menos no perjudicar, la colonización por la especie de briófito propuesta.

En el caso que nos ocupa en la presente tesis habrá que diferenciar, al menos, entre bio-receptividad primaria y secundaria. Hay que distinguir entre los poros en el sustrato pre-existentes a la colonización vegetal y los poros debidos al bio-deterioro que causa la colonización vegetal. Los briófitos, al colonizar el sustrato, modifican su superficie (Ilustración 72), alterando sus condiciones nutritivas y de humedad. En el caso de materiales cementosos, fácilmente solubles por los ácidos orgánicos, sus rizoides tienden a penetrar en los macroporos del sustrato, generando cambios físico-químicos¹.

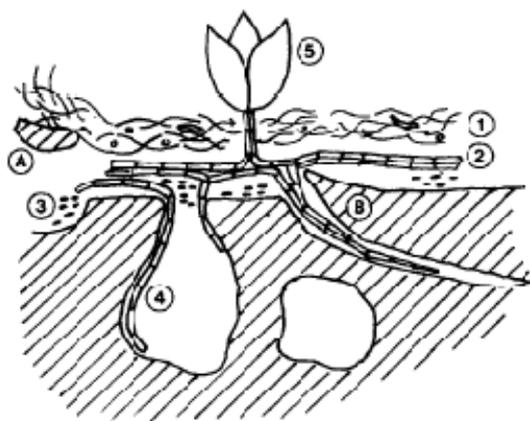


Ilustración 72

Esquema ilustrando la estratificación de los organismos colonizadores en los poros de un material de construcción después de 6 meses de exposición una cámara climática. 1-bio-film (cianobacterias y algas), 2-protonema, musgo, 3-diatomeas, 4-rizoides, musgo, 5-musgo, A-bio-deterioro por cizalladura, B- bio-deterioro causado por la penetración de los rizoides. Fuente Guillitte, O., Dreesen, R.

Aunque hemos comentado que, a priori, una alta macroporosidad facilita la evaporación del agua contenida en el sustrato, dificultando el crecimiento de la especie vegetal, por otro lado favorece la colonización del sustrato por la especie de briófito escogida, debido a que el sustrato presenta numerosos puntos de anclaje para el protonema del briófito, y posteriormente para sus rizoides. De hecho, según los estudios realizados por O. Guillitte y R. Dreesen que evaluaban la bio-receptividad de 5 materiales de construcción, los musgos no consiguen colonizar las muestras² de los materiales con macroporosidad inferior al 3%.

Será necesario que el sustrato presente un pH adecuado para la especie de briófito que se va a implantar en él. En el caso que nos ocupa, el *Hypnum Cupressiforme* tiende a crecer en sustratos ácidos³

Por tanto el sustrato escogido debe:

- Tener una macroporosidad superior al 3%, una alta microporosidad y preferentemente una red capilar abierta
- Ser un sustrato rugoso
- Tener un pH ligeramente ácido

Durabilidad

Es necesario que el sustrato escogido presente una durabilidad equiparable a la del resto de elementos constituyentes de una envolvente edificatoria. A este efecto, no ha de disgregarse produciendo mermas y desprendimientos, ha de soportar los fenómenos atmosféricos que sobre él incidan y ha de mantener sus propiedades constantes en el tiempo, por lo menos durante un plazo equiparable al del resto de elementos del sistema constructivo en el que se integre.

Por ejemplo, si el soporte va a ser un mortero, es necesario que no presente patologías de heladicidad (según zona climática donde se vaya a emplear), carbonatación, que tenga una cierta resistencia a impactos y otras sollicitaciones mecánicas...

Sostenibilidad

Es deseable que el sustrato escogido sea lo más sostenible posible, por coherencia con las intenciones generales de esta tesis doctoral. A este efecto, ha de presentar valores bajos de energía gris, estar fabricado a partir de elementos reciclados favoreciendo una economía circular, ha de aportar valores añadidos como aislante térmico y acústico...

Aporte de nutrientes

Es deseable que el sustrato escogido sea capaz de aportar por sí mismo la totalidad o parte de los nutrientes necesarios para el desarrollo del briófito, ya que, en este sistema, se busca evitar o minimizar en lo posible el mantenimiento.

A este efecto ya se ha mencionado que alguna de las características más interesantes de los briófitos es su capacidad de colonizar medios hostiles⁴ prosperando únicamente con agua y una cantidad mínima de sales minerales⁵.

Viabilidad técnica y económica

Es deseable que el sistema compuesto por el sustrato y el briófito sea viable a nivel técnico y económico.

Se ha de configurar como un sistema susceptible de ser utilizado en una obra convencional; ha de ser capaz de soportar las sollicitaciones mecánicas (resistencia a compresión, flexión, resistencia a impactos...), las exigencias normativas básicas, y las agresiones de los agentes atmosféricos a los que vaya a estar expuesto.

De este modo, se han de descartar:

- sistemas demasiado complejos técnicamente
- sistemas demasiado pesados de muy difícil puesta en obra
- que sobrecarguen demasiado la estructura portante

- sustratos débiles ante solicitaciones mecánicas
- sustratos que no sean capaces de soportar la agresión de los agentes atmosféricos
- sustratos con mal comportamiento ante el riesgo de incendio
- sustratos cuya ejecución sea demasiado onerosa, y por tanto que generen sistemas que no sean competitivos en coste comparados con otros sistemas constructivos...

4.2. Posibles soportes resistentes analizados y descartados

Fibras vegetales/madera

La opción de utilizar como sustrato madera, productos derivados de la madera (paneles de corcho, Ilustración 73) u otras fibras vegetales (fibra de coco, Ilustración 74) se ha descartado porque son materiales que, si no tienen un tratamiento específico, se degradan debido a la acción de los agentes atmosféricos, los xilófagos, la acción de diversos compuestos químicos⁶...

Los tratamientos usados para aumentar la durabilidad de los materiales de construcción fabricados con madera o subproductos de la madera están dirigidos, entre otras funciones, a evitar precisamente su colonización biológica, por lo que repercuten negativamente en la bio-receptividad de los mismos.



Ilustración 73: Paneles de aislamiento térmico de corcho tratado, fuente Aglocork



Ilustración 74: Rollos de fibra de coco, fuente internet

Bloques de tierra compactada

Los bloques de tierra compactada, son bloques de tierra natural, sin ningún tipo de aglutinante artificial, que se fabrican mediante prensado de la masa en un molde. Las dimensiones de estas piezas prismáticas y modulares son variables, aunque normalmente tienen unas dimensiones en torno a 30x15x10 cm, pudiendo asimilarse a las dimensiones de un adobe grueso tradicional.

El uso de bloques de tierra compactada se ha descartado por el elevado peso de los mismos, y porque su misma lógica constructiva incide en la necesidad de volúmenes prismáticos macizos, incompatibles con un sistema de acabado de fachada; además, porque en la escasa literatura científica localizada no se hace referencia a la bio-receptividad de los bloques.

Se puede suponer que, además, la colonización biológica del material facilitaría su disgregación, o que el proceso de compactación disminuye notablemente la bio-receptividad al incidir en su porosidad.

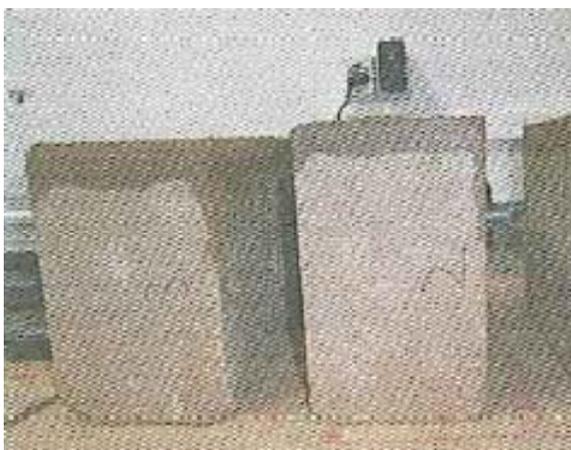


Ilustración 75: Bloques de tierra comprimida, fuente internet

Espumas cerámicas

Las espumas cerámicas presentan una micro-estructura celular de celdas abiertas, constituida por una red tridimensional de barras interconectadas de material cerámico. El resultado es un material ligero, con buenas propiedades mecánicas específicas, altamente poroso y con una superficie de contacto elevada⁷.

En un apartado anterior de la presente tesis ya se ha comentado que el sistema comercial Geomoss utiliza como sustrato una espuma cerámica. Sin embargo, las pruebas preliminares efectuadas con distintas muestras de espuma cerámica (Ilustración 76) y brotes de *Hypnum Cupressiforme* en una habitación soleada climatizada no han prosperado (Ilustración 77).

El fracaso de estas pruebas previas, el aparente fin de la comercialización del sistema geo-moss, y otras incertidumbres referentes al comportamiento mecánico de las espumas (heladicidad, resistencia ante impacto...), su sostenibilidad y su capacidad de aporte de nutrientes hacen que se haya descartado esta línea de investigación.



Ilustración 76: Muestras de espuma cerámica sobre las que se ha diseminado *Hypnum Cupressiforme*



Ilustración 77: Muestras de espuma cerámica sobre las que no ha prosperado el briófito *Hypnum Cupressiforme*

Espumas plásticas/aislantes térmicos

Las espumas plásticas y otros aislantes térmicos que, en ocasiones sirven de sustrato para los cultivos hidropónicos, se han descartado en esta tesis por su carencia de nutrientes para la especie vegetal, su durabilidad debido a su degradación ante la luz solar, su nula capacidad de resistir esfuerzos mecánicos y la alta energía gris implicada en su fabricación.

Enka drain y otros geo compuestos

Enkadrain es la denominación comercial de un geo-compuesto que, como se ha comentado en el apartado 2.5 de la tesis, ha servido como soporte para el desarrollo de diversos prototipos por parte de la experta en jardinería Anne Martin. Así mismo, el proyecto briosistema, descrito en el mismo apartado, también se ha basado en el empleo de soportes textiles sintéticos similares.

Las razones para descartar este tipo de soportes son la necesidad de aportar todos los nutrientes para el desarrollo de la especie vegetal y su baja micro-porosidad que unida a su carencia de red capilar impiden a estos soportes retener agua por capilaridad.

Sin embargo, en combinación con otro sustrato complementario, son sistemas que favorecen la diseminación de los briófitos como los estudios realizados por Anne Martin y el proyecto briosistema atestiguan.

4.3. Morteros: descripción, composición, propiedades

La palabra mortero deriva del término latino "mortarium", que significa argamasa, y que ya aparece descrito por Vitruvio en el siglo I a.c.⁸

Según enuncia H. Schmitt⁹ en su tratado de construcción, se entiende por mortero un material plástico apropiado para cerrar las juntas, de asiento y verticales, y también las que quedan entre piedras desiguales o irregulares, y conseguir mediante un proceso de fraguado un cuerpo resistente a la compresión. Los morteros también sirven para alisar las superficies de paredes o para revestir las fachadas de los edificios.

Según la asociación nacional de fabricantes de mortero seco española (AFAM), los morteros se definen como mezclas de uno o más conglomerantes inorgánicos, áridos, agua y opcionalmente, adiciones y/o aditivos.

Lo que diferencia un mortero de un hormigón es el tamaño del árido empleado, generalmente limitado en el mortero a 4 mm.

El mortero es muy empleado en distintas aplicaciones en edificación, debido a los siguientes factores:

- Adaptabilidad formal: Se puede adaptar a cualquier superficie y volumen, forma e intersticio
- Facilidad de aplicación: Los morteros no requieren especial apartamentada o sofisticación para su puesta en obra
- Prestaciones adaptables: El mortero ofrece la posibilidad de adaptar sus propiedades a las exigencias que se deseen, mediante la adecuación de su composición y su dosificación precisa¹⁰

Las normas UNE-EN 998-1 y 998-2 clasifican dos tipos de mortero en función de su uso^{11,12}:

- Mortero para revoco/enlucido: Mezcla compuesta de uno o varios conglomerantes inorgánicos, de áridos, de agua y a veces de adiciones y/o de aditivos, para realizar revocos exteriores o enlucidos interiores. (998-1)
- Mortero para albañilería: Mezcla compuesta de uno o varios conglomerantes inorgánicos, de áridos, de agua y a veces de adiciones y/o aditivos, para fábricas de albañilería (fachadas, muros, pilares, tabiques), rejuntado y trabazón de albañilería. (998-2)

Existen distintos tipos de morteros, en función del aglomerante escogido. Los más utilizados, tradicionalmente y en la actualidad son el cemento Portland, la cal hidratada en sus distintas variedades y el yeso. Los morteros, a su vez pueden contener uno o varios conglomerantes (morteros bastardos)¹³.

El mortero de cemento es el mortero adecuado especialmente para aquellas partes o elementos de las construcciones sometidas a fuertes solicitaciones estáticas, y en las que puede influir intensamente la humedad.

Su uso habitual en construcción es el revestimiento de fábricas o el rejuntado de la albañilería.

Usado como mortero de revestimiento, el mortero de cemento se emplea principalmente para la impermeabilización de partes de construcciones contra fuertes infiltraciones de humedad y de agua.

Al preparar el mortero de cemento se echan los materiales componentes, cemento, agua y arena, en distintas dosificaciones en la amasadora para mezclarlos. El proceso de fraguado y endurecimiento es físico-químico, y su inicio y duración depende de los componentes y sus porcentajes¹⁴.

Composición del mortero de cemento

Aglomerante

El aglomerante es el material utilizado para unir partículas sólidas de tal manera que formen una masa coherente¹⁵. El cemento Portland, el más habitual en construcción, es un aglomerante hidráulico que se obtiene moliendo finamente el producto de la cocción de mezclas de distintas materias debidamente dosificadas.

Áridos

Según se define en la Norma UNE-EN 998-2, el árido es el *"material granular que no contribuye a la reacción de endurecimiento del mortero"*. Es un material inorgánico inerte, que sustituye parcialmente al aglomerante.

Los aglomerantes puros se agrietan durante su endurecimiento, por lo que hay que mezclarlos con áridos, habitualmente arenas, en determinados porcentajes. El árido mezclado con los aglomerantes constituye el "soporte" para el mortero y le dota de su resistencia a la compresión.

Para los morteros de albañilería empleados usualmente solo son apropiadas las arenas procedentes de piedras resistentes, limpias y no heladizas. Se distingue entre arenas naturales y arenas de trituradora

Agua de amasado

Es un elemento indispensable para los procesos de fraguado y de endurecimiento del aglomerante.

Por un lado es necesaria para hidratar el conglomerante cemento y por otro lado sirve como lubricante para mojar las partículas del árido y facilitar su moldeo y compactación.

No debe contener sustancias que puedan alterar el proceso de fraguado del aglomerante o las propiedades del resto de los componentes; en general, se considera que todas las aguas potables son aceptables¹⁶.

Aditivos

La Norma UNE-EN 998-2 define los aditivos como *"materiales añadidos en pequeñas cantidades para obtener modificaciones especificadas de las propiedades"*.

Los aditivos son, por tanto, sustancias que se añaden al mortero para influir o modificar las propiedades físicas o químicas tanto del mortero fresco como del mortero endurecido, o ambas a la vez¹⁷.

Algunos aditivos de uso habitual son aireantes, retardadores de fraguado, plastificantes, hidrofugantes...

Propiedades de los morteros

Se distinguen dos etapas diferenciadas por su estado físico en las prestaciones que ofrece un mortero, que se denominan estado fresco y estado endurecido. La primera responde a la fase del mortero una vez mezclado y amasado. Su duración varía de acuerdo con el tiempo de fraguado requerido por la proporción que integra la mezcla, así como por la temperatura, humedad, etc. En esta etapa el mortero es plástico y trabajable, lo que permite su puesta en obra. Superada esta fase el mortero endurece hasta consolidarse¹⁸.

Propiedades del mortero fresco

En la fase de mortero fresco, los componentes pueden tener movimientos independientes, lo que puede ocasionar pérdida de homogeneidad de la mezcla al producirse ciertas agrupaciones de una parte de sus componentes.

Por tanto, para evitar la pérdida de homogeneidad en el interior de un mortero, este tiene que tener cierto grado de consistencia, pero no tanta que no permita un moldeo adecuado, facilitando la adaptación a la forma requerida final, e impidiendo la aparición de espacios vacíos.

El mortero debe conservar la forma requerida durante el proceso de endurecimiento y mantener la adherencia necesaria al soporte.

El conjunto de todas estas propiedades se resume en el concepto de “trabajabilidad”, entendido como la facilidad del mortero para su puesta en obra; algunos parámetros que determinan la trabajabilidad del mortero son la consistencia, la densidad, la retención de agua, la adherencia en fresco...¹⁹

Propiedades del mortero endurecido

Según describe C. Junco en su tesis doctoral, *“el mortero endurecido es un conglomerado sólido de estructura porosa, compuesto de una matriz que rodea y aglutina un árido, y cuyas propiedades fundamentales son resistencia a compresión, dureza superficial, adherencia a los materiales pétreos, cierta impermeabilidad y buen comportamiento frente a los agentes atmosféricos”*.

Características mecánicas

Los morteros endurecidos se encuentran sometidos a diversas sollicitaciones mecánicas en función de su uso en la obra:

- Para morteros de rejuntado: compresión, cortante y flexión
- Para morteros de revoco: flexión y tracción

Además hay que considerar las sollicitaciones que transmite al mortero su soporte²⁰.

Características físicas

En una obra es necesario considerar las siguientes características físicas de los morteros:

- La densidad aparente, para evaluar la contribución del mortero a las cargas soportadas por el sistema estructural
- La permeabilidad a fluidos, la capacidad de succión y la permeabilidad al vapor, en función de la misión que ejerza el mortero, estas características dependen de la red porosa del mortero
- Sus características de seguridad frente al riesgo de incendio

En cuanto a las propiedades de los morteros respecto a su capacidad de aislar térmicamente, los morteros convencionales, como la gran mayoría de los materiales pétreos, son buenos transmisores del calor, por lo que el aislamiento térmico de las edificaciones se fía a otros componentes de la envolvente edificatoria²¹

Durabilidad

Se entiende por durabilidad de un mortero “el tiempo durante el cual un mortero mantiene las prestaciones que le hacen apto para la función que cumple en la obra”. Depende de la calidad del mortero, de su puesta en obra, de su uso o función y de su mantenimiento.

Los agentes atmosféricos pueden degradar un mortero deteriorando sus prestaciones²²

4.4. Morteros aligerados

La norma española UNE-EN 998-1²³, "Especificaciones de los morteros para albañilería", define como morteros ligeros aquellos cuya densidad en seco aparente es $\leq 1.300 \text{ kg/m}^3$.

Ya en la Grecia clásica y en Roma era conocido el empleo de materias primas y fillers inertes de diferentes densidades para la fabricación de distintas clases de morteros²⁴.

Los morteros ligeros, o morteros aligerados se popularizan en construcción a partir de 1950 debido a sus ventajas para algunos usos específicos²⁵:

- Facilidad de transporte y puesta en obra
- Mejor comportamiento térmico al incluir un volumen de aire ocluido. Este aire ocluido disminuye la resistencia mecánica del mortero
- Menor peso, lo que permite optimizar las estructuras resistentes de las edificaciones; por ejemplo, un uso muy habitual de estos morteros es para la formación de pendientes en cubiertas planas
- Mejor comportamiento acústico al aumentar la absorción de la energía de impacto
- Mayor durabilidad, al disminuir la heladicidad

Actualmente, existen varios procedimientos para su elaboración²⁶

Introducción de aire ocluido en su interior

La incorporación de aire en el interior de un mortero se puede realizar mediante la adición de aditivos aireantes²⁷, productos que producen múltiples microburbujas de aire, de diámetros comprendidos entre 10 y 500 micras de diámetro²⁸, separadas y repartidas uniformemente. Estas burbujas deben permanecer tanto en la masa del mortero fresco como en el endurecido, interrumpiendo la red capilar del material.

Otra opción son los aditivos espumantes, que aportan propiedades espumantes a partir de la generación de gases de expansión²⁹.

Estos aditivos confieren al mortero dos propiedades principales, una en su estado fresco mejorando su fluidez y trabajabilidad, y otra en el mortero endurecido, aumentando su durabilidad³⁰.

Mediante adición de cargas ligeras

Por cargas ligeras entendemos cargas inertes y de baja densidad con una granulometría, como máximo equivalente al árido utilizado, y cuya función es reducir la densidad del mortero, aumentar su rendimiento y mejorar su trabajabilidad en la aplicación del mismo³¹.

Las cargas ligeras también se pueden denominar áridos ligeros, definidos por la norma UNE 83-101-90 como aquellos cuyos granos tienen una densidad real inferior a 2 g/cm^3 ³².

Los morteros se pueden aligerar mediante la adición de cargas ligeras, como sustitutos de parte de los áridos de la mezcla.

Hay una serie de áridos ligeros que se emplean de manera habitual en morteros, hormigones y yesos³³:

- De origen natural: Piedra pómez, escorias volcánicas, cenizas volantes, toba volcánica
- De síntesis: Arcilla expandida, perlita, vermiculita

De acuerdo con el creciente interés en el empleo de materiales más sostenibles se están empezando a emplear otro tipo de cargas ligeras³⁴ no elaboradas, como pueden ser granulados de corcho, cáscaras de cereal o las virutas de madera³⁵, y otros de naturaleza orgánica polimérica, en muchas ocasiones reciclados o de productos de desecho de la industria, como el polietileno³⁶, el poliestireno expandido³⁷ o el politereftalato de etilo (PET)³⁸.

En esta tesis se plantea aligerar el mortero fabricado mediante el empleo de una carga ligera consistente en residuos de espuma de poliuretano (PU).

4.5. Razones para escoger como soporte resistente un mortero

Uno de los principales motivos para escoger como soporte resistente un mortero de cemento es que el mortero de cemento y el hormigón son materiales muy usados en la construcción por todo el mundo, lo que ha originado un gran cuerpo científico de conocimiento sobre ellos, así como una gran masa de técnicos y operarios familiarizados con su uso y características. Los materiales cementosos, además, poseen una carga formal y estética de gran importancia y tradición en el campo de la Arquitectura³⁹. Por tanto, la posibilidad de habilitar sus superficies para el desarrollo de especies vegetales es muy interesante⁴⁰.

Hay que tener en cuenta que bajo el nombre genérico de morteros de construcción existe una gran familia de materiales de muy diversas características, lo que nos va a permitir caracterizar el mortero que mejor se adecúe a nuestros requerimientos.

En relación con las características deseables del sustrato antes enunciadas en el apartado 4.1 de la presente tesis doctoral, consideramos que un mortero puede constituir un soporte adecuado.

Bio-receptividad de los morteros

La bio-receptividad de los morteros de cemento comúnmente usados en construcción depende de los mismos factores antes enumerados

Porosidad

Cualquiera que sea el aglomerante utilizado en el mortero, su red porosa condiciona el acceso de los micro-organismos, porque el acceso a dicha red está limitado por el diámetro de los poros, que normalmente es lo suficientemente pequeño para impedir el acceso a las bacterias⁴¹.

Un mortero presenta poros abiertos y poros cerrados⁴², y su estructura porosa depende de:

- El tipo de conglomerante
- Aditivos utilizados
- Relación agua-cemento
- Grado de hidratación
- Sistema de preparación
- Edad del mortero⁴³

Cuanto más compacto sea un mortero, menor será su red capilar y, en consecuencia, menor absorción presentará. La incorporación de aditivos hidrofugantes, plastificantes y aireantes también contribuye notablemente a disminuir la absorción capilar en los morteros que los incorporan. Además, es necesario considerar que las distribuciones y la magnitud de los poros se modifican durante la vida útil del material⁴⁴.

En función de estos factores, se pueden elaborar morteros con diferentes porosidades; si bien una alta porosidad con una adecuada distribución de poros parece un factor importante para conseguir elaborar morteros con alta bio-receptividad, el estudio realizado por Manso *et al.* indica que es un factor menos relevante que la composición química y pH del mortero. De hecho, en este estudio, que evalúa la bio-receptividad de diversos materiales cementosos, la muestra más bio-receptiva resultó ser aquella con la menor porosidad de todas las muestras estudiadas⁴⁵.

De todos modos, el anterior estudio se centra en morteros de cemento elaborados con cementos de fosfato de magnesio (MPC); hay que tener en cuenta que, para muestras de mortero de cemento elaboradas con cementos tipo Portland que sufren el proceso de carbonatación, las diferencias en la porosidad de las muestras conducirían a distintas tasas de difusión del CO₂ que originarían distintos grados de carbonatación⁴⁶.

Rugosidad

Respecto a la rugosidad, el mismo estudio de Manso *et al.* concluye que, aunque la influencia de la rugosidad no deba ser descartada, es también, como la porosidad, un factor mucho menos relevante que el pH y la composición química.

Sin embargo, la investigación elaborada por Tran *et al.* sí que determina que la rugosidad de un mortero es un factor importante en su bio-colonización por algas⁴⁷.

pH

Los morteros son distintos de otros materiales industriales en el sentido de que están compuestos de un abanico muy amplio de componentes, con lo que su composición química es extremadamente variable⁴⁸.

Los cementos más usados habitualmente en la construcción están caracterizados por un pH en torno a 12 o incluso más alto⁴⁹. Bajo unas condiciones tan alcalinas la bio-receptividad se resiente ya que la mayor parte de los microorganismos son incapaces de prosperar.

La investigación elaborada por Tran *et al.*, que estudia la influencia de las propiedades intrínsecas de los morteros para su bio-colonización por algas, determina que el pH es la propiedad más determinante de las consideradas (porosidad, rugosidad y pH), pues un pH más bajo en las muestras estudiadas acelera considerablemente el desarrollo de las algas⁵⁰.

En los cementos tipo Portland la cal apagada reacciona con el CO₂ en el proceso de carbonatación, por lo que la alcalinidad disminuye, llegando a disminuir el valor de Ph hasta 8.3. Este proceso está asociado en construcción a la aparición de patologías, pero a su vez crea unas condiciones más favorables para la propagación de los microorganismos (bio-receptividad secundaria)⁵¹.

En el método desarrollado por Shirakawa *et al.* para medir la bio-receptividad de morteros de interior las diferentes pruebas realizadas ponen de manifiesto que existe un pH límite (9,5-10) a partir del cual se inhibe la colonización del mortero por el hongo *C. sphaerospermum*⁵².

La investigación realizada por Manso *et al.* ha generado una patente para el desarrollo de un sistema multicapa de hormigón con una bio-receptividad aumentada⁵³. En este contexto, han comparado la bio-receptividad de muestras de mortero elaboradas con un cemento Portland ordinario sometidas a un período de carbonatación acelerado con el objeto de disminuir su pH hasta 9 y muestras elaboradas con un cemento de fosfato de magnesio (MPC) cuyo pH es de 6,7.

A las muestras elaboradas con cemento Portland, además se les añadió un aditivo ácido (ácido bórico o ácido oxálico) con el objeto de conseguir un pH menos básico, lo que, o bien no disminuyó significativamente el Ph (el caso del ácido oxálico), o bien afectó a las propiedades físico-químicas del mortero (el caso del ácido bórico).

El resultado indica una mayor bio-receptividad de las muestras elaboradas con MPC atribuible básicamente al menor pH, más favorable para el desarrollo de la especie de alga estudiada (*Chlorella vulgaris*).

Durabilidad

Según la AFAM (asociación de fabricantes de mortero) la durabilidad de un mortero de cemento se basa en conocer el tipo de agresión que va a sufrir durante su vida útil prevista y elegir el mortero adecuado para resistirla. Al ser productos de amplio uso en la construcción, en general la elección del mortero se basa en la experiencia que se tiene de experiencias anteriores en las que un mortero se ha comportado satisfactoriamente ante el mismo tipo de agresión.

Las principales agresiones que afectan a la durabilidad del mortero son:

Ciclos de hielo deshielo

La acción destructiva de estos ciclos se debe al aumento de volumen que sufre el agua en estado líquido contenida en los poros del mortero al pasar al estado sólido cuando desciende la temperatura. El agua en estado líquido puede provenir del agua de amasado sobrante de la hidratación del conglomerante o provenir del exterior.

Acción de los iones sulfato sobre el mortero

Estos iones pueden provenir de sales solubles en agua, o de gases sulfurosos presentes en atmósferas contaminadas. Tienen la propiedad de reaccionar con el aluminato del clinker de cemento portland en presencia de iones calcio originando ettringita, compuesto muy expansivo. En morteros cuyo conglomerante no contenga aluminatos, no se contempla la formación de ettringita

Eflorescencias

La aparición de eflorescencias es un fenómeno muy frecuente en las obras realizadas con materiales que contengan sales solubles. Se denominan eflorescencias a cristales de sales, generalmente de color blanco, que se depositan en la superficie de los paramentos.

Fisuras y grietas

Se denomina fisura a toda apertura longitudinal que afecta únicamente a la parte exterior del elemento constructivo. Por contra, por grietas entendemos la apertura que afecta al elemento en todo su espesor.

En los morteros convencionales, el proceso conocido como retracción hidráulica o de secado puede ocasionar fisuras; este proceso se desarrolla una vez que ha fraguado el cemento y se ha rigidizado el mortero, cuando el agua que todavía no se ha evaporado va saliendo al exterior en forma de vapor; si esta evaporación sucede con rapidez, crea tensiones en la superficie del mortero que son las que pueden llegar a ocasionar fisuras y desconchones⁵⁴.

Otros problemas relacionados con fisuraciones, se derivan del hecho de que los materiales de construcción se mueven. Si los materiales que trabajan juntos en un elemento constructivo tienen movimientos armónicos, dicho movimiento no afectará su durabilidad; pero si los movimientos son inarmónicos, antes o después se producirá la fisura.

Humedades

Las humedades pueden generarse tanto por capilaridad, como por efecto de las condiciones climáticas. Es una patología que origina procesos de tipo químico, tales como manchas blancas o disgregación del material, o de tipo biológico, como por ejemplo manchas blanquecinas o negras, que pueden debilitar la estructura y producir fisuras, fracturas o desprendimientos de elementos constructivos⁵⁵.

Por tanto, la correcta elección de las características del mortero en función de las agresiones previstas que va a sufrir a lo largo de la vida útil es la clave para una durabilidad adecuada del mortero de cemento.

Sostenibilidad

Los morteros de cemento comunes no son materiales sostenibles, ya que en la generación del cemento se consume mucha energía, hasta el punto de que la producción de cemento en todo el planeta representa aproximadamente el 5% de todas las emisiones de CO₂, suponiendo una de las mayores fuentes de gases invernadero de la industria de la construcción⁵⁶.

La producción de 1 kg de cemento tipo Portland implica la emisión de 1 kg de CO₂ y un consumo energético de 5,4-6 MJ⁵⁷.

La producción de cemento Portland anual se acerca a los 2.000 millones de toneladas, y se prevé que para el año 2025 aumente hasta los 3.500 millones de toneladas, lo que supondría unas emisiones de CO₂ equivalentes a las que se generan hoy día en toda Europa⁵⁸.

En este aspecto, el sector cementero agrupado en el *Cement Sustainable Initiative* (CSI) encargó en 2002 un trabajo de investigación independiente para la consecución de retos de sostenibilidad en la industria del cemento: el *Informe Batelle*⁵⁹, entre cuyas directrices, figura el empleo de materias primas alternativas (escorias de alto horno, cenizas volantes ricas en CaO, residuos de demolición...)

Este es, por tanto, uno de los puntos débiles de la elección de un mortero como soporte de la especie vegetal.

Aporte de nutrientes

En cuanto al aporte de nutrientes, diversos experimentos realizados acerca de la bio-receptividad del mortero⁶⁰ y la presencia de muchas patologías constructivas asociadas a la colonización de los morteros por parte de especies vegetales muestran que el mortero es un soporte capaz de aportar nutrientes a un rango de especies vegetales variado⁶¹.

Viabilidad técnica y económica

La viabilidad técnica del sistema se basa en la elección de un mortero que sea capaz de superar las agresiones que se prevé que puede sufrir, y que a la vez propicie el crecimiento de la especie de briófito escogida. Los principales inconvenientes que se prevé que hay que afrontar a nivel técnico son:

- Que el mortero propuesto sea bio-receptivo
- Que el mortero escogido sea capaz de superar ciclos de hielo y deshielo sin sufrir disgregación

- Que sea capaz de soportar la acción de las sustancias generadas por el briófito como especie pionera, y después por el resto de especies que lo colonicen
- El sistema de puesta en obra y la trabajabilidad, para generar una unidad manejable que no transmita patologías al resto de sistemas constructivos con los que se compatibilizaría

En cuanto a la viabilidad económica, los morteros de cemento de construcción son un material de precio muy económico y gran accesibilidad. El precio final de un mortero de cemento puesto en obra depende de tres factores:

- Coste de las materias primas
- Coste de elaboración de la mezcla
- Coste de la puesta en obra del mortero⁶²

Por ejemplo, según las bases de precios habitualmente usadas para elaborar presupuestos de edificación, el enfoscado en paramentos verticales, ejecutado a buena vista sin maestrear, con mortero de cemento estándar de 20 mm de espesor oscila entre 10⁶³ euros/m² y 14⁶⁴ euros/m² de precio de ejecución material.

4.6. Parámetros de referencia

A la hora de caracterizar el tipo de mortero a escoger, comparamos características de diversos materiales constructivos con el objeto de cuantificar unos parámetros de referencia deseables para dicho mortero.

La selección de materiales incluye una serie de materiales de revestimiento de fachada, otros materiales principalmente usados en tabiquería interior, y diversas clases de morteros. En concreto, se trata de:

- Placas de fibrocemento usadas como revestimiento de fachada
- Paneles de madera-cemento usados como revestimiento de fachada, en tabiquería interior o como acabado interior (sistema Viroc)
- Paneles de Grc (Glass Reinforced Concrete, micro hormigón armado con fibra de vidrio) usados como revestimiento de fachada
- Placas de yeso laminado usadas en tabiquería interior
- Revestimiento mineral, mortero con propiedades de aislamiento térmico
- Morteros desarrollados por el Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Burgos (UBU), en los que se realiza sustitución de árido por espuma de poliuretano proveniente de reciclado (PU)

Se han analizado diversos parámetros de referencia, especialmente útiles para caracterizar en distintos aspectos el tipo de mortero que ha de servir como sustrato al sistema descrito en la presente tesis; así se comparan algunas características mecánicas, el peso, la porosidad... (Tabla 2)

De la comparativa realizada se determinan una serie resultados deseables en ciertos parámetros físicos, a conseguir mediante el estudio de la dosificación y componentes del mortero fabricado.

Parámetros de referencia	Placas de fibrocemento euronit (1)	Paneles de madera-cemento Viroq (2)	Paneles de Grc Ulma (3)	Placa de yeso laminado (4)	Onexit thermic (5)	Mortero con sustitución de árido por poliuretano, Elaborado con cemento CEM IV/B 42.5 N (6)		Resultados deseables para el mortero
						Valores 0% de árido reemplazado	Valores 100% de árido reemplazado	
Resistencia a flexión (N/mm ²)	20,00	10,50	32,20	5	0,9	5,5	2,5	>2 en revestimiento de paramentos >5 en paneles sobre sub-estructura
Resistencia a compresión (N/mm ²)	-	40,00	-	3,5	1,5	26	10	>5
Peso específico/densidad (kg/m ³)	1650,00	1350,00	2330,00	700,00	450,00	1994,00	1084,00	<1000
Contenido en aire/porosidad (%)	18,00	-	-	-	-	3,50	11,90	>20
Reacción al fuego	A2-s1-d0	B-s1-d0	B-s2-d0	A2-s1-d0	-	-	-	B-s1-d0
Ph	-	12	-	-	-	11-13	11-13	<7
Conductividad térmica (W/mk)	-	0,23	0,76	0,2	0,06	0,93	<0,93	<0,2

Valores estimados
- Valor desconocido

- (1) Fuente: Euronit
- (2) Fuente: Investwood
- (3) Fuente: Ulma
- (4) Fuente: Knauf
- (5) Fuente: Onexit
- (6) Fuente: Departamento de construcciones arquitectónicas, UBU

Tabla 2: Comparativa de parámetros de referencia de diversos materiales de construcción

En resumen, necesitamos un mortero:

- Con unas características mecánicas equiparables al menos a las de las placas de yeso laminado, si se pretende disponer en paneles en masa sin armar montados sobre una sub-estructura. En caso de usarse como revestimiento o en paneles trasdosados estos requerimientos serían menores.
- Del menor peso y densidad posible para mejorar su puesta en obra, de ahí la opción aligerar el mortero propuesto
- De alta porosidad y pH ligeramente ácido para que conforme un sustrato bio-receptivo para la especie pionera propuesta
- De baja conductividad térmica para poder considerar sus propiedades como aislante térmico
- Resistente a ciclos de hielo-deshielo y otras agresiones que puedan menoscabar su durabilidad
- Por último, además, el mortero a utilizar debe ser más sostenible que el mortero tradicional elaborado a partir de cemento Portland

4.7. Composición del mortero escogido como sustrato

Aglomerante

El aglomerante escogido es un cemento de fosfato de magnesio.

Es un cemento químico ácido-base, es decir, que se forma a partir de la interacción de un ácido y una base, cuya reacción forma un hidrogel salino cementoso. Este tipo de materiales se pueden considerar cerámicos debido a su estructura cristalina, aunque también pueden considerarse cementos por su proceso de obtención y conformado a temperatura ambiente^{65, 66}.

Pertenece a la familia de los cementos químicos de fosfato, denominados con el acrónimo CBPC (Chemically Bonded Phosphate Ceramics). En general, presentan como característica principal un fraguado rápido a temperatura ambiente acompañado de un buen desarrollo de resistencia inicial⁶⁷.

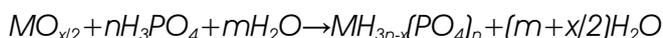
En la actualidad su mayor aplicación es la de biomaterial, ya que presentan muy buenas características de bio-compatibilidad, pero se investiga también su aplicación como materiales reparadores de estructuras de hormigón⁶⁸, estabilizadores de residuos peligrosos⁶⁹, la contención de residuos nucleares⁷⁰, la generación de protecciones pasivas contra el fuego en edificación⁷¹, así como su empleo como material bio-receptivo en construcción⁷².

Los CBPC se obtienen por un endurecimiento químico, reaccionando un compuesto ácido de fosfato con un óxido metálico parcialmente soluble en medio acuoso. En la reacción exotérmica generada, el producto inicial es un gel de fosfatos de cationes metálicos hidratados, que posteriormente cristalizan parcialmente como fosfatos insolubles⁷³.

Tal y como Formosa J. ha recogido en su tesis doctoral⁷⁴, según los estudios realizados por Wilson y Nicholson⁷⁵, las etapas de la reacción consisten en:

- Disolución de los óxidos metálicos en una solución ácida rica en aniones para formar los correspondientes cationes metálicos
- Interacción de los cationes metálicos y aniones de la solución para formar complejos neutros
- Gelificación de los complejos y saturación de la solución
- Precipitación de los sólidos a partir de la solución de gel saturada para formar una red interconectada cristalina, semicristalina o desordenada

La reacción genérica ácido-base que sucede en la formación de un cemento químico de fosfato, a partir de un óxido metálico es la siguiente:



Los CBPC se pueden obtener a partir de diferentes materiales de partida, lo que determina la velocidad de la reacción química, el PH de la solución resultante y las propiedades del cemento obtenido.

Según Formosa J., los fosfatos ácidos más empleados son los hidrogenofosfatos de amonio, calcio, sodio, potasio y aluminio a causa de criterios de optimización. Interesa que la fuente de fosfato contenga el máximo contenido de P₂O₅ para disminuir su cantidad en la formación de CBPC⁷⁶.

En cuanto a los óxidos más adecuados para la formación de este tipo de cementos son aquellos con una baja solubilidad, ya que el control de la velocidad de la reacción ácido-base se establece a partir de la velocidad de disolución del óxido metálico, siendo los óxidos de magnesio (MgO) y zinc (ZnO) los más empleados.

En los estudios realizados por Wagh y Jeong se concluye que para la correcta formación cristalina de CBPC es necesario que la solubilidad del óxido empleado sea lo suficientemente elevada para la formación del gel, pero que al mismo tiempo, permita la lenta cristalización del gel⁷⁷.

Cementos de fosfato-magnesia (MPC)

Los MPC, *magnesia-phosphate cement*, son un tipo de CBPC de especial relevancia, en los que la fuente de cationes metálicos es el MgO; el aglomerante que se va a usar en esta tesis va a ser de este tipo.

En la patente desarrollada por Manso *et al.*⁷⁸ para desarrollar un soporte biológico y por tanto, como ya se ha descrito, muy relacionada con el tema de esta tesis, el aglomerante hidráulico tipo MPC se elabora con la mezcla de una fuente de magnesio, en concreto óxido de magnesio, MgO, y una fuente de fosfato, dihidrógeno fosfato de amonio $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$.

Para esta tesis doctoral se va a emplear la misma fuente de fosfato, dihidrógeno fosfato de amonio $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$.

Según la investigación realizado por Manso *et al.* el ratio P:M (ratio fosfato:magnesio) interesa que sea bajo, debido a dos razones:

- El $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$ es más caro que el MgO
- La mezcla resultante tiene una mejor trabajabilidad⁷⁹

En la investigación realizada por Manso *et al.* se escoge como ratio $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$: MgO=1:1,75⁸⁰. Este ratio se puede considerar como una referencia para elaborar el cemento, si bien en esta tesis se van a utilizar distintas fuentes de magnesio, de menor pureza en general que la empleada en la investigación anterior, por lo que es necesario evaluar de nuevo el ratio P:M en función de los productos empleados como fuente de magnesio.

A este respecto hay que comentar que en esta reacción química el mecanismo de formación del producto resultante no está claro. Soudée y Pera⁸¹ proponen que cuando se agrega el agua de amasado a los reactivos, el dihidrógeno fosfato de amonio se disuelve hasta alcanzar la saturación, mientras que la magnesia (MgO) comienza a empaparse. Según dichos autores, se produce en esta fase una caída en el pH asociada a la disociación de la magnesia en una reacción de tipo ácido-base. Concluyen que la cinética de la reacción depende de la estructura superficial del MgO.

Cuanto mayores son los defectos estructurales del MgO, mayor es la interfase entre el MgO y el $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$. De aquí se concluye que disminuir el tamaño de las partículas de MgO mejora su reactividad⁸².

Según avanza la disociación de la magnesia, los iones Mg^{2+} presentes en la solución se complejizan en $\text{Mg}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$ y son capaces de sustituir las moléculas de agua y adsorberse en la superficie del MgO. Estos complejos permanecen unidos a la superficie y la recubren progresivamente, hasta que, finalmente los iones PO_4^{3-} y NH_4^+ y los complejos $\text{Mg}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$ adheridos a la superficie desarrollan una nueva estructura de estruvita ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) por enlaces de puente de hidrógeno⁸³.

El control de la velocidad de la reacción ácido-base se establece a partir de la velocidad de disolución del óxido metálico. En los procesos de pre-calcinado de la magnesia se disminuye su reactividad al aumentar el tamaño de sus partículas y disminuir su solubilidad. Otra alternativa es emplear retardantes de fraguado, como por ejemplo el ácido bórico⁸⁴, o bien bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) como aditivo para controlar la exotermia de la reacción y obtener tiempos de trabajabilidad razonables⁸⁵. La velocidad de fraguado depende también, así mismo, de la proporción de los materiales de partida y de la cantidad de agua de amasado.

Al emplear MgO procedente de la calcinación de la magnesita, cabe la posibilidad de que existan carbonatos sin descomponer si el tiempo o la temperatura de permanencia en el horno no han sido suficientes⁸⁶. La presencia de carbonato magnésico ($MgCO_3$) puede hacer que la reacción ácido-base sea más rápida debido a que la disociación del carbonato es más rápida que la de la magnesita⁸⁷. Por ello se recomienda la calcinación del MgO, ya que por un lado se disminuye su reactividad y por otro, dadas las temperaturas de calcinación (900 a 1.600°C) se disminuye la posibilidad de que existan restos de $MgCO_3$ sin descomponer.

Sostenibilidad de los cementos de fosfato-magnesita (MPC)

Es importante comparar la sostenibilidad del aglomerante hidráulico tipo MPC respecto a un cemento tipo portland tradicional.

Para elaborar un cemento Portland son necesarias 1,7 toneladas de materias primas, que se mezclan, se muelen y se sinterizan a temperaturas próximas a los 1.450 °C, para la obtención de un nuevo material denominado clinker (módulos esféricos).

Se entiende por sinterización el tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico o cerámico a una temperatura inferior a la de fusión de la mezcla, para aumentar la resistencia mecánica de la pieza, ya que se ha aumentado el tamaño de grano.

Si atendemos al consumo de energía, es necesario emplear 4 GJ de energía para elaborar una tonelada de cemento tipo Portland⁸⁸.

El óxido de magnesio, principal materia prima de los MPC, magnesia-phosphate cement, se obtiene de calcinar magnesita.

Este proceso sucede desde temperaturas en torno a 400°, pero para producir óxido de magnesio de elevada pureza, son necesarias temperaturas mucho más elevadas para producir la sinterización del mineral usado como materia prima.

Para obtener el sinter de magnesio de mayor riqueza utilizado en la presente tesis doctoral, se utilizan temperaturas punta de 1700°C tras un recorrido del mineral de aproximadamente 8 horas en un horno horizontal rotativo de 80 m de largo cuya temperatura inicial está en el entorno de los 400°C⁸⁹.

Por tanto, como afirma Phair⁹⁰, la formación de componentes de magnesio como materia prima para cementos (básicamente MgO) genera una cantidad de emisiones de CO₂ equivalentes o superiores a las generadas al producir clinker de cemento Portland.

Además, es necesario tener en cuenta que el componente que aporta el fosfato es caro.

Por tanto, como veremos, la posibilidad de elaborar el mortero a partir de sub-productos industriales generados en otros procesos es la opción que interesa para lograr un mortero bio-receptivo y sostenible.

Áridos

Los morteros desarrollados con cementos tipo CBPC pueden usar como árido arena de sílice como la usada en los morteros que emplean cementos Portland tradicionales^{91,92,93} pero en esta tesis doctoral se propone investigar la sustitución total del árido convencional por residuos de espumas rígidas de poliuretano (PU), con el objeto de mejorar la sostenibilidad y algunas propiedades del conjunto.

En la actualidad se utilizan diferentes agregados en los morteros para producir morteros aligerados⁹⁴.

Diversos estudios^{95,96,97,98} valoran las propiedades de los morteros generados a partir de cemento de magnesio-fosfato-potasio (MPPC) y arena. Tassew y Lubell estudian la resistencia a compresión de estos morteros, con diferentes ratios de masa cemento-arena, lo que permite establecer a Hong, L.T. et al⁹⁹ un ratio 1:1 como un ratio en el que se optimiza el coste de las materias primas de esta clase de morteros sin que las propiedades mecánicas sean deficientes.

Hong, L.T. *et al.* afirman que la naturaleza química de los morteros MPPC permite incluir en su composición un amplio rango de fibras naturales o artificiales, evaluando en su artículo la inclusión de escorias, humo de sílice y fibra de vidrio con resultados positivos.

Existen investigaciones en curso acerca de la adición a cementos MPC de cenizas de estiércol de ganado¹⁰⁰, residuos de colza¹⁰¹, Wollastonita¹⁰², humo de sílice¹⁰³, cenizas volantes^{104 105 106 107}, escorias de alto horno¹⁰⁸, piedras calizas en polvo¹⁰⁹, papel triturado¹¹⁰...

Del Valle-Zermeño, R *et al.* han realizado un estudio preliminar de las propiedades mecánicas e higrotérmicas de un cemento MPC con fibras de cáñamo añadidas en distintos porcentajes para ser usado como material para estructuras prefabricadas o forjados, valorando positivamente sus posibilidades¹¹¹.

Por otro lado, la reutilización de áridos es un tema de gran actualidad, ya sea áridos derivados de la demolición de hormigón o de otras fuentes. En los últimos años se están desarrollando investigaciones cuyo eje es el aprovechamiento de subproductos industriales para sustituir parcial o totalmente las materias primas naturales. Hay que valorar, además, que debido a que los morteros no tienen capacidad estructural, sus áridos están sometidos a una normativa menos severa que la aplicable a los hormigones¹¹².

Hay que tener en cuenta que la industria en la actualidad genera una enorme cantidad de productos de desecho, cuyo destino tradicional ha sido terminar en vertederos. En concreto, la industria del automóvil produce una gran cantidad de residuos de espuma rígida de poliuretano (PU). Estos residuos, convenientemente triturados pueden sustituir total o parcialmente a los áridos presentes en los morteros convencionales elaborados con cemento Portland^{113, 114}. Esta operación implementa una estrategia de economía circular.

El empleo de poliuretano como componente del mortero además contribuye a la mejora de sus propiedades como aislamiento térmico, de hecho varias casas comerciales disponen en su catálogo de morteros aislantes basados en la inclusión de un material plástico aislante (EPS, polímeros...) encapsulado en la matriz del mortero, componiendo un producto homogéneo¹¹⁵.

Los resultados de los estudios realizados por Calderón V. *et al.* con residuos de espuma rígida de poliuretano (PU) indican que el incremento de la cantidad de poliuretano disminuye la densidad y las propiedades mecánicas del mortero, a la vez que aumenta su trabajabilidad, permeabilidad y contenido en aire ocluido.

En los estudios realizados por Calderón V. *et al.* el procedimiento empleado para la fabricación de las muestras de mortero aligerado ha consistido en elaborar muestras de mortero tradicional en las que progresivamente se ha ido reemplazando diferente porcentaje de la arena por el residuo de espuma rígida de poliuretano. El cemento empleado ha sido cemento Portland de dos tipos: CEM I 42,5 R y CEM IV/B 42,5 N.

La densidad del estado fresco del mortero oscila desde 2.100 kg/m³ para las muestras de mortero en las que no se ha producido sustitución de la arena por poliuretano hasta 1.300 kg/m³ para las muestras en las que la sustitución de la arena ha sido completa, causada por un aumento del aire ocluido del 8%, hasta rondar un 11-13% del total.

Además, se detecta una mayor permeabilidad ante el vapor de agua, que permite un mejor comportamiento ante condensaciones no deseadas en el material. Los autores del estudio consideran que esta mejora se puede deber a la posible presencia de una red capilar debida a la espuma de poliuretano.

Las propiedades mecánicas a flexión y compresión empeoran en torno a un 50% en las muestras en las que el árido se ha sustituido totalmente por poliuretano con respecto a aquellas muestras en las que no ha habido sustitución.

En cuanto a la durabilidad, los morteros aligerados mediante el empleo de residuos de espuma de poliuretano (PU) tienen un comportamiento similar a los morteros convencionales cuando son sometidos a ambientes agresivos. Se observa que las propiedades mecánicas permanecen prácticamente inalteradas incluso con las pruebas estandarizadas más agresivas empleadas para determinar la durabilidad de los paneles de poliuretano usados en construcción¹¹⁶.

En general, con la dosificación adecuada el mortero aligerado elaborado con espumas rígidas de poliuretano es comparable a los morteros aligerados elaborados con materiales tradicionales¹¹⁷.

En la actualidad, existe poca bibliografía acerca del empleo de poliuretano como adición a cementos tipo MPC.

Ma C. y Chen B. han investigado las propiedades mecánicas y la durabilidad de un cemento MPC al que se le adiciona distintos porcentajes de un polímero en polvo con base de silano (hidruro de silicio). En general, pequeñas adiciones del 0,2-0,3% de aditivo contribuyen a mejorar las propiedades mecánicas del cemento MPC, así como su adherencia a un soporte de cemento portland convencional. Si los porcentajes de aditivo superan esos valores las propiedades mecánicas se ven deterioradas¹¹⁸.

Huang Y. *et al.* han investigado las variaciones que sufren los cementos MPC según diferentes adiciones de polímeros emulsionados. En general, sus resultados muestran que la viscosidad de la emulsión de polímeros está directamente ligada a la densidad, fluidez y trabajabilidad del cemento MPC. El pH de la emulsión también condiciona de manera notable las propiedades mecánicas del cemento MPC¹¹⁹.

Esta tesis doctoral plantea emplear residuos de espuma de poliuretano (PU) como árido en la elaboración del mortero MPC aligerado planteado como soporte bio-receptivo.

Existen otros precedentes en el empleo de residuos o sub-productos de otros procesos industriales para elaborar materiales de construcción que emplean como aglutinante cemento MPC¹²⁰.

Agua de amasado

En general, las dosificaciones de agua cemento (w/c ratio) que se emplean para generar cementos tipo MPC oscilan entre valores de 0.15 a 0.28^{121,122,123,124}.

Aditivos

Se va a utilizar como aditivo retardante Bórax de alta pureza ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), para controlar la exotermia de la reacción y obtener unos tiempos de trabajabilidad razonables para la elaboración del MPC¹²⁵.

4.8. Aumento de la bio-receptividad del mortero escogido como sustrato

Aumento de la porosidad del mortero

Ma, H. *et al* han investigado el efecto del contenido de agua y el ratio molar magnesia/fosfato en la estructura de poros y permeabilidad de la pasta de cemento MPC¹²⁶.

Según su investigación, una proporción agua/cemento (w/c) baja implica menor porosidad y genera una estructura porosa más fina. Cuando se mantiene constante w/c, un ratio molar magnesia a fosfato (M/P) de 6 genera la porosidad más baja y el menor diámetro crítico de los poros, así como la mayor resistencia a compresión y la menor permeabilidad intrínseca. En sus modelos empíricos basados en los resultados experimentales, la porosidad y la resistencia a compresión son inversamente proporcionales.

Tal y como se ha visto en el apartado anterior, en los estudios de Calderón V. *et al.*¹²⁷ se comprueba que la sustitución total o parcial del árido del mortero por residuos de espuma de poliuretano aumenta el porcentaje de aire ocluido en el material, y mejora su permeabilidad ante el vapor de agua.

Por tanto, se plantea trabajar con un mortero sustituyendo el empleo de árido convencional por espuma de poliuretano reciclada para aumentar su porosidad. Se emplearán un ratio w/c alto para potenciar la porosidad del mortero MPC fabricado.

Aumento de la rugosidad del mortero

En función del conocimiento práctico y teórico adquirido durante la redacción de esta tesis sobre los briófitos, y en concreto sobre la especie *Hypnum Cupressiforme*, podemos afirmar que el posible crecimiento de los tapices de *Hypnum* tenderá a ser aleatorio y poco previsible.

Esta apreciación se ha visto refrendada en el intercambio de impresiones con otros grupos de investigación que trabajan con briófitos, como el grupo que desarrolla el Briosistema descrito en el Capítulo 3. Es muy improbable que los tapices de musgo sobre el sustrato de mortero, si prosperan, presenten un aspecto uniforme a lo largo del tiempo.

A su vez, la especie de briófito se ve favorecida por una superficie rugosa del sustrato, ya que aumenta la superficie de asentamiento, los puntos de anclaje y la retención de materia orgánica, polvo o gotas de lluvia¹²⁸.

Por estos motivos se descarta intentar generar tapices uniformes de briófito a la manera de una pradera de césped. Se plantea imitar las superficies que en la naturaleza favorecen la implantación de la especie *Hypnum Cupressiforme*, como cortezas de árbol y rocas silíceas¹²⁹, superficies naturales que presentan ondulaciones, concavidades, convexidades...

Es un acercamiento similar al desarrollado en el prototipo de panel de fachada y en los ladrillos bio-receptivos descritos en el punto 3.3 de esta tesis doctoral¹³⁰.

Por tanto, para conseguir este acercamiento a la topografía de una superficie natural y producir un aumento de la rugosidad se puede emplear un acabado en el mortero MPC análogo al acabado que tienen las fachadas construidas mediante la técnica del revoco a la tirolesa (Ilustración 78), o al acabado de las fachadas generadas mediante proyección de mortero (Ilustración 79).



Ilustración 78: Revoco a la tirolesa. Fuente generador de precios

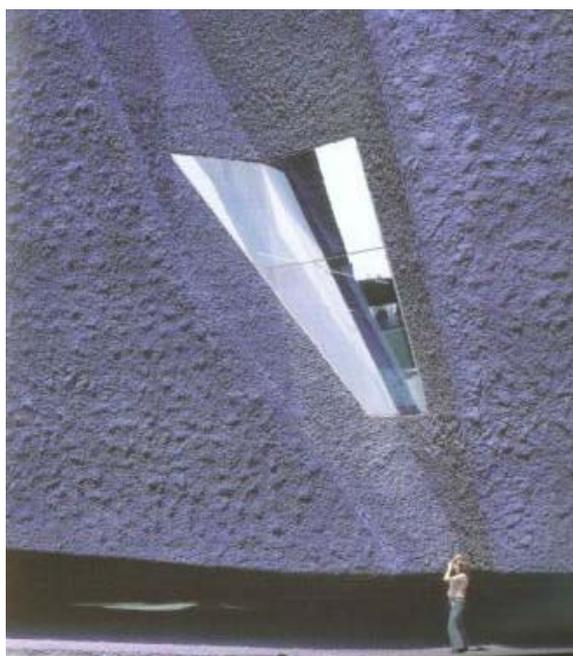


Ilustración 79: Fachada de mortero proyectado con pigmentos de color añil. Edificio Fórum, fuente Arquitectura Viva

El revoco a la tirolesa es un tipo de revoco que se realiza sobre un enfoscado aún fresco, formado por mortero de cemento con arena gruesa. Se tira fuertemente sobre el paramento con la paleta para que quede adherido y se puede pintar una vez fraguado¹³¹.

El propósito es que el sistema de recubrimiento de fachadas planteado sea una "rocalla" artificial, en la que la especie de briófito prospere en los puntos de la superficie generada donde se den las condiciones apropiadas de iluminación, humedad, depósitos de materia orgánica... a semejanza de cómo coloniza las superficies naturales.

Reducción del pH del mortero

Utilizar como aglomerante un cemento de fosfato de magnesio (MPC) en vez de un cemento Portland causa que las muestras fabricadas de mortero tengan un pH entre 6.5 y 9, valores equiparables a los recogidos en las investigaciones desarrolladas por Manso *et al.*¹³².

Este rango de pH es, a priori, adecuado para la colonización del mortero por la especie de briófito *Hypnum Cupressiforme*, que en su hábitat natural crece en sustratos ligeramente ácidos.

4.9. Ensayos preliminares del empleo de PU

Con el objeto de familiarizarse con esta sustitución del árido tradicional por la espuma de poliuretano se han realizado para esta tesis unas muestras preliminares de mortero aligerado a partir de cemento tradicional Portland, arena de río, agua de amasado y residuos de espuma rígida de poliuretano (PU).

Estas muestras se han basado en la línea de investigación sobre sustitución de los áridos del mortero por materiales de reciclaje, investigación realizada por el Grupo de Investigación en Ingeniería de la Edificación de la Universidad de Burgos.

El cemento empleado ha sido cemento Portland CEM IV/B 32,5 N, cuya densidad es de 3.030 kg/m³. La composición química del cemento se muestra en la Tabla 3:

Componentes	Fórmula química	% Composición
Óxido de calcio	CaO	42.20
Sílice	SiO ₂	30.30
Alúmina	Al ₂ O ₃	10.80
Óxido de hierro	Fe ₂ O ₃	3.00
Óxido de magnesio	MgO	2.50
Óxido de potasio	K ₂ O	1.60
Óxido de sodio	Na ₂ O	0.80
Anhídrido sulfúrico	SO ₃	2.00
Otros	–	1.10
Pérdidas por combustión	–	5.70

Tabla 3: Composición química del cemento (%)¹³³

El árido tradicional empleado es arena de río tamizada con un tamiz entre 0-4 mm y con una densidad de 2.700 kg/m³. La distribución del tamaño de las partículas es acorde con la norma española EN 13139¹³⁴.

La espuma de poliuretano (PU) empleada (Ilustración 80) proviene del reciclaje de la industria del automóvil, y se ha desmenuzado hasta un tamaño de partícula de entre 0-4 mm similar al de la arena de río que reemplaza.



Ilustración 80: espuma de poliuretano empleada

Su densidad es de $26 \pm 2 \text{ kg/m}^3$, y su composición química, obtenida según un análisis elemental CHNS¹³⁵ es la que se recoge en la Tabla 4:

Elemento	Peso (%)
C	65,50
O	19,00
N	7,20
H	6,20
Ca	1,00
Others	1,10
Total	100,00

Tabla 4: Composición química básica de los residuos de espuma de poliuretano empleados

El proceso para elaborar las muestras ha sido la elaboración de un mortero de cemento tradicional, en el que parte del volumen de árido es sustituido por la espuma de poliuretano (PU). Las muestras se han elaborado en el laboratorio de materiales del Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno de la Universidad de Burgos.

Las dosificaciones PU-mortero empleadas han sido las siguientes (Tabla 5):

Relación cemento/(arena+PU)	Cem IV (g)	Arena (g)	PU (g)	Agua (g)	a/c
4PU50 (Sustitución del 50% del árido)	458,5	458,5	58,8	380,1	0,83
1/4 6PU75 (Sustitución del 25% del árido)	300,1	900,4	38,5	475	1,58
1/6					

Tabla 5: Dosificación PU-mortero empleadas

Como se ha comentado, estas dosificaciones se proponen como resultado de la experiencia adquirida durante el desarrollo de la investigación sobre sustitución de los áridos del mortero por materiales de reciclaje. Se tiene en cuenta especialmente la necesidad de una porosidad alta y de una reducción en el peso del producto resultante.

En las dosificaciones propuestas observamos como la relación agua/cemento (w/c) disminuye al aumentar el porcentaje de espuma de poliuretano. Según Calderón V. *et al.* este fenómeno se podría deber a la menor agua demandada por la espuma de poliuretano comparada con la que demanda la arena¹³⁶.

En la primera dosificación, 4PU50, se ha sustituido el 50% del volumen por espuma de poliuretano, mientras que la sustitución realizada en la segunda muestra, 6PU75, ha sido del 25%.

Para la correcta medida de las dosificaciones consideradas se ha empleado una balanza electrónica de precisión, y en las pesadas se ha descontado el peso de la bandeja plástica empleada (Ilustración 81). La balanza electrónica es marca Cobos Precision, serie CS, modelo D-4000, con capacidad para 4.100 g y 0,1 g de precisión.



Ilustración 81: Balanza electrónica empleada, con el peso de la bandeja descontado

Las muestras de mortero se han elaborado con una amasadora-mezcladora de hormigón de laboratorio (Ilustración 82), con la finalidad de conseguir una perfecta mezcla de los componentes del mortero y asegurar así un alto grado de homogeneidad.



Ilustración 82: Mezcladora de laboratorio empleada

Posteriormente, el mortero resultante se ha vertido en un molde y se ha trasladado a una cámara frigorífica para su fraguado.

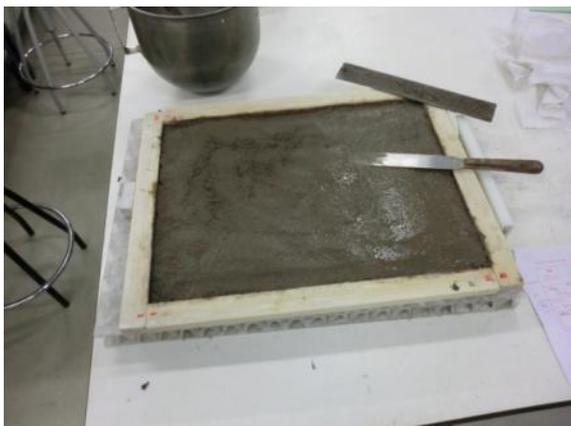


Ilustración 83: mortero fresco, recién mezclado y amasado

Tras procederse a su desmoldado, las muestras de mortero presentan el siguiente aspecto:



Ilustración 84: Muestra tipo 6PU50, anverso



Ilustración 85: Muestra tipo 6PU50, reverso



Ilustración 86: Muestra tipo 4PU75, anverso



Ilustración 87: Muestra tipo 4PU75, reverso

No se ha realizado una caracterización física de las muestras elaboradas, puesto que el objetivo perseguido en su elaboración era familiarizarse con las características del futuro sustrato propuesto y su proceso de elaboración.

Las principales características organolépticas apreciables son:

- Textura muy diferente en la cara en contacto con el molde que en la cara sin contacto: La cara en contacto con el molde presenta una superficie mucho más lisa que la cara que no lo está. Por tanto, habrá que tener en cuenta esta circunstancia si lo que deseamos es una superficie rugosa
- Dureza superficial baja: en la manipulación de las muestras se desprende mucho material en forma de polvo
- Peso relativamente elevado: comparado con muestras de un mortero comercial aislante (muestra de Onexit Thermic¹³⁷) las muestras obtenidas resultan sensiblemente más pesadas, lo que indica la posibilidad de elevar la sustitución de árido por espuma de poliuretano para reducir la densidad del mortero, siempre que las propiedades mecánicas resulten suficientes

4.10. Síntesis de lo expuesto en el capítulo

Se especifican las características deseables en el material a emplear como soporte resistente del sistema descrito en la tesis.

Se relacionan otros materiales que se han analizado y descartado para constituirse en el soporte resistente del sistema.

A nivel general, se define lo que es un mortero, se describen sus componentes genéricos y sus propiedades principales en estado fresco y endurecido. Se introduce el concepto de mortero aligerado.

Se motiva la elección de un mortero como soporte resistente. Para ello, se comparan sus características con las enunciadas como características deseables al principio del capítulo.

Se aporta unos parámetros de referencia para el mortero a fabricar.

Se enuncia la composición genérica del mortero escogido en la tesis, introduciendo el concepto de mortero MPC y el empleo de PU como árido. Se describe como, a priori, el mortero propuesto mejora la bio-receptividad de un mortero convencional.

Por último, se describen unos ensayos preliminares realizados con mortero convencional para familiarizarse con el empleo de PU como árido.

4.11. Referencias

-
- 1 Guillitte, O., Dreesen, R.
Laboratory chamber studies and petrographical analysis as bioreceptivity assessment tools of building materials
(1995) Science of the Total Environment, 167 (1-3), pp. 365-374
- 2 Ibíd.4
- 3 Atherton, I.; Bosanquet, S.; Lawley M.
Mosses and Liverworts of Britain and Ireland. A Field Guide.
(2010) British Bryological Society. ISBN: 978-0-9561310-1-0.
- 4 Martínez, J., Núñez, E.
Los briófitos: plantas diminutas al borde del masoquismo
(2004) Páginas de información ambiental, 17, pp. 24-28.
- 5 Jiménez, C., Ariño, X.
Biological colonization and deterioration of mortars by phototrophic organisms
(1995) Materiales de construcción, vol. 45, nº 240, pp. 5-16
- 6 AITIM. Asociación de Investigación de las Industrias de la Madera
<http://infomadera.net/modulos/index.php>
- 7 Presas, M.; Pastor, J.Y.; Llorca, J.
Comportamiento mecánico de espumas cerámicas de SiC
(2006) Anales de Mecánica de la Fractura, Vol. II
- 8 Vitruvio, M.
Los Diez Libros de Arquitectura
(1787) Imprenta Real, traducción de José Ortiz Sanz
- 9 Schmitt, H.
Tratado de construcción
(1978) Editorial Gustavo Gili, ISBN 84-252-0092-X
- 10 AFAM, asociación de fabricantes de mortero seco
<http://www.afam.es/>
- 11 Norma Española UNE-EN 998-1
(2010) Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido
- 12 Norma Española UNE-EN 998-2
(2004) Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería
- 13 Junco, C.
Morteros aligerados con residuos de espumas rígidas de poliuretano.
(2012) Universidad de Burgos, PhD thesis
- 14 Schmitt, H.
Tratado de construcción
(1978) Editorial Gustavo Gili, ISBN 84-252-0092-X
- 15 Norma Española UNE-EN 998-2
(2004) Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería
- 16 Junco, C.
Morteros aligerados con residuos de espumas rígidas de poliuretano.
(2012) Universidad de Burgos, PhD thesis
- 17 Schmitt, H.
Tratado de construcción
(1978) Editorial Gustavo Gili, ISBN 84-252-0092-X
- 18 AFAM, asociación de fabricantes de mortero seco
<http://www.afam.es/>

-
- 19 Junco, C.
Morteros aligerados con residuos de espumas rígidas de poliuretano.
(2012) Universidad de Burgos, PhD thesis
- 20 *Ibíd.*
- 21 *Ibíd.*
- 22 *Ibíd.*
- 23 Norma Española UNE-EN 998-1
(2010) Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido
- 24 Cowan H.J.A.
History of masonry and concrete domes in building construction.
(1977) *Build Environ*, 12, 1-24
- 25 Junco, C.
Morteros aligerados con residuos de espumas rígidas de poliuretano.
(2012) Universidad de Burgos, PhD thesis
- 26 *Ibíd.*
- 27 Diccionario de la construcción
Fundación laboral de la construcción
<http://www.diccionariodelaconstruccion.com>
- 28 Junco, C.
Morteros aligerados con residuos de espumas rígidas de poliuretano.
(2012) Universidad de Burgos, PhD thesis
- 29 *Ibíd.*
- 30 Diccionario de la construcción
Fundación laboral de la construcción
<http://www.diccionariodelaconstruccion.com>
- 31 Morteros la Unión
<http://www.launion.es/>
- 32 Norma Española UNE- 83-101-90
(1990) áridos para hormigones : definiciones y clasificaciones
- 33 Mnjit S., Mridul G.
Perlite based building materials. A review of current applications
(1991) *Constr Build Mater*, 5, (2), 75-81
- 34 Junco, C.
Morteros aligerados con residuos de espumas rígidas de poliuretano.
(2012) Universidad de Burgos, PhD thesis
- 35 Gouny F, Fouchal F, Maillard P, Rossignol S.
A geopolymer mortar for wood and earth structures.
(2012) *Constr Build Mater*, 36, 188-195
- 36 Chen P.W, Chung D.D.L.
A comparative study of concretes reinforced with carbon, polyethylene, and steel fibers and their improvement by latex addition. A review.
ACI Mater J 1996, 93 (2), 129-133
- 37 Cai L.
Experimental research on producing thermal insulating bonding mortar by spent polystyrene foam.
(2012) *Cem Concr Compos*, 174-177, 1253-1256
- 38 Reis J.M.L , Carneiro E.P.
Evaluation of PET waste aggregates in polymer mortars.
(2012) *Constr Build Mater*, 27(1), 107-111

- 39 Cruz, M., Beckett, R.
Bioreceptive design: A novel approach to biodigital materiality
(2016) *Architectural Research Quarterly*, 20 (1), pp. 51-64
- 40 Manso, S., Calvo-Torras, M.T., De Belie, N., Segura, I., Aguado, A.
Evaluation of natural colonisation of cementitious materials: Effect of bioreceptivity and environmental conditions
(2015) *Science of the Total Environment*, 512-513, pp. 444-453.
- 41 Bur, N., Roux, S., Delmas, L., Géraud, Y., Feugeas F.
Porosité des mortiers et bioréceptivité
(2010) *Matériaux & Techniques* 98 (1) 31-40
- 42 Alejandro, F
Historia, caracterización y restauración de morteros
(2002) Instituto universitario de ciencias de la construcción, ISBN 84-472-0773-0
- 43 Rodríguez-Mora, O.
Morteros para fábricas
(2004) Asociación nacional de fabricantes de mortero, ISBN 978-84-612-5455-2
- 44 Lichtner, B., Hundt, J.
Medidas de porosidad en morteros de cemento y en hormigón
(1974) *Materiales de construcción*, 24, nº153
- 45 Manso, S., De Muynck, W., Segura, I., Aguado, A., Steppe, K., Boon, N., De Belie, N.
Bioreceptivity evaluation of cementitious materials designed to stimulate biological growth
(2014) *Science of the Total Environment*, 481 (1), pp. 232-241
- 46 Shirakawa, M.A., Beech, I.B., Tapper, R., Cincotto, M.A., Gambale, W.
The development of a method to evaluate bioreceptivity of indoor mortar plastering to fungal growth
(2003) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 51 (2), pp. 83-92
- 47 Tran, T.H., Govin, A., Guyonnet, R., Grosseau, P., Lors, C., Garcia-Diaz, E., Damidot, D., Devès, O., Ruot, B.
Influence of the intrinsic characteristics of mortars on biofouling by *Klebsormidium flaccidum*
(2012) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 70, pp. 31-39
- 48 Shirakawa, M.A., Beech, I.B., Tapper, R., Cincotto, M.A., Gambale, W.
The development of a method to evaluate bioreceptivity of indoor mortar plastering to fungal growth
(2003) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 51 (2), pp. 83-92
- 49 Manso, S., Mestres, G., Ginebra, M.P., De Belie, N., Segura, I., Aguado, A.
Development of a low pH cementitious material to enlarge bioreceptivity
(2014) *Construction and Building Materials*, 54, pp. 485-495. Cited 4 times.
- 50 Tran, T.H., Govin, A., Guyonnet, R., Grosseau, P., Lors, C., Garcia-Diaz, E., Damidot, D., Devès, O., Ruot, B.
Influence of the intrinsic characteristics of mortars on biofouling by *Klebsormidium flaccidum*
(2012) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 70, pp. 31-39
- 51 Wiktor, V., Grosseau, P., Guyonnet, R., Garcia-Diaz, E., Lors, C.
Accelerated weathering of cementitious matrix for the development of an accelerated laboratory test of biodeterioration
(2011) *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 44 (3), pp. 623-640
- 52 Shirakawa, M.A., Beech, I.B., Tapper, R., Cincotto, M.A., Gambale, W.
The development of a method to evaluate bioreceptivity of indoor mortar plastering to fungal growth
(2003) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 51 (2), pp. 83-92
- 53 Manso S, Segura I, Aguado A.
Conjunto multicapa en base cemento, aplicable como soporte biológico para fachadas de edificios u otras construcciones, Patent PCT/ES2013/070438, 28 July 2013
- 54 Junco, C.
Morteros aligerados con residuos de espumas rígidas de poliuretano.
(2012) Universidad de Burgos, PhD thesis
- 55 AFAM, asociación de fabricantes de mortero seco
<http://www.afam.es/>
- 56 Mueller A., Hartley A.
Materiales de hormigón reciclado en One Bryant Park
(2009) *Detail Green*, pp 782

-
- 57 Formosa J.
Formulaciones de nuevos morteros y cementos especiales basadas en subproductos de magnesio
(2012) Universitat de Barcelona, PhD thesis
- 58 Shi, C., Jiménez, A.F., Palomo, A.
New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement
(2011) Cement and Concrete Research, 41 (7), pp. 750-763
- 59 World Business Council for Sustainable Development
<http://wbcscservers.org/wbcscpublications/>
- 60 Guillitte, O., Dreesen, R.
Laboratory chamber studies and petrographical analysis as bioreceptivity assessment tools of building materials
(1995) Science of the Total Environment, 167 (1-3), pp. 365-374
- 61 Jiménez, C., Ariño, X.
Biological colonization and deterioration of mortars by phototrophic organisms
(1995) Materiales de construcción, vol. 45, nº 240, pp. 5-16
- 62 Junco, C.
Morteros aligerados con residuos de espumas rígidas de poliuretano.
(2012) Universidad de Burgos, PhD thesis
- 63 Gabinete Técnico Aparejadores Guadalajara, S.L.U.
Base de Precios de la Construcción
(2014) Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de la Edificación de Guadalajara
- 64 Generador de precios de la construcción
(2015) CYPE Ingenieros
<http://generadorprecios.cype.es/>
- 65 Wilson, A. D., Nicholson, J. W.
Acid-base cements: their biomedical and industrial applications (Vol. 3)
(1993) Cambridge University Press
- 66 Wagh A S.
Chemically bonded phosphste ceramics, Twenty First century materials with diverse applications
(2004) Elsevier B.V., Amsterdam
- 67 Formosa J.
Formulaciones de nuevos morteros y cementos especiales basadas en subproductos de magnesio
(2012) Universitat de Barcelona, PhD thesis
- 68 Ibíd.
- 69 Wagh, A.S., Strain, R., Jeong, S.Y., Reed, D., Krause, T., Singh, D.
Stabilization of Rocky Flats Pu-contaminated ash within chemically bonded phosphate ceramics
(1999) Journal of Nuclear Materials, 265 (3), pp. 295-307
- 70 Borzunov, A.I., Dyakov, S.V., Poluektov, P.P.
Fixing the radioactive wastes (RW) by means of their inclusion into phosphate ceramics (PC)
(2004) Atomnaya Energiya, 96 (2), pp. 133-137.
- 71 Formosa, J., Chimenos, J.M., Lacasta, A.M., Haurie, L., Rosell, J.R.
Novel fire-protecting mortars formulated with magnesium by-products
(2011) Cement and Concrete Research, 41 (2), pp. 191-196
- 72 Manso, S., De Muyck, W., Segura, I., Aguado, A., Steppe, K., Boon, N., De Belle, N.
Bioreceptivity evaluation of cementitious materials designed to stimulate biological growth
(2014) Science of the Total Environment, 481 (1), pp. 232-241
- 73 Formosa J.
Formulaciones de nuevos morteros y cementos especiales basadas en subproductos de magnesio
(2012) Universitat de Barcelona, PhD thesis
- 74 Ibíd.
- 75 Wilson, A. D., Nicholson, J. W.
Acid-base cements: their biomedical and industrial applications (Vol. 3)
(1993) Cambridge University Press

- 76 Formosa J.
Formulaciones de nuevos morteros y cementos especiales basadas en subproductos de magnesio
(2012) Universitat de Barcelona, PhD thesis
- 77 Wagh, A., Jeong, S.
Chemically Bonded Phosphate Ceramics: I, A Dissolution Model of Formation
(2003) Journal of the American Ceramic Society, 1838-1844
- 78 Manso S, Segura I, Aguado A.
Conjunto multicapa en base cemento, aplicable como soporte biológico para fachadas de edificios u otras construcciones, Patent PCT/ES2013/070438, 28 July 2013
- 79 Manso, S., Mestres, G., Ginebra, M.P., De Belie, N., Segura, I., Aguado, A.
Development of a low pH cementitious material to enlarge bioreceptivity
(2014) Construction and Building Materials, 54, pp. 485-495. Cited 4 times.
- 80 Manso, S., De Muynck, W., Segura, I., Aguado, A., Steppe, K., Boon, N., De Belie, N.
Bioreceptivity evaluation of cementitious materials designed to stimulate biological growth
(2014) Science of the Total Environment, 481 (1), pp. 232-241
- 81 Soudée, E., Péra, J.
Mechanism of setting reaction in magnesia-phosphate cements
(2000) Cement and Concrete Research, 30 (2), pp. 315-321
- 82 Formosa J.
Formulaciones de nuevos morteros y cementos especiales basadas en subproductos de magnesio
(2012) Universitat de Barcelona, PhD thesis
- 83 Soudée, E., Péra, J.
Mechanism of setting reaction in magnesia-phosphate cements
(2000) Cement and Concrete Research, 30 (2), pp. 315-321
- 84 Sarkar, Asok K.
Phosphate cement-based fast-setting binders
(1990) American Ceramic Society Bulletin, 69 (2), pp. 234-238
- 85 Hall, D.A., Stevens, R., El-Jazairi, B.
The effect of retarders on the microstructure and mechanical properties of magnesia-phosphate cement mortar
(2001) Cement and Concrete Research, 31 (3), pp. 455-465
- 86 Formosa J.
Formulaciones de nuevos morteros y cementos especiales basadas en subproductos de magnesio
(2012) Universitat de Barcelona, PhD thesis
- 87 Soudée, E., Péra, J.
Influence of magnesia surface on the setting time of magnesia-phosphate cement
(2002) Cement and Concrete Research, 32 (1), pp. 153-157
- 88 Mehta, P.K.
Concrete technology for sustainable development
(1999) Concrete International, Volume 21, Issue 11, pp. 47-53
- 89 Departamento I+D+i
Magna. Magnesitas Navarras S.A.
<http://www.magnesitasnavarras.es/>
- 90 Phair, J.W.
Green chemistry for sustainable cement production and use
(2006) Green Chem., 2006,8, PP. 763-780
- 91 Tassew, S.T., Lubell, A.S.
Properties of Phosphate-based Cement with High Fly Ash Contents
(2013) Advances in Green Binder Systems, SP-294, p. 16
- 92 Qiao, F., Lin, W., Chau, C.K., Li, Z.
Property assessment of magnesium phosphate cement
(2009) Key Engineering Materials, 400-402, pp. 115-120

-
- 93 Qiao, F., Chau, C.K., Li, Z.
Property evaluation of magnesium phosphate cement mortar as patch repair material
(2010) *Construction and Building Materials*, 24 (5), pp. 695-700
- 94 Ohama, Y.
Concrete-polymer composites-the past, present and future
(2011) *Key Engineering Materials*, 466, pp. 1-14
- 95 Tassew, S.T., Lubell, A.S.
Properties of Phosphate-based Cement with High Fly Ash Contents
(2013) *Advances in Green Binder Systems*, SP-294, p. 16
- 96 Qiao, F., Lin, W., Chau, C.K., Li, Z.
Property assessment of magnesium phosphate cement
(2009) *Key Engineering Materials*, 400-402, pp. 115-120
- 97 Qiao, F., Chau, C.K., Li, Z.
Property evaluation of magnesium phosphate cement mortar as patch repair material
(2010) *Construction and Building Materials*, 24 (5), pp. 695-700
- 98 Ding, Z., Li, Z.
Effect of aggregates and water contents on the properties of magnesium phospho-silicate cement
(2005) *Cement and Concrete Composites*, 27 (1), pp. 11-18
- 99 Hong, L.T., Lubell, A.S.
Phosphate cement-based concretes containing silica fume
(2015) *ACI Materials Journal*, 112 (4), pp. 587-596
- 100 Feng, P., Zhou, S., Zhao, J.
Effect of cattle manure ash on workability and mechanical properties of magnesium phosphate cement
(2016) *Construction and Building Materials*, 129, pp. 79-88
- 101 Hen, B., Liu, N.
Experimental investigation on green concrete using magnesium phosphate cement(MPC) and rape stalk
(2016) *Jianzhu Calliao Xuebao/Journal of Building Materials*, 19 (6), pp. 1046-1050
- 102 Gao, X., Zhang, A., Li, S., Sun, B., Zhang, L.
The resistance to high temperature of magnesia phosphate cement paste containing wollastonite
(2016) *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 49 (8), pp. 3423-3434
- 103 Hong, L.T., Lubell, A.S.
Phosphate cement-based concretes containing silica fume
(2015) *ACI Materials Journal*, 112 (4), pp. 587-596
- 104 Zheng, D.-D., Ji, T., Wang, C.-Q., Sun, C.-J., Lin, X.-J., Hossain, K.M.A.
Effect of the combination of fly ash and silica fume on water resistance of Magnesium-Potassium Phosphate Cement
(2016) *Construction and Building Materials*, 106, pp. 415-421
- 105 Li, Y., Shi, T., Li, J.
Effects of fly ash and quartz sand on water-resistance and salt-resistance of magnesium phosphate cement
(2016) *Construction and Building Materials*, 105, pp. 384-390
- 106 Huang, R., Kong, X.
The application analysis of fly ash in magnesium phosphate cement
(2015) *Advances in Civil Engineering and Building Materials IV - Selected and Peer Reviewed Papers from the 2014 4th International Conference on Civil Engineering and Building Materials, CEBM 2014*, pp. 113-116
- 107 Ding, Z., Li, Z.
High-early-strength magnesium phosphate cement with fly ash
(2005) *ACI Materials Journal*, 102 (6), pp. 375-381
- 108 Gardner, L.J., Bernal, S.A., Walling, S.A., Corkhill, C.L., Provis, J.L., Hyatt, N.C.
Characterisation of magnesium potassium phosphate cements blended with fly ash and ground granulated blast furnace slag
(2015) *Cement and Concrete Research*, 74, pp. 78-87
- 109 Yang, J., Du, Y., Xu, X.
Effect of limestone powder on properties of magnesium phosphate cement paste
(2015) *Jianzhu Calliao Xuebao/Journal of Building Materials*, 18 (1), pp. 38-43

-
- 110 Donahue, P.K., Aro, M.D.
Durable phosphate-bonded natural fiber composite products
(2010) *Construction and Building Materials*, 24 (2), pp. 215-219
- 111 Del Valle-Zermeño, R., Aubert, J.E., Laborel-Préneron, A., Formosa, J., Chimenos, J.M.
Preliminary study of the mechanical and hygrothermal properties of hemp-magnesium phosphate cements
(2016) *Construction and Building Materials*, 105, pp. 62-68
- 112 España, Ministerio de Fomento
(2008) Instrucción de hormigón estructural. Secretaría General Técnica
- 113 Siddique, R., Khatib, J., Kaur, I.
Use of recycled plastic in concrete: A review
(2008) *Waste Management*, 28 (10), pp. 1835-1852
- 114 Gadea, J., Rodríguez, A., Campos, P.L., Garabito, J., Calderón V.
Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam
(2010) *Cement & Concrete Composites* 32, pp. 672-677
- 115 Weber Saint Gobain
<http://www.weber.es/>
- 116 Junco, C., Gadea, J., Rodríguez, A., Gutiérrez, S., Calderón V.
Durability of lightweight masonry mortars made with white recycled polyurethane foam
(2012) *Cement & Concrete Composites* 34, pp. 1174-1179
- 117 Gadea, J., Rodríguez, A., Campos, P.L., Garabito, J., Calderón V.
Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam
(2010) *Cement & Concrete Composites* 32, pp. 672-677
- 118 Ma, C., Chen, B.
Properties of magnesium phosphate cement containing redispersible polymer powder
(2016) *Construction and Building Materials*, 113, pp. 255-263
- 119 Huang, Y.-B., Wang, R.-Z., Yu, F., Zhou, J.-J.
Modification of magnesium phosphate cement by polymers
(2014) *Hunan Daxue Xuebao/Journal of Hunan University Natural Sciences*, 41 (7), pp. 56-63
- 120 Amiandamhen, S.O., Meincken, M., Tyhoda, L.
Magnesium based phosphate cement binder for composite panels: A response surface methodology for optimisation of processing variables in boards produced from agricultural and wood processing industrial residues
(2016) *Industrial Crops and Products*, 94, pp. 746-754
- 121 Formosa J.
Formulaciones de nuevos morteros y cementos especiales basadas en subproductos de magnesio
(2012) Universitat de Barcelona, PhD thesis
- 122 Manso, S., De Muynck, W., Segura, I., Aguado, A., Steppe, K., Boon, N., De Belie, N.
Bioreceptivity evaluation of cementitious materials designed to stimulate biological growth
(2014) *Science of the Total Environment*, 481 (1), pp. 232-241
- 123 Hong, L.T., Lubell, A.S.
Phosphate cement-based concretes containing silica fume
(2015) *ACI Materials Journal*, 112 (4), pp. 587-596
- 124 Tassew, S.T., Lubell, A.S.
Properties of Phosphate-based Cement with High Fly Ash Contents
(2013) *Advances in Green Binder Systems*, SP-294, p. 16
- 125 Formosa J.
Formulaciones de nuevos morteros y cementos especiales basadas en subproductos de magnesio
(2012) Universitat de Barcelona, PhD thesis
- 126 Ma, H., Xu, B., Liu, J., Pei, H., Li, Z.
Effects of water content, magnesia-to-phosphate molar ratio and age on pore structure, strength and permeability of magnesium potassium phosphate cement paste
(2014) *Materials and Design*, 64, pp. 497-502

-
- 127 Gadea, J., Rodríguez, A., Campos, P.L., Garabito, J., Calderón V.
Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam
(2010) *Cement & Concrete Composites* 32, pp. 672–677
- 128 Guillitte, O., Dreesen, R.
Laboratory chamber studies and petrographical analysis as bioreceptivity assessment tools of building materials
(1995) *Science of the Total Environment*, 167 (1-3), pp. 365-374
- 129 : Atherton, I.; Bosanquet, S.; Lawley M.
Mosses and Liverworts of Britain and Ireland. A Field Guide.
(2010) British Bryological Society. ISBN: 978-0-9561310-1-0.
- 130 Cruz, M., Beckett, R.
Bioreceptive design: A novel approach to biodigital materiality
(2016) *Architectural Research Quarterly*, 20 (1), pp. 51-64
- 131 Serra Hamilton, A.
(1991) *Términos ilustrados de arquitectura, construcción y otras artes y oficios*
- 132 Manso, S., Mestres, G., Ginebra, M.P., De Belie, N., Segura, I., Aguado, A.
Development of a low pH cementitious material to enlarge bioreceptivity
(2014) *Construction and Building Materials*, 54, pp. 485-495.
- 133 EN 197-1.
(1994) Cement composition, specification and conformity criteria. Part 1: common cements
- 134 EN 13139.
(2002) Aggregates for mortar
- 135 Gadea, J., Rodríguez, A., Campos, P.L., Garabito, J., Calderón V.
Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam
(2010) *Cement & Concrete Composites* 32, pp. 672–677
- 136 *Ibíd.*
- 137 Onexit thermic
<http://www.onexit.es>

5. Elaboración del mortero bio-receptivo propuesto

Los componentes necesarios para elaborar el mortero MPC con bio-receptividad mejorada propuesto en esta tesis son:

Aglomerante	Cemento de fosfato magnesio (MPC)
Árido	Residuos de espuma rígida de poliuretano
Agua de amasado	Agua de la red de suministro municipal de Burgos

5.1. Cemento de fosfato magnesio (MPC)

Los dos componentes principales del cemento MPC son óxido de magnesio, MgO, y dihidrógeno fosfato de amonio $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$. También es necesario considerar la adición de bórax como retardante.

Dihidrógeno fosfato de amonio $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$, MAP

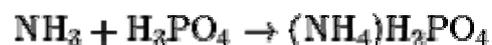
La fuente ácida de fosfato que se va a emplear es el dihidrógeno fosfato de amonio.

Es una materia prima de elevado coste, lo que penaliza el empleo generalizado de los cementos de fosfato-magnesio fabricados a partir de ella en el sector de la construcción, ya que normalmente dicho sector precisa de grandes volúmenes de material.

No obstante, dado que en general existe bibliografía adecuada sobre su uso, y teniendo en cuenta que el producto de la construcción que se va a generar presenta más valor añadido que su simple uso como mortero de revestimiento, se considera adecuado su uso para el desarrollo de la fase experimental de esta tesis.

El dihidrógeno fosfato de amonio o fosfato monoamónico (MAP de las siglas en inglés), $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, es una de las sales de fosfato de amonio solubles en agua que se puede producir cuando el amoníaco reacciona con el ácido fosfórico hasta que la disolución es claramente ácida. Cristaliza en prismas tetragonales.

Se obtiene a partir de la reacción de neutralización entre el ácido fosfórico y el amoníaco:



El MAP que se va a utilizar en la fase de experimentación de esta tesis se ha comprado a la empresa Sigma Aldrich, sus características son las siguientes:

Ensayo	≥99.0% (T)
pH	3.8-4.4 (25°C, 50 mg/ml en H ₂ O)
Punto de fusión	190°C (dec.)(lit.)
Trazas de aniones	chloride (Cl ⁻): ≤5 mg/kg nitrate (NO ₃ ⁻): ≤10 mg/kg
Trazas de cationes	As: ≤0.5 mg/kg Ca: ≤10 mg/kg Cd: ≤5 mg/kg Co: ≤5 mg/kg Cr: ≤5 mg/kg Cu: ≤5 mg/kg Fe: ≤5 mg/kg K: ≤50 mg/kg Mg: ≤5 mg/kg Mn: ≤5 mg/kg Na: ≤50 mg/kg Ni: ≤5 mg/kg Pb: ≤5 mg/kg Zn: ≤5 mg/kg

Tabla 6: Características MAP, fuente Sigma-Aldrich

El precio de un kilogramo de este reactivo es de 58.30 Euros.

Para solventar el inconveniente del coste de fuente ácida de fosfato, en posteriores líneas de investigación se plantea la posibilidad de emplear fuentes de menor pureza.

Una posibilidad, tal y como indica Formosa J., puede ser el empleo de dihidrogenofosfato de potasio o fosfato monopotásico (MKP) de grado alimentario, cuya formulación es KH₂PO₄. Dado que no se trata de un producto químico de grado reactivo, se conseguiría economizar el precio final del mortero generado con él¹.

Óxido de magnesio, MgO

La magnesita es un mineral (MgCO₃) que se destina fundamentalmente a la calcinación, fundamentalmente con dos variedades:

- Se considera magnesita calcinada a muerte y sinterizada aquella calcinada en un horno a muy alta temperatura (1.800°). En la magnesita calcinada a muerte los cristales de MgO son grandes, y el producto denso, lo que implica una mayor estabilidad química. Es un producto muy compacto y estable
- Se considera magnesita calcinada cáustica aquella calcinada a 900°; es un producto mucho más activo químicamente que absorbe fácilmente agua y CO₂²

El grupo de investigación de Manso et al., que ha desarrollado una investigación científica muy relacionada con el objeto de esta tesis, recoge en su bibliografía que para producir MPC ha usado magnesita calcinada a muerte (sinterizada) y de gran pureza, en torno al 98% en contenido de MgO, y por tanto, de baja reactividad³.

En primera instancia, se ha optado por replicar el proceso de fabricación de MPC a partir de los resultados publicados de las investigaciones desarrolladas por dicho grupo de investigación. Sin embargo, al profundizar en el proceso de fabricación, se detectó el siguiente problema:

- La magnesita calcinada a muerte (sinterizada), de gran pureza (98% en contenido de MgO) es una materia prima cara y su proceso de fabricación implica, como ya hemos explicado anteriormente, el consumo de grandes cantidades de energía.

Para ampliar la información disponible se ha contactado con la empresa Magnesitas Navarras, principal productora nacional de magnesita cruda.

La empresa Magnesitas Navarras produce MgO a partir de la calcinación de menas naturales ricas en magnesita ($MgCO_3$). Fabrica ambas variedades de magnesita, la calcinada a muerte y la cáustica.

La empresa dispone de MgO de 83% de riqueza, siendo el resto impurezas. Desde el departamento de I+D+i se advierte que el MgO de gran pureza es más caro, y se ofrece incorporar a la investigación un subproducto de magnesio generado en el proceso de calcinación de la magnesita natural, ya que dicho producto se considera idóneo para reaccionar con el $NH_4(H_2PO_4)$. Por tanto, se incorpora a la investigación desarrollada en la presente tesis dicho subproducto, puesto que es un residuo del proceso industrial y además es más barato, teniendo así el potencial de incrementar sustancialmente la sostenibilidad del mortero propuesto.

Como se menciona antes, para conseguir mayor riqueza en MgO se necesita una mayor temperatura en horno, y por tanto, una mayor cantidad de energía, por lo que es muy interesante la posibilidad de emplear un subproducto de menor riqueza de dicho proceso, ya que el subproducto de un proceso industrial se constituye en la materia prima de otro, lo que contribuye a implementar en esta investigación el concepto de economía circular expuesto en la introducción de la tesis.

El subproducto se trata de un óxido de magnesio de baja ley en MgO (del orden de un 65%), que se obtiene en los filtros de mangas en forma de polvo de ciclón (PC) mientras se elabora el producto principal. La recuperación de este subproducto se corresponde aproximadamente con el 30% de la producción de MgO. En esta tesis lo denominaremos PC teniendo en cuenta su origen como polvo de ciclón.

El PC, es una mezcla de partículas finas que recoge la corriente de aire que circula en dirección opuesta a la del mineral. Y por lo tanto, contiene partículas que han estado en toda la gama de temperaturas del horno industrial. La temperatura a la que llega a la batería de ciclones es de unos 150°C⁴.

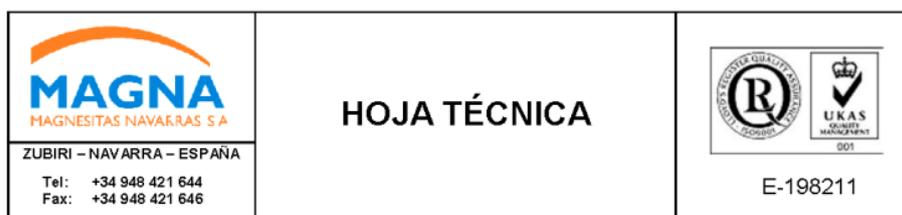
La empresa Magnesitas Navarras ha facilitado, pues, dos productos de distinta riqueza de MgO para incorporar a la investigación de la presente tesis doctoral.

Magnesita sinterizada (riqueza MgO 83%)

Es el producto base de la empresa, con un 83% de MgO, siendo el resto impurezas. La empresa nos ha hecho llegar dos muestras de esta calidad con distinto tamaño de partícula, lo que influye en la velocidad de la reacción⁵:

- < 1 mm, con solamente un 5% < 100 micras
- Impalpables (Imp), con el 100% < 150 micras

Se adjunta a continuación la hoja técnica del producto comercial:



IMPALMAG® N

Magnesita sinterizada muy refractaria, de alta finura y homogeneidad, obtenida por molienda en molinos rotativos de bolas. Este material se suministra seco. Entre sus usos cabe destacar el relleno intersticial entre los ladrillos de los hornos de fusión.

ANÁLISIS QUÍMICO

MgO	85,0
CaO	8,0
SiO ₂	3,8
Fe ₂ O ₃	3,0

OTRAS CARACTERÍSTICAS

Granulometría.....	> 90 µm.... 17,0
	< 25 µm.... 53,1

El análisis químico y granulométrico de las muestras enviadas es el siguiente:

- Para la magnesita < 1 mm, con solamente un 5% < 100 micras:

FECHA	PRODUCTO						
19/01/16	Mag 7 <1mm						
SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	S	P ₂ O ₅	
3,90	10,00	3,00	0,41	82,58	0,020	0,09	
> 1,5 mm	1,5-1	1-0,8	0,8-0,5	0,5-0,3	0,3-0,2	0,2-0,1	<0.1
0,0	0,2	12,8	46,2	26,6	8,7	4,4	1,1

- Para la magnesita "impalpables" (Imp), con un 100 % < 150 micras

FECHA	PRODUCTO					
19/01/16	Impalmag					
SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	P F	
3,68	10,91	3,01	0,40	81,65	0,35	
> 200 micras	200-160	160-90	90-63	63-40	40-25	< 25
0,0	2,3	14,0	8,4	8,7	14,5	52,1

El precio de esta materia prima se puede estimar en 180€/Tm⁶.

Magnesita calcinada PC (riqueza MgO 65%)

Es el sub-producto en forma de polvo de ciclón (PC) generado durante la obtención de la magnesita sinterizada, con un 65% de MgO. Hay que tener en cuenta que, al ser un sub-producto que no está constituido únicamente de MgO, se puede considerar que las otras fases mineralógicas que lo componen van a actuar como *fillers* inertes. Los MPC desarrollados con este subproducto se podrían considerar directamente morteros sin necesidad de añadir otros áridos⁷.

Se adjunta a continuación la hoja técnica del producto comercial:

 MAGNA MAGNESITAS NAVARRAS S.A. ZUBIRI – NAVARRA – ESPAÑA Tel: +34 948 421 644 Fax: +34 948 421 646	<p>HOJA TÉCNICA</p>	 E-198211
--	----------------------------	--

**MAGNESITA CALCINADA-
CALIDAD PC 8**

ANÁLISIS QUÍMICO (%)

MgO	64,0
CaO	8,0
SiO ₂	3,0
Fe ₂ O ₃	2,5

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

< 200 micras	95% min
< 100 micras	85% min

El análisis químico y granulométrico de la muestra enviada es el siguiente:

FECHA	PRODUCTO					
9-11/12/15	PC8					
SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	P.F.	SO ₃
2,77	8,38	2,35	0,49	60,80	16,78	8,43
Reactividad	>0,5 mm	0,5-0,3	0,3-0,2	0,2-0,1	<0.1	
25	0,0	1,5	2,7	6,6	89,2	

En este caso vemos que se aporta un campo denominado reactividad; la empresa Magnesitas Navarras tiene definido un ensayo, denominado "Reactividad", como el tiempo requerido para que una cantidad (2 gr) de un determinado componente incorporado a una solución de Ácido Cítrico 0,4 N permita alcanzar el pH 8,5⁸.

Este ensayo implica que el componente estudiado es mas reactivo cuanto menos tiempo le cuesta que la solución alcance el pH básico determinado.

En comparación, los otros 2 productos de magnesita sinterizada (riqueza MgO 83%) son mucho menos reactivos, ya que han sido calcinados a muerte para evitar esa reactividad. De todos modos, como la reactividad también está relacionada con el tamaño de partícula, una misma DBM (dead burned magnesita) como son el < 1mm y el Impalpable (< 100 micras) tienen reactividades distintas⁹.

A continuación se aporta una tabla comparativa con las reactividades de los productos con MgO considerados en esta tesis:

Producto	Reactividad
Magnesita sinterizada (riqueza MgO 83%)	
< 1 mm	240
Impalpables (Imp)	150
Magnesita calcinada PC (riqueza MgO 65%)	
PC	25

Tabla 7: Comparativa de las distintas reactividades

El precio del PC se puede estimar en 75€/Tm¹⁰.

Bórax de alta pureza (Na₂B₄O₇·10H₂O)

Bórax es el nombre comercial de la sal de boro. Es un cristal blanco que se disuelve fácilmente en agua

Se va a emplear como retardador del fraguado, ya que las reacciones que tienen lugar durante el fraguado de un cemento tipo MPC son muy exotérmicas, resultando unos tiempos de fraguado mucho más breves que los de un cemento Portland común. Por tanto, es conveniente emplear aditivos para reducir la velocidad de las reacciones, lo cual implica una demora en el inicio del fraguado y una evolución más lenta del calor desprendido. Hay que tener en cuenta que los aditivos comúnmente agregados al cemento Portland para plastificar las mezclas y/o retardar el fraguado no son efectivos en los MPC¹¹.

Aunque no existe uniformidad de criterio en cuanto al mecanismo por el que se produce el retardo al emplear compuestos de boro¹², la adición de 1% en peso de ácido bórico respecto al sólido (MgO puro) puede llegar a incrementar el tiempo de fraguado de 1,5 a 4,5 horas¹³.

Algunos investigadores¹⁴ plantean la hipótesis de que el mecanismo a través del cual se produce el retardo al emplear bórax se genera al formarse un film superficial de compuestos de borato de magnesio alrededor de los granos de magnesita. Otros investigadores¹⁵ consideran poco probable la formación de dicha capa protectora en las condiciones de acidez del sistema y sugieren que el mecanismo de retardo consiste en que las especies B(OH)₃ y B(OH)₄⁻ del ácido bórico son adsorbidas sobre la superficie de los granos de magnesita reduciendo así su velocidad de disolución.

El bórax que se va a utilizar en la fase de experimentación de esta tesis se ha comprado a la empresa Sigma Aldrich, sus características son las siguientes:

Ensayo	≥99.5%
pH	9.0-9.6 (20 C, 5%)
Densidad	1.73 g/ml at 25 °C(lit.)
Trazas de aniones	chloride (Cl-): ≤10 mg/kg phosphate (PO43-): ≤10 mg/kg sulfate (SO42-): ≤50 mg/kg
Trazas de cationes	As: ≤1 mg/kg Ca: ≤50 mg/kg Cu: ≤5 mg/kg Fe: ≤5 mg/kg Pb: ≤5 mg/kg

Tabla 8: Características bórax, fuente Sigma-Aldrich

El precio de un kilogramo de este retardante es de 51.40 Euros.

Cuadro resumen componentes aglomerante MPC

MAP: Dihidrógeno fosfato de amonio, NH₄(H₂PO₄)	Obtenido de la empresa Sigma Aldrich con riqueza 99%
Óxido de magnesio, MgO	Obtenido de la empresa Magnesitas Navarras, con tres posibilidades <1 mm: Calcinado a muerte con 83% de MgO, tamaño de partícula < 1 mm Imp: Calcinado a muerte con 83% de MgO, tamaño de partícula impalpable PC: Subproducto industrial polvos de ciclón (LG-MgO) con 65% de MgO
Bórax de alta pureza (Na₂B₄O₇·10H₂O)	Obtenido de la empresa Sigma Aldrich con riqueza 99,5%
Agua de amasado	Agua común de grifo templada a temperatura ambiente del laboratorio

Tabla 9: cuadro resumen componentes aglomerante MPC

5.2. Áridos

En cuanto al árido a aportar al mortero, la bibliografía consultada difiere. Investigadores como Manso, S. et al, o Formosa J., no aportan árido como tal en la elaboración de sus cementos MPC.

Formosa J. considera en el capítulo 6 de su tesis doctoral, "optimización de la formulación de cementos de fosfato con óxido de magnesio de bajo contenido"¹⁶, que, debido a los fillers inertes que aporta la fuente de óxido de magnesio de baja riqueza que emplea en su investigación, lo que elabora, sin añadir ningún árido más, ya es un mortero, no un cemento.

Sin embargo, tal y como afirman Hong, L.T. et al.¹⁷ la inclusión de otros componentes en la elaboración de un cemento tipo CBPC genera una serie de ventajas:

- La reacción exotérmica que se produce puede ser controlada por la masa térmica que aportan los componentes añadidos
- Los componentes habituales de un cemento MPC son materias primas relativamente caras, por lo que hay que aprovechar la capacidad que tienen para incorporar grandes cantidades de otros componentes baratos, sin toxicidad o procedentes de desechos industriales
- Las características mecánicas del cemento CBPC pueden ser mejoradas por la adición de otros componentes como escorias, alcanzando el grado mejor de mejora cuando se sustituye un 40-60% del peso del cemento por escorias

Hay que tener en cuenta que cualquier fuente de MgO de las que se emplean en esta investigación tiene de un 15 a un 35 % de otros componentes que actúan como fillers inertes.

Por tanto, dado que en esta tesis lo que se pretende es elaborar un mortero aligerado, se descarta el empleo de áridos tradicionales como arenas, ya que dichos fillers inertes toman su lugar, y el resto del árido aportado al mortero serán residuos de espumas rígidas de poliuretano (PU).

Caracterización de los residuos de espumas rígidas de poliuretano (PU)

La caracterización de los residuos de espumas rígidas de poliuretano (PU) empleados en la fabricación del mortero MPC bio-receptivo se ha descrito ya en el apartado 4.9 del capítulo anterior, en los ensayos preliminares efectuados para familiarizarse con su uso como árido.

5.3. Diseño de experimentos

Formulación preliminar del MPC basada en la bibliografía

Usando como fuente de MgO magnesita sinterizada (riqueza MgO 83%)

Como ya hemos mencionado anteriormente, en la investigación realizada por Manso *et al.*, en la que se ha usado magnesita sinterizada de gran pureza (98%) se ha escogido como ratio $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$: $\text{MgO}=1:1,75$ ¹⁸. Este ratio puede servir como referencia para elaborar el cemento MPC, si bien hay que tener en cuenta que, debido a que se emplea una magnesita sinterizada de menor riqueza, es conveniente también investigar ratios mayores, como $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$: $\text{MgO}=1:2,25$.

En la misma investigación se utiliza Bórax, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, para controlar la exotermia de la reacción y obtener unos tiempos de trabajabilidad razonables¹⁹. En concreto, emplea una adición de bórax del 6% del peso de la suma de los pesos del $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$ y del MgO.

Dado que en el resto de la bibliografía consultada se refleja la utilidad de usar un aditivo retardante, se empleará Bórax también en esta investigación. Sin embargo, Formosa J.²⁰ recomienda una adición mucho menor, del 0,5 al 0,75%.

Respecto al agua de amasado, la dosificación agua cemento (w/c ratio) que se va a emplear en los primeros experimentos es 0.28, considerada por Manso *et al.* como la óptima para una aplicación industrial del MPC²¹.

Teniendo en cuenta estos factores se propone la siguiente dosificación como referencia para iniciar los experimentos:

- Ratio $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$: MgO =de 1:1,75 a 1:2,25
- Ratio agua /cemento: 0.28
- Adición de bórax: 3%

Usando como fuente de MgO magnesita calcinada PC (riqueza MgO 65%)

En este caso, se puede utilizar como referencia la investigación desarrollada por Formosa J., en su tesis doctoral "Formulaciones de nuevos morteros y cementos especiales basadas en subproductos de magnesio"²².

El autor elabora un tipo de MPC usando como fuente de óxido básico otro sub-producto industrial de la empresa Magnesitas Navarras S.A., en este caso con una riqueza de MgO del 55%, que el autor denomina LG- MgO (Low-grade MgO). La fuente ácida de fosfato que emplea es dihidrogenofosfato de potasio o fosfato monopotásico, KH_2PO_4 de grado alimentario.

En dicha tesis doctoral el autor optimiza la formulación del cemento con un estudio específico hasta concluir que la dosificación adecuada es un porcentaje de LG- MgO del 60%, y un porcentaje de KH_2PO_4 del 40%, es decir, un ratio KH_2PO_4 : LG- MgO =1:1,5. Así mismo, emplea una pequeña adición de ácido bórico como retardante de fraguado, del 0,5 al 0,75%, para controlar el tiempo de fraguado. Como ya hemos comentado, en la presente tesis se sustituirá el ácido bórico por bórax.

Respecto al agua de amasado, Formosa J. emplea una la dosificación agua cemento (w/c ratio) que oscila entre 0.24 y 0.28, recomendando en su tesis una dosificación de 0.24.

Hay que tener en cuenta que la fuente ácida de fosfato no se trata de un producto químico de grado reactivo, por lo que para la presente investigación, en la que sí que se emplea un producto químico de grado reactivo, es razonable plantear el estudiar ratios mayores, del orden de KH_2PO_4 : LG- MgO =1:1,175 o incluso KH_2PO_4 : LG- MgO =1:2,25.

Teniendo en cuenta estos factores se propone la siguiente dosificación como referencia para iniciar los experimentos:

- Ratio $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$: MgO =de 1:1,50 a 1:2,25
- Ratio agua /cemento: 0.24
- Adición de bórax: 1%

Adición de árido

Tenemos que considerar que la diferente riqueza de las fuentes de magnesio empleadas determina el porcentaje de fillers inertes que aportan; dichos fillers inertes hacen las veces de árido tradicional. En este caso, el porcentaje de fillers inertes que aporta la fuente de MgO es del 17 %.

En cuanto a la adición de espuma rígida de poliuretano, en adelante PU, dado que se no se ha localizado una bibliografía específica de su empleo en morteros tipo MPC, se va a proceder a elaborar una serie de muestras con distintos porcentajes de aportación en peso de PU para lograr una dosificación correcta.

Protocolo de elaboración propuesto en la bibliografía

Según la experiencia previa de Formosa J., se ha de evitar en el proceso de amasado y moldeado de las probetas el empleo de utensilios metálicos, como por ejemplo, la pala y la cubeta de una amasadora, así como los moldes metálicos empleados para el conformado de las probetas en los ensayos mecánicos. El proceso de limpieza de dichos utensilios comporta gran dificultad que Formosa J. atribuye a la fuerte unión que se da entre el fosfato y el hierro contenido en los materiales de acero²³.

Formosa J. propone sustituir la amasadora de mortero empleada habitualmente por un proceso de amasado empleando distintos materiales de plástico, así como moldes de poliestireno expandido (EPS). Propone realizar la mezcla empleando una máquina taladradora de velocidad regulable con una varilla mezcladora que asegure un flujo turbulento.

Posteriormente las muestras se curan durante al menos 7 días, pero no se especifica si se emplea una cámara climática para el proceso de curado.

5.4. Elaboración de muestras prototipo preliminares de mortero

Dado que existen variantes en las materias primas que se van a utilizar para elaborar el mortero MPC, y dado que la bibliografía encontrada no recoge dosificación para exactamente las mismas materias primas disponibles, se decide elaborar en primera instancia unas amasadas previas de mortero para corregir las dosificaciones propuestas. En cada amasada se van a producir unas placas de pequeña dimensión que únicamente van a ser caracterizadas de modo organoléptico.

La elaboración de estas muestras persigue contrastar las dosificaciones propuestas en la bibliografía para afinar su formulación; cuando se logre optimizar la dosificación es cuando se va a proceder a elaborar una serie de probetas que permitan caracterizar de modo adecuado el mortero MPC elaborado.

Protocolo de elaboración empleado

El proceso de amasado para elaborar estas muestras prototipo consiste en la mezcla de los componentes sólidos mediante un homogeneizado manual para una masa sólida de aproximadamente 500 gramos, compuesta por los componentes del MPC, y el árido a emplear.

Posteriormente se añade el agua de amasado y se procede a realizar la amasada durante 4-5 minutos a velocidad constante, realizando un movimiento rotatorio con paletas de albañilería durante todo el proceso para mezclar adecuadamente todos los componentes del mortero. La amasada se realiza en recipientes de plástico.

Para estas muestras se descarta el uso de máquinas taladradoras provistas de varilla mezcladora dado el escaso volumen de las muestra a generar.

El mortero resultante se vierte en moldes prismáticos y se deposita en una cámara climática para el proceso de curado a humedad relativa del $95\% \pm 5\%$.

Equipo empleado

Para la correcta medida de las dosificaciones consideradas se ha empleado una balanza electrónica de precisión, y en las pesadas se ha descontado el peso de la bandeja metálica empleada. La balanza electrónica es marca Cobos Precision, serie CS, modelo D-4000, con capacidad para 4.100 g y 0,1 g de precisión.

Muestra prototipo con MgO 83%, tamaño de partícula impalpable y sin árido

Se decide elaborar una primera muestra de mortero sin árido, para comprobar las afirmaciones recogidas en la bibliografía consultada. El empleo de árido genera mucha incertidumbre en cuanto a la relación a emplear de agua/cemento.

Por tanto, se procede a elaborar una muestra de 375 gramos de MPC sin aporte de ningún árido que no sean los propios fillers inertes del MgO empleado.

Se decide machacar los cristales de $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$ para reducir el tamaño de las partículas y facilitar la cinética de la reacción. Se emplea la dosificación con mayor cantidad de MgO para posibilitar que todo el $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$ reaccione, en línea con los razonamientos expuestos en el capítulo 6 de la tesis doctoral de Formosa J²⁴.

Además, se decide usar MgO de tipo impalpable con el mismo objetivo de acelerar la reacción debido al menor tamaño de partícula, y para mayor seguridad en comprobar la reacción descrita en la bibliografía consultada para generar MPC, se decide reducir la dosificación del bórax²⁵.

Se emplea un bajo ratio w/c, con el objeto de cribar de un extremo al otro el rango de valores de la relación agua/cemento.

Para dicha muestra se usan las siguientes materias primas y dosificaciones:

Componentes MPC	$\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$ 99%
	MgO 83%, tamaño de partícula impalpable
	Bórax 99,5%
	Agua de amasado
Árido	Sin árido
Ratio $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$: MgO	1:2,25
w/c ratio	0,20
Adición de bórax	1%
Adición de árido	No

Tabla 10: Componentes MPC y dosificación empleada

El resultado de esta amasada es fallido, pero por la rapidez con la que se produce la reacción ácido-base que da lugar al mortero MPC. Se comprueba por tanto que la elaboración de morteros MPC es viable con los reactivos incorporados a la amasada, pero como se han llevado al extremo los factores que aceleran la cinética de la reacción, esta resulta ingobernable.

Tras la mezcla y pesado de los componentes sólidos del mortero (Ilustración 88) y su homogeneizado manual, se procede a añadir el agua de amasado (Ilustración 89).



Ilustración 88: Pesado de los distintos componentes del mortero MPC

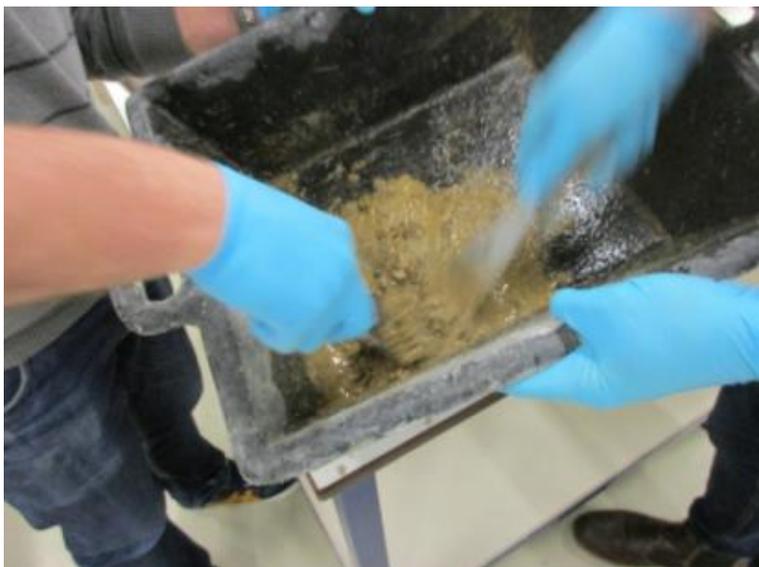


Ilustración 89: Primeros instantes tras añadir el agua de amasado

En primera instancia el aspecto del mortero es muy bueno, el mezclado tiene consistencia y el aspecto es de mezcla uniforme (Ilustración 90).



Ilustración 90: Mezclado manual del mortero

Sin embargo la disminución del tamaño de las partículas y de la concentración de bórax genera que la reacción entre los reactivos sea tan rápida que la trabajabilidad de la muestra de mortero es nula.

La fuerte reacción exotérmica que se produce genera humo y un penetrante olor a amoníaco y se produce el fraguado del mortero casi instantáneamente (Ilustración 91).



Ilustración 91: Fraguado casi instantáneo del mortero

En consecuencia, resulta imposible verter el mortero en el molde, puesto que ya ha perdido toda trabajabilidad (Ilustración 92).



Ilustración 92: Resultado final de la amasada

El exceso de celo en conseguir elaborar una muestra viable de MPC genera un mortero de fraguado demasiado rápido a consecuencia de una concatenación de circunstancias:

- Un porcentaje demasiado ajustado de adición de bórax²⁶
- El empleo de MgO de tamaño de partícula impalpable²⁷
- La reducción del tamaño de las partículas de $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$ ²⁸
- La no inclusión de árido y por tanto, reducción de la masa térmica que puede atenuar la exotermia de la reacción ácido-base²⁹

Hay que señalar, además, que acostumbrados a trabajar con morteros tradicionales fabricados con cemento Portland, el mortero MPC resulta poco familiar.

Muestra prototipo con MgO 83%, tamaño de partícula impalpable y con árido PU. Primera amasada

Con la experiencia recogida en la prueba anterior se empieza a aportar espuma de poliuretano (PU) como árido para producir un mortero MPC aligerado.

Se procede a elaborar una muestra de 425 gramos de MPC con PU. Se decide seguir usando MgO impalpable (Ilustración 93) y bórax al 1%. No se machacan los cristales de $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$.

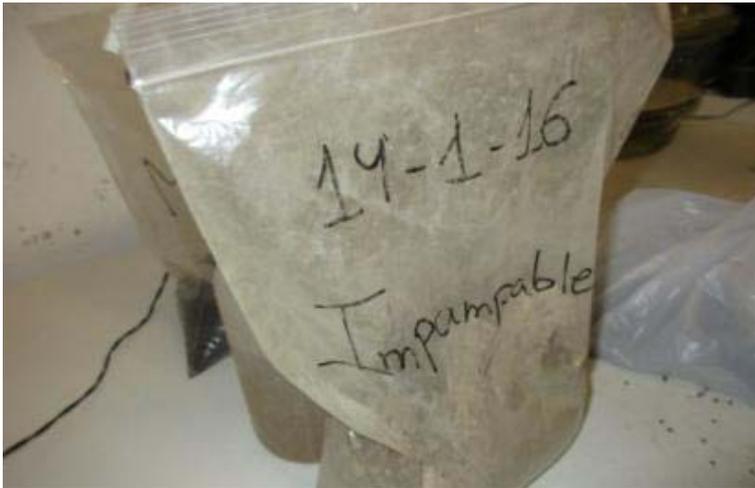


Ilustración 93: MgO impalpable usado en la muestra

En cuanto al aporte de PU, como no se localiza bibliografía específica de su empleo como árido en este tipo de morteros se comienza haciendo una prueba preliminar con un aporte de PU del 12% del peso del mortero. Inicialmente, este porcentaje, que resulta ser desproporcionadamente elevado, era todavía mayor, pero se corrige al empezar el proceso de pesado al ver que el volumen de PU es excesivamente alto comparado con el de los otros componentes del mortero (Ilustración 94).



Ilustración 94: Aporte de PU demasiado elevado respecto al volumen de MPC en fase seca (bandeja en segundo plano en la imagen)

En cuanto a la relación agua/cemento (w/c ratio) se empieza usando 0,20, pero ante el volumen de PU aportado al mortero (Ilustración 95) es necesario aportar en el proceso de amasado mucha más agua para que la mezcla tenga una consistencia adecuada (Ilustración 96). Al final el ratio w/c empleado alcanza el valor 1,65.



Ilustración 95: Volumen de PU en la mezcla del mortero



Ilustración 96: mezcla tras aporte extra de agua para conseguir consistencia adecuada

Para dicha muestra se usan las siguientes materias primas y dosificaciones:

Componentes MPC	NH ₄ (H ₂ PO ₄) 99%
	MgO 83%, tamaño de partícula impalpable
	Bórax 99,5%
	Agua de amasado
Árido	Sí, PU
Ratio NH ₄ (H ₂ PO ₄): MgO	1:2,25
w/c ratio	1,65
Adición de bórax	1%
Adición de árido	12% en peso

Tabla 11: Componentes MPC y dosificación empleada

El resultado de esta amasada es completamente fallido. En el proceso de amasado si se ha producido el característico olor que indica la existencia de la reacción ácido-base, pero la consistencia de la mezcla es extremadamente esponjosa, lo que indica que el porcentaje de PU en la mezcla es demasiado elevado. El mortero resultante se moldea con facilidad (Ilustración 97)



Ilustración 97: Proceso de moldeado

A las 48 horas se procede a su desmoldado (Ilustración 98); en este momento, según la bibliografía³⁰, el mortero debería haber alcanzado elevados valores de rigidez, pero no presenta consistencia, pudiendo ser desmenuzado con los dedos sin esfuerzo alguno (Ilustración 99).

Parece obvio que el porcentaje de PU aportado a la mezcla ha sido tan excesivo que el cemento MPC ha sido incapaz de ejercer de aglutinante.



Ilustración 98 Estado del mortero a las 48 horas



Ilustración 99: Estado del mortero a las 48 horas, nula resistencia y consistencia

Muestra prototipo con árido PU. Empleo de subproducto PC

Las siguientes muestras se elaboran utilizando como fuente de MgO el subproducto industrial polvos de ciclón (LG-MgO) con 65% de MgO, denominado PC.

El proceso de elaboración es el mismo, y se emplean dos dosificaciones distintas que se diferencian en el w/c ratio. Se machacan ligeramente los cristales de $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$.

Componentes MPC	NH ₄ (H ₂ PO ₄) 99% MgO 65%, PC Bórax 99,5% Agua de amasado
Árido	Sí, PU
Ratio NH ₄ (H ₂ PO ₄): MgO	1:2,50
w/c ratio	0,95
Adición de bórax	3%
Adición de árido	Si, 3% en peso

Tabla 12: Primera dosificación empleada

Componentes MPC	NH ₄ (H ₂ PO ₄) 99% MgO 65%, PC Bórax 99,5% Agua de amasado
Árido	Sí, PU
Ratio NH ₄ (H ₂ PO ₄): MgO	1:2,50
w/c ratio	1,05
Adición de bórax	3%
Adición de árido	Si, 3% en peso

Tabla 13: Segunda dosificación empleada

Las muestras generadas tienen diferente consistencia en su estado fresco; en la primera la consistencia del mortero resulta plástica (Ilustración 100), mientras que en la segunda, en la que el w/c ratio es mayor, la consistencia resulta más fluida (Ilustración 101).



Ilustración 100: Muestra de consistencia plástica tras su vertido al molde

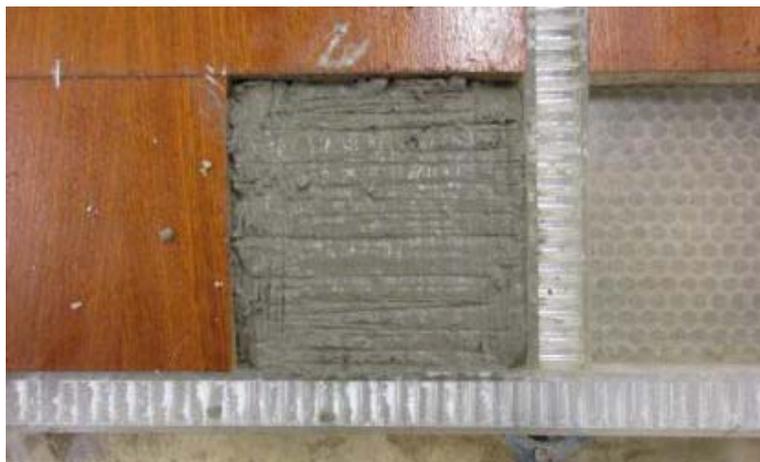


Ilustración 101: Muestra de consistencia fluida tras su vertido al molde

Cuando se ha procedido a su desmolde, a los 5 días, momento en el que la consistencia del mortero MPC ya debe alcanza un valor próximo al definitivo³¹, se comprueba que estas muestras no han generado un mortero de mínima dureza.

El simple proceso de desmolde ha generado fracturas en las muestras (Ilustración 102 e Ilustración 103).

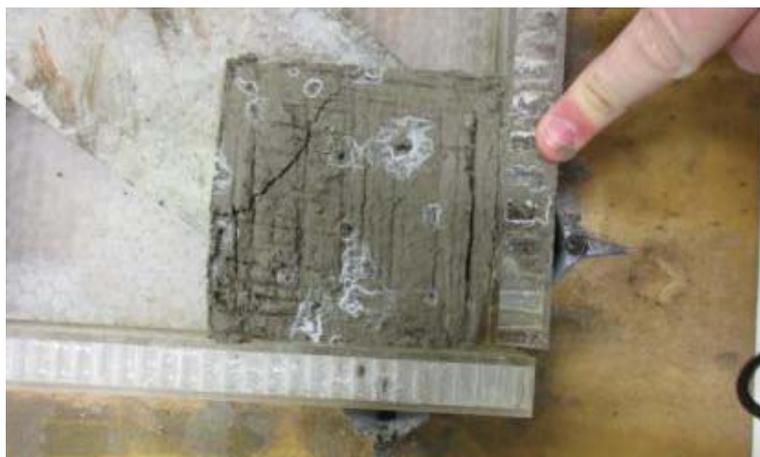


Ilustración 102: muestra fracturada en el desmolde, sin resistencia mecánica adecuada



Ilustración 103: muestra fracturada en el desmolde, sin resistencia mecánica adecuada

Muestra prototipo sin árido. Empleo de subproducto PC

Las muestras se elaboran utilizando como fuente de MgO el subproducto industrial polvos de ciclón (LG-MgO) con 65% de MgO, denominado PC. No se aporta árido

El proceso de elaboración es idéntico, y también se emplean dos dosificaciones distintas (Tabla 14 y Tabla 15) que se diferencian en el w/c ratio. Se machacan ligeramente los cristales de $NH_4(H_2PO_4)$.

Componentes MPC	$NH_4(H_2PO_4)$ 99%
	MgO 65%, PC
	Bórax 99,5%
	Agua de amasado
Árido	Sin árido
Ratio $NH_4(H_2PO_4)$: MgO	1:2,50
w/c ratio	0,68
Adición de bórax	3%
Adición de árido	No

Tabla 14: primera dosificación empleada

Componentes MPC	$NH_4(H_2PO_4)$ 99%
	MgO 65%, PC
	Bórax 99,5%
	Agua de amasado
Árido	Sin árido
Ratio $NH_4(H_2PO_4)$: MgO	1:2,50
w/c ratio	0,76
Adición de bórax	3%
Adición de árido	No

Tabla 15: segunda dosificación empleada, consistencia más fluida



Ilustración 104: Muestra de consistencia plástica tras su vertido al molde



Ilustración 105: Muestra de consistencia fluida tras su vertido al molde

Estas muestras se desmoldan a los 5 días, y tampoco presentan buenas propiedades mecánicas (Ilustración 106).



Ilustración 106: las muestras obtenidas presentan unas propiedades mecánicas deficientes

Muestra prototipo sin árido. Empleo de subproducto PC

Dado que las muestras que se van elaborando están resultando fallidas, se decide evaluar de nuevo la dosificación referida en la bibliografía consultada para la fabricación de MPC a partir de LG-MgO.

Para ello se amasa una muestra usando la dosificación propuesta en la bibliografía (Tabla 16).

Las muestras se elaboran utilizando como fuente de MgO el subproducto industrial polvos de ciclón (LG-MgO) con 65% de MgO, denominado PC. No se aporta árido

No se machacan los cristales de $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$.

Componentes MPC	NH ₄ (H ₂ PO ₄) 99%
	MgO 65%, PC
	Bórax 99,5%
	Agua de amasado
Árido	Sin árido
Ratio NH₄(H₂PO₄): MgO	1:1,75
w/c ratio	0,28
Adición de bórax	3%
Adición de árido	No

Tabla 16: dosificación empleada, estándar según la bibliografía empleada

Como ya se ha observado en la elaboración de las muestras, el w/c ratio propuesto por Formosa de 0,24 a 0,28³² aparentemente parece muy insuficiente para ligar los reactivos; la muestra generada no parece tener agua suficiente, generándose una amasada muy seca (Ilustración 107)



Ilustración 107: muestra según dosificación estándar, muy seca

Por este motivo se decide volver a hacer una segunda amasada (Ilustración 108) aumentando la dosificación de agua (Tabla 17):

Componentes MPC	NH ₄ (H ₂ PO ₄) 99%
	MgO 65%, PC
	Bórax 99,5%
	Agua de amasado
Árido	Sin árido
Ratio NH₄(H₂PO₄): MgO	1:1,75
w/c ratio	0,58
Adición de bórax	3%
Adición de árido	No

Tabla 17: segunda dosificación empleada, con mayor w/c ratio



Ilustración 108: muestra con mayor w/c ratio

Ninguna de las dos muestras fabricadas muestra buenas propiedades mecánicas cuando se desmolda, presentando además cristales de $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$ sin disolver.

Cuadro resumen de dosificaciones empleadas

	Dosif. 1	Dosif. 2	Dosif. 3	Dosif. 4	Dosif. 5	Dosif. 6	Dosif. 7	Dosif. 8
$\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$ 99%	x	x	x	x	x	x	x	x
MgO 65%, PC			x	x	x	x	x	x
MgO 83%, <1mm								
MgO 83%, impalpable	x	x						
Bórax 99,5%	1%	1%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
Árido, PU (% peso)		12	3	3				
Ratio $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$: MgO	1:2,25	1:2,25	1:2,50	1:2,50	1:2,50	1:2,50	1:1,75	1:1,75
w/c ratio	0,20	1,65	0,95	1,05	0,68	0,76	0,28	0,58

5.5. Optimización de la dosificación

Como las muestras prototipos iniciales resultan insatisfactorios, con la experiencia adquirida se realiza una revisión de las dosificaciones propuestas.

En las muestras obtenidas se observa cristales de MAP que no han reaccionado; dado que en la bibliografía empleada se menciona que la fuente de fosfato se presenta en forma de polvo cristalino blanco totalmente soluble en agua³³, se decide molturar manualmente todo el MAP a emplear hasta, por lo menos reducirlo a este mismo polvo cristalino, con el objeto de facilitar su reacción.

Muestras sin árido

El empleo de árido genera mucha incertidumbre en cuanto a la relación a emplear de agua/cemento. Al no emplearse en primera instancia, se elimina un factor de incertidumbre. Para dosificaciones de mejor trabajabilidad se va a emplear un w/c ratio de 0,20, y para las de peor trabajabilidad de 0,28. Para las muestras de PC se emplea 0,36.

Como ya se ha indicado, un mayor w/c ratio origina un aumento de la porosidad y disminuye las propiedades mecánicas^{34,35}.

Primero, por tanto, se realizan una serie de muestras sin árido, basadas en la bibliografía consultada, en las muestras realizadas que han tenido éxito y en la experiencia adquirida.

Las muestras se realizan en placas de 375 gramos

	Dosif. 1	Dosif. 2	Dosif. 3	Dosif. 4	Dosif. 5	Dosif. 6
NH ₄ (H ₂ PO ₄) 99%	x	x	x	x	x	x
MgO 65%, PC					x	x
MgO 83%, <1mm	x	x				
MgO 83%, impalpable			x	x		
Bórax 99,5%	3%	3%	5%	5%	10%	10%
Ratio NH ₄ (H ₂ PO ₄): MgO	1:1,75	1:2,25	1:1,75	1:2,25	1:1,75	1:2,25
w/c ratio	0,20	0,20	0,28	0,28	0,36	>0,36*

*Se añadió agua sin control

Con la experiencia adquirida, todas las muestras realizadas resultan exitosas, con la salvedad de la denominada Dosif 6, a la que es necesario añadir agua sobre la marcha en el proceso de amasado sin posibilidad de control debido a la rápida reacción.

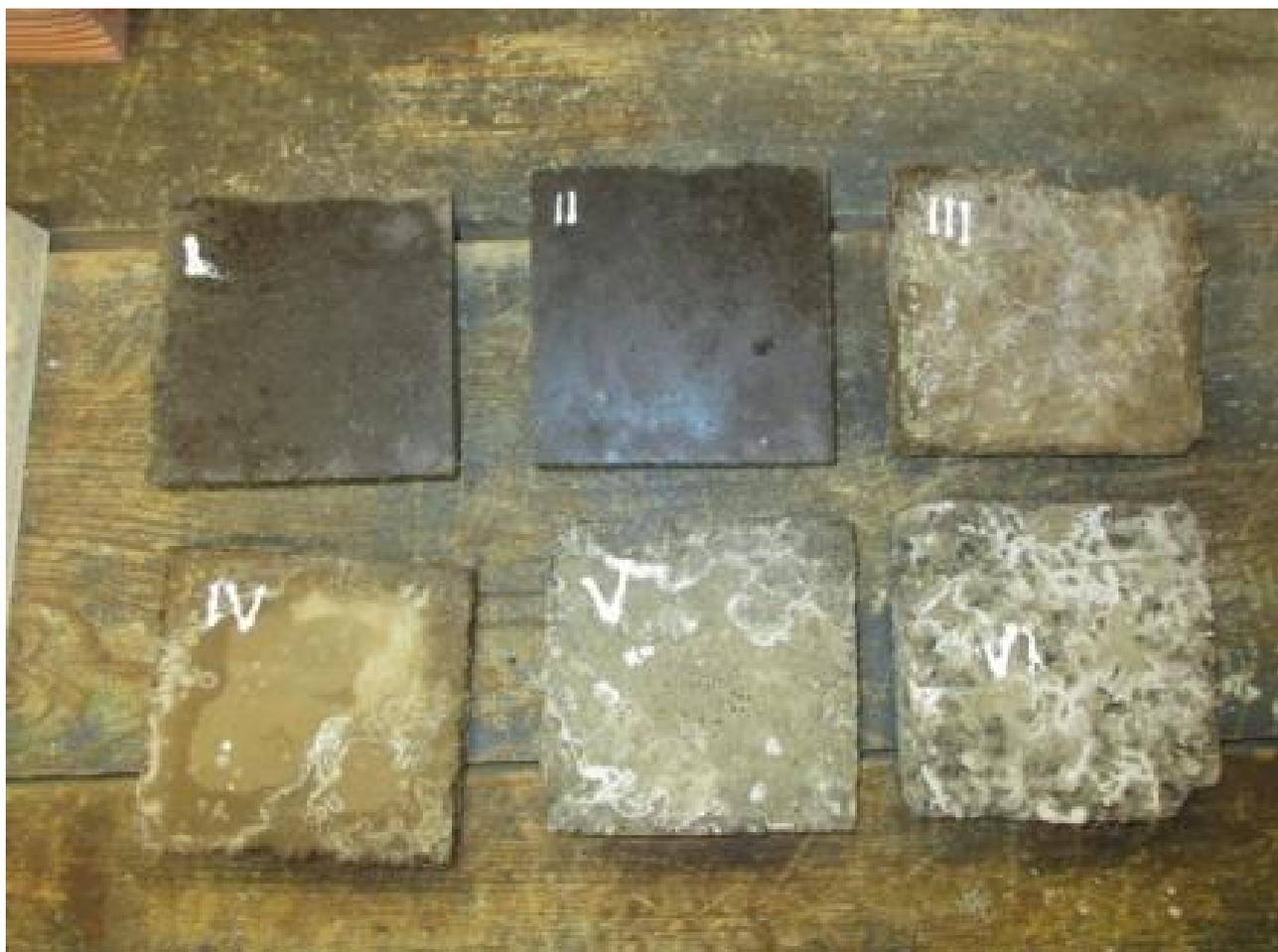


Ilustración 109: Aspecto de las muestras tras su desmoldado a los 5 días



Ilustración 110: Aspecto de las muestras a los 4 meses, anverso



Ilustración 111: Aspecto de las muestras a los 4 meses, reverso

En general, se aprecian en todas las muestras unas eflorescencias muy notables, circunstancia que no había sido mencionada en la bibliografía consultada.

En cuanto a las propiedades organolépticas, se aprecia en todas las muestras, menos en la denominada Dosif 6, unas propiedades mecánicas aparentemente satisfactorias; a falta de una caracterización adecuada, las muestras presentan dureza aparente, soportan esfuerzos de flexión y no se desmigán.

Las muestras denominadas Dosif 5 y Dosif 6 son más ligeras y porosas, lo que se puede atribuir al mayor ratio w/c empleado. La muestra Dosif 6 presenta una menor dureza superficial, que se manifiesta en su disgregación con facilidad en polvo.

Las diferencias iniciales de coloración se atenúan con el proceso de curado, como se manifiesta en las fotografías adjuntadas.

El carácter violentamente exotérmico de la reacción química se puede observar en la siguiente fotografía (Ilustración 112), en la que el agua sobrante de la reacción hierve y se evapora sobre la superficie de la muestra a los pocos segundos de su vertido en el molde:



Ilustración 112: agua evaporándose sobre la muestra

Muestras con árido: adición de poliuretano

Las muestras se realizan en placas de 300 gramos. La dosificación del árido se limita al 1% en peso de la muestra. Para controlar la exotermia de la reacción, especialmente notable cuando se emplea PC como fuente de MgO, es necesario recurrir a una dosificación de bórax hasta del 15%.

	Dosif. 1	Dosif. 2	Dosif. 3
NH ₄ (H ₂ PO ₄) 99%	x	x	x
MgO 65%, PC			x
MgO 83%, <1mm	x		
MgO 83%, impalpable		x	
Bórax 99,5%	3%	5%	15%
Ratio NH ₄ (H ₂ PO ₄): MgO	1:2,25	1:2,25	1:1,75
Árido, PU (% peso)	1	1	1
w/c ratio	0,20	0,28	0,36

Todas las muestras resultan exitosas. Al igual que las realizadas sin adición de árido, se manifiestan eflorescencias muy notables. La muestra denominada Dosif 3, en la que se emplea PC, es notablemente más porosa y ligera que las otras dos, lo que se atribuye a la velocidad de la reacción exotérmica, muy superior en el caso del PC.

En este caso, la velocidad de la reacción hace que el mortero pase de estado fresco a endurecido en menos de 1 minuto.

La muestra Dosif 3 es muy interesante por su ligereza y porosidad, pero es necesario caracterizarla para comprobar que no se reducen demasiado sus propiedades mecánicas.



Ilustración 113: Aspecto de las muestras a los 4 meses, anverso



Ilustración 114: Aspecto de las muestras a los 4 meses, reverso

Optimización del protocolo de elaboración

- Tras observar las eflorescencias que aparecen en las muestras fabricadas curadas en cámara climática, y dada la naturaleza de la reacción química que se genera, se decide no emplear en adelante la cámara climática
- Al emplear moldes metálicos para elaborar probetas prismáticas se hacen patentes los problemas de adherencia advertidos por Formosa J. en su tesis doctoral³⁶. Por tanto, se decide emplear moldes plásticos
- En la elaboración de probetas prismáticas se utiliza, para mezclar los componentes del mortero, una máquina taladradora de velocidad regulable provista con una varilla mezcladora metálica, puesto que no se ha dispuesto de una varilla mezcladora de plástico

5.6. Síntesis de lo expuesto en el capítulo

Se especifican y caracterizan los componentes propuestos para elaborar el mortero MPC: el cemento de fosfato magnesio y la espuma de poliuretano (PU).

Se describe el diseño de experimentos. Dada la novedad del material empleado, se parte de formulaciones preliminares basadas en la bibliografía, teniendo en cuenta que se van a emplear distintos productos como fuente de MgO. Se reseña un protocolo de elaboración basado también en bibliografía existente.

Se elaboran diversas muestras prototipo. En general, se trata de un proceso en el que se consigue familiarizarse con la fabricación del material, partiendo de muestras fallidas y obteniendo al final muestras de mortero exitosas.

Con la experiencia adquirida, se proponen dosificaciones optimizadas en función del empleo o no de árido, y de las distintas fuentes de MgO usadas. Se perfecciona el protocolo de elaboración aportado originalmente.

El análisis experimental del mortero MPC fabricado parte del empleo de estas dosificaciones optimizadas.

5.7. Referencias

-
- 1 Formosa J.
Formulaciones de nuevos morteros y cementos especiales basadas en subproductos de magnesio (2012) Universitat de Barcelona, PhD thesis
 - 2 Instituto geológico y minero de España
(2005-2006) Panorama minero, histórico
<http://www.igme.es/>
 - 3 Manso, S., Mestres, G., Ginebra, M.P., De Belie, N., Segura, I., Aguado, A.
Development of a low pH cementitious material to enlarge bioreceptivity
(2014) *Construction and Building Materials*, 54, pp. 485-495. Cited 4 times.
 - 4 Departamento I+D+i
Magna. Magnesitas Navarras S.A.
<http://www.magnesitasnavarras.es/>
 - 5 *Ibid.*
 - 6 *Ibid.*
 - 7 Formosa J.
Formulaciones de nuevos morteros y cementos especiales basadas en subproductos de magnesio (2012) Universitat de Barcelona, PhD thesis
 - 8 Departamento I+D+i
Magna. Magnesitas Navarras S.A.
<http://www.magnesitasnavarras.es/>
 - 9 *Ibid.*
 - 10 *Ibid.*
 11. Hipedinger, E., Aglietti, E., Scian, A.
Utilización de ácido bórico como retardador en materiales refractarios cordieríticos de liga química magnesia-ácido fosfórico (2006) 6º Congreso Binacional de Metalurgia y Materiales . CONAMET/SAM 2006
 - 12 Formosa J.
Formulaciones de nuevos morteros y cementos especiales basadas en subproductos de magnesio (2012) Universitat de Barcelona, PhD thesis
 - 13 Wagh, A.S.
Chemically Bonded Phosphate Ceramics: Twenty-First Century Materials with Diverse Applications (2004) *Chemically Bonded Phosphate Ceramics: Twenty-First Century Materials with Diverse Applications*, pp. 1-283
 - 14 Yang, Q., Wu, X.
Factors influencing properties of phosphate cement-based binder for rapid repair of concrete (1999) *Cement and Concrete Research*, 29 (3), pp. 389-396
 - 15 Hall, D.A., Stevens, R., El-Jazairi, B.
The effect of retarders on the microstructure and mechanical properties of magnesia-phosphate cement mortar (2001) *Cement and Concrete Research*, 31 (3), pp. 455-465
 - 16 Formosa J.
Formulaciones de nuevos morteros y cementos especiales basadas en subproductos de magnesio (2012) Universitat de Barcelona, PhD thesis
 - 17 Hong, L.T., Lubell, A.S.
Phosphate cement-based concretes containing silica fume (2015) *ACI Materials Journal*, 112 (4), pp. 587-596
 - 18 Manso, S., De Muynck, W., Segura, I., Aguado, A., Steppe, K., Boon, N., De Belie, N.
Bioreceptivity evaluation of cementitious materials designed to stimulate biological growth (2014) *Science of the Total Environment*, 481 (1), pp. 232-241
 - 19 *Ibid.*

-
- 20 Formosa J.
Formulaciones de nuevos morteros y cementos especiales basadas en subproductos de magnesio
(2012) Universitat de Barcelona, PhD thesis
- 21 Manso, S., Mestres, G., Ginebra, M.P., De Belie, N., Segura, I., Aguado, A.
Development of a low pH cementitious material to enlarge bioreceptivity
(2014) *Construction and Building Materials*, 54, pp. 485-495.
- 22 Formosa J.
Formulaciones de nuevos morteros y cementos especiales basadas en subproductos de magnesio
(2012) Universitat de Barcelona, PhD thesis
- 23 Ibíd.
- 24 Ibíd.
- 25 Hall, D.A., Stevens, R., El-Jazairi, B.
The effect of retarders on the microstructure and mechanical properties of magnesia-phosphate cement mortar
(2001) *Cement and Concrete Research*, 31 (3), pp. 455-465
- 26 Ibíd.
- 27 Formosa J.
Formulaciones de nuevos morteros y cementos especiales basadas en subproductos de magnesio
(2012) Universitat de Barcelona, PhD thesis
- 28 Ibíd.
- 29 Ibíd.
- 30 Manso, S., Mestres, G., Ginebra, M.P., De Belie, N., Segura, I., Aguado, A.
Development of a low pH cementitious material to enlarge bioreceptivity
(2014) *Construction and Building Materials*, 54, pp. 485-495
- 31 Ibíd.
- 32 Formosa J.
Formulaciones de nuevos morteros y cementos especiales basadas en subproductos de magnesio
(2012) Universitat de Barcelona, PhD thesis
- 33 Ibíd.
- 34 Ibíd.
- 35 Ma, H., Xu, B., Liu, J., Pei, H., Li, Z.
Effects of water content, magnesia-to-phosphate molar ratio and age on pore structure, strength and permeability of magnesium potassium phosphate cement paste
(2014) *Materials and Design*, 64, pp. 497-502
- 36 Formosa J.
Formulaciones de nuevos morteros y cementos especiales basadas en subproductos de magnesio
(2012) Universitat de Barcelona, PhD thesis

6. Conjunto soporte + briófito

6.1. Reproducción de la especie de briófito

Introducción y problemática

Como ya hemos comentado antes, la viabilidad de un sistema como el propuesto en esta tesis reside, en gran parte, en ser capaz de cultivar el briófito escogido, puesto que, si el briófito es cosechado en la naturaleza, se estará produciendo una agresión al medio ambiente¹.

El cultivo del musgo es un campo complicado. Como Robin Wall Kimmerer describe en su libro *Gathering Moss*², los intentos de trasplantar matas de musgo que se ha desarrollado espontáneamente en la naturaleza a otro hábitat (un jardín, una valla de mampostería a la que se le quiere dar una pátina de antigüedad...) fracasan en una gran cantidad de casos.

Según indica, a priori, parece sencillo trasplantar una mata de musgo de un lugar a otro ya que no existe la complicación de tener raíces. Alguna especie cuyo hábitat es el suelo, como el *Polytrichum*, puede ser trasplantado como un terrón de césped, pero los musgos cuyo hábitat es rocoso muestran una tasa de éxito en los trasplantes muy baja. Incluso con las mayores precauciones, los trasplantes de matas de musgo de roca a roca están condenados al fracaso en un gran porcentaje de casos.

Kimmerer especula que la causa puede ser que, al desplazar al musgo de su roca hábitat, se produce un desgarramiento de los rizoides, o se deterioran las células más allá de su capacidad de regeneración. O que el nuevo hábitat carece de algún ingrediente clave para la supervivencia de la especie...

Michael Fletcher coincide con estas apreciaciones; en su libro *Moss Grower's handbook*³, afirma que nunca ha habido una tradición sólida en el cultivo de musgos. Mantiene que tradicionalmente se han considerado plantas tan especializadas que existe el lugar común de que muchas variedades no pueden ser cultivadas, y que pese a las evidencias en sentido contrario, este prejuicio todavía no ha sido desterrado.

Fletcher, por el contrario, afirma que si bien no nos son familiares los métodos para su cultivo, el 90% de las variedades de Gran Bretaña pueden ser cultivadas por jardineros sin gran experiencia, ya que, manipuladas de la manera correcta, muchas especies son extremadamente resistentes.

Si se desconoce la técnica adecuada, sostiene, en base a su experiencia, que mantener musgos vivos durante unos meses es relativamente fácil, pero que hacer que crezcan y se desarrollen es mucho más complicado. De hecho, literalmente dice que es un desafío de horticultura aprender a desarrollarlos, puesto que sus necesidades se diferencian en gran medida de las de las plantas "normales".

Fletcher afirma que las necesidades de los briófitos son muchísimo más variadas que las necesidades de las plantas con floración, y alejadas de los tópicos a los que estamos acostumbrados.

Los briófitos son muy distintos a las plantas con flores y a los helechos. Tienen muy poco o ningún tejido vascular diseñado para transportar el agua, razón por la cual son de pequeño tamaño⁴.

En el caso de las especies de menor tamaño, el agua que absorben del sustrato se difunde, con lentitud, por la planta. En el caso de las especies de mayor tamaño, la planta absorbe el agua a través de toda su superficie, lo que explica que en muchos casos funcione muy bien el riego con espray; para este tipo de especies, regar el sustrato en que están implantadas produce poco o ningún efecto beneficioso.

A diferencia de las plantas con raíces, los musgos no disponen de mecanismos para discriminar sustancias disueltas en el agua que absorben; cuando el agua se evapora, forma depósitos en el briófito. Esto, para muchas especies, es perjudicial cuando se forman depósitos de cal.

Los briófitos rara vez compiten con plantas más grandes; crecen, en rocas, paredes, árboles, lugares donde hay poco o ningún sustrato terroso⁵.

A modo de ejemplo, explica⁶ que muchas especies de musgos no crecen en entornos oscuros y húmedos. Se trata de especies que en muchos casos se desarrollan en rocas secas y árboles completamente expuestos a la luz solar. Si se trata de cultivar una de estas especies en un ambiente húmedo y fresco es solo cuestión de tiempo que el brote de briófito decaiga y termine muriendo. A este tipo de especies les beneficia un riego ocasional, en contra del tópico de que los musgos solo crecen en lugares sombríos y húmedos.

Fletcher concluye la introducción de su libro sosteniendo la idea de que, pese a que con los briófitos se han realizado trabajos experimentales muy sofisticados, no se trata de plantas "high-tech". Que de hecho, crecerán igual de bien, si no mejor, en un invernadero o en un bote de mermelada, antes que en un laboratorio.

A este respecto, la experta en jardinería de musgos Annie Martin sostiene⁷ que el campo de la horticultura del musgo está todavía en sus primeros pasos, que queda mucho por aprender respecto a los nutrientes apropiados para cada especie de musgo, los beneficios o perjuicios causados a las distintas especies de musgos por los fertilizantes usados para otras especies de plantas... Y, que ya que los musgos son tan tolerantes ante situaciones de stress, y que se han adaptado a condiciones muy diversas a lo largo del planeta, puede haber muchas más que una forma "correcta" de cultivar musgos con éxito

Métodos de cultivo de la bibliografía consultada

Michael Fletcher menciona en su libro *Moss Grower's handbook*⁸ que un buen método para mantener con vida muchas especies de musgo es depositar brotes en bandejas para semillas cubiertas con un propagador de plástico, depositadas al aire libre en una zona sombría, y regarlas esporádicamente. Sin embargo, este método tiende a producir pobres resultados en cuanto a cultivar la especie se trata. De entrada, es evidente que muchas especies de briófito no crecen en entornos húmedos y oscuros.

Fletcher considera necesario establecer métodos distintos en función de la especie que se desee cultivar.

Cultivo de ejemplares maduros

Según el *Moss Grower's Handbook*, cualquier variedad de *Hypnum Cupressiforme* se cultiva bien en macetas con turba⁹. Si bien en contra de la creencia generalizada no es necesario cultivar los musgos en su sustrato original, para esta especie es conveniente utilizar un sustrato ácido libre de cal, como por ejemplo turba¹⁰. Necesitan riego con espray regular cuando están creciendo, mejor si es con agua de lluvia para evitar la acumulación de depósitos de cal¹¹.

Según la experiencia adquirida por otros investigadores (briosistema), este método es el que da resultados más satisfactorios; la dificultad consiste en encontrar un sustrato favorable al desarrollo del briófito.

El equipo de biosistema utilizó un geocompuesto similar al empleado por la experta en jardinería Annie Martin como sustrato para las muestras de musgo empleadas.

Esta experta afirma que ha probado numerosos sustratos artificiales (fieltros de distintas clases, arpilleras, alfombras de distintos materiales, telas de jardinería antihierbas...) y naturales (rocas, gravilla, arcilla...) por sus propiedades respecto a una mejor retención de agua. Su experiencia es que, de todas esas opciones, la mejor, de las elaboradas por el hombre, son las telas geotextiles profesionales de jardinería antihierbas¹², pero que ella aún así prefiere plantar sobre el suelo existente siempre que es posible.

Respecto al riego para los jardines de musgos, recomienda riegos frecuentes y cortos varias veces al día¹³.

Annie Martin indica que en la actualidad no existe un consenso acerca de cómo afectan los fertilizantes a las distintas especies de musgos, si favorecen o empeoran su crecimiento¹⁴.

Cultivo a partir de fragmentos de ejemplares maduros

Annie Martin recomienda esta técnica de cultivo para crear nuevas áreas ajardinadas de musgo partiendo de la ventaja que proporciona el hecho de que los briófitos pueden desarrollarse a partir, incluso, de fragmentos muy mínimos de una colonia madre¹⁵.

Se pueden separar los fragmentos de la colonia madre con las manos o con unas tijeras; en el caso de las especies pleurocárpicas, Annie Martin indica hacer fragmentos de 2 a 5 centímetros.

Una vez fragmentado el musgo, propone, su implantación sobre el sustrato deseado, y posteriormente, lo que ella denomina "*water and walk*". Es decir, riego abundante y pasear sobre los fragmentos, puesto que pisarlos, sostiene, no los daña y los ayuda a fijarse firmemente en su nuevo sustrato. En caso de ser necesario, en esta fase de implantación en un nuevo sustrato, se puede usar algún tipo de red tejida para ayudar a que los fragmentos se mantengan fijos en el lugar deseado¹⁶.

Cultivo de brotes embrionarios

Otra técnica de cultivo según el Moss Grower's Handbook es aprovechar la habilidad que tienen los musgos para desarrollarse a partir de su protonema u otros pequeños brotes en estado embrionario que el musgo utiliza en la naturaleza como método de reproducción; esta técnica consiste en hacer el cultivo más estéril posible en un recipiente con tierra fresca¹⁷. La superficie de la tierra puede ser esterilizada humedeciéndola con lejía doméstica, pero es necesario esperar un día o dos a que la lejía se disipe antes de plantar un pequeño brote embrionario. Se procede en ese momento a tapar el recipiente con un film plástico, mantenerlo en un lugar sombreado y esperar a que el brote se desarrolle. Cuando el brote empieza a desarrollarse se destapa el recipiente y se riega con mucha abundancia, especialmente si han aparecido algas.

No importa cuánto esmero se haya empeñado en esterilizar el sustrato, al cabo de unas semanas van a aparecer algas. Por tanto una estrategia, para minimizar este problema es realizar un riego con spray abundante y enérgico con el objeto de "lavar" las algas.

De todos modos, según el Moss Grower's Handbook, normalmente esta técnica de crecimiento tiene menos éxito que empezar el cultivo desde una planta desarrollada o un brote maduro.

Cultivo de esporas

Para Michael Fletcher este método tiene a ser muy arduo¹⁸, la única opción que contempla viable es el cultivo de esporas en tubos de ensayo.

Como mencionamos en el apartado 2.5, la investigadora Sarah Eppley ha investigado el desarrollo del protonema del briófito a partir de esporas cultivadas en agar, en el contexto del proyecto de investigación Materializad: protonemata¹⁹.

Cultivos estériles in vitro

Hay muchas especies de musgos que, a diferencia de las plantas superiores, no se reproducen bien en tubos de ensayo, cuando se trata de desarrollarlos en cultivos estériles con una solución nutritiva; los intentos de desarrollarlos de ese modo han tendido a terminar en fracaso, de tal modo que se ha extendido la creencia de que los musgos no pueden ser cultivados a no ser que se use métodos y equipos sofisticados.

Michel Fletcher sostiene²⁰ que este método de cultivo merece la pena para ciertos tipos de musgos. Si se usa esta técnica fuera de un laboratorio un escollo es el desarrollo de una solución nutritiva adecuada, por lo que Fletcher recomienda comprar alguna solución nutritiva comercial.

La principal dificultad consiste en esterilizar el tubo de ensayo, el nutriente y el mismo musgo. El autor recomienda utilizar lejía doméstica, pues lo considera una solución sencilla, mucho menos compleja que el usar calor para esterilizar. Sin embargo, cualquier traza de lejía que permanezca en el cultivo causará su fracaso; pero, mantiene, afortunadamente no parece ser necesario esterilizar completamente los cultivos. Lo importante es que no existan en él ni plagas ni algas, pero no importa que estén presentes bacterias u hongos. El resultado es menos atractivo que el obtenido al cultivar plantas maduras sobre sustratos terrosos, pero si el cultivo permanece cerrado con estanquidad suficiente para conservar la humedad y evitar su desecamiento, puede ser conservado en un lugar fresco y sin soleamiento sin necesitar cuidados.

El proceso a seguir, según Michel Fletcher, consta de los siguientes pasos:

- A título preliminar, conviene tener en cuenta que, dado la complejidad del proceso, es adecuado preparar más tubos de ensayo de los que necesitemos en ese momento.
- El primer paso es empapar los tubos de ensayo con una solución de lejía doméstica diluida al 10%, y luego enjuagarlos con agua del grifo, que, como el agua recién hervida, no suele contener ni algas vivas ni esporas. Es conveniente dejar pasar unos días desde que se esterilizan los tubos de ensayo hasta que se usan para eliminar cualquier traza de lejía.
- Posteriormente se puede depositar en el fondo del tubo de ensayo una pequeña cantidad de solución nutritiva; la herramienta con la que se deposite la solución ha de estar también esterilizada. Si se usan tapas para el tubo de ensayo también es conveniente esterilizarlas. Otra opción es cerrar los tubos con film plástico sujetos con gomas.

Estos preparativos deberían ser desarrollados en interior, en un espacio razonablemente libre de polvo y corrientes de aire.

Esterilizar los musgos requiere cierta práctica, por lo que merece la pena contar con una cantidad de plantas para la ocasión. Conviene tener a mano una buena fuente de iluminación, pinzas, una probeta, lente de aumento, papel poroso, y dos o tres recipientes con agua limpia y otro vacío, preferentemente de color blanco para que se puedan ver con facilidad pequeños fragmentos de musgo.

Solo son necesarias unas gotas de lejía diluida en agua; el autor ha usado una marca concreta diluida al 10%, pero comenta que distintas marcas podrían requerir otras concentraciones. La finalidad es acabar con las algas o esporas que pudieran estar presentes en la superficie del musgo, pero sin afectar a la planta misma. Con las pinzas se toma uno o dos brotes, una hoja o un fragmento de tallo (no es necesario más); si dichos fragmentos tienen tierra adherida, es conveniente enjuagarlos con agua para limpiarlos. Se depositan en el recipiente vacío, y se empapan con una gota de la lejía diluida con una pipeta o similar, de tal modo que queden completamente cubiertos. Se agitan los fragmentos con la punta de las pinzas y se observan con la lente de aumento.

En unos instantes, de unos pocos segundos a unos minutos, las puntas y los bordes de las hojas comenzarán a desteñirse, con su color verde desapareciendo. En ese momento, antes de que la planta se muera, es necesario sujetar el fragmento con las pinzas, y enjuagarlo en el agua limpia, y posteriormente eliminar los restos de agua y lejía secándolo en el papel poroso. Este proceso de enjuague y secado se repite dos o tres veces para lavar el fragmento completamente, y luego se deposita sobre la solución nutriente y se cierra el tubo de ensayo con el tapón o con el film plástico.

Si el fragmento se sigue decolorando en los siguientes segundos es prueba de que su exposición a la lejía ha sido excesiva, o su enjuagado con agua limpia deficiente. Será necesario probar con otras disoluciones con menor concentración de lejía, o someter al fragmento a un mejor proceso de enjuague y secado.

De todos modos, en cuanto alguna célula se haya mantenido intacta, el fragmento se regenerará. En la mayor parte de los cultivos, es obvio cuando la planta ha comenzado a crecer. Debería estar produciendo nuevo protonema en una semana. Transcurrido este plazo sin que se haya producido el nuevo protonema, o sin que la planta permanezca verde, se puede concluir que el cultivo ha fracasado y será necesario volver a empezar de cero.

Por otro lado, si la concentración de lejía es demasiado baja, no matará a las algas, especialmente si queda el menor trazo de sustrato en el cultivo. Formarán un amasijo verde y lo más probable es que emponzoñen el cultivo en unos pocos meses, aunque normalmente lo colonicen mucho antes.

El autor basándose en su experiencia, comenta que los resultados son mucho peores que los que se obtienen en los cultivos de plantas con floración. Obtuvo malos resultados con los musgos que se caracterizan por crecer en sustratos ácidos, lo que el autor atribuye a usar un agua con un Ph demasiado básico.

El autor tiene la experiencia de que trasplantar las plantas así cultivadas a cultivos convencionales y viceversa es fácil.

Batidos de musgo

La reproducción del musgo a partir de lo que se denomina "batidos de musgo" (moss milkshakes) es un método de cultivo que se basa, literalmente, en batir brotes de una especie de musgo adulta en un lácteo.

Se trata de un método que goza de amplia difusión en páginas de jardinería en internet, en la que se encuentran diversas instrucciones para realizar esta técnica de cultivo, existiendo incluso productos comerciales²¹.

No obstante, algunos expertos en la jardinería de musgos son escépticos ante esta técnica. Lo consideran un método que tiene una gran popularidad entre los interesados en la jardinería con musgos, pero con una tasa de éxito baja²².

Robin Wall Kimmerer describe esta técnica en su libro *Gathering Moss*²³. Se recolectan ejemplares maduros de la especie de briófito escogida en su medio natural. El autor hace hincapié en que el medio natural del que se recogen las planas sea similar al medio en el que después se van a tratar de cultivar.

El musgo así recolectado se introduce en una licuadora con un litro de suero de leche y se licua todo hasta obtener un batido verde. Posteriormente se pinta con este batido el medio en el que se desee implantar el musgo; en el plazo de unos meses o un año se produce un tapiz de musgo.

La descripción de esta técnica que recoge la experta en jardinería con briófitos Annie Martin²⁴ es muy similar; se selecciona la especie musgo deseada, teniendo en cuenta que no todas ofrecerán resultados adecuados. Triturar el musgo en un medio líquido, para el que propone un abanico de opciones: leche, cerveza, yogur, agua azucarada... A continuación se trata de extender la mezcla sobre la superficie deseada. Esta experta es muy escéptica acerca de esta forma de cultivar musgo, pero asevera que sustratos muy porosos aumentan las probabilidades de que el cultivo a partir de batido de musgo sea exitoso.

Tasa de crecimiento de los briófitos

Los procedimientos para medir crecimiento en musgo son muy diversos y no siempre precisos, y las unidades en las que se ha medido el crecimiento son igualmente diversas.

Según la bibliografía consultada, la especie *Hypnum Cupressiforme* tiene unos valores máximos de crecimiento de 0,01/día²⁵, medidos en unidades de tasa de crecimiento relativo (Relative Growth Rate, RGR).

La tasa de crecimiento relativo es la cantidad de crecimiento por unidad de biomasa y unidad de tiempo. Es decir, que la especie *Hypnum Cupressiforme* crece en un día 0.01 gramos por cada gramo de musgo en proceso de crecimiento. Estos valores son bajos dentro de las especies analizadas

Si valoramos la producción anual por superficie²⁶, entonces el *Hypnum Cupressiforme* alcanza una producción de $188 \pm 62 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$.

Por tanto, teniendo en cuenta la RGR máxima descrita anteriormente (0.01/día), a un tapiz en crecimiento de *Hypnum Cupressiforme* le bastaría, en condiciones ideales, menos de 100 días para producir una masa equivalente a la inicial.

Si atendemos a otras fuentes, según una web especializada en jardinería con musgo, el tamaño de un musgo pleurocárpico, como es el *Hypnum Cupressiforme* se duplica en 6 meses en condiciones ideales²⁷.

Otra opción para conseguir mayores tasas de crecimiento es el empleo de biorreactores (Ilustración 115), pero el cultivo en biorreactores aumenta considerablemente el coste del cultivo; con esta técnica, se obtienen fragmentos de musgo pequeños²⁸.



Ilustración 115: Cultivo de esfagno (*Sphagnum*) en biorreactor. Fuente Universidad de Santiago de Compostela

6.2. Pruebas preliminares de reproducción de la especie de briófito

Se han realizado pruebas preliminares de reproducción de *Hypnum Cupressiforme* sobre las muestras de mortero aligerado a partir de cemento tradicional Portland, arena de río, agua de amasado y residuos de espuma rígida de poliuretano (PU) descritas en el capítulo 0 de la presente tesis doctoral.

En concreto, se han probado las siguientes técnicas de cultivo de musgo sobre estas muestras de cemento tradicional aligerado:

- Cultivo de ejemplares maduros
- Batidos de musgo

Además, se ha realizado un cultivo de brotes embrionarios empleando agar.

Cultivo de ejemplares maduros

Ya que la especie seleccionada para esta tesis doctoral, *Hypnum Cupressiforme*, prospera sobre todo en suelos ácidos o ligeramente básicos²⁹, y el mortero elaborado a partir de cemento tradicional Portland tiene un pH muy básico³⁰, se ha optado por intentar el cultivo de ejemplares maduros directamente sobre este mortero Portland (Ilustración 116), pero además se ha mejorado la bio-receptividad de estas muestras de mortero al añadirles turba (Ilustración 117) y una mezcla de turba con yogur (Ilustración 118).



Ilustración 116: Cultivo directamente sobre el sustrato de cemento aligerado



Ilustración 117: Cultivo sobre el sustrato de cemento aligerado con añadido de turba



Ilustración 118: Cultivo sobre el sustrato de cemento aligerado con añadido de turba y yogur

Batidos de musgo

Se ha elaborado un batido de musgo sobre el mortero Portland según la técnica descrita por Robin Wall Kimmerer en su libro *Gathering Moss*³¹. Se ha utilizado yogur natural en vez del suero de leche.



Ilustración 119: Cultivo a partir de batido de musgo

Cultivo de brotes embrionarios

En el laboratorio, en condiciones controladas, se ha probado un cultivo de brotes embrionarios (Ilustración 120) que parte de la descripción de esta técnica recogida en el libro *Moss Grower's Handbook*³², pero con diferencias; el procedimiento empleado es el siguiente:

- Se llenan diversas placas Petri desechables en condiciones de esterilidad en cabina de flujo laminar con solución nutritiva PpNH₄, compuesta por 2 ml de Solución Stock + 1 ml Solución Microelementos + 50 mg FeSO₄·7H₂O + 7 g Agar, enrasado a 1 l. Se realiza autoclavado durante 1 h a 120°C
- Se suspenden brotes embrionarios de musgo en 5 ml de agua destilada y son triturados con un homogeneizador a 9.500 rpm; el homogeneizador empleado el modelo T 25 digital ULTRA-TURRAX de la marca IKA
- Se adiciona 0,5 ml extendidos en superficie a cada placa Petri
- Las placas se conservan con iluminación y temperatura ambientales

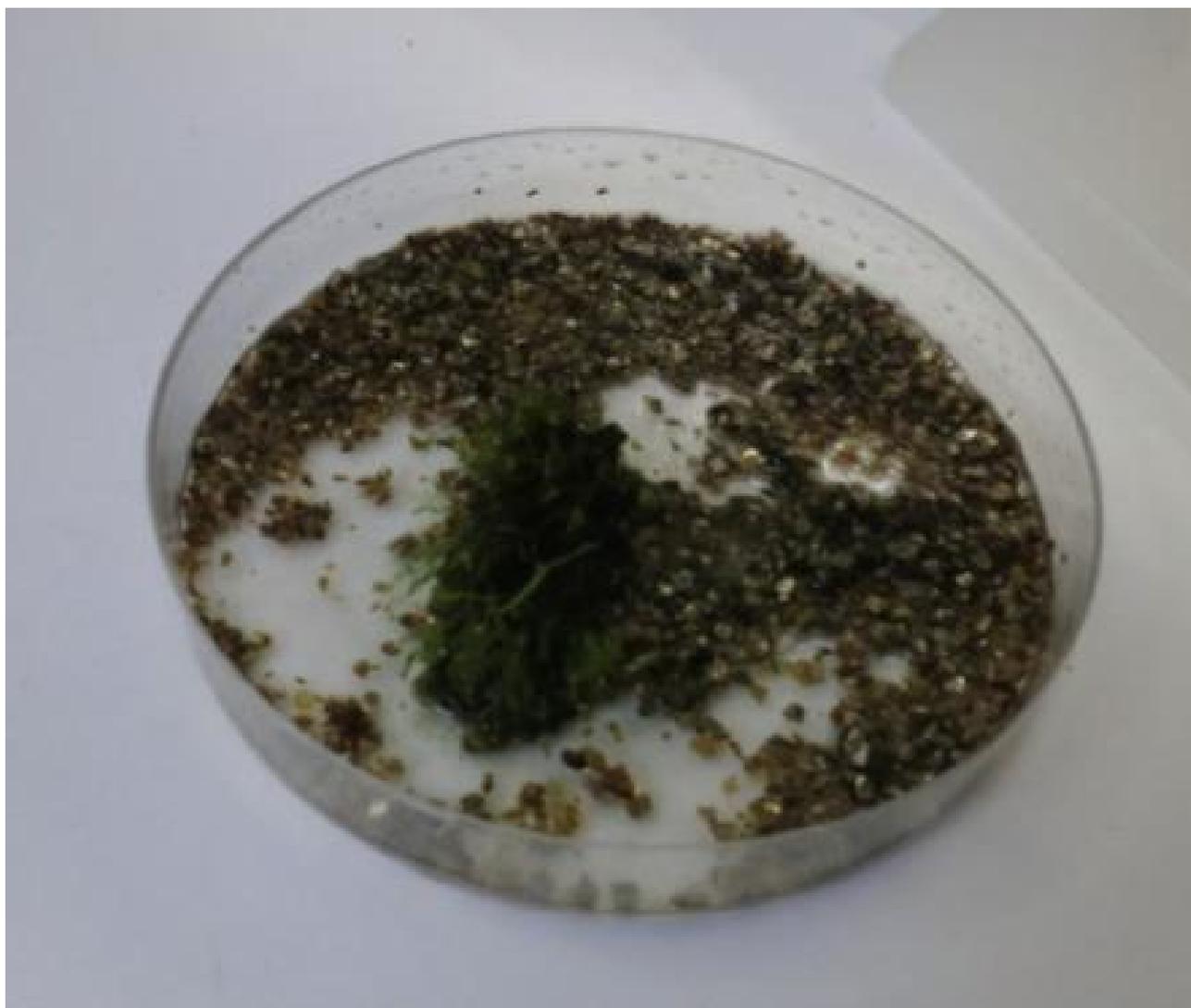


Ilustración 120: Cultivo de brotes embrionarios

A continuación se aporta la composición de las Soluciones Stock y Microelementos empleadas:

Solución Stock	g L ⁻¹
K ₂ HPO ₄	125
CaNO ₃ .4H ₂ O	400
MgSO ₄ .7H ₂ O	127
NH ₄ AcO	250

Solución Microelementos	mg L ⁻¹
H ₃ BO ₃	614
CuSO ₄ .5H ₂ O	55
MnCl ₂ .4H ₂ O	389
CoCl ₂ .6H ₂ O	55
ZnSO ₄ .7H ₂ O	55
KI	28
Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O	25

Tabla 18: Composición de las Soluciones Stock y Microelementos empleadas

El cultivo resulta fallido a causa de la rápida proliferación de hongos. Las condiciones muy favorables del cultivo, al emplearse una solución nutritiva, propician que los briófitos sean fácilmente desplazados por otros organismos que crecen más rápido, tal y como se argumenta³³ en el apartado 2.2.

Resultado de las pruebas preliminares

Todas estas pruebas preliminares han resultado fallidas. Los cultivos de musgo no han logrado reproducirse sobre el sustrato seleccionado y han muerto, lo que se atribuye a las siguientes causas en el caso de las pruebas sobre sustrato de mortero:

- El sustrato es inadecuado
 - Presenta una baja rugosidad que dificulta la implantación de los rizomas en su superficie
 - No se ha esperado a que se produzca el fenómeno de la carbonatación; el sustrato seleccionado tiene un pH tan elevado, al menos 12, que imposibilita la reproducción de la especie vegetal sobre él
- En una primera instancia los cultivos han estado sin exponer a la luz solar, que en base a la experiencia adquirida posteriormente, es fundamental para el desarrollo de la especie
- El riego efectuado ha sido inadecuado: las muestras se depositaron sobre una fina lámina de agua, lo que ocasionó su absorción por capilaridad del sustrato, la excesiva humectación de este, y la aparición de mohos. El riego, tal y como figura en la bibliografía consultada, ha de ser preferentemente riego con espray regular³⁴, con poco volumen de agua y frecuente³⁵.

En el caso del cultivo de brotes embrionarios han aparecido otras especies vegetales que han colonizado el cultivo con rapidez a causa de la solución nutritiva empleada, impidiendo el desarrollo del briófito.

6.3. Método de enraizamiento

Dada la experiencia adquirida en las pruebas preliminares, para reproducir la especie *Hypnum Cupressiforme* sobre el mortero MPC elaborado se opta inicialmente por la técnica de “batidos de musgo” (moss milkshakes) por las siguientes razones:

- Sustratos muy porosos aumentan las probabilidades de que el cultivo con esta técnica sea exitoso³⁶
- El batido proporciona una base de nutrientes para el desarrollo del briófito, y además adherencia al sustrato

La dosificación que se va a emplear para elaborar el “batido de musgo”, tomada de la investigación Bio Ceramic System³⁷, es la siguiente:

Brotos de briófitos (con bajo contenido de humedad)	x gr
Cerveza	4x ml
Yogur	x ml
Azúcar	x/3 gr
Agua	4x ml

Tabla 19: Dosificación empleada para el “batido de musgo”, fuente Bio Ceramic System

A continuación se extiende la mezcla, con una paleta, sobre la superficie del mortero MPC (Ilustración 121).

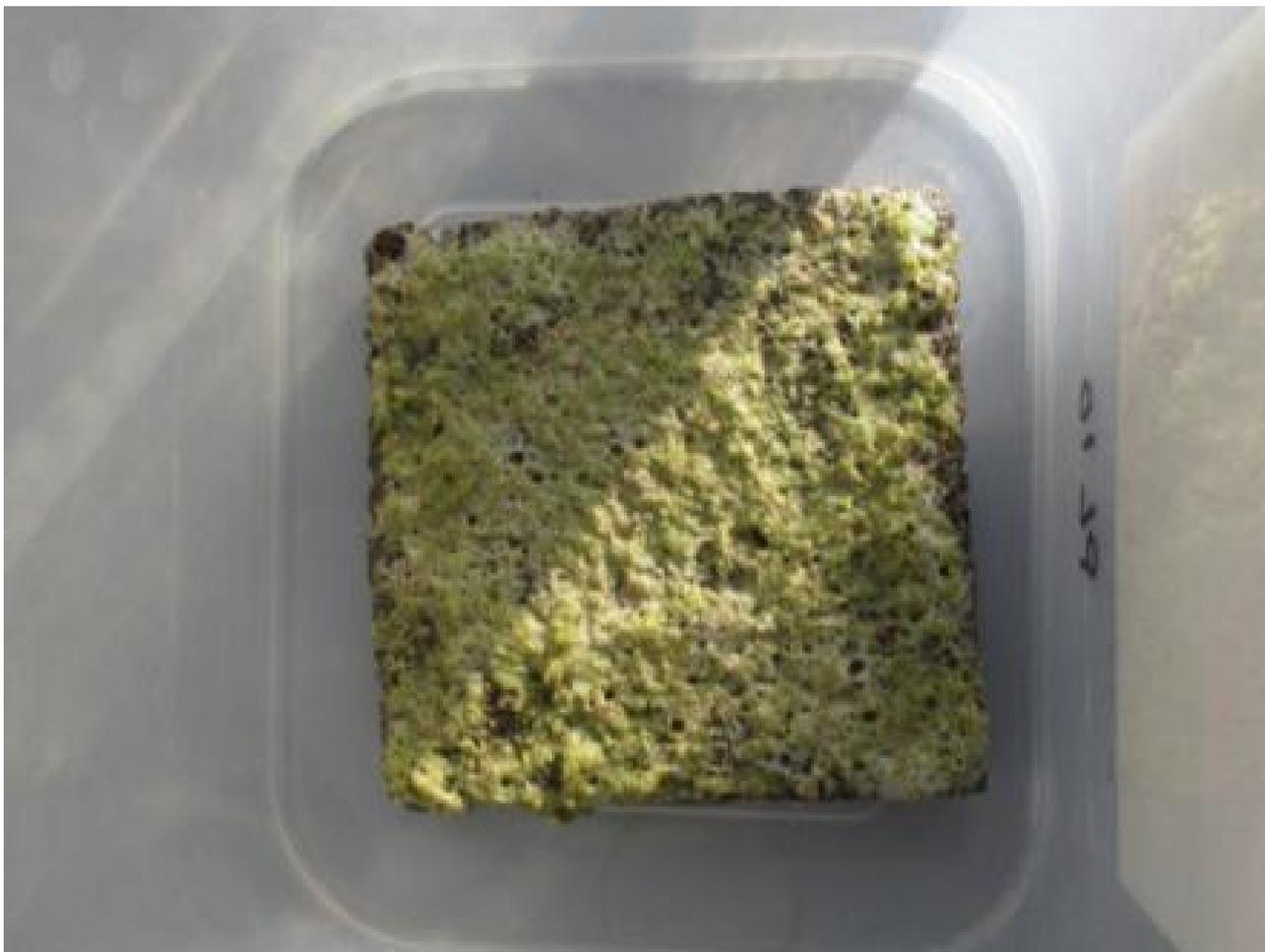


Ilustración 121: Batido de musgo extendido sobre muestra de MPC

Sobre este conjunto de mortero MPC+briofito es sobre el que se va a llevar a cabo la experimentación para dictaminar la bio-receptividad del mortero.

6.4. Síntesis de lo expuesto en el capítulo

En este capítulo se recoge la problemática de cultivar briófitos; se trata de plantas sobre las que existe poca experiencia en su cultivo. Nunca ha habido una tradición sólida en el cultivo de musgos.

Se describen diversos métodos de cultivo recogidos en la bibliografía y la tasa de crecimiento de la especie escogida.

A continuación, se describen las pruebas preliminares de reproducción del briófito realizadas.

Finalmente, con la experiencia adquirida, se decide inicialmente emplear el “batido de musgo” como método para evaluar la bio-receptividad del mortero.

6.5. Referencias

-
- 1 Fletcher, M.
Moss grower's handbook
(1991) ISBN 0 95171760 X, pp. 5
- 2 Wall, R.
Gathering moss
(2003) ISBN 0 087071-499-6, pp. 131
- 3 Fletcher, M.
Moss grower's handbook
(1991) ISBN 0 95171760 X, pp. 1
- 4 Fletcher, M.
Moss grower's handbook
(1991) ISBN 0 95171760 X, pp. 8
- 5 Fletcher, M.
Moss grower's handbook
(1991) ISBN 0 95171760 X, pp. 16
- 6 Fletcher, M.
Moss grower's handbook
(1991) ISBN 0 95171760 X, pp. 4
- 7 Martin, A.
Moss gardening
(2015) ISBN 978-1-60469-560-1, pp. 172
- 8 Fletcher, M.
Moss grower's handbook
(1991) ISBN 0 95171760 X, pp. 4
- 9 Fletcher, M.
Moss grower's handbook
(1991) ISBN 0 95171760 X, pp. 21
- 9 Fletcher, M.
Moss grower's handbook
(1991) ISBN 0 95171760 X, pp. 24
- 11 Fletcher, M.
Moss grower's handbook
(1991) ISBN 0 95171760 X, pp. 34
- 12 Martin, A.
Moss gardening
(2015) ISBN 978-1-60469-560-1, pp. 178
- 13 Ibíd.8
- 14 Martin, A.
Moss gardening
(2015) ISBN 978-1-60469-560-1, pp. 177
- 15 Martin, A.
Moss gardening
(2015) ISBN 978-1-60469-560-1, pp. 178
- 16 Martin, A.
Moss gardening
(2015) ISBN 978-1-60469-560-1, pp. 180
- 17 Fletcher, M.
Moss grower's handbook
(1991) ISBN 0 95171760 X, pp. 39

18 Ibíd.

19 Faulders Studio, Eppley Lab
Materialised: protonemata by Thom Faulders
(2014) Synthetic Design Biotopes
<http://syndebio.com/contaminant/>

20 Fletcher, M.
Moss grower's handbook
(1991) ISBN 0 951 71 760 X, pp. 52

21 Moss Acres
<http://www.mossacres.com>

22 Martin, A.
Moss gardening
(2015) ISBN 978-1-60469-560-1

23 Wall, R.
Gathering moss
(2003) ISBN 0 087071-499-6, pp. 132

24 Martin, A.
Moss gardening
(2015) ISBN 978-1-60469-560-1, pp. 180

25 Furness, S.B., Grime, J.P.
Growth rate and temperature responses in bryophytes. II. A comparative study of species of contrasted ecology.
(1982) *Journal of Ecology*, 70 (2), pp. 525-536

26 Zechmeister, H.G.
Annual growth of four pleurocarpous moss species and their applicability for biomonitoring heavy metals
(1998) *Environmental Monitoring and Assessment*, 52 (3), pp. 441-451

27 Moss and Stone gardens
Understanding the growth rate of pleurocarps versus acrocarps
<http://www.mossandstonegardens.com/>

28 Beike, A.K., Spagnuolo, V., Lüth, V., Steinhart, F., Ramos-Gómez, J., Krebs, M., Adamo, P., Rey-Asensio, A.I., Angel Fernández, J., Giordano, S., Decker, E.L., Reski, R.
Clonal in vitro propagation of peat mosses (*Sphagnum* L.) as novel green resources for basic and applied research
(2015) *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 120 (3), pp. 1037-1049

29 : Atherton, I.; Bosanquet, S.; Lawley M.
Mosses and Liverworts of Britain and Ireland. A Field Guide.
(2010) British Bryological Society. ISBN: 978-0-9561310-1-0.

30 Manso, S., Mestres, G., Ginebra, M.P., De Belle, N., Segura, I., Aguado, A.
Development of a low pH cementitious material to enlarge bioreceptivity
(2014) *Construction and Building Materials*, 54, pp. 485-495. Cited 4 times.

31 Wall, R.
Gathering moss
(2003) ISBN 0 087071-499-6, pp. 131

32 Fletcher, M.
Moss grower's handbook
(1991) ISBN 0 951 71 760 X, pp. 21

33 Martínez, J., Núñez, E.
Los briófitos: plantas diminutas al borde del masoquismo
(2004) *Páginas de información ambiental*, 17, pp. 24-28.

34 Fletcher, M.
Moss grower's handbook
(1991) ISBN 0 951 71 760 X, pp. 34

35 Martin, A.
Moss gardening
(2015) ISBN 978-1-60469-560-1, pp. 178

36 Íbid.

37 Bio Ceramic System
<http://www.iaacblog.com/openthesis/category/iker-luna/>

7. Experimental muestras MPC

Tras realizar una optimización de la dosificación a emplear para elaborar el mortero MPC aligerado bio-receptivo (Apartado 5.5), se decide centrar la fase experimental en las muestras de MPC fabricadas a partir de polvo de ciclón (PC) como fuente de magnesio, descartando las otras fuentes de MgO consideradas en la presente tesis doctoral. Esta decisión se toma por las siguientes razones:

- Es más sostenible: Se trata de un subproducto industrial generado durante la obtención de la magnesita sinterizada, que se obtiene en los filtros de mangas en forma de polvo de ciclón (PC), por lo que contribuye a implementar el concepto de economía circular expuesto en la introducción de la tesis
- Es más barato: Al tratarse de un subproducto su coste económico es del orden de un 60% inferior al de las otras fuentes de MgO consideradas en la presente tesis doctoral
- Dado su contenido en *fillers* inertes los MPC desarrollados con este subproducto se consideran directamente morteros sin necesidad de añadir otros áridos

En contrapartida, de las tres fuentes de magnesio consideradas es la que origina las muestras con la menor trabajabilidad debido a su alta reactividad¹, pese a la adición de un elevado porcentaje de Bórax como retardador del fraguado.

A consecuencia de esta baja trabajabilidad no ha sido posible realizar ensayos que permitan caracterizar el estado fresco del mortero MPC fabricado. Por tanto, en la tesis no se aportan ensayos de consistencia, aire ocluido, trabajabilidad ni densidad aparente del mortero fresco.

Por tanto, mejorar la trabajabilidad del mortero MPC fabricado a partir de PC es uno de las líneas de investigación futuras a considerar.

La dosificación optimizada para la fabricación de mortero MPC a partir de polvos de ciclón, descrita en el apartado 5.5, tiene las siguientes peculiaridades:

- Emplea un ratio w/c alto
- Emplea una alta dosificación de bórax

A continuación se describen los ensayos en estado endurecido y procesos llevados a cabo para la caracterización del mortero MPC fabricado, especificando el método operatorio empleado en cada ensayo.

7.1. Ensayos mecánicos

Determinación de la resistencia a flexión del mortero endurecido

Para determinar la resistencia a flexión del mortero endurecido se ha empleado la norma española UNE-EN 1015-11, parte 11², determinación de la resistencia a flexión y compresión del mortero endurecido.

Esta normativa no prevé el empleo de morteros MPC como el propuesto en la presente tesis, pero se estima que proporciona un marco normativo adecuado para la caracterización del mortero elaborado, en particular en los ensayos mecánicos.

Descripción del ensayo

La resistencia a flexión de un mortero se determina aplicando una carga en tres puntos de los prismas enmoldados de mortero endurecido, hasta su rotura³.

Las probetas fabricadas tienen forma prismática y dimensiones de 160 mm x 40 mm x 40 mm (Ilustración 122). Se han curado en una cámara húmeda, a humedad relativa del $95\% \pm 5\%$ durante 7 días.



Ilustración 122: Probetas fabricadas

En las primeras amasadas realizadas se han roto varias probetas al desmoldar, (Ilustración 123) puesto que el mortero MPC fabricado se ha adherido al molde de metal pese al empleo de un aceite mineral para lubricar las caras interiores del molde. Este fenómeno ya había sido advertido por Formosa J. en su tesis doctoral⁴.



Ilustración 123: Probeta rota al ser desmoldada

En sucesivas amasadas se va a emplear moldes fabricados con plástico (Ilustración 124) para solventar este problema.



Ilustración 124: Molde de plástico

Las probetas se ensayan a los 7 días de su fabricación, puesto que según atestiguan los experimentos de Manso S. *et al*, a los 7 días una probeta de MPC ya ha alcanzado valores máximos de resistencia mecánica⁵.

Las probetas se colocan en una máquina (Ilustración 125) que aplica la carga a velocidad uniforme según la especificación de la norma, y que está provista de dos rodillos de apoyo en acero, con una longitud comprendida entre 45 y 50 mm, separados entre ejes una longitud de $100,00 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ y de un tercer rodillo de la misma longitud instalado entre los rodillos de apoyo, que es el que transmite la carga.



Ilustración 125: máquina para ensayo, colocación de la probeta

La resistencia a flexión de cada probeta, f , en N/mm^2 se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$f = 1,5 \frac{Fl}{bd^2}$$

b y *d* se pueden considerar como las dimensiones interiores del molde. *l* es la distancia entre los ejes de los rodillos de apoyo.

Al realizar estos ensayos se han comparado probetas de MPC sin adición de árido y probetas de MPC con adición de PU, a fin de discernir como influye la adición de PU en las propiedades mecánicas de las probetas.

La dosificación empleada para fabricar las probetas ha sido la siguiente:

Sin adición de árido	
NH ₄ (H ₂ PO ₄) 99%	x
MgO 65%, PC	x
Bórax 99,5%	10%
Ratio NH ₄ (H ₂ PO ₄): MgO	1:1,75
w/c ratio	0,36

Con adición de PU (1% de peso)	
NH ₄ (H ₂ PO ₄) 99%	x
MgO 65%, PC	x
Bórax 99,5%	10%
Ratio NH ₄ (H ₂ PO ₄): MgO	1:1,75
w/c ratio	0,36

Respecto al procedimiento de la norma, se ha producido la siguiente desviación:

- Por la disponibilidad de los reactivos, no se ha podido preparar amasadas de tres probetas, sino que se han realizado, en fechas distintas, amasadas de dos probetas cada una

Los resultados obtenidos han sido los siguientes. El valor considerado es el resultado de la media aritmética de los valores individuales:

Probetas de MPC sin adición de árido		
	<i>F</i> (KN)	<i>f</i> (N/mm ²)
Probeta 1	0,39	0,90 (Se desprecia)
Probeta 2	0,21	0,50 (Se desprecia)
Probeta 3	0,94	2,20
Probeta 4	0,84	1,95
	Valor considerado	2,10
	(Solo probetas 3 y 4)	

Las probetas 1 y 2 sin árido han sido amasadas en primer lugar, y se detectan fallos en su fabricación, por lo que se desprecia su valor.

Probetas de MPC con adición de árido (PU)

	F (KN)	f (N/mm ²)
Probeta 1	0,68	1,60
Probeta 2	0,98	2,30
Probeta 3	1,00	2.35
Probeta 4	0,87	2,05
	Valor considerado	2,10

En el caso de la resistencia a flexión, no se detecta influencia alguna de la adición de PU en el porcentaje considerado, ya que el valor obtenido para las probetas con árido, PU, es equivalente al de las probetas sin árido.

Determinación de la resistencia a compresión del mortero endurecido

Para determinar la resistencia a compresión del mortero endurecido se ha empleado la norma española UNE-EN 1015-11, parte 11⁶, determinación de la resistencia a flexión y compresión del mortero endurecido.

Descripción del ensayo

La resistencia a compresión se determina aplicando una carga sobre dos superficies opuestas del prisma hasta su rotura⁷.

La resistencia se determina en cada una de las dos mitades (semiprismas) resultantes del ensayo a flexión, el mismo día que se efectúan los ensayos de resistencia a flexión.

Los platos de apoyo deben tener 40,0 mm de longitud x 40,0 mm ± 0,1 mm de ancho y 10 mm de espesor. La máquina aplica la carga a velocidad uniforme hasta la rotura de la probeta (Ilustración 126).

El prisma se coloca de tal modo que la extremidad enmoldada se sitúa a 16 mm ± 0,1 mm del borde más próximo de los platos o de la placa de carga. La probeta se alinea, cuidadosamente de tal modo que la carga se aplica en todo el ancho de las caras en contacto con los platos.



Ilustración 126: máquina durante ensayo

La resistencia se calcula dividiendo la carga máxima soportada por la probeta por su sección transversal.

Respecto al procedimiento de la norma, se ha producido la siguiente desviación:

- Por la disponibilidad de los reactivos, no se ha podido preparar amasadas de tres probetas, sino que se han realizado, en fechas distintas, amasadas de dos probetas cada una

Los resultados obtenidos han sido los siguientes. El valor considerado es el resultado de la media aritmética de los valores individuales:

Probetas de MPC sin adición de árido

	Carga máxima soportada (KN)	Resistencia (N/mm ²)
Probeta 1	7,31	4,55
Probeta 2	11,89	7,45
Probeta 3	4,59	2,85
Probeta 4	7,39	4,60
Probeta 5	7,10	4,45
Probeta 6	7,50	4,70
Probeta 7	6,83	4,25
Probeta 8	6,22	3,90
	Valor considerado	4,60

Probetas de MPC con adición de árido (PU)

	Carga máxima soportada (KN)	Resistencia (N/mm ²)
Probeta 1	5,12	3,20
Probeta 2	6,74	4,20
Probeta 3	8,74	5,45
Probeta 4	7,77	4,85
Probeta 5	5,24	3,30
Probeta 6	5,15	3,20
Probeta 7	5,17	3,25
Probeta 8	6,44	4,05
	Valor considerado	3,90

En el caso de la resistencia a compresión, el empleo de adición de PU en el porcentaje considerado genera una pérdida del 15% del valor obtenido cuando no se emplea.

7.2. Ensayos físicos

Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido

Para determinar la densidad aparente en seco del mortero endurecido se ha empleado la norma española UNE-EN 1015-10, parte 10⁸, determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido.

Esta normativa no prevé el empleo de morteros MPC como el propuesto en la presente tesis, pero se estima que proporciona un marco normativo adecuado para la caracterización del mortero elaborado, en particular en este ensayo físico.

Descripción del ensayo

Se han de emplear probetas de forma regular.

La densidad aparente en seco de una probeta dada se determina dividiendo la masa de la probeta, secada en estufa, por el volumen que ocupa cuando se sumerge en agua, en estado saturado.

Se han fabricado probetas prismáticas de dimensiones 160 mm x 40 mm x 40 mm que se han secado en estufa hasta peso constante (Ilustración 127). Posteriormente se han sumergido en agua (Ilustración 128) hasta que no se observa un aumento de la masa aparente, y se ha determinado su volumen por pesada hidrostática (Ilustración 129).

La estufa empleada en el secado es de la marca J.P. Selecta, modelo Digitronic TFT 145 l. Tiene un rango de temperatura de +5 °C la temperatura ambiente hasta 250 °C, con una precisión $\pm 2\%$



Ilustración 127: secado de probetas



Ilustración 128: semiprobetas sumergidas en agua



Ilustración 129: Pesada hidrostática

La densidad aparente en seco de cada probeta se calcula dividiendo la masa por el volumen.

Respecto al procedimiento de la norma, se han producido las siguientes desviaciones:

- Las muestras se han secado a 80°C
- El amasado se ha realizado con el procedimiento descrito en esta tesis, puesto, que como se ha mencionado antes, su trabajabilidad es muy distinta de los morteros estándar para los que se ha concebido esta normativa
- Se han ensayado las semiprobetas originadas tras haber sido empleadas las probetas en ensayos mecánicos. Dada la disponibilidad de materias primas, no ha sido posible fabricar probetas suficientes para todos los ensayos

Los resultados obtenidos han sido los siguientes. El valor considerado es el resultado de la media aritmética de los valores individuales:

Probetas de MPC sin adición de árido

	Peso seco (gr)	Peso saturado (gr)	Peso sumergido (gr)	Volumen (cm ³)	Densidad (Kg/m ³)
Probeta 1	129,30	166,60	49,90	116,70	1108
Probeta 2	133,70	165,00	54,00	111,00	1205
Probeta 3	323,00	363,60	107,40	256,20	1261
Probeta 4	322,80	368,70	108,70	260,00	1242
				Valor considerado	1204

Probetas de MPC con adición de árido (PU)

	Peso seco (gr)	Peso saturado (gr)	Peso sumergido (gr)	Volumen (cm ³)	Densidad (Kg/m ³)
Probeta 1	171,20	220,30	59,50	160,80	1065
Probeta 2	95,10	127,50	34,30	93,20	1020
				Valor considerado	1042

La reducción de la densidad del mortero MPC fabricado cuando se añade un 1% de PU es de un 13 %.

Determinación de la porosidad abierta

En función de las medidas obtenidas anteriormente es posible obtener la porosidad abierta de las muestras de mortero MPC fabricadas.

Entendemos la porosidad abierta como el volumen de poros abiertos (V_a) o comunicados entre sí y con el exterior (accesibles al agua normalmente) por unidad de volumen total (V_t). El valor considerado es el resultado de la media aritmética de los valores individuales:

Probetas de MPC sin adición de árido

	Peso seco (gr)	Peso saturado (gr)	V_a (cm ³)	V_t (cm ³)	Porosidad abierta (%)
Probeta 1	129,30	166,60	37,30	116,70	32
Probeta 2	133,70	165,00	31,30	111,00	28
Probeta 3	323,00	363,60	40,60	256,20	16
Probeta 4	322,80	368,70	45,90	260,00	18
				Valor considerado	24

Probetas de MPC con adición de árido (PU)					
	Peso seco (gr)	Peso saturado (gr)	Va (cm ³)	Vt (cm ³)	Porosidad abierta (%)
Probeta 1	171,20	220,30	49,10	160,80	31
Probeta 2	95,10	127,50	32,40	93,20	35
				Valor considerado	33

En general, la porosidad abierta es superior en las muestras con adición de PU.

Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido

Para determinar el coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido se ha empleado la norma española UNE-EN 1015-18, parte 18^º, determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido.

Esta normativa no prevé el empleo de morteros MPC como el propuesto en la presente tesis, puesto que su objeto son los morteros con conglomerantes minerales (yeso, cemento, cal...) pero se estima que proporciona un marco normativo adecuado para la caracterización del mortero elaborado, en particular en este ensayo físico.

Descripción del ensayo

El coeficiente de absorción de agua por capilaridad se mide por la cantidad de agua absorbida, en función de la superficie en contacto con el agua y el tiempo de exposición.

Se determina en probetas de mortero prismáticas, a la presión atmosférica. Las probetas tienen 160 mm x 40 mm x 40 mm de dimensiones.

Se curan las probetas y se secan en una estufa hasta masa constante. La estufa empleada en el secado es de la marca J.P. Selecta, modelo Digitronic TFT 145 l. Tiene un rango de temperatura de +5 °C la temperatura ambiente hasta 250 °C, con una precisión $\pm 2\%$

Después del secado hasta masa constante, se rompen por flexión y la cara de rotura de la probeta se sumerge en 7 mm de agua durante un periodo de tiempo especificado (Ilustración 130).



Ilustración 130: Semiprobetas sumergidas en 7 mm de agua

Se pesan las probetas a los 10 y a los 90 minutos de inmersión.

Respecto al procedimiento de la norma, se han producido las siguientes desviaciones:

- Las muestras se han secado a 80°C
- Las muestras no se han parafinado

El coeficiente de absorción de agua se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$C = 0,1(M2 - M1)kg/(m^2 \cdot min^{0,5})$$

Los resultados obtenidos han sido los siguientes. El valor considerado es el resultado de la media aritmética de los valores individuales:

Probetas de MPC sin adición de árido			
	M2 (gr)	M1 (gr)	C
Probeta 1	212,60	197,90	1,47
Probeta 2	228,30	212,10	1,62
		Valor considerado	1.55

Probetas de MPC con adición de árido (PU)			
	M2 (gr)	M1 (gr)	C
Probeta 1	195,00	185,60	0,94
Probeta 2	122,60	113,30	0,93
Probeta 3	154,50	144,40	1,01
Probeta 4	177,80	167,70	1,01
		Valor considerado	0,97

Según estos resultados, el coeficiente de absorción de agua por capilaridad es menor para las probetas a las que se ha añadido PU. A priori, este resultado es aparentemente incoherente, teniendo en cuenta que la porosidad abierta de las muestras con PU también es significativamente mayor.

Es necesario realizar en el futuro un estudio más completo para determinar si este resultado es producto de una característica real del mortero fabricado, o de la falta de un muestreo más amplio y representativo, investigando la red capilar del material antes y después de la adición del árido.

pH y conductividad eléctrica

Se determina el pH y conductividad eléctrica de diferentes muestras de MPC; unas fabricadas sin árido, y otras, en las que se ha incluido la adición de árido, poliuretano (PU) en 1% del peso.

Para la medida de pH lo se introducen las muestras en recipientes de plástico de 3 litros (13 x 15 x 20 cm, ancho x largo x alto) con 200 ml de agua destilada.

Se realiza la medida del pH y la conductividad a los 0, 1, 2 y 8 días. El valor 0 es el correspondiente al agua destilada

La medida de pH se efectúa en pH-metro Crison GLP2 con electrodo de vidrio. Para su calibración se emplean tampones de pH 4,00 y 7,02. Su precisión es $\pm 0,01$.

La medida de conductividad se efectúa en conductímetro Crison Basic 30, con celda de conductividad y sonda de temperatura. Para su calibración se emplearon estándares de 1,413 y 12,88 dS/m. Su precisión es ± 500 mS/cm.

A continuación se aporta la dosificación empleada para cada muestra y los resultados obtenidos:

Denominación muestra MPC	Fuente MgO	Ratio $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4):\text{MgO}$	Adición de Bórax	w/c ratio	Árido (%peso)	Peso (g)
PL2	Mg<1mm	2,25	3%	0,2		280,00
PL5	PC	1,75	10%	0,36		225,95
PL10	Mg<1mm	2,25	3%	0,2	1%	267,40
PL11	Mg Imp	2,25	5%	0,28	1%	292,55
PL12	PC	1,75	15%	0,36	1%	154,28

Inmersión placas en 200 mL agua destilada	
Inicio: 19/10/2016	12,30 horas
pH inicial agua destilada	7,04
EC inicial agua destilada (dS/m)	0,0224
Inmersión en 200 mL de agua	18/10/2016

Muestra MPC	19/10/2016		20/10/2016		26/10/2016	
	pH	CE (dS/m)	pH	CE (dS/m)	pH	CE (dS/m)
PL2	7,75	27,1	5,71	30,6	6,51	38,5
PL5	8,01	12,56	8,48	16,67	9,88	25,8
PL10	5,85	52,5	6,32	61,3	6,17	66,3
PL11	7,89	6,8	8,27	8,93	8,86	13,3
PL12	6	38,2	6,12	38,5	6,67	42,3
Media aritmética	6,73	27,93	6,92	31,70	7,27	37,60

El valor medio de pH obtenido es próximo a 7, aunque determinados resultados presentan una dispersión significativa sin causas aparentes. Se trata de un valor medio que se estima como muy satisfactorio.

Como la capacidad del agua para conducir la electricidad aumenta con la concentración de sales, midiendo la conductividad eléctrica (CE), se puede estimar la salinidad de un suelo¹⁰.

Observamos que el valor de conductividad eléctrica es muy elevado, ya que valores de CE superiores a 2 caracterizan un suelo como ligeramente salino, y superiores a 16 como extremadamente salinos¹¹.

7.3. Ensayos de durabilidad

Ensayo de heladicidad

Para determinar el comportamiento del mortero frente a las heladas se ha empleado como referencia la norma española experimental UNE 67028 EX¹², "Ladrillos cerámicos de arcilla cocida. Ensayo de heladicidad".

Esta normativa no está concebida para morteros MPC como el propuesto en la presente tesis, pero se estima que proporciona un marco normativo adecuado para la caracterización del mortero elaborado.

Descripción del ensayo

El comportamiento del mortero frente a la helada se determina mediante:

- Inspección ocular de las piezas comprobando que durante el ensayo no se han producido roturas, exfoliaciones ni desconchados de dimensión media superior a 15 mm en cualquier parte de la pieza, según las definiciones dadas en la norma UNE 67019¹³
- Cálculo de la pérdida de valor de resistencia a flexión y compresión de las probetas sometidas a este ensayo en comparación con un valor de referencia, el valor obtenido en probetas no sometidas al ensayo (ver apartado 7.1), de manera análoga a lo que específico en la norma UNE-EN 12371:2010¹⁴

La aparición de cualquiera de los defectos citados, en algunas de las probetas de la muestra, o de más de una pieza fisurada según la norma UNE 67019, califica al mortero MPC como heladizo.

Se emplean 4 probetas de forma prismática de dimensiones 160 mm x 40 mm x 40 mm, 2 con árido y 2 sin árido. Se someten a 15 ciclos de hielo-deshielo, que consisten en períodos de congelación de 18 horas en cámara frigorífica (Ilustración 131) de las probetas previamente saturadas (Ilustración 132), a temperatura de $-15^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, seguidos de períodos de descongelación de 6 horas en tanques de deshielo (Ilustración 133), sumergidas en agua a temperatura $15^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.



Ilustración 131: Cámara frigorífica



Ilustración 132: probetas en proceso de saturación



Ilustración 133: Probetas en tanque de deshielo

Las probetas se ubican en la cámara frigorífica (Ilustración 134) sin estar en contacto entre ellas ni en contacto con las paredes.



Ilustración 134: Probetas en cámara frigorífica

En los períodos de interrupción las probetas se mantienen en la cámara frigorífica.

Es significativo que durante el proceso de saturación se ha manifestado la presencia de cristales salinos en puntos determinados de alguna probeta (Ilustración 135).



Ilustración 135: Formación de cristales salinos

Respecto al procedimiento de la norma, se ha producido la siguiente desviación:

- El ciclo hielo/deshielo se ha repetido 15 veces, en vez de 25 veces, debido al plazo de tiempo disponible para realizar este ensayo
- La muestra empleada ha sido de 4 probetas, 2 sin árido y 2 con árido, en vez de 6 probetas. debido a la disponibilidad de reactivos en el momento de realizar el ensayo

Los resultados obtenidos han sido los siguientes:

Pérdida de volumen

Se ha determinado por pesada hidrostática el volumen de cada probeta al inicio, a la mitad, y al final de los ciclos de hielo deshielo. La variación de volumen entre el estado inicial de la probeta y el estado final se refleja en la siguiente tabla:

	Volumen (cm ³) Inicio, ciclo 1	Volumen (cm ³) Mitad, ciclo 7	Volumen (cm ³) Final, ciclo 15	Variación de volumen (%)
Probeta 1	256,20	255,80	255,30	0,4
Probeta 2	260,00	260,00	258,30	0,7
Probeta 3	258,80	258,80	257,60	0,5
Probeta 4	254,70	254,70	252,70	0,8

En todas las probetas, la variación de volumen tras los ciclos de hielo/deshielo ha sido inferior al 1%.

Inspección ocular

En la inspección ocular se atestigua que durante el ensayo no se han producido roturas, exfoliaciones ni desconchados de dimensión media superior a 15 mm en cualquier parte de las probetas.

Se observa que, en general, los poros superficiales han aumentado su dimensión como resultado de pequeños desprendimientos de material en la cara de las probetas (Ilustración 136), lo que es coherente con la pequeña variación de volumen observada en el apartado anterior.



Ilustración 136: Aspecto de superficie de probetas tras ensayo de heladicidad

Por tanto, en función de la inspección ocular efectuada, calificamos el mortero MPC como no heladizo.

Cálculo de las pérdidas de resistencia

Los resultados de los ensayos mecánicos después de los ciclos de hielo y deshielo se indican en las siguientes tablas

Probetas de MPC sin adición de árido				
Resistencia a flexión, N/mm ²				
	Probetas ensayadas a heladicidad	Valor medio considerado	Valor de referencia	Disminución de resistencia
Probeta 1	0,25	0,20	2,10	90%
Probeta 2	0,15			
Resistencia a compresión, N/mm ²				
	Probetas ensayadas a heladicidad	Valor medio considerado	Valor de referencia	Disminución de resistencia
Probeta 1	2,25	1,80	4,60	61%
Probeta 2	2,25			
Probeta 3	0,90			
Probeta 4	1,80			

Probetas de MPC con adición de árido

Resistencia a flexión, N/mm²				
	Probetas ensayadas a heladicidad	Valor medio considerado	Valor de referencia	Disminución de resistencia
Probeta 1	0,15	0,15	2,10	93%
Probeta 2	0,15			
Resistencia a compresión, N/mm²				
	Probetas ensayadas a heladicidad	Valor medio considerado	Valor de referencia	Disminución de resistencia
Probeta 1	1,70	1,70	3,90	56%
Probeta 2	1,70			
Probeta 3	1,65			
Probeta 4	1,80			

Se observa que las resistencias mecánicas de las probetas ensayadas sufren una disminución muy importante tras los ciclos efectuados de hielo/deshielo; tanto en probetas con árido como sin árido, las resistencias a flexión disminuyen al menos un 90%, y las resistencias a compresión, al menos un 55%; en función de estos ensayos mecánicos, se considera que los morteros ensayados no son resistentes a la helada.

Hay que valorar que, además, el número de ciclos hielo/deshielo efectuados en el ensayo ha sido inferior en un 40% al prescrito por la norma de referencia empleada; de haber efectuado los ciclos prescritos, la disminución de las resistencias mecánicas hubiera sido todavía más acusada.

7.4. Síntesis del capítulo y conclusiones parciales

En este capítulo se describen el conjunto de ensayos mecánicos, físicos y de durabilidad que se han realizado para caracterizar el mortero MPC fabricado.

Comparativa respecto a parámetros de referencia descritos en el apartado 4.6

En el apartado 4.6 de la tesis se hace referencia a diversos parámetros de referencia que describen los valores deseables que habría de alcanzar el mortero MPC fabricado. En la siguiente tabla comparamos los resultados obtenidos en el capítulo con dichos valores de referencia:

	Resultados deseables	Resultados obtenidos Muestras sin PU	Resultados obtenidos Muestras con PU
Resistencia a flexión (N/mm ²)	>2 en revestimiento de paramentos >5 en paneles sobre sub-estructura	2,10	2,10
Resistencia a compresión (N/mm ²)	>5	4,60	3,90
Densidad (kg/m ³)	<1000	1204	1042
Contenido en aire/porosidad (%)	>20	24	33
pH	<7	±7	±7
Resistencia a la heladicidad	Si	No	No

Tabla 20: Comparativa resultados deseables/resultados obtenidos

Respecto a las resistencias mecánicas:

En el caso de la resistencia a flexión, los valores obtenidos indican que el mortero MPC fabricado no tiene la resistencia suficiente por sí mismo para constituir paneles montados sobre sub-estructura. La resistencia en revestimiento de paramentos sí se considera adecuada. Su empleo en paneles necesitará de otro componente que aporte la resistencia necesaria a flexión.

Como ya se ha comentado, la resistencia a flexión no varía con la adición de PU en porcentaje de 1% en peso.

En el caso de la resistencia a compresión, el valor obtenido en las muestras sin PU es inferior en un 8% al deseado, pero el empleo de un 1% de adición de PU hace que el valor obtenido sea inferior en un 22% al deseado.

En todo caso, el valor obtenido de 3,90 N/mm² en las muestras fabricadas con adición de PU es equiparable al de un material tan comúnmente usado en construcción como las placas de yeso laminado estándar, cuyo valor de resistencia a compresión¹⁵ es de >3,50 N/mm².

Por tanto, la adición de PU al mortero MPC está condicionada a la pérdida de resistencia a compresión que implica.

Respecto a la densidad: El resultado obtenido cuando no se aporta PU como árido es superior en un 20% al deseado, pero la adición de PU redundará en un aligeramiento significativo del mortero MPC fabricado, ya que se obtiene un valor ligeramente superior al deseado. Por tanto, es posible aumentar el porcentaje de PU para disminuir la densidad, siempre hasta un punto en el que las resistencias mecánicas obtenidas sean satisfactorias.

Respecto a la porosidad: Con o sin árido los resultados obtenidos alcanzan y sobrepasan el resultado deseado del 20%. Sería adecuado un estudio más profundo de la red capilar del material fabricado.

Respecto al pH: En general, el mortero fabricado presenta un valor adecuado para el crecimiento de la especie de briófito escogida, puesto que el pH de las muestras es de alrededor de 7. El resultado de alguna de las muestras presenta una dispersión significativa, para lo que no se ha localizado motivo aparente. Este resultado es muy satisfactorio, ya que un valor de PH adecuado es, en general, el factor que los autores consultados en la bibliografía consideran más determinante en la bio-receptividad de un material.

Respecto a la heladicidad: el resultado obtenido caracteriza al material fabricado como heladizo; el ensayo efectuado muestra que, aunque la inspección ocular del material sea satisfactoria tras los ciclos de hielo/deshielo, su pérdida de resistencia mecánica es muy acusada (superior al 90% para la resistencia a flexión y al 55% para la resistencia a compresión).

En el curso de la investigación realizada no ha sido posible caracterizar el mortero fabricado en su comportamiento frente al fuego y en su conductividad térmica, quedando esta caracterización como una línea futura de investigación.

En principio, según la investigación realizada por Formosa, J¹⁶, el mortero MPC fabricado debería tener buen comportamiento frente al fuego, puesto que afirma que puede considerarse el empleo de morteros MPC con subproductos de magnesio como morteros de protección pasiva frente al fuego (PPF).

En cuanto a la conductividad térmica, también en función de la investigación realizada por Formosa, J., es esperable la obtención de valores de conductividad térmica para el mortero MPC fabricado ligeramente inferiores a los típicos de un mortero fabricado con cemento Portland; en la medida que exista adición de PU este valor de conductividad disminuirá, pero no es previsible que el material fabricado llegara a poder considerarse como un aislante térmico. Los revestimientos minerales comerciales con propiedades de aislante térmico (por ejemplo, onexit thermic¹⁷) presentan unas resistencias mecánicas muy bajas, incompatibles en principio con el uso propuesto en la tesis para el mortero MPC fabricado.

Otros valores a considerar

Respecto a la conductividad eléctrica:

El valor de conductividad eléctrica obtenido es muy elevado, lo que caracteriza el material fabricado como muy salino.

En el estudio de los atributos de las especies de briófito localizadas en las Islas Británicas realizado por Hill *et al*, califican con índice 0 de tolerancia a la salinidad 1013 especies, mientras que consideran que sólo 44 tienen tolerancia en diversos grados¹⁸. Este estudio puede servir como referente para las especies localizadas en climas similares.

Incluso los briófitos cuyo hábitat son las playas son incapaces de prosperar si se les somete a un riego por espray continuado de agua de mar¹⁹.

La alta salinidad del mortero MPC se manifiesta también en la formación de eflorescencias y cristales salinos tras períodos de inmersión en agua.

Previsiblemente, esta salinidad va a dificultar que los cultivos de briófito prosperen sobre la superficie del mortero MPC, por lo que disminuir la salinidad del mortero hasta valores de salinidad "ligeramente salino" (2-4 dS/m) o "moderadamente salino" (4-8 dS/m)²⁰ va a ser una línea de investigación futura.

Por último, manifestar que es necesario profundizar y ampliar en la caracterización del mortero MPC fabricado mediante la fabricación de un mayor número de probetas.

7.5. Referencias

-
- 1 Departamento I+D+i
Magna. Magnesitas Navarras S.A.
<http://www.magnesitasnavarras.es/>
- 2 Norma Española UNE-EN 1015-11
(2000) Determinación de la resistencia a flexión y compresión del mortero endurecido
- 3 *Íbid.*
- 4 Formosa J.
Formulaciones de nuevos morteros y cementos especiales basadas en subproductos de magnesio
(2012) Universitat de Barcelona, PhD thesis
- 5 Manso, S., Mestres, G., Ginebra, M.P., De Belie, N., Segura, I., Aguado, A.
Development of a low pH cementitious material to enlarge bioreceptivity
(2014) *Construction and Building Materials*, 54, pp. 485-495.
- 6 Norma Española UNE-EN 1015-11
(2000) Determinación de la resistencia a flexión y compresión del mortero endurecido
- 7 *Íbid.*
- 8 Norma Española UNE-EN 1015-10
(2000) Determinación de densidad aparente en seco del mortero endurecido
- 9 Norma Española UNE-EN 1015-18
(2000) Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido
- 10 Como se evalua la salinidad
<http://estaciones.ivia.es/evaluar.html>
- 11 *Íbid.*
- 12 Norma Española UNE 67028 EX
(1997) Ladrillos cerámicos de arcilla cocida. Ensayo de heladicidad
- 13 Norma Española UNE 67019 EX
(1996) Ladrillos cerámicos de arcilla cocida. Definiciones, clasificaciones y especificaciones
- 14 Norma Española UNE-EN 12371:2011
(2011) Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la heladicidad
- 15 Placa Knauf Universal, standard A
<http://www.knauf.es/>
- 16 Formosa J.
Formulaciones de nuevos morteros y cementos especiales basadas en subproductos de magnesio
(2012) Universitat de Barcelona, PhD thesis
- 17 Onexit thermic
<http://www.onexit.es>
- 18 Hill, M. ;Preston, C. ; Bosanquet, S. ; Roy, D.
BRYOAT Attributes of British and Irish Mosses, Liverworts and Hornworts
(2007) ISBN: 9781855312364, pp. 26
- 19 Shaw, J., Goffinet B.
Bryophyte Biology
(2000) ISBN: 0521667941, 9780521667944, pp. 339
- 20 Como se evalua la salinidad
<http://estaciones.ivia.es/evaluar.html>

8. Experimental bio-receptividad

8.1. Método escogido para evaluar la bio-receptividad del mortero MPC

Se usan diversos métodos para evaluar la bio-receptividad de un material.

Guillite y Dressen realizaron inspecciones visuales, e inspecciones con un microscopio óptico para medir el espesor de la capa de biofilm en las diferentes muestras analizadas¹. Efectuaban extracciones de biofilm de las muestras, por lo que la dureza de la muestra analizada y la distinta adherencia del biofilm a cada sustrato analizado incidían en los resultados obtenidos².

Otros métodos empleados para evaluar la biomasa presente en un sustrato pétreo son:

- Cuantificación de la clorofila *a*
- Hidrólisis de diacetato de fluoresceína
- Análisis de los cambios en la coloración

Prieto *et al* determinan como el más óptimo el método del análisis de los cambios en la coloración, ya que según su investigación, la hidrólisis de diacetato de fluoresceína produce una desviación significativa en los resultados obtenidos respecto de la cantidad de biomasa real, y la cuantificación de la clorofila *a* es un ensayo destructivo, que además presenta problemas para asegurar la total extracción de la clorofila *a*³.

Sandra Manso *et al* evalúan y cuantifican la bio-receptividad de su sustrato bio-receptivo con dos métodos distintos⁴:

- Medidas colorimétricas y análisis de imagen
- Medida de la fluorescencia de la clorofila mediante PAM fluorimetría (ensayo no destructivo)

En este caso, analizan la bio-receptividad de biofilms generados por algas.

Posteriormente, Manso *et al* emplean ensayos destructivos para evaluar la bio-receptividad de una muestras de sustrato MPC depositadas durante un año en diversas localizaciones al aire libre⁵.

En la presente tesis doctoral se decide emplear análisis de imagen para evaluar la bio-receptividad del mortero aligerado MPC fabricado.

Para ello se realiza un seguimiento fotográfico de las distintas muestras fabricadas de mortero MPC diseminadas con vegetación, con el objeto de realizar un análisis cuantitativo de la cantidad de biomasa generada en su superficie.

Se pretende, inicialmente, monitorizar la evolución de la biomasa por medio de imágenes tomadas periódicamente, desarrollando un protocolo de obtención de estas imágenes a fin de homogenizar su calidad de las imágenes antes analizarlas mediante el empleo de un software específico.

Basándonos en el trabajo desarrollado en el análisis del crecimiento de algas filamentosas por Miñón, J., *et al*⁶, la intención es emplear el entorno de programación LabVIEW⁷ en la supervisión de la evolución de la biomasa. LabVIEW es un entorno de desarrollo integrado y diseñado específicamente para ingenieros y científicos que desarrollan sistemas de medidas y control.

Dada la pigmentación verde de la especie de briófito empleada, *Hypnum Cupressiforme*, se iba a analizar la componente de dicho color en el histograma del plano de color de las imágenes obtenidas. Según el trabajo desarrollado por Miñón, J., *et al* existe una correlación directa entre los valores del historigrama y la cantidad de biomasa presente en la muestra de mortero MPC⁸.

No obstante, finalmente no se ha podido emplear este software debido a las dificultades encontradas en el cultivo del briófito, que han originado que no haya prosperado adecuadamente en el período de investigación que abarca la presente tesis doctoral.

8.2. Bio-receptividad: mortero MPC+batido de musgo

Como se describe en el apartado 6.3, inicialmente se opta por evaluar la bio-receptividad del mortero MPC realizando un análisis de su evolución tras la diseminación de un batido de musgo sobre las muestras de mortero fabricadas.

Para ello, se emplean las muestras en las que, previamente, se ha determinado su pH y su conductividad eléctrica (ver apartado 0). Dichas muestras están elaboradas con las distintas fuentes de magnesio descritas en esta tesis, y con o sin aporte de espuma de poliuretano, PU, como árido.

Al emplear muestras con distinta composición se persigue discriminar si alguno de los componentes empleados en la dosificación favorece o penaliza la bio-receptividad del mortero MPC.

A continuación se aporta cuadro resumen con la composición de las muestras empleadas y su pH:

Denominación muestra MPC	Fuente MgO	Ratio NH ₄ (H ₂ PO ₄):MgO	Adición de Bórax	w/c ratio	Árido (%peso)	Peso (g)	pH	CE (dS/m)
PL2	Mg<1mm	2,25	3%	0,2		280,00	6,51	38,5
PL5	PC	1,75	10%	0,36		225,95	9,88	25,8
PL10	Mg<1mm	2,25	3%	0,2	1%	267,40	6,17	66,3
PL11	Mg Imp	2,25	5%	0,28	1%	292,55	8,86	13,3
PL12	PC	1,75	15%	0,36	1%	154,28	6,67	42,3

Tabla 21: Composición, pH y conductividad eléctrica de muestras sobre las que se evalúa la bio-receptividad

Como se ha indicado en el capítulo previo, los valores de pH son propicios para la bio-receptividad del mortero, pero no así los de conductividad eléctrica, demasiado elevada.

Primera fase experimental

Tras la fabricación del batido de musgo y su diseminación sobre las muestras de MPC, inicialmente el conjunto mortero+capa vegetal se deposita en recipientes de plástico con una lámina de agua en la base en contacto con la cara inferior del mortero MPC, cerrados con una tapa de plástico con perforaciones.

Dichos recipientes se ubican en el interior de un laboratorio climatizado del área de Edafología y Química Agrícola de la Universidad de Burgos, en la proximidad de una ventana, de tal modo que nunca incide luz solar directa sobre ellos (Ilustración 137).



Ilustración 137: Muestras en laboratorio

Al cabo de 4 días se comprueba que las muestras han sido contaminadas por hongos y mohos de manera masiva (Ilustración 138), arruinándose la muestra. Se trata del mismo fenómeno que ya había pasado con las pruebas preliminares sobre mortero elaborado con cemento Portland.



Ilustración 138: Muestras contaminadas por hongos

Se considera que el exceso de humedad aportada por la lámina de agua, que se manifiesta en una condensación elevada en el recipiente, así como las condiciones de temperatura del laboratorio son las culpables de dicha contaminación.

Se comprueba, no obstante, que el batido de musgo solidifica en una costra orgánica que se adhiere al soporte con consistencia. Al retirar esta costra orgánica de las muestras fallidas, se comprueba que esta adherencia se ve potenciada a mayor rugosidad de la superficie de la muestra.

Segunda fase experimental

Se vuelve a realizar la diseminación del batido de musgo sobre el mortero MPC, pero esta vez las muestras se conservan en los recipientes de plástico sin tapar al aire libre (Ilustración 139 e Ilustración 140), en un espacio que prácticamente no recibe radiación solar directa.

Las muestras PL2 y PL5 se diseminan en su 50% de superficie con el batido de musgo realizado con la especie de referencia en esta tesis, *Hypnum Cupressiforme*, pero el 50% restante se ha diseminado con un batido realizado con la especie *Antitrichia Curtipendula*.

Dicha especie es otra de las especies que en Capítulo 2 se ha considerado como muy viable para su empleo en esta tesis. Las muestras de dicha especie han sido recogidas en el Parque Natural de la Sierra de Cebollera, al igual que las de *Hypnum Cupressiforme*; se busca ampliar el rango de la investigación para ampliar las probabilidades de éxito.



Ilustración 139: Muestra en recipiente de plástico sin tapar, previa a su traslado a su emplazamiento



Ilustración 140: Detalle de muestra en recipiente de plástico sin tapar

El emplazamiento se trata del alfeizar de una ventana en planta baja de la facultad de Ciencias de la Universidad de Burgos (Ilustración 141). La orientación es prácticamente norte perfecto. En todo caso, las fachadas colindantes impiden el soleamiento directo sobre las muestras a cualquier hora, excepto la primera luz del día proveniente del este. Lo denominaremos emplazamiento A.

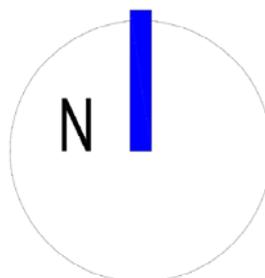


Ilustración 141: Ubicación de las muestras en la facultad de Ciencias, emplazamiento A

Se procede a la humectación de las muestras por medio de riego con espray cada 2-3 días.

Además, para analizar mayor cantidad de variables, se evalúan distintas condiciones de riego y soleamiento en otra muestra de mortero MPC, de la que no se ha determinado su pH; esta se dispone en un espacio exterior en la ciudad de Burgos, con condiciones de soleamiento de orientación este, y es sometida a un riego con espray de periodicidad diaria. Lo denominaremos emplazamiento B.

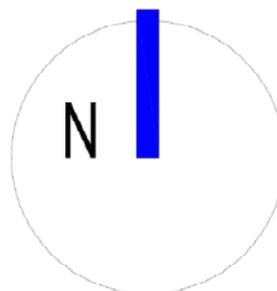


Ilustración 142: Ubicación de las muestras en la ciudad de Burgos, emplazamiento B

A continuación se aporta cuadro resumen con la composición de la muestra empleada en el emplazamiento B.

Denominación muestra MPC	Fuente MgO	Ratio $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4):\text{MgO}$	Adición de Bórax	w/c ratio	Árido (%peso)	Peso (g)	pH
PL3	Mg Imp	1,75	5%	0,28	1%	154,28	-

Tabla 22: Composición de muestra en emplazamiento B

Dicha muestra recibe incidencia directa de la luz solar en las primeras horas de la mañana (Ilustración 143).



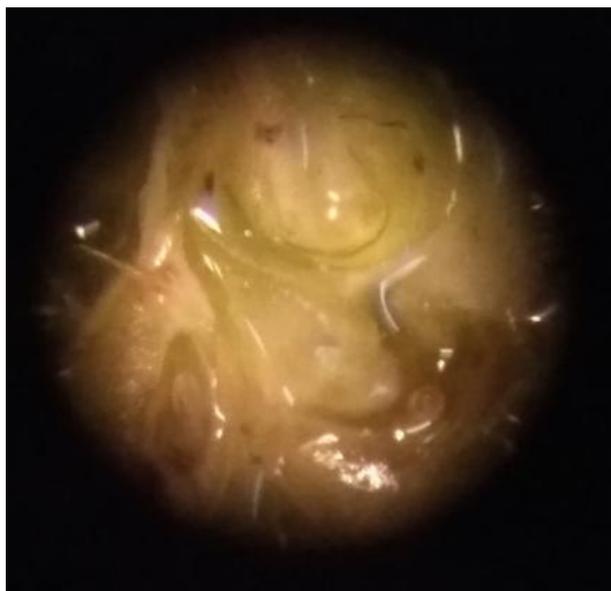
Ilustración 143: Muestra en ubicación alternativa. Estado inicial

Análisis de imagen de las muestras en emplazamiento A

Tras la diseminación del batido de musgo se inspeccionan las muestras mediante un microscopio estereoscópico modular Leica MZ6 con zoom 6.3:1 (Ilustración 144).



Ilustración 144: microscopio empleado



Muestras al microscopio, día 1



Muestras al microscopio, día 5

La inspección de las muestras al microscopio se realiza el primer día que se disemina el batido de musgo en las muestras de MPC, y se vuelve a realizar al día 5. Aunque tras 5 días los tejidos vegetales parecen estar en buen estado, se empieza a evidenciar, a partir de la segunda semana, que el cultivo vegetal no está prosperando.

A continuación se aporta la secuencia fotográfica semanal de la evolución de las distintas muestras; las fotos se han realizado con el mismo dispositivo, a la misma distancia, tras efectuar un riego con espray, y con las mismas condiciones de iluminación artificial:

Muestra PL2



Muestra PL5



Muestra PL10



Muestra PL11



Muestra PL12

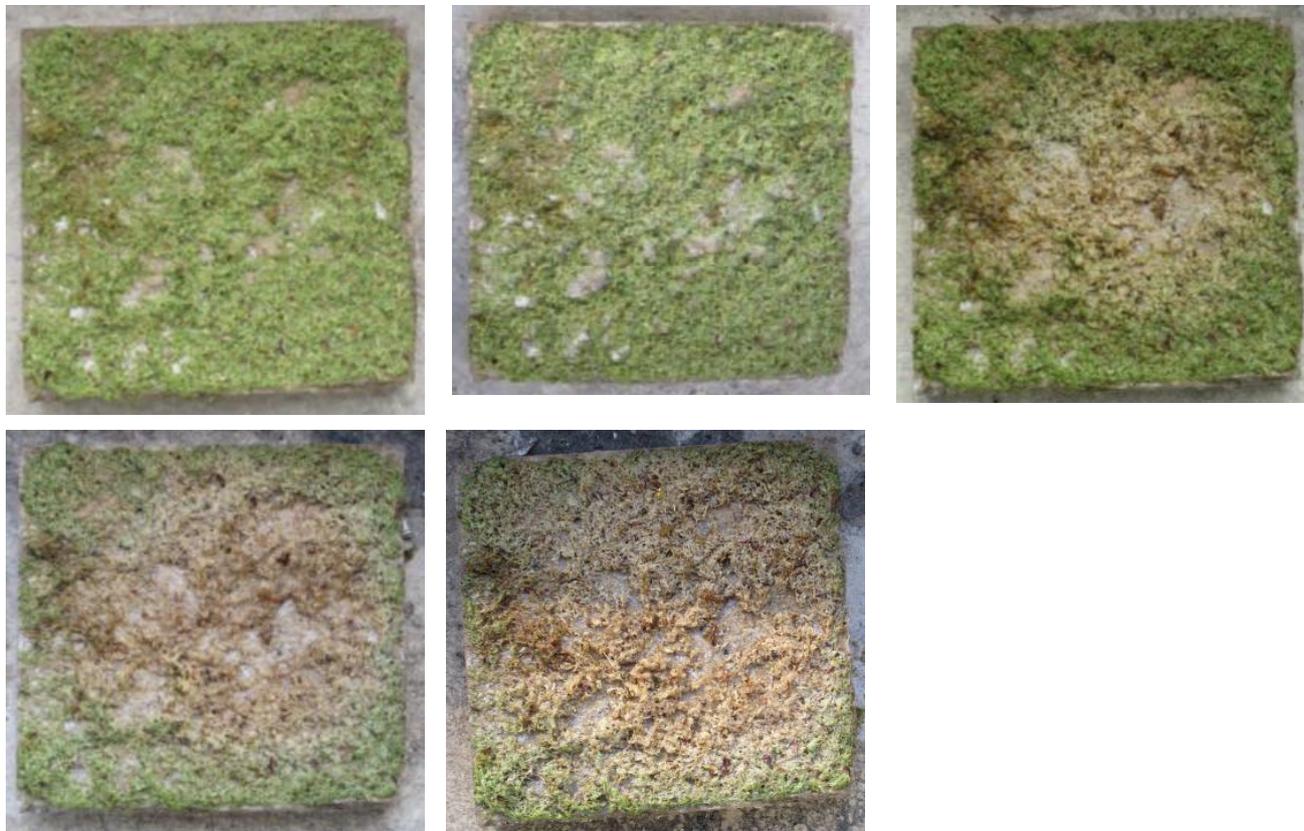


En la cuarta semana es evidente que el cultivo vegetal no está prosperando y se desechan las muestras.

Análisis de imagen de la muestra en emplazamiento B

Se realiza un seguimiento fotográfico semanal de las muestras depositadas en el emplazamiento B.

Como se puede observar en la secuencia fotográfica adjuntada bajo estas líneas, de igual modo a lo que sucede con las muestras depositadas en el emplazamiento A, la costra vegetal del batido de musgo, originalmente verde, se seca de manera continua hasta que es evidente que los brotes contenidos en el batido de musgo no han prosperado.



Tercera fase experimental

Tras no conseguir resultados positivos con las anteriores tentativas, se inicia una tercera prueba de diseminación de batido de musgo sobre el mortero MPC, pero alterando los siguientes factores:

- Se incluye la diseminación de batido de musgo sobre diferentes superficies pétreas, a fin de discriminar si la no proliferación del briófito obedece a la falta de bio-receptividad del mortero MPC o a otros factores. Se emplean dos muestras de piedra (Ilustración 145) para su empleo en fachadas ventiladas. Se trata de piedras tipo lutita (roca sedimentaria detrítica o clástica) y arenisca (roca sedimentaria de tipo detrítico) sobre las que se disemina el batido de musgo (Ilustración 146)
- Se varían las condiciones ambientales de las muestras de MPC; se conservan en los recipientes de plástico al aire libre, pero con la parte superior del recipiente tapada con un film transparente al que se le realizan perforaciones. Uno de los recipientes que contiene las muestras también se forran con cartón para disminuir la incidencia de la luz ambiente (Ilustración 147)
- Se cambian las condiciones de irrigación, alternando riego con spray periódico para unas muestras y riego mediante empleo de una lámina de agua en la base de los recipientes de plástico para otras muestras. En este segundo caso se comprueba que la cara superior de las muestras de mortero MPC, donde se ha diseminado el briófito, se humedece por efecto de la capilaridad.



Ilustración 145: muestras pétreas sobre las que se disemina el batido de musgo



Ilustración 146: Batido de musgo diseminado sobre muestra de piedra arenisca



Ilustración 147: Recipientes de plástico con la parte superior tapada con film transparente. Uno de los recipientes también se forra para disminuir la luz ambiente

Las muestras se conservan en los emplazamientos A y B descritos anteriormente. A continuación se aporta una tabla resumen de las muestras empleadas en esta fase, su ubicación y sus condiciones de iluminación:

Denominación muestra	Ubicación	Incidencia lumínica
PL3	B	Normal
PL5	B	Normal
PL 10	A	Atenuada
PL 11	A	Normal
PL 12	A	Normal
Arenisca	B	Normal
Lutita	B	Normal

Tabla 23: Tabla resumen muestras empleadas en esta fase experimental

Resultado de las muestras en emplazamiento A

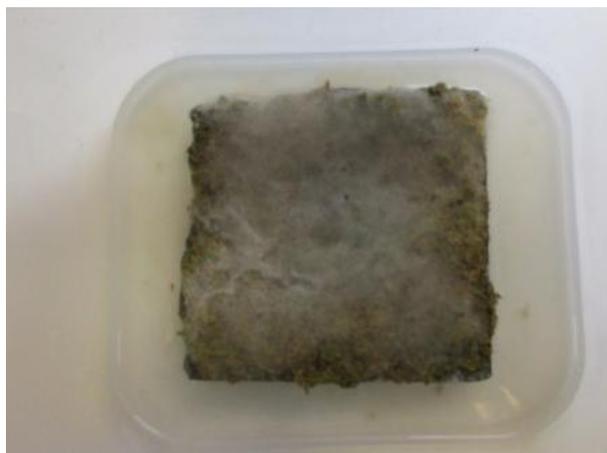
Al cabo de 7 días se comprueba que las muestras situadas en el emplazamiento A han sido contaminadas por hongos y mohos de manera masiva. No se aprecian diferencias en el grado de contaminación en función del tipo de muestra

Muestra PL 10 a la semana/ a las dos semanas/al mes



Muestra PL 11



Muestra PL 12 a la semana/ a las dos semanas/al mes

En total se espera un total de 6 semanas para observar cómo evolucionan las especies colonizadoras del cultivo de briófito, y si éste es capaz de prosperar pese a ellas. Al no se detecta evolución positiva del briófito en ningún caso, se desechan las muestras.

Resultado de las muestras en emplazamiento B

Al cabo de 7 días se comprueba que también las muestras situadas en el emplazamiento B han sido contaminadas por hongos y mohos. Tampoco se aprecian diferencias en el grado de contaminación en función del tipo de muestra

Muestra PL 3

Muestra PL 5



Las muestras pétreas sobre las que se ha diseminado el batido de musgo igualmente han terminado siendo colonizadas por hongos y mohos. La muestra de piedra arenisca, que es regada mediante una lámina de agua, es contaminada de manera masiva en menos de una semana; la muestra de lutita, regada con espray, sufre una colonización más lenta y leve. Se atribuye, pues, el distinto grado de contaminación en las muestras a las citadas condiciones de riego.

Muestra piedra arenisca



Muestra piedra lutita a la semana/ a las dos semanas



En ninguno de los dos casos prospera el cultivo de briófito.

Si, en igualdad de condiciones, el briófito cultivado mediante batido de musgo hubiera prosperado sobre las muestras pétreas y no sobre el mortero MPC fabricado, hubiera indicado claramente una falta de bio-receptividad en el mortero.

Sin embargo, el fallo del cultivo también sobre las muestras pétreas señala un posible problema en el método de cultivo escogido o en la idoneidad de la especie *Hypnum Cupressiforme* para el fin propuesto. Es necesario abrir el rango de la investigación a otras técnicas de cultivo y a otras especies de briófito.

Cuarta fase experimental

Para discernir si existe un problema de adaptación de la especie seleccionada en la tesis doctoral a las condiciones climáticas de las localizaciones A y B, se opta por reproducir el método de cultivo, batido de musgo, con una especies autóctonas que crecen espontáneamente en la localización A (Ilustración 148).



Ilustración 148: Especies autóctonas incorporadas a la investigación en su medio natural

Se trata de especies acrocárpicas que se entremezclan en los tapices de briófito, identificadas como *Tortula muralis* Hedw y *Bryum argenteum* Hedw. Se realiza la identificación a partir de rasgos característicos, como las cápsulas de la *Tortula muralis* Hedw y los ápices brillantes un poco plateados típicos del *Bryum argenteum* Hedw. Es posible que también exista en el tapiz una tercera, especie, *Bryum capillare* Hedw, pero es una identificación no confirmada (Ilustración 149).



Ilustración 149: tapices de especies autóctonas recogidos para la investigación

Los tapices de estas especies se asientan sobre materia de apariencia similar al barro (Ilustración 150), con la que los rizoides forman un todo. Cualquier intento de eliminar esta materia disgrega el tapiz.



Ilustración 150: Envés de los tapices con la materia en la que están diseminados los rizoides

Tal y como se comenta en el apartado 2.6, es preferible el empleo de especies pleurocárpicas para el sistema propuesto, pues dichas especies son tapizantes, al crecer paralelas al sustrato. El empleo de esta especie autóctona se plantea en la tesis exclusivamente para discernir si, al no ser autóctona de la zona, la especie *Hypnum Cupressiforme* es incapaz de prosperar debido a alguna de las múltiples causas que pueden generar un problema de adaptación al medio deseado (ver capítulo 6.1).

Si en igualdad de condiciones las especies autóctonas prosperan, se focalizaría el fallo de las fases anteriores en la especie vegetal empleada.

Se prepara un nuevo batido de musgo, empleando los tapices autóctonos mencionados. El batido de musgo se disemina sobre las muestras de mortero MPC (Ilustración 151).



Ilustración 151: Batido de musgo recién aplicado sobre mortero MPC

Las muestras se conservan en el emplazamiento A descrito anteriormente, en recipientes de plástico, al aire libre, con la parte superior del recipiente tapada con un film transparente al que se le realizan perforaciones.

A continuación se aporta una tabla resumen de las muestras empleadas en esta fase, su ubicación y sus condiciones de iluminación:

Denominación muestra	Ubicación	Incidencia lumínica
PL2	A	Normal
PL5	A	Normal

Tabla 24: Tabla resumen muestras empleadas en esta fase experimental

Resultado de las muestras

Las muestras desde los primeros días dan síntomas de no prosperar

Muestra PL 2 a la semana/ a las tres semanas



Muestra PL 5 a la semana/ a las tres semanas



Estas muestras también se desechan.

8.3. Bio-receptividad: mortero MPC+ejemplares adultos de briófito

Dado que no ha prosperado ninguno de los batidos de musgo elaborados se decide probar con otra técnica de cultivo. En concreto, se emplea la técnica descrita en el apartado 6.1, cultivo de ejemplares maduros.

Muestras adultas sujetas a soporte con tejido

Se selecciona una muestra de briófito, *Hypnum Cupressiforme*, en buen estado (Ilustración 152) y se sujeta al mortero MPC mediante un tejido sintético de malla (Ilustración 153), de tal modo que el tejido mantenga el briófito fijado para que tenga oportunidad de colonizar el mortero.



Ilustración 152: Muestra sobre sustrato



Ilustración 153: Briófito fijado con tejido sintético

El conjunto se dispone en el emplazamiento B (Ilustración 154), cubierto con un film transparente con perforaciones, y se mantiene hidratado mediante riegos con espray periódicos y una lámina de agua que mantiene humectado el mortero por capilaridad.



Ilustración 154: Conjunto dispuesto en el emplazamiento B

El briófito mantiene partes aparentemente vivas, pero en general muestra signos de desecación y de no estar prosperando.

Muestra a la semana/ a las dos semanas



Al cabo de 5 semanas se examina la evolución de la muestra. Se retira el tejido sintético (Ilustración 155), y se comprueba que, en su mayor parte, el briófito no ha arraigado en el mortero MPC (Ilustración 156).



Ilustración 155: Muestra sin tejido



Ilustración 156: Briófito no adherido al soporte

Un porcentaje del briófito, sin embargo, parece haberse fijado a la superficie del mortero (Ilustración 157), por lo que se prolonga la humectación del briófito fijado al mortero para estudiar su evolución.



Ilustración 157: Briófito adherido al soporte a las 5 semanas

Sin embargo, a las 7 semanas es patente que el briófito fijado a la superficie del mortero no ha prosperado (Ilustración 158), por lo que se desecha la muestra.



Ilustración 158: Estado del briófito adherido al soporte a las 7 semanas

Muestras adultas desmenuzadas insertadas en mortero MPC

Se ha desmenuzado tapices de briófito en buen estado de *Hypnum Cupressiforme* y de los briófitos autóctonos, *Tortula muralis Hedw* y *Bryum argenteum Hedw*, y las porciones resultantes, de tamaño menor a 1 cm, se han diseminado en restos de probetas de mortero MPC (Ilustración 159). Dichos restos presentan caras que no han sido alisadas, en las que existe una gran rugosidad y muchos poros abiertos, por lo que son muy adecuados para este propósito, al proporcionar una gran superficie de sujeción para los rizoides⁹.



Ilustración 159: Uno de los restos de probetas empleados

La diseminación se ha hecho manualmente, insertando con presión la materia vegetal en los poros del mortero MPC, teniendo en cuenta que la experta Annie Martin recomienda emplear presión para ayudar a los briófitos a fijarse al sustrato, según su técnica denominada "water and walk"¹⁰.

El mortero MPC empleado en esta fase experimental se ha fabricado a partir de la dosificación optimizada descrita en el apartado 5.5.

Hypnum Cupressiforme

El cultivo realizado de *Hypnum Cupressiforme* se ha ubicado en el emplazamiento B, pero en la habitación en la que se conservan los tapices de dicha especie recogidos del medio natural para su empleo futuro en la fase experimental (ver apartado 2.7) (Ilustración 160).



Ilustración 160: Cultivo en emplazamiento B

Se estima que, si los tapices recolectados se mantienen en buen estado durante meses, se puede garantizar que las condiciones higrotérmicas del espacio permiten la supervivencia del briófito, por lo que es un entorno adecuado para el cultivo.

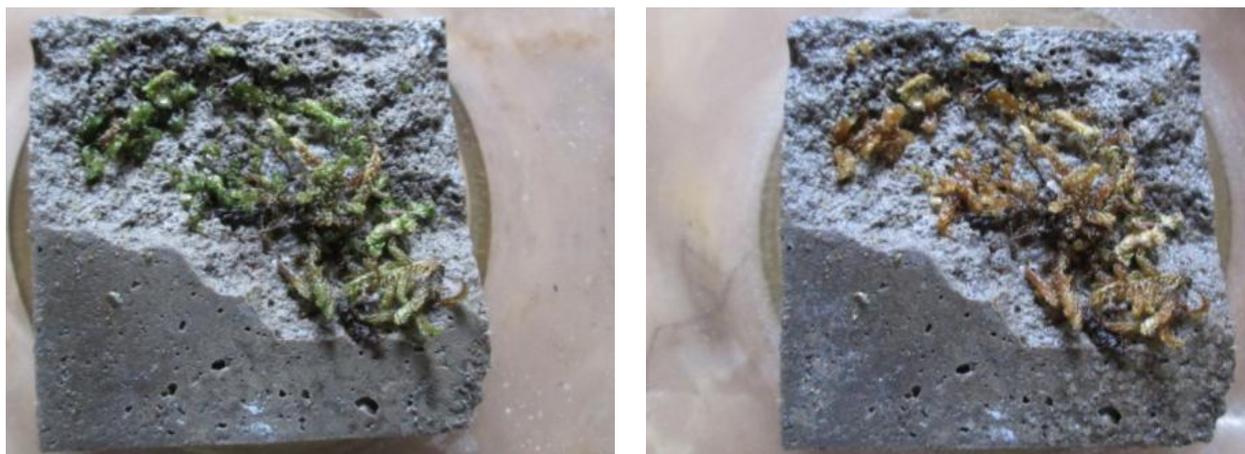
El cultivo se ha mantenido húmedo por medio de la capilaridad del mortero MPC, ya que este siempre está en contacto con una lámina de agua (Ilustración 161). Se ha dispuesto bajo un film perforado de plástico transparente.



Ilustración 161: Estado inicial del cultivo

El cultivo no ha prosperado, mostrando síntomas de deterioro ya en la primera semana.

Cultivo a la semana/ al mes



Briófito local

Se procede a discriminar si la no proliferación del briófito obedece a la falta de bio-receptividad del mortero MPC o a otros factores, de igual modo que se hizo en la tercera fase experimental empleando piedra como sustrato. Para ello, se ha diseminado las especies autóctonas, *Tortula muralis* Hedw y *Bryum argenteum* Hedw, en un geocompuesto (Ilustración 162), ya que, tal y como se recoge en el apartado 2.5, se trata de un sustrato propicio para el crecimiento de los briófitos.



Ilustración 162: Briófitos autóctonos diseminados en tejido geosintético, estado inicial

El conjunto se deposita en una bandeja cubierta con film transparente, en un espacio exterior anexo al emplazamiento B, un patio interior donde no existe soleamiento directo, y se somete a un riego frecuente con spray más una continua lámina de agua en su base.

A las tres semanas se comprueba que las especies autóctonas están prosperando en el geocompuesto (Ilustración 163), apareciendo numerosos brotes nuevos.



Ilustración 163: Brotes nuevos de las especies autóctonas

Se toman del geocompuesto pequeños fragmentos de briófito en crecimiento y se trasplantan al mortero MPC. Ambos cultivos, el realizado sobre geocompuesto y el realizado sobre mortero MPC se sitúan en el patio interior, juntos, para que tengan exactamente las mismas condiciones ambientales y se siguen sometiendo al mismo régimen de riego citado.



Ilustración 164: Cultivos dispuestos en la misma ubicación

Durante las siguientes semanas se comprueba que el cultivo sobre ambos sustratos presenta una evolución similar (Ilustración 165). Los brotes de briófitos prosperan en los dos casos.



Ilustración 165: Estado de los cultivos a las 3 semanas

8.4. Bio-receptividad: mortero MPC+microalgas

En un momento dado, como las rondas experimentales efectuadas mediante batido de musgo para la evaluación de la bio-receptividad del mortero MPC fabricado van arrojando resultados negativos, se decide ampliar la evaluación con el empleo de microalgas.

Se pretende emplear otra vía para discriminar si el material fabricado es bio-receptivo, dado que los briófitos son plantas con un cultivo complicado¹¹, tal y como se comenta en el apartado 6.1. Se puede dar la circunstancia de que estemos errando en la elección de la especie de briófito o en el método de cultivo, por lo que el empleo de otra especie vegetal contribuye a ampliar el enfoque de la tesis doctoral.

Ya Manso, S., *et al*, emplearon en su momento algas para realizar la evaluación de la bio-receptividad de distintas clases de mortero¹². También Ferrándiz-Mas V. *et al* han desarrollado una investigación para desarrollar un material con las propiedades óptimas para promover su bio-colonización por microalgas.

En la Universidad de Burgos se está desarrollando el proyecto IntegralCarbon “*Desarrollo e implementación integrada de fotobiorreactores de captura de gases de efecto invernadero en agroindustria*” cuyo objeto es la implementación y demostración en actividades agroindustriales de la captura de gases de efecto invernadero (GEI), su fijación en biomasa de algas autóctonas y su posterior aplicación agronómica como fuente de nutrientes vegetales y sumidero de carbono en los suelos¹³.

Aprovechando la infraestructura desarrollada para dicho proyecto es posible evaluar la bio-receptividad del mortero MPC por medio del empleo de microalgas.

Se ha dispuesto una muestra de mortero MPC fabricado en un canal en el que recircula agua en la que se ha inoculado diversas especies de microalgas autóctonas. Estas especies de microalgas crecen en el canal sobre una malla de crecimiento plástica y son recolectadas periódicamente.

Según explican Miñón, J., *et al*, responsables de su diseño¹⁴, el canal está compuesto de tres planos (Ilustración 166):

a) Plano de transición. Plano paralelo a la superficie del suelo donde desagua la bomba y que tiene la función de reducir la turbulencia de la lámina de agua posterior a su vertido sobre el plano de monitorización.

b) Plano de monitorización. Plano inclinado 45° respecto a la superficie del suelo donde se ancla la malla de crecimiento.

c) Plano de recepción. Este plano queda paralelo al plano de transición y permite regular la lámina de agua que está discurriendo por el plano de monitorización.



Ilustración 166: canal compuesto por tres planos para recolección de microalgas

Muestras de mortero MPC de dimensión 10 x10 x 1 cm se disponen al final del plano de monitorización, en su encuentro con el plano de recepción. También se dispone otra muestra de mortero Portland tradicional de dimensión 15 x 9,50 x 1 cm, para poder comparar la bio-receptividad de ambos tipos de mortero (Ilustración 167). Las muestras se disponen de tal modo que la corriente de agua discurre por la totalidad de su superficie; además, en cada sesión de control, cada 10 días, el orden de disposición de las muestras se altera aleatoriamente para tratar de homogeneizar su exposición al agua inoculada.



Ilustración 167: Diversas muestras de mortero dispuestas en el canal

La composición del mortero MPC empleado en este experimento es:

Denominación muestra MPC	Fuente MgO	Ratio $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4):\text{MgO}$	Adición de Bórax	w/c ratio	Árido (%peso)	Peso (g)	pH	CE (dS/m)
PL11	Mg Imp	2,25	5%	0,28	1%	292,55	8,86	13,3

Debido al plazo disponible para realizar esta experimentación no ha sido viable disponer en el canal la iluminación necesaria para poder realizar un seguimiento fotográfico que posibilite emplear el entorno de programación LabVIEW¹⁵.

Por ello, la bio-receptividad de ambas clases de mortero se va a valorar con inspecciones visuales periódicas y mediante la extracción y pesado en seco de la biomasa generada sobre cada muestra, de tal modo que podamos obtener un ratio de generación de biomasa por unidad de superficie para cada clase de mortero.

Proceso de obtención del inóculo de microalgas autóctonas empleado en el canal

Se aporta a continuación un resumen de la obtención de las microalgas autóctonas inoculadas en el agua del canal extraído de la tesis doctoral del investigador Miñón, J.¹⁶.

Toma de muestras

El investigador tomó diversas muestras de suelos en el municipio Fuente de Pedro Naharro (Cuenca), y a continuación empleó el siguiente procedimiento:

- Diluir la costra de suelo en medio de cultivo BG11 esterilizado
- Agitar el contenido durante 30 min en agitación orbital a 150 rpm hasta lograr una buena dispersión del suelo
- Sonicar la solución con un pulso de un minuto de duración e intervalos de 5 pulsos/segundo y con una amplitud de salida de 90 Hz
- Tomar de dicha suspensión una alícuota de 100 μ L que se siembra en una placa de Petri con medio de cultivo BG11 y agar al 2%
- Incubar las placas en cámara climática, invertidas y cubiertas con un papel de filtro para permitir una iluminación difusa e impedir la inhibición por exceso de luz
- Realizar un replicado de cada colonia en una nueva placa Petri con medio de cultivo BG11. Pasados 12 días, inocular las colonias aisladas en 10 ml medio de cultivo BG11 líquido

Identificación de las especies de algas

Según Miñón, J.¹⁷, la identificación de las cinco especies de algas, inicialmente extraídas de las muestras de suelo mediante microscopía óptica con contraste de fase, permitió observar que todas ellas eran especies de un mismo género: *Chlorella*.

Con el objeto de conseguir una mayor variedad de especies de algas del suelo, con presencia de otros géneros diferentes a *chlorella*, procedió a repetir el proceso de extracción utilizando un periodo de pre-incubación en microplacas de 12 pocillos, en los que introdujo una muestra de suelo en un medio de cultivo BG11, al que le modificó su composición para incrementar su capacidad de selección

Logró así aislar un número más elevado de especies que tuvieron una primera identificación mediante microscopía óptica, tras la cual fueron posteriormente caracterizadas molecularmente mediante el análisis de su composición en pigmentos y la secuenciación de su ADN.

Resumen de la identificación

En la siguiente tabla, Miñón, J.¹⁸ recogió las especies de algas y cianobacterias que se lograron aislar e identificar.

Nombre	Observaciones
<i>Chlorella Sorokiniana</i> isolate BE1	Aislada en el segundo muestreo, marzo 2015
<i>Klebsormidium Flaccidum</i>	La de mayor crecimiento sobre soporte sólido
<i>Haslea Spicula</i> strain BA28	Identificada inicialmente como <i>Navícula oblonga</i>
<i>Navicula Pulchripora</i> isolate UTEX 2604	Identificada inicialmente como <i>Navícula sp</i>
<i>Oocystis</i> sp. FG2/8.5E	Crece bien en medio líquido
<i>Microcoleus</i> sp. E6	Cianobacteria filamentosas, crece bien en soporte sólido.

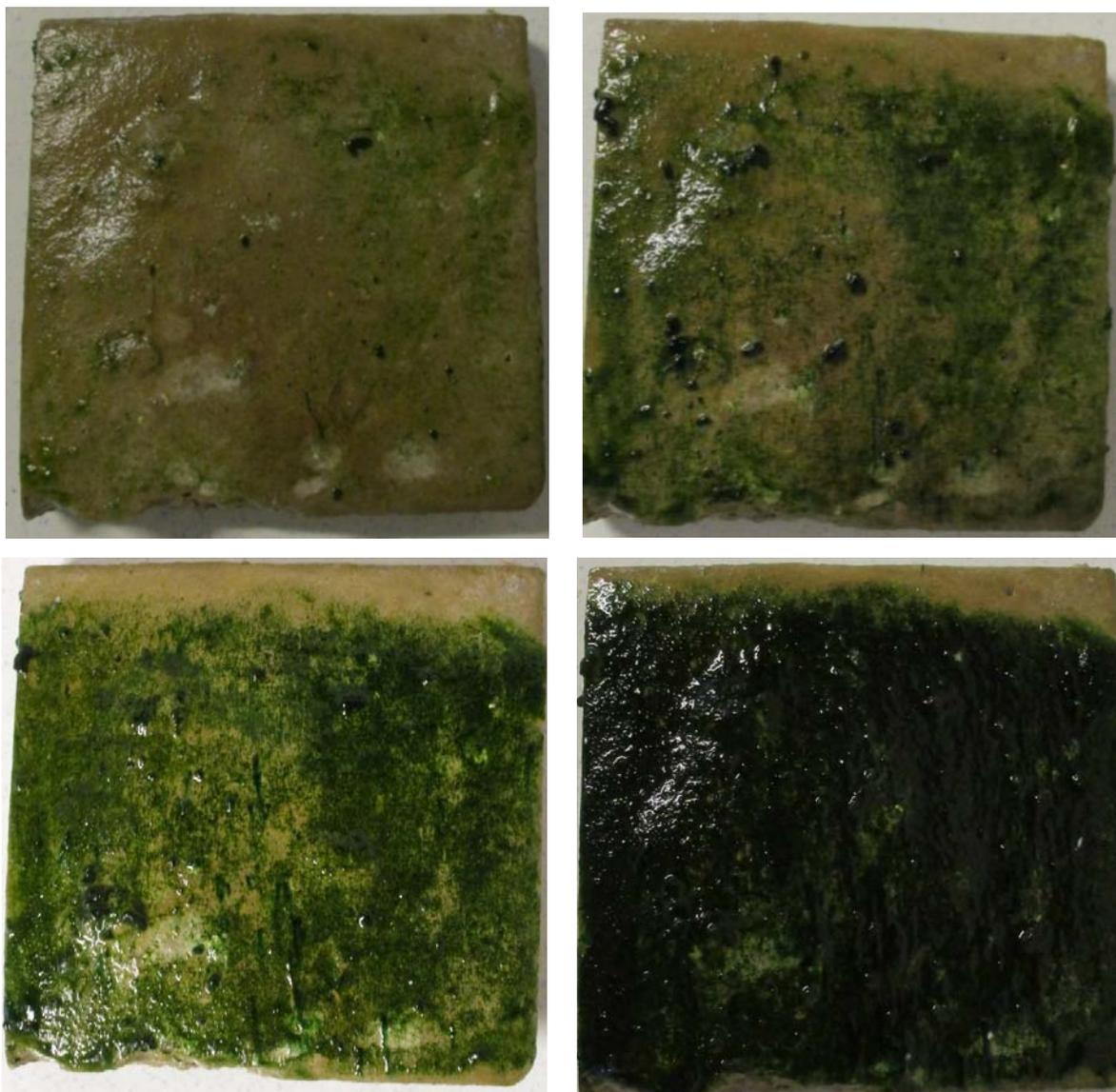
Tabla 25 Nombre, género y observaciones de las microalgas aisladas de los suelos

Resultado del experimento

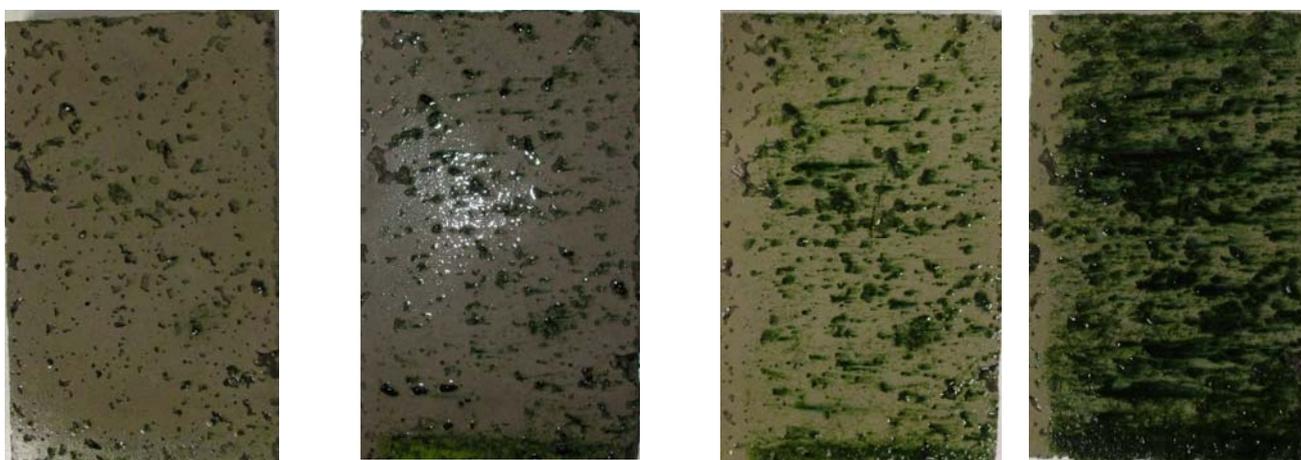
Ya en la primera sesión de control del experimento realizado en la presente tesis se observa que las algas empiezan a colonizar la superficie de mortero MPC fabricado; así mismo, también colonizan el mortero Portland, aunque aparentemente, en menor cuantía.

Seguimiento fotográfico realizado cada 10 días

Muestra de mortero MPC:



Muestra de mortero Portland tradicional:



Ratio de generación de biomasa por unidad de superficie

La biomasa que se ha generado durante 6 semanas en cada muestra de mortero se extrae mediante cepillado y lavado de la muestra; la disolución resultante de biomasa en agua se filtra mediante una bomba de vacío y filtros de microfibras (Ilustración 168).



Ilustración 168: Proceso de extracción de la biomasa mediante cepillado, lavado, y posterior filtrado

Se emplea una bomba de vacío de membrana marca Vacuubrand, modelo MZ 2C, con caudal de 1,7 m³/h (Ilustración 169).



Ilustración 169: Bomba de vacío empleada en el filtrado

Posteriormente, la biomasa depositada en el filtro se deposita en una placa Petri y se seca en estufa durante 24 horas.

Por último, se procede a su pesado mediante una balanza electrónica de precisión marca Precisa, modelo 40SM-200, con capacidad máxima 200 g y precisión $\pm 0,0001$ g.

Los resultados obtenidos han sido los siguientes:

	Biomasa generada (g)	Ratio biomasa por superficie (g/cm ²)
Mortero MPC	0,3378	3,38 x 10 ⁻³
Mortero Portland	0,0974	0,68 x 10 ⁻³

El ratio de generación de biomasa en el mortero MPC fabricado es casi 5 veces (4,97) el ratio de generación en el mortero Portland tradicional.

Dado el alcance del ensayo, limitado a solo una muestra de cada clase de mortero, no se puede inferir con rigor conclusiones cuantitativas. Pero el resultado parcial obtenido en este ensayo indica que, cualitativamente, el mortero MPC fabricado presenta bio-receptividad mejorada ostensiblemente frente a un mortero Portland tradicional.

Para alcanzar una conclusión definitiva es necesario ampliar este ensayo a un número significativo de muestras, además de establecer un protocolo de fabricación que garantice la homogeneidad de las muestras de cada clase de mortero sometida a comparación. Además, sería necesario, al menos, realizar un análisis de imagen completo de la producción de biomasa según el método descrito en el apartado 8.1.

Que el mortero fabricado sea mucho más bio-receptivo a las microalgas que a los briófitos es un resultado coherente con el alto valor de salinidad detectado en las muestras en el apartado 0.

La hipótesis considerada es que, en el cultivo de microalgas, la superficie del mortero es constantemente lavada con agua, arrastrando las sales solubles de la superficie del mortero MPC y disminuyendo así el efecto nocivo para la vida vegetal de la alta salinidad; estas sales posteriormente cristalizarán en algún punto del canal. Esto no sucede con el riego por espray o capilaridad efectuado en el cultivo de briófitos.

8.5. Análisis condiciones climáticas

Dados que ningún cultivo de la especie *Hypnum Cupressiforme* ha prosperado, se realiza un somero análisis comparativo de las condiciones climáticas entre el entorno natural del que los tapices de briófito fueron extraídos, el entorno del Embalse de Pajares, en el Parque Natural de la Sierra de Cebollera, y los emplazamientos A y B de los ensayos realizados, en el casco urbano de la localidad de Burgos. Se pretende discriminar si las condiciones han sido tan distintas que hayan podido dificultar que el briófito prosperara fuera de su entorno natural.

Para ello se han recogido datos de las estaciones climatológicas más cercanas al Embalse de Pajares (Duruelo de la Sierra) y el emplazamiento de los cultivos en Burgos (Renuncio)¹⁹. Los datos abarcan un período de dos años completos.

Los datos de Renuncio se consideran perfectamente asimilables a los del emplazamiento de los cultivos en Burgos. Sin embargo, al no existir datos climáticos libremente accesibles del Embalse de Pajares, se emplean los de Duruelo de la Sierra, localidad situada a 30 kms de distancia y a una altitud similar a la del Embalse (Ilustración 170). Se considera que estos datos son representativos de los del Embalse de Pajares, aunque es inevitable que exista un cierto grado de desviación.



Ilustración 170: Posición relativa entre el Embalse de Pajares y Duruelo de la Sierra

Comparativa precipitaciones, período marzo 2015-marzo 2017

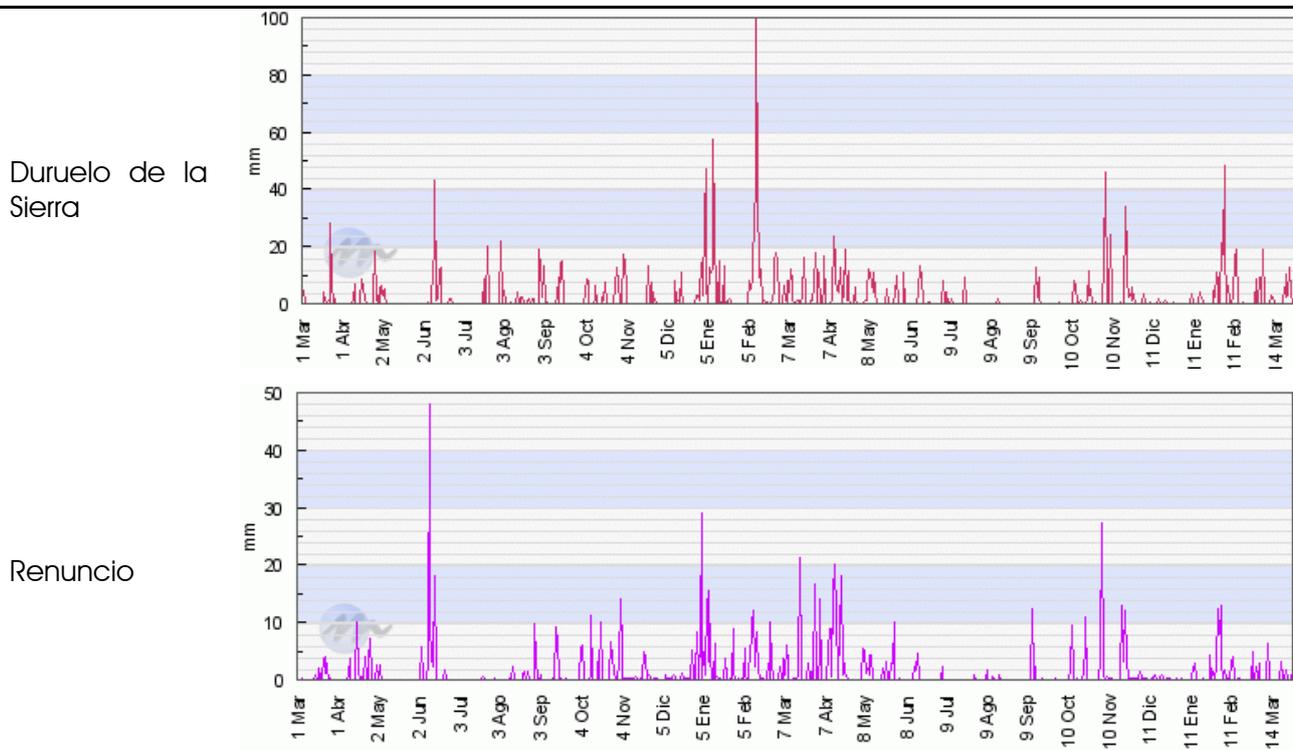


Tabla 26: comparativa precipitaciones, fuente <http://www.meteoclimatic.net/>

Existe una variación importante entre las precipitaciones recogidas en Duruelo respecto a las recogidas en Renuncio; el entorno del Embalse de Pajares recoge precipitaciones significativamente mayores.

Comparativa humedad máxima y mínima, período marzo 2015-marzo 2017

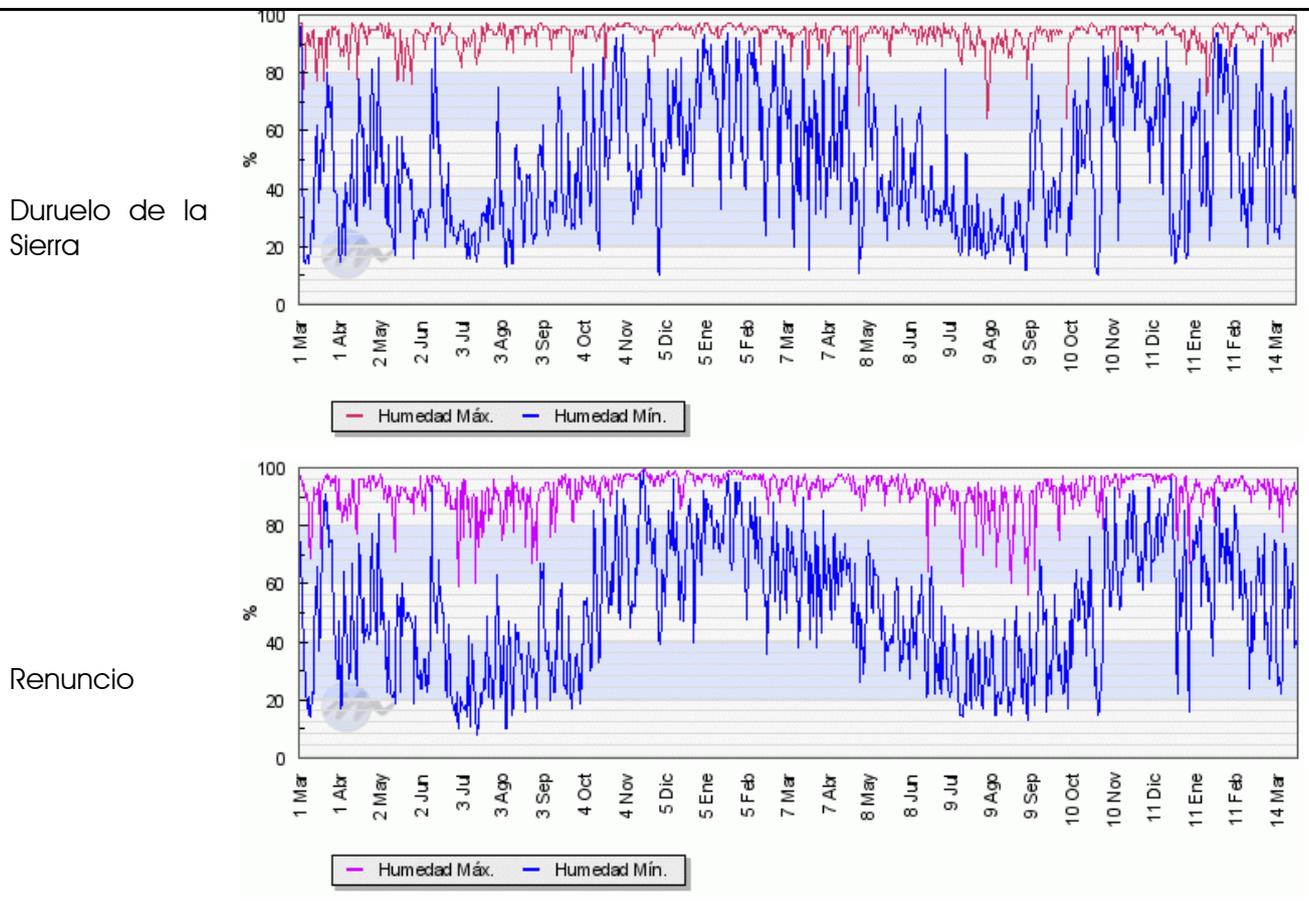
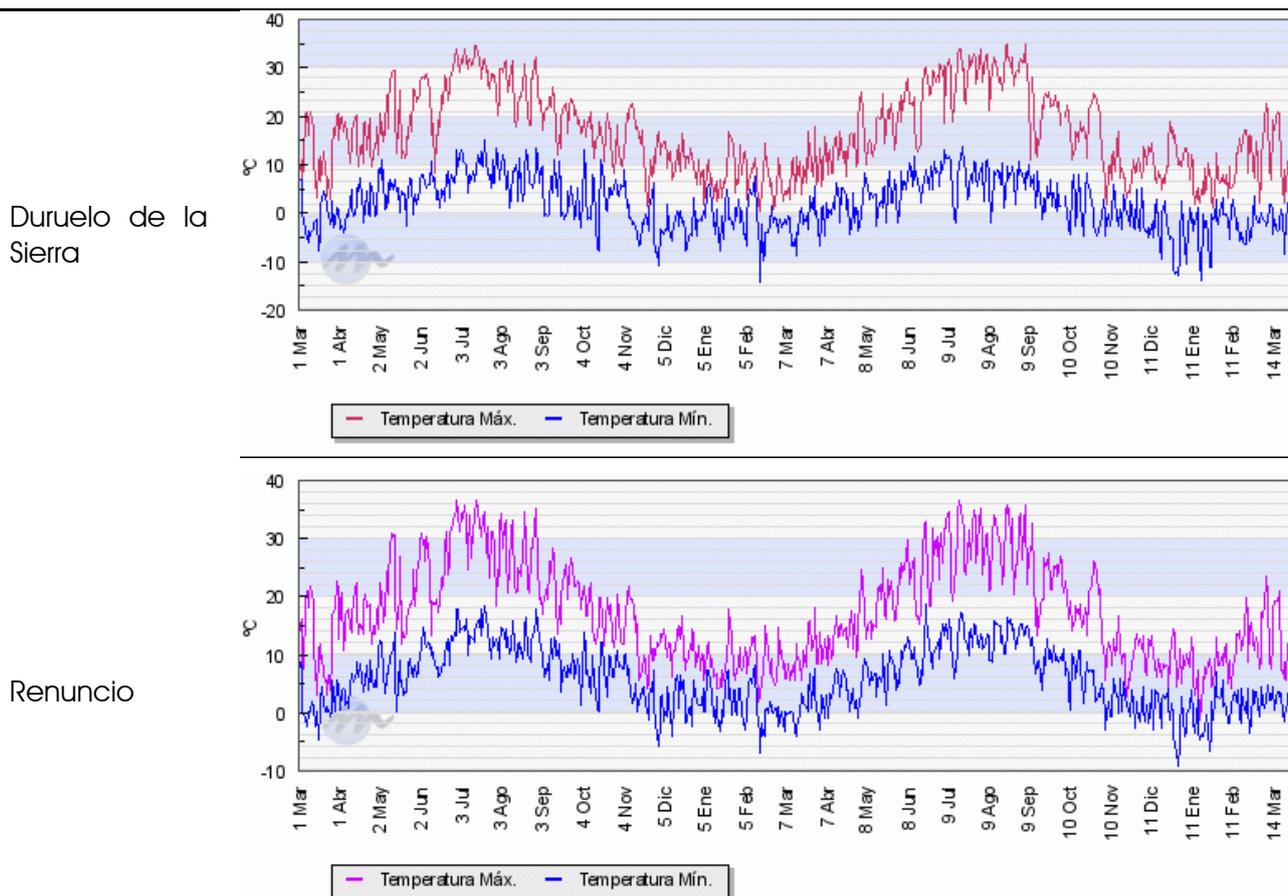


Tabla 27: comparativa humedad, fuente <http://www.meteoclimatic.net/>

En cuanto a la humedad, los valores de humedad máxima tienden a ser sostenidamente más altos en Duruelo de la Sierra/Embalse de Pajares que en Renuncio. En cuanto a los valores de humedad mínima, los valores no presentan una variación significativa entre los dos emplazamientos.

Comparativa temperatura, período marzo 2015-marzo 2017

Tabla 28: comparativa temperatura, fuente <http://www.meteoclimatic.net/>

En cuanto a las temperaturas, las máximas son muy similares, pero las mínimas son inferiores en Duruelo de la Sierra/Embalse de Pajares.

En general, la diferencia más relevante que ha podido influir en los ensayos realizados en la tesis doctoral es el régimen de precipitaciones, ya que Burgos recoge menos precipitaciones que el emplazamiento natural de la especie *Hypnum Cupressiforme*.

Sin embargo, esta diferencia ha sido paliada mediante el régimen de riegos empleado y el empleo de film transparente para retener la humedad de los cultivos. Dadas las características de la especie *Hypnum Cupressiforme*, considerada de alto espectro por su alta resistencia a la desecación y tolerancia a la luz solar²⁰, se considera que las condiciones climáticas no han sido la causa determinante del fallo de los cultivos.

8.6. Síntesis del capítulo y conclusiones parciales

En este capítulo se describe, en primer lugar el método escogido para evaluar la bio-receptividad del mortero MPC fabricado, y como, a causa de las dificultades encontradas en el cultivo del briófito, no se ha llegado a efectuar el análisis de imagen inicialmente planteado.

Se definen las muestras de mortero MPC empleadas en los ensayos realizados, así como sus valores de pH y conductividad eléctrica, ambos determinantes para su bio-receptividad.

A continuación se describen todos los ensayos realizados para cultivar briófitos sobre el mortero MPC mediante las siguientes técnicas de cultivo:

- Batido de musgo
- Ejemplares adultos de briófito

También se han comparado las condiciones climáticas del hábitat natural de la especie *Hypnum Cupressiforme* y las del emplazamiento de la fase experimental, para determinar si pueden incidir en el desarrollo de los experimentos.

Los ensayos inicialmente contemplados en el programa experimental de la tesis doctoral se limitaban a los realizados con la técnica “batido de musgo”, pero dado que no prospera ningún cultivo así realizado, se incorporan progresivamente a la experimentación los siguientes campos:

- Empleo de sustratos alternativos al mortero MPC como elementos de control: Superficies pétreas y geocompuesto
- Empleo de especies de briófitos autóctonas del emplazamiento de los ensayos

Cultivos con la especie de briófito Hypnum Cupressiforme

La especie *Hypnum Cupressiforme* ha sido incapaz de prosperar en ningún sustrato empleado en los ensayos, independientemente del método de cultivo empleado: Ni sobre mortero MPC, ni sobre superficies pétreas, ni, en su momento, sobre espumas cerámicas (ver apartado 4.2). No se ha dispuesto sobre geocompuesto. Sin embargo, los tapices recogidos de su emplazamiento natural para su uso en las distintas fases de la investigación se mantienen en buen estado durante meses sobre sustrato universal de jardinería en una habitación interior sin apenas climatización.

Teniendo en cuenta:

- La variedad de técnicas de cultivo que se han intentado
- La baja incidencia que se estima tienen las condiciones climáticas sobre los cultivos, y a que los tapices sobre sustrato universal se mantienen en buen estado
- Las características propias de la especie que la hacen a priori buena candidata para el cometido propuesto

El fallo de los cultivos sobre los sustratos empleados, piedra y mortero MPC, se atribuye a las siguientes causas:

- En el caso del mortero MPC, se estima que su alta salinidad impide el crecimiento del briófito, tal y como se recoge en la bibliografía sobre la cuestión^{21,22,23}
- En el caso de los cultivos sobre superficies pétreas, el régimen de riego empleado propició su colonización por hongos y mohos
- Se desconoce la causa del fallo del cultivo sobre espumas cerámicas

Cultivos con especies de briófitos autóctonas

Las especies autóctonas (*Tortula muralis Hedw* y *Bryum argenteum Hedw*) no han prosperado sobre mortero MPC cuando se han cultivado con la técnica “batido de musgo”; sí que han prosperado cuando se han diseminado ejemplares adultos sobre geocompuesto y sobre mortero MPC. No obstante, el alcance del ensayo ha sido muy limitado, lo que impide inferir conclusiones definitivas.

La razón de que los ejemplares adultos sobrevivan sobre el mortero MPC, pese a su alta salinidad, se atribuye a dos posibles razones:

- Una tolerancia superior a la salinidad de las especies *Tortula muralis Hedw* y *Bryum argenteum Hedw* sobre la que tiene la especie *Hypnum Cupressiforme*. En todo caso, esta tolerancia superior a la salinidad es hipotética, ya que no está documentada bibliográficamente
- Que la presencia de sustrato adherido a los rizoides del briófito sirva de atenuante de la salinidad del mortero MPC

Es relevante que la técnica de cultivo "batido de musgo" no ha sido efectiva tampoco con estas especies, mientras que la reproducción a partir de ejemplares adultos sí lo es. En general, los resultados recogidos en la tesis parecen confirmar la aseveración de algunos expertos que consideran que el "batido de musgo" es un método que presenta una tasa de éxito baja²⁴.

En todo caso, el empleo de otras especies constituye una línea de investigación futura, ya sea por su mejor adaptación al mortero MPC, a las condiciones climáticas o por sus necesidades hídricas.

Cultivos con microalgas

El mortero MPC presenta una bio-receptividad muy mejorada frente al mortero Portland tradicional cuando se ha ensayado con cultivos de microalgas, ya que el ratio de generación de biomasa en el mortero MPC es 5 veces el ratio de generación de biomasa obtenido en el mortero Portland tradicional. No obstante, es necesario realizar un ensayo de mayor alcance para alcanzar conclusiones rigurosas.

Se estima que la alta salinidad del mortero MPC fabricado es el principal factor que lastra su bio-receptividad, dado que otras propiedades de gran importancia, como la porosidad y el pH, presentan valores muy satisfactorios.

Esta conclusión es coherente con los resultados obtenidos en los cultivos de briófitos y de microalgas, ya que, en el cultivo de microalgas, la superficie del mortero es constantemente lavada con agua, arrastrando las sales solubles de la superficie del mortero MPC, lo que no sucede con el riego por spray o capilaridad efectuado en el cultivo de briófitos.

8.7. Referencias

-
- 1 Guillitte, O., Dreesen, R.
Laboratory chamber studies and petrographical analysis as bioreceptivity assessment tools of building materials (1995) *Science of the Total Environment*, 167 (1-3), pp. 365-374
- 2 Hill, A.S., Hawkins, S.J.
An investigation of methods for sampling microbial films on rocky shores (1990) *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 70 (1), pp. 77-88
- 3 Prieto, B., Silva, B., Lantes, O.
Biofilm quantification on stone surfaces: Comparison of various methods (2004) *Science of the Total Environment*, 333 (1-3), pp. 1-7
- 4 Manso, S.; De Muynck, W.; Segura, I.; Aguado, A.; Steppe, K.; Boon, N.; De Belie, N.
Bioreceptivity evaluation of cementitious materials designed to stimulate biological growth. (2014) *Science of the Total Environment*, 481, pp. 232-241
- 5 Manso, S., Calvo-Torras, M.T., De Belle, N., Segura, I., Aguado, A.
Evaluation of natural colonisation of cementitious materials: Effect of bioreceptivity and environmental conditions (2015) *Science of the Total Environment*, 512-513, pp. 444-453
- 6 Miñón, J., Ruiz, G., Navas, L.M., Rad, C., Martínez, V.
Sistema de monitorización del crecimiento de algas filamentosas basado en análisis de imagen (2014) I Symposium Nacional de Ingeniería Hortícola "La Agromótica en la Horticultura"
- 7 LabVIEW
<http://www.ni.com/labview/why/esa>
- 8 Miñón, J., Ruiz, G., Navas, L.M., Rad, C., Martínez, V.
Sistema de monitorización del crecimiento de algas filamentosas basado en análisis de imagen (2014) I Symposium Nacional de Ingeniería Hortícola "La Agromótica en la Horticultura"
- 9 Tran, T.H., Govin, A., Guyonnet, R., Grosseau, P., Lors, C., Damidot, D., Deves, O., Ruot, B.
Influence of the intrinsic characteristics of mortars on their biofouling by pigmented organisms: Comparison between laboratory and field-scale experiments (2014) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 86, pp. 334-342
- 10 Martin, A.
Moss gardening (2015) ISBN 978-1-60469-560-1, pp. 1
- 11 Wall, R.
Gathering moss (2003) ISBN 0 087071-499-6, pp. 131
- 12 Manso, S.; De Muynck, W.; Segura, I.; Aguado, A.; Steppe, K.; Boon, N.; De Belie, N.
Bioreceptivity evaluation of cementitious materials designed to stimulate biological growth. (2014) *Science of the Total Environment*, 481, pp. 232-241
- 13 LIFE+ IntegralCarbon
(2013) Programa life
<http://www.integralcarbon.eu/>
- 14 Miñón, J., Ruiz, G., Navas, L.M., Rad, C., Martínez, V.
Sistema de monitorización del crecimiento de algas filamentosas basado en análisis de imagen (2014) I Symposium Nacional de Ingeniería Hortícola "La Agromótica en la Horticultura"
- 15 LabVIEW
<http://www.ni.com/labview/why/esa>
- 16 Miñón, J.
Desarrollo y análisis técnico-económico de la gestión de nutrientes residuales en la producción de biomasa de algas para fines agrícolas y ganaderos (2017) Universidad de Valladolid, PhD thesis
- 17 Íbid.

18 Íbid.

19 Datos climáticos 2015-2017
<http://www.meteoclimatic.net/>

20 Fletcher, M.
Moss grower's handbook
(1991) ISBN 0 95171760 X, pág 21

21 Hill, M. ;Preston, C. ; Bosanquet, S. ; Roy, D.
BRYOATT Attributes of British and Irish Mosses, Liverworts and Hornworts
(2007) ISBN: 9781855312364, pp. 26

22 Shaw, J., Goffinet B.
Bryophyte Biology
(2000) ISBN: 0521667941, 9780521667944, pp. 339

23 Como se evalua la salinidad
<http://estaciones.ivia.es/evaluar.html>

24 Martin, A.
Moss gardening
(2015) ISBN 978-1-60469-560-1

Conclusiones finales. Líneas de investigación futuras

a) Conclusiones finales

El trabajo de investigación realizado en la presente tesis doctoral explora una vía para construir una piel arquitectónica de fachada con bio-receptividad mejorada, compuesta por un mortero tipo MPC, aligerado mediante adición de PU, sobre el que se cultiva una especie vegetal pionera.

Se trata de buscar una alternativa a los sistemas existentes de jardinería vertical que implique bajos o nulos costes de mantenimiento, en contraposición a los elevados costes de implantación y mantenimiento que tienen los sistemas actualmente existentes.

Para documentar la tesis, se ha revisado el estado del arte en cuanto a:

- Sistemas de fachadas verdes
- Empleo de briófitos en la edificación
- Investigaciones sobre materiales y sistemas constructivos con bio-receptividad mejorada

Se han extraído las siguientes conclusiones:

- Se ha propuesto un briófito de tipo pleurocárpico (tapizante) como especie vegetal pionera para el sistema constructivo propuesto, en concreto, la especie *Hypnum Cupressiforme*
- No se ha podido evaluar la idoneidad de la especie *Hypnum Cupressiforme* para el uso propuesto, puesto que el mortero MPC fabricado ha resultado demasiado salino para dicha especie, impidiendo su crecimiento. Como alternativa, se han empleado especies autóctonas acrocárpicas (*Tortula muralis Hedw* y *Bryum argenteum Hedw*) que han prosperado sobre el mortero MPC pese a su alta salinidad
- La técnica de cultivo del briófito sobre el mortero MPC inicialmente escogida, "batido de musgo", no ha ofrecido resultados positivos en ningún caso, mientras que el cultivo a partir de fragmentos de ejemplares maduros ha obtenido resultados positivos cuando se ha empleado con las especies autóctonas mencionadas
- Se ha ampliado una línea de investigación existente sobre materiales de construcción bio-receptivos, en concreto la que versa sobre el empleo de morteros con bio-receptividad mejorada fabricados a partir de aglomerante MPC (del inglés "Magnesium phosphate cement"), un cemento de fosfato magnesio
- Es posible la fabricación de mortero MPC mediante el empleo de sub-productos industriales, en vez de reactivos químicos de gran pureza, con el consiguiente abaratamiento de su coste económico. En concreto, se ha fabricado mortero MPC sustituyendo uno de los dos reactivos químicos principales, la magnesita sinterizada de gran pureza (riqueza MgO 98%) por los siguientes productos:
 - Magnesita sinterizada de menor pureza (riqueza MgO 83%) con dos tamaños de partícula distintos
 - Magnesita calcinada PC (riqueza MgO 65%), sub-producto industrial en forma de polvo de ciclón (PC) generado durante la obtención de la magnesita sinterizada

- La adición como árido de residuos de espuma de poliuretano (PU), procedentes de la industria del automóvil permite aligerar el mortero MPC fabricado; el empleo de esta fuente de PU, en conjunción con el uso de PC como fuente de MgO, mejora la sostenibilidad del material con bio-receptividad mejorada propuesto
- Se establece una dosificación apropiada del mortero MPC para cada una de las tres fuentes de MgO empleadas en la tesis
- El mortero MPC fabricado a partir de polvo de ciclón (PC) cumple con la mayor parte de los parámetros deseados establecidos a priori:
 - Su resistencia mecánica es apropiada para ser empleado como revestimiento, pero cuando el mortero MPC se aligera con un 1% en peso de PU, el valor obtenido de resistencia a compresión es inferior al deseado, por lo que dicha resistencia a compresión constituye un factor limitante en el aporte de PU
 - La densidad del mortero MPC es un 20% superior a la deseada, lo que se corrige cuando se aporta un 1% en peso de PU
 - La porosidad supera holgadamente los valores establecidos a priori, siendo el resultado obtenido muy satisfactorio
 - El pH del mortero MPC es de alrededor de 7. Este resultado es muy satisfactorio, ya que un valor de PH adecuado es el factor más determinante en la bio-receptividad de un material
 - El mortero MPC fabricado es heladizo
 - La conductividad eléctrica determina que el mortero MPC fabricado es un sustrato extremadamente salino. Este resultado es considerado muy negativo si tenemos en cuenta que los briófitos son, en general, muy sensibles a la salinidad. La salinidad del mortero MPC fabricado se manifiesta en los ensayos en la formación de eflorescencias y cristales salinos tras períodos de inmersión en agua
- En cuanto a la bio-receptividad del mortero MPC fabricado, se considera que su alta salinidad impide el crecimiento de la especie de briófito *Hypnum Cupressiforme*, pero no inhibe el crecimiento de las especies autóctonas *Tortula muralis Hedw* y *Bryum argenteum Hedw*; esto se explica en función de una hipotética mayor tolerancia a la salinidad de dichas especies
- El mortero MPC fabricado presenta una bio-receptividad muy mejorada respecto al mortero Portland tradicional en cuanto a los cultivos de microalgas realizados, lo que se atribuye a que, en este tipo de cultivo, la superficie del mortero es constantemente lavada con agua, arrastrando las sales solubles de la superficie del mortero MPC, disminuyendo así su salinidad
- Para perfeccionar el mortero MPC fabricado de cara a su uso como sustrato bio-receptivo, es necesario corregir su alta salinidad, ya que la experimentación realizada arroja valores muy satisfactorios de las otras propiedades intrínsecas consideradas de gran importancia para su bio-receptividad, como la porosidad y el Ph

b) Líneas de investigación futuras

En la presente tesis, se ha propuesto el diseño de una "piel" de fachada bio-receptiva, entendiendo como "piel" la capa más externa de la envolvente vertical de los edificios y/o construcciones.

La tesis ha contemplado el desarrollo de dicho sistema constructivo, desde su base teórica a su materialización mediante la fabricación de mortero en laboratorio y el cultivo sobre el mortero de la especie vegetal seleccionada.

Es obvio que, dado lo novedoso del tema propuesto, la investigación no queda ni mucho menos agotada con la presente tesis, sino que más bien se han puesto los cimientos para el desarrollo y perfeccionamiento del sistema propuesto.

En última instancia, la piel de fachada bio-receptiva descrita en esta tesis tendrá que responder, en el desarrollo de investigaciones futuras, a cuestiones tan fundamentales como las siguientes:

- A nivel ambiental, un diseño como el propuesto, ¿cuánta biomasa puede generar a gran escala?
- A nivel estético, ¿este tipo de pieles bio-receptivas serían bien aceptadas por los habitantes de las ciudades o los futuros usuarios de los edificios y/o construcciones donde se implantarían?

Pero a corto plazo, se proponen las siguientes líneas de investigación para dar respuesta a las preguntas surgidas en el desarrollo de la tesis:

Mejora de la trabajabilidad del mortero MPC fabricado a partir de PC

Tal y como se ha reflejado en el capítulo 5, la trabajabilidad de las muestras de mortero MPC fabricadas a partir de polvos de ciclón (PC) como fuente de MgO es muy baja, inferior al minuto. Una causa posible es la presencia en el PC de carbonato magnésico ($MgCO_3$), ya que puede hacer que la reacción ácido-base sea más rápida debido a que la disociación del carbonato es más rápida que la de la magnesia.

Teóricamente, sería posible hidratar el PC antes de mezclarlo con el resto de componentes del cemento para apagar su actividad, mejorando así su trabajabilidad.

Por tanto, una línea de investigación futura es determinar si la hidratación del PC mejora la trabajabilidad del mortero MPC, y de ser así, definir una dosificación adecuada de PC hidratado, la proporción de agua para hidratarlo así como los tiempos de hidratación necesarios.

Disminución de la salinidad del mortero MPC fabricado

Para corregir la alta salinidad del mortero MPC es necesario encontrar su causa, determinando la cantidad y tipo de aniones y cationes que se liberan en el mortero, provenientes de sus distintos componentes.

En el caso del PC, su hidratación sirve, además de para mejorar la trabajabilidad, para eliminar parte de dichos aniones y cationes.

Completar la caracterización del mortero MPC fabricado

Otra línea de investigación futura es completar y profundizar en la caracterización del mortero MPC fabricado. Para ello se puede:

- Caracterizar la red capilar originada en el mortero sin árido y al emplear como árido PU
- Caracterizar el mortero MPC fabricado en su comportamiento frente al fuego y en su conductividad térmica

- Realizar otros ensayos de durabilidad:
 - Resistencia al dióxido de azufre. Ensayo Kesternich
 - Comportamiento frente a ciclos de humedad-sequedad
 - Comportamiento frente a solución salina

Desarrollar y evolucionar el material fabricado

Otra línea de investigación futura es, a partir de los conocimientos desarrollados en esta tesis doctoral, evolucionar la composición del mortero MPC fabricado para mejorar sus características o abaratar su producción:

- Dado que el grado de reactividad y el tipo de iones liberados son factores clave, se puede valorar el empleo, como alternativa al PC, de materiales similares como son las CCM (cáusticas calcinadas); se trataría de mejorar las propiedades más desfavorables del mortero MPC fabricado en la presente tesis, como su salinidad o su trabajabilidad
- Ya que la fuente ácida de fosfato empleada, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, es una materia prima de elevado coste al ser un producto químico de grado reactivo, se conseguiría disminuir el precio final del mortero al sustituirlo por otra fuente de fosfato de menor riqueza, como el dihidrogenofosfato de potasio o fosfato monopotásico (MKP) de grado alimentario propuesto en su investigación por Formosa, J.

Sistema de puesta en obra

Se ha propuesto, en el Capítulo 4, que la piel de fachada planteada sea puesta en obra de tal modo que se asemeje a una "rocalla" artificial, en la que la especie de briófito prospere en los puntos de la superficie generada donde se den las condiciones apropiadas. Es necesario investigar sobre la viabilidad de este sistema de puesta en obra a partir de los datos de trabajabilidad y resistencias mecánicas obtenidos en la experimentación de la tesis.

Implantación del briófito en el mortero MPC

Otra línea de investigación futura pasa por mejorar la implantación del briófito en el mortero MPC:

- Tras la experiencia adquirida se estima muy interesante ampliar la investigación a un amplio espectro de especies de briófitos, evaluando las circunstancias en las que se pudiera optimizar el rendimiento de cada una de ellas
- También es necesario alcanzar una conclusión definitiva sobre el método de cultivo más efectivo para el sistema planteado
- Otra posibilidad es potenciar el anclaje del briófito al mortero MPC mediante hormonas vegetales (auxinas artificiales) para inducir un mejor desarrollo de los rizoides

Mortero MPC como sustrato bio-receptivo para microalgas

Por último, dado que el resultado parcial obtenido en la tesis ha sido muy satisfactorio, otra línea de investigación es desarrollar un estudio específico para evaluar la capacidad del mortero MPC como sustrato bio-receptivo para el cultivo de microalgas

Apéndice: Producción científica directamente relacionada con esta tesis doctoral

a) Patentes de invención

Descripción de la invención:	Mortero con aglomerante de cemento de magnesio-fosfato y componentes procedentes de usos industriales
Inventores:	Daniel Garabito López y Roberto Vallejo Diez
Entidad depositaria:	Universidad de Burgos
Nº de solicitud:	P201730424, Marzo2017

b) Becas obtenidas

V Convocatoria de becas para el desarrollo de proyectos Programa Prototipo Comercializables

Proyecto:	Diseño de un panel de fachada de una especie de briófito tapizante cuyo mantenimiento sea nulo o casi nulo
Autores:	Daniel Garabito López y Roberto Vallejo Diez
Convocante:	Universidad de Burgos. Proyecto de Desarrollo de Actividades de Transferencia de Conocimiento desde la Universidad de Burgos hacia el tejido empresarial (proyecto TCUE)
Lugar y fecha:	Burgos, 2013-2014

c) Artículos publicados

Título:	"Envolventes verdes con briófitos. Una revisión del estado del arte"
Revista:	Boletín sociedad española de briología (BSEB)
Autores:	Daniel Garabito López, Roberto Vallejo Diez, Eduardo Montero García, Javier Garabito López y Javier Martínez Abaigar
Estado:	En revisión, Noviembre 2016

d) Congresos nacionales e internacionales

Título: **"Sistemas constructivos de fachadas que incorporan vegetación para acondicionamiento energético y ambiental. Una revisión del estado del arte"**

Autores: Daniel Garabito López, Roberto Vallejo Diez y Eduardo Montero García.

Evento: 9º Congreso Nacional de Ingeniería Termodinámica (9CNIT)

Lugar y fecha: Cartagena, Junio 2015

Título: **"Use of bryophytes in the building envelope. A review of the state of the art"**

Autores: Daniel Garabito López, Roberto Vallejo Diez y Javier Garabito López.

Evento: III International congress on construction and building research (COINVEDI 2015)

Lugar y fecha: Madrid, Diciembre 2015

Título: **"Strategies to increase urban green areas: Comparative study between living wall systems and façade skins built with energy efficient bio-receptive materials"**

Autores: Daniel Garabito López, Roberto Vallejo Diez, Carlos Rad Moradillo, Eduardo Montero García y Javier Garabito López.

Evento: 30th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems

Lugar y fecha: San Diego, Estados Unidos, Julio 2017
