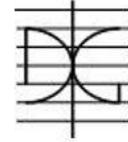




UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



DEPARTAMENTO
DE INGENIERÍA DE
LA CONSTRUCCIÓN
Y DE PROYECTOS DE
INGENIERÍA CIVIL

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DEL HORMIGÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER
CURSO ACADÉMICO 2020/2021

**Aplicación de bacterias en hormigón y
mortero como método de autosanado**

Autor/a: Javier De Jesús Estacio Cumberbatch

Tutor/a: Pedro Serna Ros

Cotutor/a: Marta Roig Flores

Valencia, septiembre de 2021

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA
CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



A mi familia, con amor,
especialmente a mi padre, Francisco

Agradecimientos

Aprovecho este espacio para agradecer a todas las personas que, de alguna manera u otra, me ayudaron en la ardua labor de hacer este TFM.

Empiezo agradeciendo a mis tutores Pedro Serna y Marta Roig. Son personas con un amplio conocimiento sobre el hormigón y se les nota la pasión que sienten por la investigación. Me han guiado bien a lo largo de este trabajo, aunque si no fuera porque me tenía que regresar a mi país, me seguirían bombardeando con más experimentos. Esos “¡aquí nunca te vas a quedar sin trabajar, eh!” de Pedro, aunque los decía en tono de broma, no eran broma.

Agradezco al Paco, crack del laboratorio. Cuando no está ocupado y/o estresado con todo lo que lo mandan a hacer en el laboratorio, es buen tipo. Siempre estuvo atento a cualquier ensayo o amasada que necesitara hacer y me echaba una mano cuando podía. Reitero que es un crack.

Gracias a todas las personas del laboratorio por ofrecerme su ayuda y/o conocimientos. Gracias a Lourdes y Jordi por el apoyo en la parte química. Gracias a Hesam por ayudar con los ensayos en los momentos en los que estaba disponible. Y gracias a Sidiclei por ayudarme a aprender acerca de los ensayos y como preparar todo para las amasadas, además de mantener la buena vibra y enseñarme cosas de Brasil. Eguinha Pocotó.

Gracias a mis amigos del MUIH, por su ayuda a lo largo del máster. En realidad, no tendría otra excusa para mencionarlos ya que no aportaron nada en este trabajo, pero hicieron menos estresante la odisea del máster y los aprecio por eso.

Gracias a los amigos internacionales que hice en Valencia, por su incesante y verdaderamente asombrosa capacidad para distraerme de mis obligaciones y hacer que me divirtiera un poco. Dicen por ahí que hay tiempo para todo así que... ¿por qué no?

A mi familia, por siempre estar ahí, preocupándose por mí y preguntando todos los días cuándo iba a terminar con el trabajo. Esto último fue muy efectivo para motivarme a siquiera empezarlo. Realmente se les agradece. Sobre todo, gracias a mi madre por todas las veces que rezó por mí y a mi padre por todas las veces que me motivó a seguir adelante y decirme lo orgulloso que estaba de las cosas que hacía y aprendía.

Y, por último, pero no por eso menos importante, gracias a Dios por hacer que nuestros caminos se cruzaran y por hacer posible este trabajo.

Índice

CAPÍTULO 1	1
Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos de esta investigación	2
1.3 Estructura del documento	3
CAPÍTULO 2	4
Estado del arte	4
2.1 Introducción al hormigón autosanable	4
2.2 Mecanismos de autosanado	5
2.3 Autosanado autógeno	7
2.3.1 <i>Factores que influyen en el autosanado autógeno</i>	7
2.3.2 <i>Límite de cierre de fisuras según ambientes</i>	9
2.4 Autosanado autónomo	11
2.4.1 <i>Tipos de agentes del autosanado autónomo</i>	12
2.4.1.1 Polímeros superabsorbentes (SAP).....	12
2.4.1.2 Adiciones cristalinas (CA).....	14
2.4.1.3 Adhesivos y otros reactivos encapsulados.....	15
2.4.1.3.1 <i>Capsulas dispersas</i>	15
2.4.1.3.2 <i>Cápsulas localizadas</i>	16
2.4.3.1.3 <i>Áridos porosos</i>	17
2.5. Autosanado con agentes biológicos: bacterias	18
2.5.1 <i>Concepto</i>	18
2.5.1.1 Hidrólisis de urea.....	18
2.5.1.2 Desnitrificación.....	19
2.5.1.3 Amonificación.....	19
2.5.1.4 Reductoras de sulfatos.....	20
2.5.1.5 Fotosintéticas.....	20
2.5.1.6 Oxidación de metano.....	21
2.5.2 <i>Incorporación al hormigón</i>	21
2.5.2.1 Microencapsulación.....	21
2.5.2.2 Inmovilización en materiales porosos.....	22
2.5.2.3 Encapsulación en hidrogeles.....	24
2.5.3 <i>Proyectos con hormigón autosanable con bacterias</i>	24
2.6 Discusión	26

CAPÍTULO 3.	28
Fase experimental	28
3.1 Objetivo específicos	28
3.2 Campaña experimental	29
3.2.1 Morteros	29
3.2.2 Hormigones	30
3.3 Materiales	30
3.3.1 Cemento	30
3.3.2 Agua	31
3.3.3 Áridos	31
3.3.4 Aditivos	31
3.3.5 Adiciones	31
3.3.6 Fibras	32
3.3.7 Bacterias	32
3.4 Metodología	35
3.4.1 <i>Diseño de mezcla</i>	35
3.4.1.1 Morteros con Serenade Max	35
3.4.1.2 Morteros con Serbiotec	37
3.4.1.3 Hormigones con Serenade Max	38
3.4.1.4 Hormigones con Serbiotec	39
3.4.1.5 Proceso de mezclado y ensayos de control realizados	40
3.4.2 <i>Metodología de autosanado</i>	43
3.4.2.1 Fase de prefisuración	43
3.4.2.2 Medición de fisuras	44
3.4.2.3 Fase de sanado	45
3.4.2.4 Ensayo de permeabilidad	46
3.4.2.5 Ensayo de penetración de cloruros	47
CAPÍTULO 4.	50
Resultados y discusión	50
4.1 Introducción	50
4.2 Presentación de resultados	50
4.2.1 <i>Ensayos de control en morteros</i>	50
4.2.1.1 Trabajabilidad con Serenade Max	50
4.2.1.2 Trabajabilidad con Serbiotec	54
4.2.1.3 Resistencia a compresión	58
4.2.2 <i>Ensayos de control en hormigones</i>	58

4.2.2.1 Consistencia con Serenade Max	58
4.2.2.2 Consistencia con Serbiotec	61
4.2.2.3 Resistencia a compresión	62
4.2.3 <i>Autosanado en morteros</i>	64
4.2.3.1 Prefisuración y aberturas de fisura	64
4.2.3.2 Evaluación del cierre de fisuras	66
4.2.4 <i>Autosanado en hormigones</i>	68
4.2.4.1 Abertura inicial de fisura	68
4.2.4.2 Permeabilidad	72
4.2.4.3 Evaluación de cierre de fisuras	75
4.2.4.4 Penetración de cloruros	88
4.2.4.5 Análisis adicionales	103
4.3 Discusión	106
CAPÍTULO 5.	111
Conclusiones y futuras líneas	111
5.1 Conclusiones	111
5.2 Futuras líneas	112
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113

Lista de figuras

Figura 1. Publicaciones totales (eje vertical izquierdo) y número de citas (eje vertical derecho) por año en el tema de hormigón autosanable (Tsangouri, 2019).....	4
Figura 2. Diagrama Venn de la clasificación de autosanado/reparación en fisuras (Igarashi et al., 2009).....	6
Figura 3. Posibles causas del autosanado autógeno (De Rooij et al., 2013).....	8
Figura 4. Cierre de fisura (%) vs apertura inicial de fisura para diferentes ambientes (Cuenca & Serna, 2021).....	10
Figura 5. Partícula de SAP a medida que absorbe agua (Snoeck et al., 2014a).....	12
Figura 6. Tamaño de partículas de SAP (Kang et al., 2018).....	13
Figura 7. Comparación entre partículas de cemento y adiciones cristalinas (Roig-Flores, 2015).....	15
Figura 8. Esquema del ensayo con tubos de cerámica y vidrio (Van Tittelboom et al., 2011b).....	16
Figura 9. Red vascular en 2D liberando silicato sódico (De Belie et al., 2018).....	17
Figura 10. Método de impregnación del árido ligero (Alghamri et al., 2016).....	18
Figura 11. Proceso de precipitación de carbonato cálcico (Hammes & Verstraete, 2002).....	18
Figura 12. Proceso de impregnación de bacterias en tierra de diatomeas (Wang et al., 2012).....	23
Figura 13. Medio comparativo entre la perlita expandida y la arcilla expandida, como portadoras de bacterias (Zhang et al., 2017).....	23
Figura 14. Sanación de apertura de fisura (mm) a) serie prefisurada a los 7 días b) serie prefisurada a los 28 días (Rauf et al., 2020).....	24
Figura 15. Producto Basilisk Healing Agent (Basilisk Self-Healing Concrete, 2021)....	25
Figura 16. Producto CERUP de 5L (izq.) y 50L (der.) (Bravo Da Silva et al., 2015).....	26
Figura 17. Probetas prismáticas de mortero.....	29
Figura 18. Probetas cúbicas y cilíndricas UHPC (izq.) y OPC (der.).....	30
Figura 19. Materiales de una amasada de hormigón OPC (izq) y UHPC (der).	31
Figura 20. Producto Serenade Max.....	32
Figura 21. Producto Serbiotec.....	34
Figura 22. Porcentaje de bacterias en el producto Serbiotec por tipo.....	35
Figura 23. Esquema de amasado.....	41
Figura 24. Amasadoras para morteros (izq) y hormigones (der).....	42
Figura 25. Máquina Ibertest (izq) y accesorio para ensayar morteros a compresión (der).....	42
Figura 26. Introducción de parámetros para prefisurar morteros.....	43
Figura 27. Equipo para prefisurar morteros (INSTRON, izq) y discos de hormigón (Ibertest, der).....	44
Figura 28. Esquema de medición de un disco de hormigón (izq) y un prisma de mortero (der).....	45
Figura 29. Medición de un disco antes (izq) y después (der) de sanar.....	45
Figura 30. Exceso de precipitado sobre una fisura.....	45
Figura 31. Ambientes de sanado: inmersión en agua (izq) y cámara húmeda (der).....	46
Figura 32. Ensayo de permeabilidad.....	47
Figura 33. Ensayo de penetración de cloruros.....	47
Figura 34. Disco OPC penetrado por cloruros (izq) y disco UHPC no penetrado (der).	48

Figura 35. Esquema de medición de penetración de cloruros.....	48
Figura 36. Discos OPC de referencia (R).....	49
Figura 37. Mortero UHPC con 30 kg/m ³ de Serenade Max, sin reaccionar después del tiempo de amasado.....	51
Figura 38. Consistencia de morteros con Serenade Max.....	51
Figura 39. Mediciones del mortero OPC en la mesa de sacudidas antes (izq) y después (der) de los golpes para contenidos de bacteria de a) 0 kg/m ³ b) 7.5 kg/m ³ c) 15 kg/m ³ d) 30 kg/m ³	52
Figura 40. Mediciones del mortero HPC en la mesa de sacudidas antes (izq) y después (der) de los golpes para contenidos de bacteria de a) 0 kg/m ³ b) 7.5 kg/m ³ c) 15 kg/m ³ d) 30 kg/m ³	53
Figura 41. Mediciones del mortero UHPC en la mesa de sacudidas después de levantar el molde para contenidos de bacteria de a) 0 kg/m ³ b) 7.5 kg/m ³ c) 15 kg/m ³	54
Figura 42. Mediciones del mortero OPC en la mesa de sacudidas antes (izq) y después (der) de los golpes para contenidos de bacteria de a) 0% b) 10% c) 25% d) 50%.....	55
Figura 43. Mediciones del mortero HPC en la mesa de sacudidas antes (izq) y después (der) de los golpes para contenidos de bacteria de a) 0% b) 10% c) 25% d) 50%.....	56
Figura 44. Mediciones del mortero UHPC en la mesa de sacudidas para contenidos de bacteria de a) 0% b) 10% c) 25% d) 50%.....	57
Figura 45. Trabajabilidad de morteros con Serbiotec.....	57
Figura 46. Resistencia a compresión de morteros con Serbiotec.....	58
Figura 47. Ensayo de cono de los hormigones OPC a) 0 kg/m ³ , b) 7.5 kg/m ³ , c) 15 kg/m ³	59
Figura 48. Ensayo de cono de los hormigones HPC a) 0 kg/m ³ , b) 7.5 kg/m ³ , c) 15 kg/m ³	59
Figura 49. Ensayo de escurrimiento de los hormigones UHPC a) 0 kg/m ³ , b) 7.5 kg/m ³ , c) 15 kg/m ³ inicial, d) 15 kg/m ³ con agua extra.....	60
Figura 50. Consistencia de los hormigones con Serenade Max.....	61
Figura 51. Ensayo de cono de los hormigones a) OPC, b) HPC y c) ensayo de escurrimiento de UHPC.....	62
Figura 52. Consistencia de los hormigones con Serbiotec.....	62
Figura 53. Resistencia a compresión de hormigones con Serenade Max.....	63
Figura 54. Resistencia a compresión de hormigones con Serbiotec.....	63
Figura 55. Huecos en la matriz del hormigón HPC-25%.....	64
Figura 56. Resistencia a flexión de prismas con Serbiotec.....	64
Figura 57. Aberturas de fisura en las series OPC-REF, HPC-REF, UHPC-REF, OPC-10%, HPC-10%, UHPC-10%, OPC-25%, HPC-25%, UHPC-25%, OPC-50%, HPC-50% y UHPC-50%.....	65
Figura 58. Cierre de fisura vs abertura de fisura inicial de morteros con Serbiotec.....	66
Figura 59. Cierre de fisura vs abertura de fisura de a) referencias, b) series OPC, c) series HPC, d) series UHPC.....	67
Figura 60. Aberturas de fisura de las series de hormigón OPC A (izq) y OPC D* (der).....	69
Figura 61. Aberturas de fisura de las series de hormigón HPC A (izq) y HPC D (der).....	70
Figura 62. Aberturas de fisura de las series de hormigón UHPC A (izq) y UHPC D (der).....	71
Figura 63. Eficiencia vs abertura de fisura inicial de hormigones.....	72
Figura 64. Eficiencia vs abertura de fisura a) referencias A, b) referencias D.....	73

Figura 65. Eficiencia vs abertura de fisura c) series OPC A, d) series OPC D*, e) series HPC A, f) series HPC D, g) series UHPC A, h) series UHPC D.....	74
Figura 66. Fisuras antes (izq), después de 7 días (centro) y 28 días (der) del sanado en discos de hormigón OPC-7.5kg/m ³ (a,b,c) y OPC-15kg/m ³ (d,e,f) en el ambiente D* (7d agua + 21d cámara húmeda).....	75
Figura 67. Fisuras antes (izq) y después (der) del sanado en discos de hormigón OPC-7.5kg/m ³ (a,b) y OPC-15kg/m ³ (c,d) en el ambiente A.....	76
Figura 68. Fisuras antes (izq) y después (der) del sanado en discos de hormigón OPC-25% en el ambiente A (a,b) y en el ambiente D (c,d).....	76
Figura 69. Fisuras antes (izq) y después (der) del sanado en discos de hormigón HPC-7.5kg/m ³ en el ambiente A (a,b) y en el ambiente D (c,d).....	77
Figura 70. Fisuras antes (izq) y después (der) del sanado en discos de hormigón HPC-15kg/m ³ en el ambiente A (a,b) y en el ambiente D (c,d).....	77
Figura 71. Fisuras antes (izq) y después (der) del sanado en discos de hormigón HPC-25% en el ambiente A (a,b) y en el ambiente D (c,d).....	78
Figura 72. Fisuras antes (izq) y después (der) del sanado en discos de hormigón UHPC-REF en el ambiente A (a,b) y en el ambiente D (c,d).....	78
Figura 73. Fisuras antes (izq) y después (der) del sanado en discos de hormigón UHPC-7.5kg/m ³ en el ambiente A (a,b) y en el ambiente D (c,d).....	79
Figura 74. Fisuras antes (izq) y después (der) del sanado en discos de hormigón UHPC-15kg/m ³ en el ambiente A (a,b) y en el ambiente D (c,d).....	79
Figura 75. Fisuras antes (izq) y después (der) del sanado en discos de hormigón UHPC-25% en el ambiente A (a,b) y en el ambiente D (c,d).....	80
Figura 76. Cierre de fisura vs abertura de fisura inicial de hormigones.....	80
Figura 77. Cierre de fisura vs abertura de fisura inicial a) referencias A, b) referencias D.....	81
Figura 78. Cierre de fisura vs abertura de fisura inicial c) series OPC A, d) series OPC D*, e) series HPC A, f) series HPC D, g) series UHPC A, h) series UHPC D.....	82
Figura 79. Cierre de fisura vs abertura de fisura inicial de hormigones y morteros con 25% Serbiotec, expuestos al ambiente A (sumergido en agua).....	83
Figura 80. Cierre de fisura vs flujo normalizado final de hormigones.....	84
Figura 81. Cierre de fisura vs flujo normalizado final a) series OPC A, b) series OPC D*, c) HPC A, d) HPC D, e) UHPC A, f) UHPC D.....	85
Figura 82. Eficiencia vs cierre de fisura de hormigones.....	86
Figura 83. Eficiencia vs cierre de fisura de hormigones a) series OPC A, b) series OPC D*, c) HPC A, d) HPC D, e) UHPC A, f) UHPC D.....	87
Figura 84. Penetración de cloruros P.....	88
Figura 85. Penetración de cloruros (P) vs abertura de fisura inicial.....	89
Figura 86. Penetración de cloruros (P) vs abertura de fisura inicial a) referencias A, b) referencias D.....	89
Figura 87. Penetración de cloruros (P) vs abertura de fisura inicial c) series OPC A, d) series OPC D*, e) series HPC A, f) series HPC D g) series UHPC A, h) series UHPC D.....	90
Figura 88. Penetración de cloruros (W) vs abertura de fisura inicial.....	91
Figura 89. Penetración de cloruros (W) vs abertura de fisura inicial a) referencias A, b) referencias D.....	92
Figura 90. Penetración de cloruros (W) vs abertura de fisura inicial c) OPC A, d) OPC D*, e) HPC A, f) HPC D, g) UHPC A, h) UHPC D.....	93
Figura 91. Penetración de cloruros (W) vs penetración de cloruros (P).....	94

Figura 92. Penetración de cloruros (W) vs penetración de cloruros (P) a) referencias A, b) referencias D.....	94
Figura 93. Penetración de cloruros (W) vs penetración de cloruros (P) c) OPC A, d) OPC D*, e) HPC A, f) HPC D, g) UHPC A, h) UHPC D.....	95
Figura 94. Penetración de cloruros (W) vs flujo normalizado final.....	96
Figura 95. Penetración de cloruros (W) vs flujo normalizado final a) referencias A, b) referencias D.....	96
Figura 96. Penetración de cloruros (W) vs flujo normalizado final c) OPC A, d) OPC D*, e) HPC A, f) HPC D, g) UHPC A, h) UHPC D.....	97
Figura 97. Penetración de cloruros (W) vs eficiencia.....	98
Figura 98. Penetración de cloruros (W) vs eficiencia a) referencias A, b) referencias D.....	98
Figura 99. Penetración de cloruros (W) vs eficiencia c) OPC A, d) OPC D*, e) HPC A, f) HPC D, g) UHPC A, h) UHPC D.....	99
Figura 100. Recorrido de los cloruros a través de los discos de hormigón a) paso total, b) sin paso c) paso parcial, d) paso bifurcado, e) otros.....	101
Figura 101. Cantidad de patrones de penetración de cloruros encontrados en las series OPC A y OPC D.....	101
Figura 102. Cantidad de patrones de penetración de cloruros encontrados en las series HPC A, HPC D, UHPC A y UHPC D.....	102
Figura 103. Evaluación química de los precipitados del autosanado.....	103
Figura 104. Microscopía de un grano de tierra de diatomeas con bacterias <i>Bacillus subtilis</i>	104
Figura 105. Microscopía de las bacterias <i>Bacillus subtilis</i> en el producto Serenade Max con 500 aumentos (izq) y 3000 aumentos (der).....	104
Figura 106. Colonia de <i>Bacillus subtilis</i> (SciencePhotoLibrary, 2021).....	105
Figura 107. Microscopía de una muestra de celulosa bacterial formando red 3-D (Torres et al., 2012).....	105
Figura 108. Formación de cadenas de carbonato cálcico en discos UHPC-15kg/m ³ D (sup) y UHPC-25% D (inf).....	106
Figura 109. Resultados de resistencia a compresión de hormigones con <i>B.subtilis</i> Mondal et al. (2017).....	107
Figura 110. Medidas de penetración de cloruros (Farzad et al,2019).....	108

Lista de tablas

<i>Tabla 1. Casos de estudio correspondientes a la clasificación de autosanado/repación (Igarashi et al., 2009).</i>	6
<i>Tabla 2. Resumen de campaña experimental.</i>	29
<i>Tabla 3. Composición de cada subproducto que contiene Serbiotec.</i>	33
<i>Tabla 4. Resumen de cálculo del contenido de bacterias en ml/L</i>	33
<i>Tabla 5. Resumen de cálculo de bacterias (UFC/ml)</i>	34
<i>Tabla 6. Dosificación de mortero OPC para Serenade Max.</i>	36
<i>Tabla 7. Dosificación de mortero HPC para Serenade Max</i>	36
<i>Tabla 8. Dosificación de mortero UHPC para Serenade Max</i>	36
<i>Tabla 9. Dosificación de mortero OPC para Serbiotec</i>	37
<i>Tabla 10. Dosificación de mortero HPC para Serbiotec</i>	37
<i>Tabla 11. Dosificación de mortero UHPC para Serbiotec</i>	38
<i>Tabla 12. Dosificación para hormigón OPC con Serenade Max</i>	38
<i>Tabla 13. Dosificación para hormigón HPC con Serenade Max</i>	39
<i>Tabla 14. Dosificación para hormigón UHPC con Serenade Max</i>	39
<i>Tabla 15. Dosificación para hormigón OPC con 25% Serbiotec</i>	40
<i>Tabla 16. Dosificación para hormigón HPC con 25% Serbiotec</i>	40
<i>Tabla 17. Dosificación para hormigón UHPC con 25% Serbiotec</i>	40
<i>Tabla 18. Consistencia de hormigones OPC y HPC (EHE-08)</i>	42
<i>Tabla 19. Consistencia de hormigones UHPC (European Guidelines of Self Compacting Concrete)</i>	43

CAPÍTULO 1.

Introducción

Esta tesis de Máster describe un proyecto llevado a cabo desde Febrero 2021 hasta Julio 2021 en el Instituto de Ciencias y Tecnología del Hormigón (ICITECH) en la Universitat Politècnica de València, España.

1.1 Antecedentes

La presencia de pequeñas fisuras en el hormigón armado suele ser inevitable. Esto se debe a su baja resistencia a tracción en comparación con su resistencia a compresión. Estas fisuras pueden dar paso a agentes agresivos que deterioran al hormigón o a las armaduras o bien, si es una estructura que requiere cierta estanqueidad, son una vía de escape para el contenido de dicha estructura. Para evitarlo, se recurre a métodos de reparación y/o mantenimiento, pero suelen ser costosos. Para evitar incurrir en estos gastos, se han analizado distintos métodos para que el hormigón sea capaz de cerrar estas fisuras por sí mismo. A esto se le conoce como autosanado.

Hay dos tipos de autosanado: el autógeno y el autónomo. El autosanado autógeno ocurre por la hidratación de las partículas de cemento aún sin reaccionar o por la carbonatación del hidróxido de calcio, mientras que el autónomo depende de agentes especiales que se añaden al hormigón para que reaccionen cuando aparezcan las fisuras. Hay diferentes agentes estudiados para conseguir el autosanado autónomo, como los polímeros superabsorbentes, las adiciones cristalinas y las bacterias, siendo estas últimas el objeto de esta investigación.

La aplicación de bacterias ha tenido lugar en tiempos antiguos y es relativamente común en muchas industrias en la actualidad. En la agroindustria, su uso está enfocado en compuestos para combatir insectos, hongos u otros agentes perjudiciales para los cultivos. En la medicina, se usan como control biológico de enfermedades y para la creación de vacunas y antibióticos (Ostos et al., 2018). Las bacterias pueden servir muchos propósitos, desde el tratamiento de aguas servidas hasta incluso la producción de fuentes de energía como el biogás. Por lo tanto, no suena extraño que se piense en utilizarlas en el hormigón como agente de autosanado, aunque es necesario utilizar un tipo específico de bacterias: las capaces de precipitar calcita o carbonato cálcico (CaCO_3).

La precipitación de calcita inducida por bacterias se ha vuelto un área de interés para el autosanado. Boquet et al (1973) fueron de los primeros investigadores en demostrar la habilidad que poseen algunas bacterias para precipitar carbonato de calcio bajo condiciones de laboratorio. Entre los organismos estudiados, se observó que muchas cepas *Bacillus* y *Pseudomonas aeruginosa* formaron cristales. A partir de ahí, muchos estudios se enfocaron en el uso de

bacterias para la restauración y protección de superficies de piedra (Adolphe et al.,1990). Los primeros en implementar estas técnicas en hormigón fueron Ramachandran et al (2001), que investigaron la remediación microbiológica de fisuras en el hormigón. Los especímenes rellenos con bacteria, nutrientes y arena tuvieron un aumento considerable de resistencia a compresión y rigidez en comparación a los de referencia.

Hoy en día, el estudio del hormigón autosanable con bacterias está tomando cada vez más importancia, incluso hasta con miras de introducirlo en el mercado, como están intentando ciertas empresas como Avecom y Basilisk. Sin embargo, los costos de producción de estos agentes microbiológicos diseñados específicamente para el autosanado son exorbitantes, lo que hace que sean productos muy caros con poco atractivo en el mercado. Normalmente, los estudios de autosanado con bacterias consisten en el cultivo de bacterias y el encapsulamiento de esas bacterias (y sus nutrientes) en algún material poroso o cápsula polimérica. Estos procedimientos consumen tiempo, mano de obra y recursos para los investigadores, además de que requieren equipos especializados para realizar el conteo de bacterias y la producción de cápsulas.

Por esta razón, el desarrollo de este trabajo se basará en el uso de agentes microbiológicos capaces de precipitar carbonato cálcico presentes en productos que se encuentran en mercados ajenos a la industria de la construcción. El uso de estos productos presenta una serie de ventajas entre las cuales están su accesibilidad en cuanto a precio y disponibilidad en el mercado y el ahorro de tiempo y recursos al no tener que cultivar bacterias. Este estudio será el primero en analizar la capacidad que tendrán estos productos para inducir el autosanado autónomo en el hormigón.

1.2 Objetivos de esta investigación

Los objetivos principales de esta investigación son:

- Desarrollar un estado del arte sobre el hormigón autosanable con bacterias.
- Analizar el potencial de autosanado de algunos productos microbiológicos disponibles en el mercado cuyo uso normal es ajeno a la industria del hormigón.
- Comprobar experimentalmente si el autosanado autónomo de las bacterias es más eficiente que el autosanado autógeno.
 - De ser ese el caso, determinar para qué tamaños de fisura y para qué tipo de ambiente lo es.

1.3 Estructura del documento

Este documento está organizado en cinco capítulos:

- Capítulo 1 es el capítulo introductorio actual.
- Capítulo 2 presenta el estado del arte sobre el hormigón autosanable.
- Capítulo 3 describe la fase experimental, incluyendo el programa experimental y la metodología de los ensayos.
- Capítulo 4 presenta los resultados de la fase experimental y la discusión de estos.
- Capítulo 5 resume los resultados obtenidos y sugiere ideas para investigaciones futuras.

2.1 Introducción al hormigón autosanable

El autosanado del hormigón es el proceso en el cual el hormigón se regenera a sí mismo, reparando cualquier daño que pueda tener para recuperar sus propiedades originales. El proceso es comparable, o incluso se puede decir que fue inspirado por las funciones biológicas en la naturaleza (Speck & Speck, 2019), como la piel cuando se cierra y cicatriza después de sufrir un corte.

El objetivo inmediato del autosanado es conseguir que el hormigón recupere total o parcialmente sus propiedades físicas, mecánicas o de durabilidad y sus objetivos finales son aumentar la vida útil de las estructuras y hacer posible el diseño de estructuras más competitivas (Roig-Flores et al., 2021).

En los últimos años, la popularidad del hormigón autosanable ha ido en aumento, por lo que cada año se realizan nuevos estudios acerca del autosanado en el hormigón y se espera que sigan aumentando (Figura 1). Sin embargo, eso no significa que sea un fenómeno reciente. Hace más de medio siglo, ya se había evidenciado la acción del autosanado autógeno en estructuras de contención de agua (Lauer & Slate, 1956). También se realizaron experimentos con fibras porosas de polipropileno que liberaban compuestos químicos para llenar vacíos en el hormigón y recuperar permeabilidad (Dry, 2000), lo cual sirvió de precedente para los métodos actuales de redes capilares.

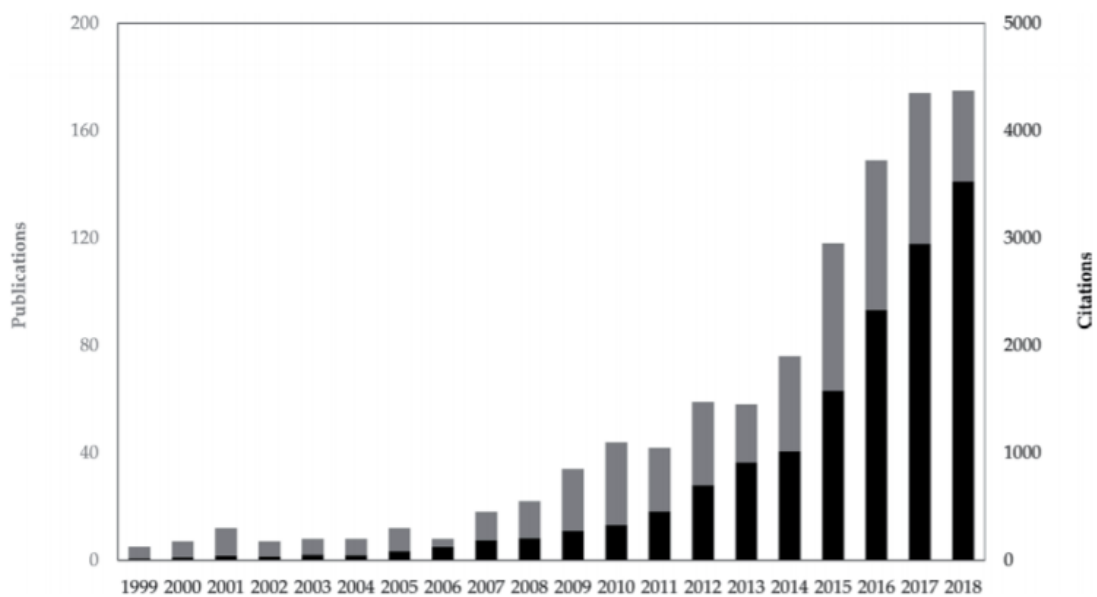


Figura 1. Publicaciones totales (eje vertical izquierdo) y número de citas (eje vertical derecho) por año en el tema de hormigón autosanable (Tsangouri, 2019).

2.2 Mecanismos de autosanado

Hay dos tipos de mecanismos de autosanado en el hormigón: autosanado autógeno y autosanado autónomo (Van Tittelboom et al., 2013).

El autosanado autógeno se debe a las propiedades intrínsecas del hormigón y se lleva a cabo de forma natural. Ocurre principalmente por la hidratación de partículas de cemento sin hidratar en la matriz y por la carbonatación que fomenta la precipitación de carbonato cálcico. Se entrará en detalle sobre este fenómeno en la sección 2.3.

El autosanado autónomo se debe a diferentes agentes especiales que se incorporan a la matriz del hormigón para promover o mejorar el autosanado. Los agentes y las metodologías relacionadas con el autosanado autónomo se mencionarán en las secciones 2.4 y 2.5.

Existen muchos términos que están relacionados con el autosanado, como el autosellado. Bernier et al. (2007) mencionan que la diferencia entre estos mecanismos es que el autosellado es la reducción de la permeabilidad en la fisura por cualquier acción hidromecánica, hidroquímica o hidro-bioquímica mientras que el autosanado es un sellado con pérdida de memoria del estado anterior al sanado. También definen el prefijo “auto” como un proceso de sellado o sanado que ocurre espontáneamente y sin intervención humana. Hearn (1998) aporta otras definiciones donde utiliza el término “sanado autógeno”, el cual define como la habilidad que tiene el cemento para sanar fisuras en el hormigón. Este mecanismo se puede observar mediante la pérdida de permeabilidad con el tiempo. Schlangen et al. (2006) introducen términos como el autoapretado (self-tightening) donde la fisura se bloquea por pequeñas partículas en las paredes de la fisura o presentes en los fluidos que corren a través de la fisura y además definen el autosanado como una reacción química que conecta las dos caras de una fisura. Esta reacción puede ser la continuación de la hidratación del cemento o la reacción química que ocurre después de la hidratación, como la formación de carbonato cálcico. Witjaksono (2020) define el término autosanado como la recuperación de las propiedades de los especímenes bajo ciertas condiciones termo-hidro-químico-mecánicas mientras que el autosellado se define como el flujo reducido a través de los especímenes como resultado del autosanado.

A pesar del amplio rango de nomenclaturas que existen, hay un consenso en el uso de los términos sanado autógeno como un sanado natural debido a las propiedades intrínsecas y el sanado autónomo como un sanado con materiales con la función específica de devolver las propiedades perdidas. El autosellado sería un término para referirse al bloqueo superficial de la fisura a causa de partículas contaminantes, sin embargo, al ser difícil de distinguir, muchas veces no se diferencia del autosanado en la literatura (Roig Flores & Serna Ros, 2015).

Tanto en la Tabla 1 como en la Figura 2, se muestran las clasificaciones del autosanado del estudio de Igarashi et al. (2009).

Tabla 1. Casos de estudio correspondientes a la clasificación de autosanado/reparación (Igarashi et al., 2009).

	Tipo	Caso de estudio	Sanado/ reparación	Inherente/ diseñado
A	Sanado natural	-Rehidratación del cemento residual sin hidratar en un hormigón de baja relación W/C. -Rehidratación de las fisuras encontradas en estructuras hidráulicas.	Sanado	Inherente
B	Sanado autónomo	- Uso de la ceniza volante -Compuestos cementicios ingenieriles (ECC) que contienen ceniza volante -Uso de aditivos especiales (aditivos expansivos) -Uso de bacterias	Sanado	Diseñado
C	Reparación activada	-Inclusión de microcápsulas, etc. -Uso de redes capilares frágiles - Uso de dispositivos generadores de calor -Uso de aleaciones con memoria de forma -Fusión con técnicas de monitoreo	Reparación	Diseñado

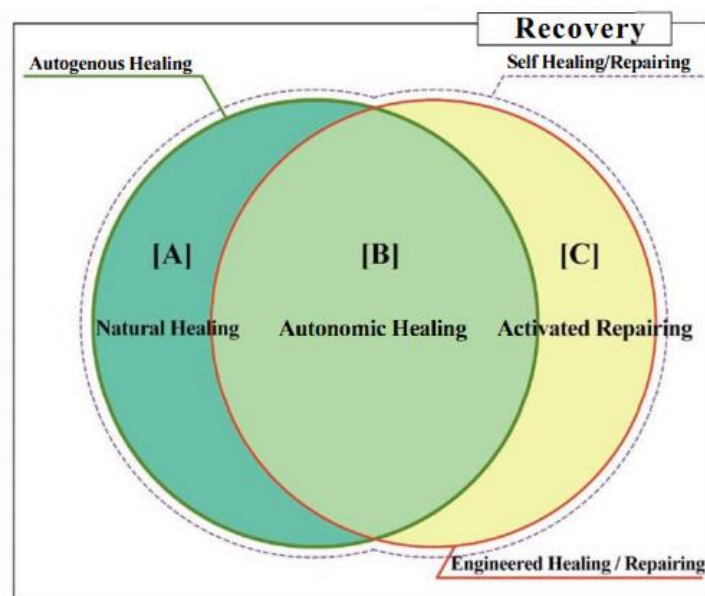


Figura 2. Diagrama Venn de la clasificación de autosanado/reparación en fisuras (Igarashi et al., 2009)

2.3 Autosanado autógeno

2.3.1 Factores que influyen en el autosanado autógeno

El autosanado autógeno fue detectado por primera vez por la Academia Francesa de Ciencia en 1836, donde fue estudiado principalmente en conexiones de tuberías y otras estructuras de retención de agua (Hearn, 1998). En este proceso, los precipitados cristalinos blancos rellenan la fisura y forman una especie de cicatriz, resultado de la reacción entre el bicarbonato de calcio del agua y el hidróxido cálcico del hormigón o de la reacción de la carbonatación del hidróxido cálcico por la exposición a la atmósfera. Sin embargo, analizando la literatura, las investigaciones sistemáticas concernientes al sanado autógeno presentan mecanismos que entran en conflicto entre sí.

Hearn & Morley (1997) recopilaron los diferentes mecanismos que se pensaba que causaban el autosanado del hormigón:

1. Aire en la matriz, ya sea por una saturación incompleta del espécimen o por disolución del aire bajo presión en el agua.
2. Expansión de la pasta de cemento endurecida al resaturarse de agua después de secarse.
3. Reacciones químicas del agua y el aire con la matriz, resultando en:
 - a. Hidratación continuada del clinker residual
 - b. Disolución y deposición de especies solubles, como el hidróxido de calcio
 - c. Carbonatación de la portlandita disuelta
4. Presión osmótica
5. Taponamiento físico causado por el movimiento de partículas sueltas

En su estudio para descubrir cuál de las causas mencionadas son las que realmente inducían el autosanado, concluyeron que el proceso de disolución y deposición es el principal mecanismo para el autosanado en hormigones maduros, mientras que la continuación de la hidratación del cemento fue más influyente en hormigones jóvenes o que no fueron curados adecuadamente. También concluyeron que los efectos del aire, la presión osmótica y la saturación incompleta no son relevantes en el autosanado.

Las causas del autosanado autógeno fueron recopiladas y categorizadas por De Rooij et al. (2013). Las causas son las siguientes:

1. Causas físicas: la expansión de la pasta de cemento hidratada cerca de las paredes de la fisura. Este fenómeno ocurre cuando el agua es absorbida por la matriz y alcanza el espacio entre los constituyentes de la pasta de cemento. Cuando este efecto es estimado, resulta ser marginal y causa una reducción de flujo menor al 10%.
2. Causas químicas:
 - a. Hidratación continuada del cemento sin reaccionar: cuando la reacción ocurre, los productos que se forman llenan el espacio libre de la fisura. Los productos de la hidratación ocupan el doble del espacio que el grano de cemento original. El efecto de la

hidratación de las partículas de cemento solo tiene influencia en aberturas de fisura menores de 0.1mm y no puede ser responsable de cerrar la fisura completamente por sí sola, pues necesita el aporte de la expansión.

- b. Formación de carbonato cálcico: los iones de Ca^{2+} reaccionan con los iones carbonato (CO_3^{2-}) formando carbonato cálcico (CaCO_3), que precipita en la fisura. La reacción depende de la temperatura, el pH y la concentración de los reactivos. Este es el mecanismo que hace la mayor contribución al autosanado.
3. Causas mecánicas: las partículas que se desprenden de las paredes de la fisura o que ya estaban originalmente en el agua se acumulan, sellando la fisura. Este mecanismo se considera de menor importancia.

En la Figura 3, se muestra una imagen representativa de las causas antes mencionadas.

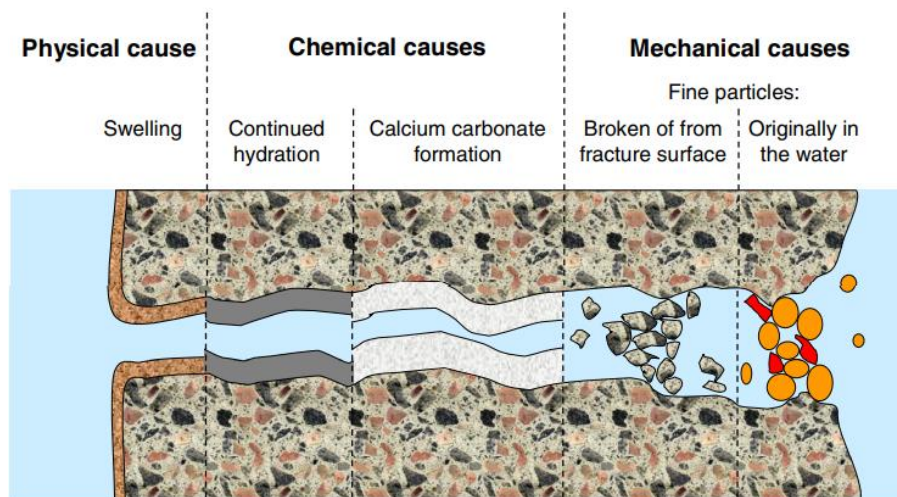


Figura 3. Posibles causas del autosanado autógeno (De Rooij et al., 2013).

Adicionalmente, existe otro mecanismo dentro de las causas químicas, siendo este la formación de $\text{Mg}(\text{OH})_2$, brucita, en ambientes marinos. Liu et al. (2019) concluyeron que el autosanado autógeno en las fisuras de la pasta de cemento sumergidas en agua de mar fue mayor que en las de los especímenes sumergidos en agua de grifo. Una capa de brucita se formó en la superficie de la fisura en los especímenes en agua de mar y representó el mayor porcentaje de los productos de la reacción del autosanado cuando la abertura de fisura era superior a 0.4mm, indicando que los iones de Mg^{2+} son capaces de promover el autosanado autógeno.

Los factores más influyentes en el autosanado autógeno fueron recopilados por De Belie et al. (2018):

1. Edad y composición del hormigón mismo:
 - a. el tipo de cemento no se considera importante, sin embargo, el contenido de clinker determina el aporte de iones Ca^{2+} y, subsecuentemente, la habilidad de la matriz para formar precipitados de carbonato cálcico.

- b. Adiciones silíceas en el hormigón producen un efecto como función de su tipo y cantidad en la mezcla, relacionada con el desarrollo de sus características reacciones puzolánicas y consumo de hidróxido de calcio, afectando también la duración del mecanismo de sanado.
 - c. El tipo de agregado puede determinar el patrón de fisuración y, como consecuencia, afecta indirectamente el proceso de sanado.
 - d. Clase de hormigón: hormigones de alta resistencia, caracterizados por una baja relación agua/cemento, contienen importantes cantidades de partículas de cemento sin hidratar que puede generar productos CSH como resultado de la hidratación.
 - e. El hormigón a edades tempranas tiene más partículas de conglomerante sin hidratar y desarrolla nuevos geles CSH, continuados después por la combinación de los dos procesos (hidratación continuada y precipitación de carbonato cálcico), dando lugar más adelante a depósitos de CaCO_3 para cerrar las fisuras.
2. Presencia de agua: la inmersión en agua es la exposición más favorable para lograr el autosanado, ya que, en exposición al aire, el autosanado autógeno está muy limitado. Algunos autores encontraron mejores resultados con ciclos de humectación—secado, donde abunda la disponibilidad de CO_2 para formar CaCO_3 . Otros factores como la dureza del agua resultaron ser neutrales.
 3. Abertura y forma de la fisura: mientras más estrecha sea la fisura, más eficiente será el autosanado autógeno. Como consecuencia, el uso de fibras en el hormigón ha tenido un auge al ser crucial para limitar y controlar la abertura de fisura, mejorando la capacidad de sanación.

2.3.2 Límite de cierre de fisuras según ambientes

El agua en la fisura es el factor más importante para el autosanado autógeno. Sin agua, no puede haber autosanado porque no se produciría la reacción química y no se produciría el transporte de las partículas. Si hay dióxido de carbono en el agua, siempre hay un cierto equilibrio entre el CO_2 combinado, el CO_2 medio combinado y CO_2 libre que se puede dividir en CO_2 complementario y CO_2 excedente. El CO_2 excedente es responsable del ataque al hormigón donde el carbonato de calcio se disuelve en bicarbonato de calcio soluble, mientras que el CO_2 complementario conduce a la formación de carbonato de calcio a partir de hidróxido de calcio (De Rooij et al., 2013).

La influencia de los ambientes es importante en el autosanado autógeno. En un estudio realizado por Roig-Flores & Serna (2020), se analizó el autosanado de especímenes de hormigón de resistencia convencional (30MPa) a edades tempranas en tres ambientes diferentes: cámara húmeda con 95% de humedad, inmersión en agua y ciclos de humectación-secado con 3.5 días de duración para cada fase del ciclo. De todos los ambientes, se concluyó que el menos efectivo es el ambiente húmedo, que no presentó siquiera un cierre visible de fisuras. Los ambientes de inmersión en agua y de ciclos humectación secado cerraron

completamente las fisuras inferiores a 0.15mm y tuvieron un cierre visible en fisuras entre 0.15 y 0.35mm. Los especímenes expuestos a los ciclos de humectación-secado sanaron a una velocidad mayor que la de los expuestos a la inmersión en agua durante los primeros 7 días. Sin embargo, después de 7 días, el desempeño de los especímenes inmersos en agua fue mejor.

Estudiando el comportamiento del autosanado en microfisuras (0.01-0.02mm) y macrofisuras (0.4mm) en hormigones de ultra-alta resistencia con fibras a edades tempranas, Cuenca & Serna (2021) consideraron cuatro ambientes de exposición: cámara húmeda, inmersión en agua de grifo, inmersión en agua de mar y curado térmico. Las tasas de autosanado más altas se observaron en los especímenes expuestos al curado térmico (Figura 4), seguidos en orden decreciente por la inmersión en agua de grifo, inmersión en agua de mar y la cámara húmeda. Adicionalmente, los máximos tamaños de fisura que lograron sanar totalmente fueron: 0.2386mm en inmersión en agua de grifo, 0.2109mm en curado térmico, 0.2025mm en inmersión en agua de mar y 0.027mm en cámara húmeda, siendo este último el ambiente menos favorable para promover el autosanado autógeno.

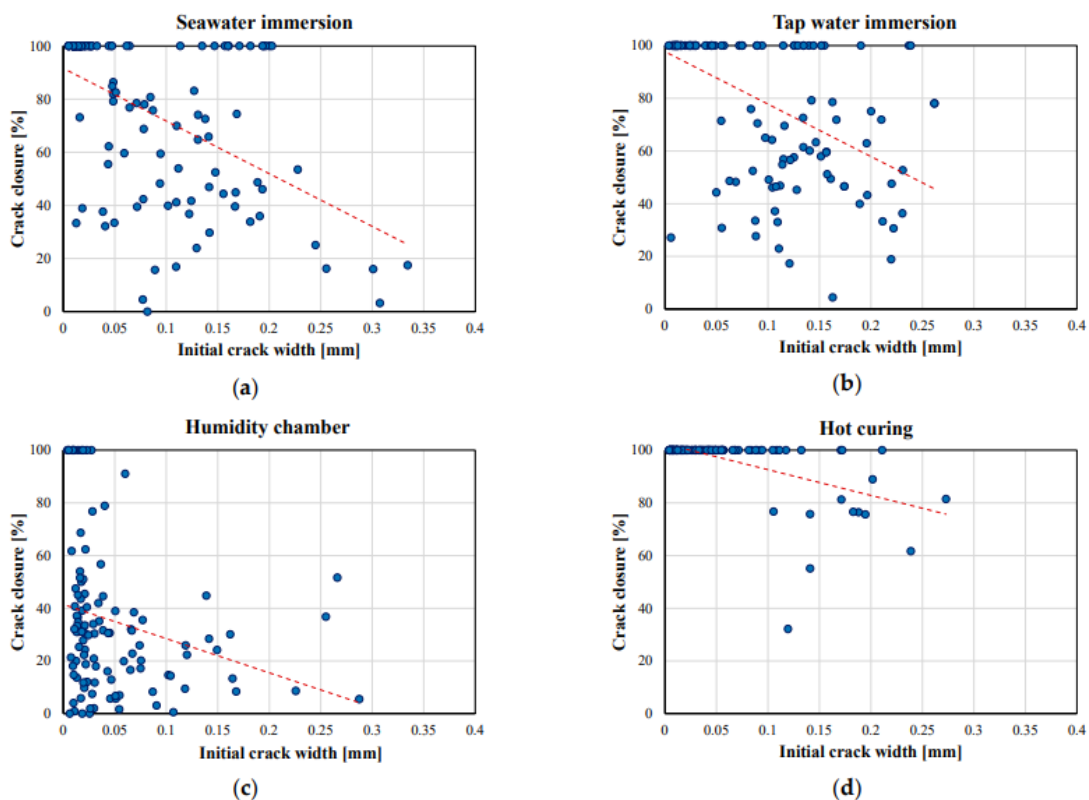


Figura 4. Cierre de fisura (%) vs abertura inicial de fisura para diferentes ambientes (Cuenca & Serna, 2021)

Otros autores detectaron que la eficiencia del autosanado autógeno fue mayor en un ambiente marino con ciclos de saturación-secado que en un ambiente marino completamente sumergido. Durante los procesos de saturación-secado, la formación de $Mg(OH)_2$ y $CaCO_3$ fue favorecida por los procesos de absorción y evaporación en el medio (Liu et al., 2019). Sin embargo, esto solo fue cierto

para ambientes donde los períodos de humedecimiento y secado fueron de 12h cada uno. Para los ambientes de saturación-secado donde el humedecimiento duró 1h y el secado 23h, la eficiencia fue menor que el ambiente marino totalmente sumergido. La acción de los iones externos presentes en el agua de mar que dio lugar a los productos de autosanado fue mayor en las fisuras con aberturas entre 0.4-0.6mm que en aquellas con aberturas de 0.15mm. Una abertura de fisura mayor facilitó la entrada de los iones durante el proceso de humedecimiento y la evaporación del agua durante el secado.

En los últimos años, un número significativo de experimentos fueron conducidos para investigar y evaluar la eficiencia del autosanado autógeno y también los factores y parámetros que influyen en él. Puede resumirse que el autosanado autógeno es eficiente solamente en fisuras pequeñas, pero con un rango de fisuras grandes que también pueden ser sanadas. En presencia de agua, el rango óptimo de autosanado autógeno está entre 0.01-0.1mm. A veces, se logra la sanación de fisuras de hasta 0.2mm, pero siempre por debajo de 0.3mm (De Belie et al., 2018). El tamaño máximo registrado que ha cerrado una fisura mediante el autosanado autógeno ha sido 0.458mm en hormigones tipo ECC (Yıldırım et al., 2018).

2.4 Autosanado autónomo

El autosanado autónomo se define como el proceso de autosanado donde el proceso de recuperación de propiedades utiliza materiales que de otra manera no estarían presentes en el hormigón.

Muchos estudios se han enfocado en optimizar la eficiencia del sanado en estos sistemas, siguiendo estos requisitos principales (Tsangouri, 2019):

1. El mecanismo de autosanado autónomo debe ser activado solo en presencia de daño. El agente sanador debe ser almacenado dentro del hormigón, protegido con un precursor que sea lo suficientemente fuerte para sobrevivir el proceso de amasado del hormigón, pero también lo suficientemente frágil para romperse instantáneamente frente a la tensión al propagarse la fisura a través de él.
2. La cantidad de agente sanador debe ser suficiente para llenar las fisuras que se forman bajo cargas de servicio, pero deben estar limitadas en volumen para eliminar el goteo en superficies externas. Las propiedades reológicas del agente deben ser ajustadas para cumplir este requerimiento.
3. Los ciclos de sanado deben ser repetibles para proteger al hormigón durante toda la vida útil de la estructura. Con respecto a la propagación temporal y espacial de los fenómenos de daño en el hormigón, el concepto de autosanado debe ir acompañado de un mecanismo de autodetección que localice las fisuras en cualquier momento para controlar el procedimiento de activación de sanado.

2.4.1 Tipos de agentes del autosanado autónomo

El autosanado autónomo ocurre por las reacciones de los agentes específicos añadidos intencionalmente en el hormigón. Estos agentes pueden ser añadidos directamente a la mezcla o dentro de un sistema de encapsulamiento que los proteja (Roig-Flores et al., 2021). Los diferentes agentes utilizados son:

1. Controladores de agua: agentes que actúan como reservas de agua, absorbiéndola cuando abunda y liberándola cuando escasea. Los polímeros superabsorbentes (SAP) pertenecen a esta categoría.
2. Agentes químicos inorgánicos como las adiciones cristalinas (CA).
3. Adhesivos reactivos: se emplean encapsulados por su capacidad de unir superficies. Ejemplos son los cianoacrilatos y poliuretanos.
4. Agentes biológicos o bacterias.

En esta sección, se hablará brevemente sobre los agentes característicos de las tres primeras categorías, dedicando la sección 2.5 exclusivamente para las bacterias.

2.4.1.1 Polímeros superabsorbentes (SAP)

Los SAP son polímeros reticulados únicos que pueden absorber una gran cantidad de líquido y expandirse sustancialmente para formar un gel insoluble suave. En la Figura 5 se observa como ocurre este proceso. Los tipos comunes de SAP son poli (acrilato) y poli (acrilato-co-acrilamida) que se usan ampliamente en productos de cuidado personal como pañales (Lee, H.X.D. et al, 2010).

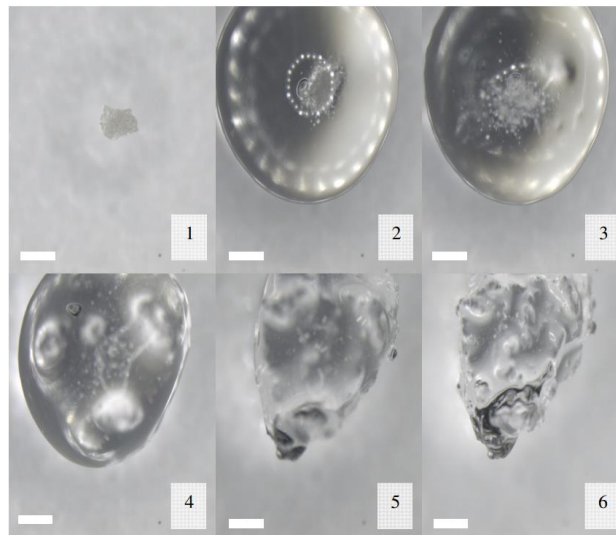


Figura 5. Partícula de SAP a medida que absorbe agua (Snoeck et al., 2014a)

La capacidad de expansión de los SAP es muy dependiente del ambiente y su pH, teniendo un mayor nivel de absorción en agua ácida/neutral pero difícilmente absorben agua alcalina presente en la matriz del hormigón (Tsuji et al., 1999). La capacidad de absorción estimada de los SAP con relación a su propia masa varía desde 500 hasta 1080 veces en agua destilada, desde 10 a 30 veces durante el

amasado de mortero (Kang et al., 2018) (Figura 6). El tiempo de la expansión depende también de las propiedades de los SAP y puede variar desde segundos hasta minutos (Hong & Choi, 2017).

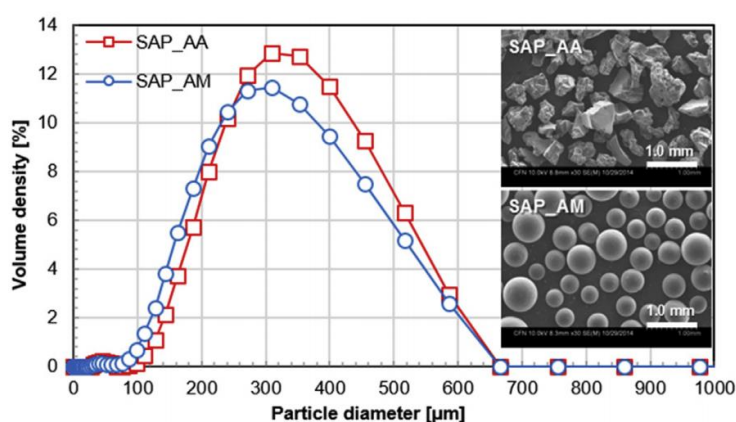


Figura 6. Tamaño de partículas de SAP (Kang et al., 2018)

Cuando se abre la fisura y la matriz entra en contacto con el agua, dos reacciones relacionadas con el autosanado ocurren (Roig-Flores et al., 2021):

- Bloqueo físico producido por el gel: el gel rellena las fisuras, haciendo que el elemento de hormigón recupere estanqueidad (Lee et al., 2010b).
- Sanado autógeno: el agua que los SAP liberan gradualmente al secarse reacciona con las partículas de cemento sin hidratar.

Los SAP se añaden en condiciones secas en dosificaciones típicas de 0.3-0.6% del peso de cemento (Snoeck et al., 2014b). Los SAP secos consumen parte del agua de la mezcla durante el amasado; con dosificaciones del 1% podría ser necesaria agua adicional para compensar y la relación agua/cemento aumentaría. El tamaño de la partícula de SAP también juega un papel importante en una buena respuesta de autosanado. Tamaños alrededor de 500 µm surten un mejor efecto que tamaños entre 200 µm y 80 µm, y en menos tiempo.

Entre las desventajas de los SAP y el agua adicional que compensa la absorción en el momento de amasado es que promueve la formación de poros y, a su vez, la reducción de la resistencia a compresión. Sin embargo, en el estudio de Klemm & Sikora (2013), se evidenció que los SAP con alta capacidad de absorción de agua resultan en un aumento de la resistencia a compresión. No obstante, en cuanto a la resistencia a flexión, no hubo un efecto similar. Contenidos de SAP de 0.5% y 1.0% redujeron la resistencia a compresión a un 79% y 56% de la resistencia de control, respectivamente (Hong & Choi, 2017).

Otra desventaja es que no se recomienda su uso en ambientes marinos porque reduce su capacidad de absorción. El agua de mar sella las fisuras donde se encuentran las partículas de SAP, impidiendo que aumenten su tamaño y limitando el autosanado autónomo (Zabanoot, 2020).

Una ventaja de los SAP es la velocidad de autosanado. Partículas esféricas de 252µm de diámetro de SAP fueron utilizadas por Hong & Choi (2017) para

analizar la velocidad de sanado. La tasa de expansión de las partículas dependía de la concentración iónica y el pH, pero independientemente de eso, siempre crecen hasta su tamaño máximo en 5 minutos. Los ensayos de flujo de agua demostraron que el flujo se reduce rápidamente en 5 minutos y la tasa de reducción de flujo en las muestras, medidas a los 13 minutos, estaba en el rango de 34-52% y 52-72% para los contenidos de SAP de 0.5% y 1.0%, respectivamente.

El flujo de una solución de cloruro de sodio a través de las fisuras en pastas de cemento y mortero, ambos con contenido de SAP del 5% del peso de cemento, fue medido para determinar el potencial del SAP como agente de sellado de fisuras en el hormigón. El flujo acumulado a través de las muestras fue significativamente menor que el del control. Las pastas de cemento mostraron una reducción del flujo acumulado de 80%. Los especímenes de mortero consiguieron una reducción de 85%. Los resultados también sugieren que los SAP de poli (acrilato-co-acrilamida) son más efectivos que los de poli (acrilato) para el autosanado (Lee et al., 2010a).

2.4.1.2 Adiciones cristalinas (CA)

Las CA se clasifican como tipos especiales de adiciones reductoras de permeabilidad (PRA). El ACI-212 diferencia entre aquellas PRAs que funcionan bajo condiciones no hidrostáticas (PRAN) y aquellas que son capaces de funcionar bajo presiones hidrostáticas (PRAH). Las CA pertenecen al último grupo, mientras que productos hidrofóbicos forman parte del primero.

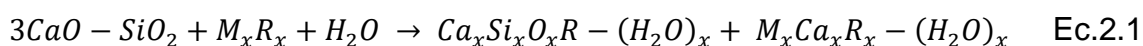
A pesar de que las empresas productoras de CA mantienen la formulación de sus componentes en confidencialidad, se puede inferir que están compuestos de químicos activos, usualmente combinados con cemento y arena, con un comportamiento altamente hidrofílico. Reaccionan en la presencia de agua, formando precipitados insolubles en agua que bloquean poros o fisuras, incrementando la densidad de los geles CSH y la resistencia a la penetración de agua (De Belie et al., 2018)

Se ha demostrado que las CA pueden mejorar propiedades mecánicas en el hormigón cuando se emplean en cantidades de 3%, 5% y 7% del peso de cemento, aunque algunos de estos porcentajes son muy altos tratándose de una adición (De Belie et al., 2018). Otros estudios no encontraron recuperación de propiedades mecánicas. En general, las CA son efectivas en contacto directo con agua y para fisuras menores a 0.30mm (Roig-Flores et al., 2015). En la Figura 7 se observa la diferencia entre partículas de cemento y adiciones cristalinas.



Figura 7. Comparación entre partículas de cemento y adiciones cristalinas (Roig-Flores, 2015)

Como producto de su reacción, las CA forman geles CSH modificados, dependiendo del promotor cristalino, y un precipitado formado por calcio y moléculas de agua. De acuerdo con el reporte del ACI, el componente de la matriz que reacciona es el silicato tricálcico, como se muestra la Ec. 1, aunque otros estudios indican que lo que reacciona es la portlandita.



Silicato tricálcico + promotor cristalino + agua → CSH modificado + precipitado insoluble

Roig-Flores & Serna (2015) analizaron la efectividad de sanado en términos de permeabilidad de agua a alta presión (2 bares) e inspeccionaron visualmente el cierre de las fisuras en hormigón fisurado a edades tempranas (2 días). Las CA fueron añadidas como sustitución del producto calizo para separar el efecto de la adición del efecto “filler”. Los resultados demostraron que las CA no fueron capaces de cerrar fisuras en un ambiente con 95-100% de humedad relativa, pero fueron más efectivas sanando fisuras en un ambiente sumergido. Además, los especímenes con CA sumergidos en agua lograron resultados más estables que los de referencia por su baja dispersión.

2.4.1.3 Adhesivos y otros reactivos encapsulados

A continuación, se verán las diferentes técnicas para encapsular los adhesivos reactivos.

2.4.1.3.1 Capsulas dispersas

En este método, se emplean microcápsulas de 20-800µm, que se añaden al momento de amasar para que los agentes estén repartidos en la matriz, lo cual es adecuado para fisuras de localización impredecible. La cáscara de la cápsula debe ser lo suficientemente resistente para resistir el proceso de amasado, con un buen nivel de adherencia a la matriz y con una fragilidad suficiente que

promueva la rotura de esta para liberar el agente en el momento que aparece la fisura. Este método depende de que el daño que sufre el hormigón llegue a las cápsulas, por lo que contenidos relativamente altos (4-7% en volumen) han sido efectivos, aunque sacrifique otras propiedades del hormigón, como la resistencia a compresión (Roig-Flores et al., 2021).

Zhang, et al. (2013) utilizó microcápsulas hechas de resina de urea formaldehído con bisfenol como agente de sanado. Se compararon los índices de sanado de permeabilidad y de resistencia, donde se vieron mejoras en ambos por el uso de las microcápsulas.

2.4.1.3.2 Cápsulas localizadas

Las cápsulas localizadas, que consisten en tubos de vidrio o cerámica de entre 10-100mm de longitud, no necesitan resistir el proceso de amasado, ya que los tubos se instalan directamente en los moldes antes de vaciar el hormigón; sin embargo, deben tener la resistencia suficiente para no sufrir daños por los impactos que ocurren durante el vertido del hormigón. El uso correcto de estos sistemas depende de la predicción de las fisuras. Este método tiene mucho potencial y es hasta capaz de recuperar propiedades mecánicas. En algunos casos, este método puede ser ineficiente, ya que a veces la cantidad de agente liberado por el tubo es solo una pequeña parte de lo que estaba previsto (Van Tittelboom et al., 2011b) (Figura 8). Factores como la viscosidad del agente, el diámetro y la esbeltez del tubo y la velocidad de reacción son fundamentales para la descarga ideal del agente (Joseph et al., 2010).

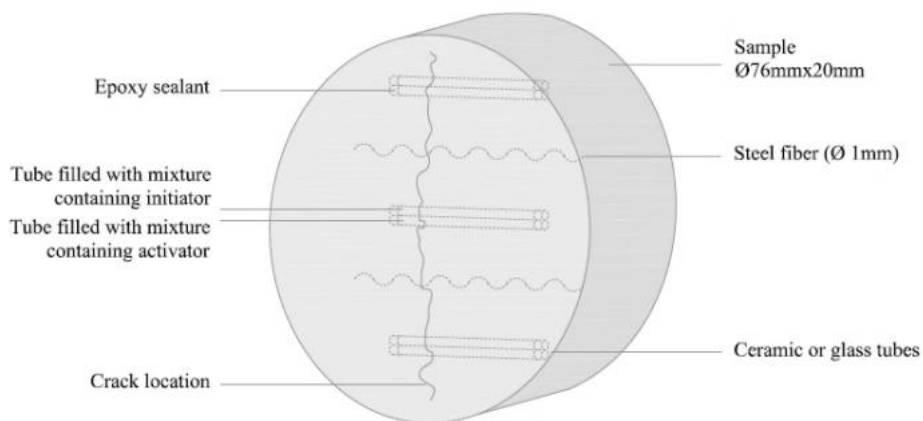


Figura 8. Esquema del ensayo con tubos de cerámica y vidrio (Van Tittelboom et al., 2011b)

Se estudió el efecto del cianoacrilato de etilo incorporado en fibras huecas de 4mm de diámetro y 20cm de longitud. Los resultados de recuperación de resistencia muestran que se logró recuperar hasta un 20% de la resistencia, mientras que, en el ensayo de flexión, los resultados indican que para aberturas de fisura menores a 0.3mm, la recuperación de resistencia es superior al 50% después del autosanado (Sun et al., 2011).

Otro estudio comparó el comportamiento de los tubos de vidrio y los de cerámica con un sistema multicomponente con metacrilato de metilo. Probetas cilíndricas de mortero que contenían los tubos dentro de su matriz fueron prefisurados hasta conseguir fisuras de 0.3mm. Al reaccionar el agente, la permeabilidad conseguida fue similar a la de las probetas sin fisurar. Adicionalmente, se evidenció un mejor comportamiento en los tubos de cerámica que en los de vidrio (Van Tittelboom et al., 2011a).

En el sistema de redes vasculares, un método muy similar al de las cápsulas localizadas, un tanque que contiene agentes de autosanado se conecta al hormigón mediante un tubo. Este tubo descarga los agentes a través de canales artificiales formados por tubos más pequeños dentro del hormigón. Una vez que ocurra la fisura, el agente saldrá de los tubos y reaccionará (Figura 9). Este método es continuo y repetitivo debido a que los tanques se pueden rellenar. Sin embargo, no es tan utilizado por lo relativamente costoso que es y requiere espacio suficiente para el tanque. A su vez, estos tanques requieren cumplir ciertas condiciones para que los agentes resistan antes de su uso (Zabanoot, 2020).



Figura 9. Red vascular en 2D liberando silicato sódico (De Belie et al., 2018).

2.4.3.1.3 Áridos porosos

En un concepto similar al de las microcápsulas, también se han impregnado áridos ligeros porosos con agentes curativos para contrarrestar el daño disperso y aleatorio. En un estudio de Alghamri et al. (2016) donde se impregnó silicato sódico en áridos ligeros, se consiguió la recuperación de la resistencia en más de cinco veces la recuperada por la serie control y la reducción de la absorción de agua por capilaridad a casi la mitad de la serie control. Esto indica resultados muy prometedores en comparación con muchas de las otras técnicas sugeridas anteriormente. El sistema utilizado aparece en la Figura 10.

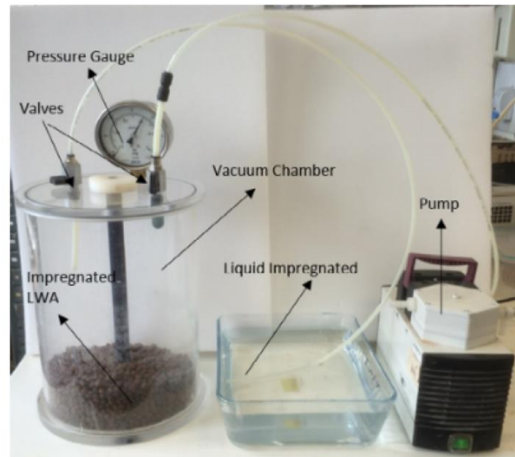


Figura 10. Método de impregnación del árido ligero (Alghamri et al., 2016)

2.5. Autosanado con agentes biológicos: bacterias

2.5.1 Concepto

Las bacterias pueden precipitar CaCO_3 mediante diferentes vías metabólicas, tales como fotosíntesis, reducción de sulfatos, hidrólisis de urea o desnitrificación (Castro-Alonso et al., 2019). A continuación, se mencionan los procesos metabólicos bacterianos en los cuales se produce CaCO_3 . En la Figura 11 se muestra como ocurre la precipitación de carbonato cálcico.

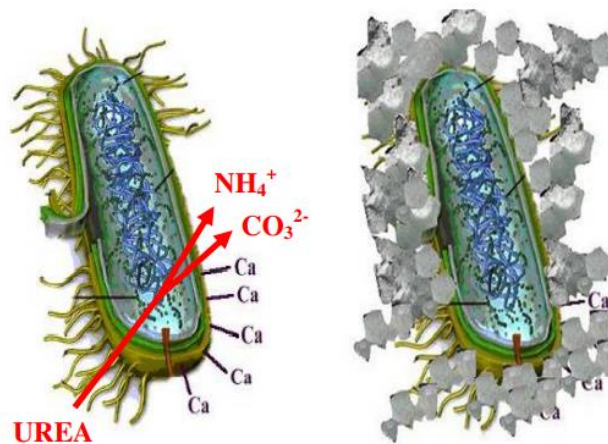


Figura 11. Proceso de precipitación de carbonato cálcico (Hammes & Verstraete, 2002)

2.5.1.1 Hidrólisis de urea

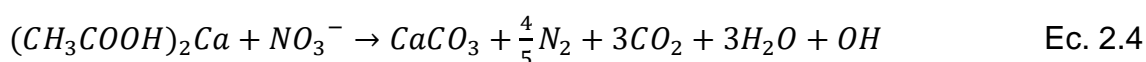
Las cepas ureolíticas tolerantes a los álcalis se han investigado para su aplicación sobre o en materiales cementosos. Estas bacterias pueden

descomponer urea en amonio/amoniaco e iones carbonato. Si hay suficientes iones Ca^{2+} en los alrededores, se formará $CaCO_3$. *Sporosarcina pasteurii* (también conocida como *Bacillus pasteurii*), *Sporosarcina ureae*, *Bacillus sphaericus* y *Bacillus megaterium* pertenecen a este grupo. Se han utilizado en varios estudios para impermeabilizar y mejorar los aspectos de resistencia y durabilidad del hormigón poroso y fisurado (De Belie et al., 2018). Las ecuaciones de su proceso metabólico son las siguientes:



2.5.1.2 Desnitrificación

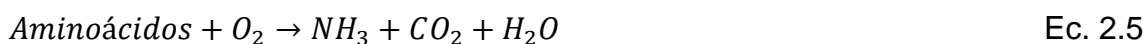
En la desnitrificación, MICP resulta de la oxidación de materia orgánica utilizando NO_3^- como aceptor final de electrones. El proceso produce NO_2 , CO_2 y OH^- , y las bacterias crean un microambiente alcalino por el consumo de H^+ en presencia de iones de calcio solubles (Zhu & Dittrich, 2016). La ecuación de su proceso metabólico es la siguiente:



Ersan et al. (2015) inmovilizaron *Pseudomonas aeruginosa* y *Diaphorobacter nitroreducens* en partículas de arcilla expandida. Se encontró que se cerraron microfisuras en el rango de tamaño de 200 a 250 μm y la permeabilidad disminuyó en un 42 y 47%, respectivamente. Ersan et al. (2018) implementaron gránulos especiales llamados “núcleo desnitrificante compacto activado” (ACDC) y observaron la curación de fisuras (> 70%) mayores de 400 μm . Sin embargo, el proceso de desnitrificación se inhibe por la acumulación de subproductos tóxicos generados como el nitrito y el óxido nitroso. En la mayoría de los casos, la hidrólisis de urea es más eficiente en la precipitación de carbonato de calcio que la desnitrificación.

2.5.1.3 Amonificación

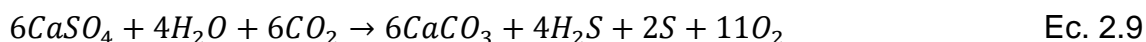
En la amonificación de aminoácidos, las bacterias producen CO_2 y amoniaco mientras metabolizan los aminoácidos (Ec. 2.5-2.8). La hidrólisis de amoniaco produce iones de amonio e hidróxido (Castro-Alonso et al., 2019).



La bacteria *Myxococcus xanthus* utiliza este mecanismo. (Rodríguez-Navarro et al., 2003; Chekroun et al., 2004; Jimenez-Lopez et al., 2007). Además, se ha reportado que también precipita uranio en forma de meta-autunita, que puede proteger al hormigón expuesto a desechos radioactivos (Turick and Berry, 2016).

2.5.1.4 Reductoras de sulfatos

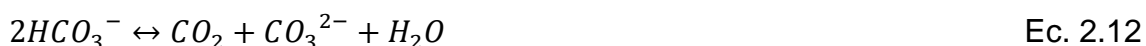
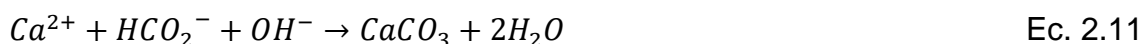
En ambientes anaeróbicos ricos en materia orgánica, la presencia de calcio induce la formación indirecta de minerales de carbonato de calcio por bacterias reductoras de sulfato (SRB) debido al proceso de reducción de sulfato disimilatorio (Ec. 2.9). Se ha demostrado que *Desulfovibrio sp.* tiene la capacidad de precipitar carbonato de calcio mediante la eliminación de sulfatos del yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) mediante una combinación de tres mecanismos: disolución, difusión y precipitación de carbonato de calcio. Los iones de calcio liberados por la disolución del yeso reaccionan con el dióxido de carbono (CO_2) en un microambiente de pH alcalino debido a la eliminación de sulfuro, lo que conduce a la precipitación de carbonato de calcio (Perito y Mastromei, 2011).



Alshalif et al. (2016) informaron que la adición de bacterias reductoras de sulfato en una matriz de concreto aumentó la resistencia a la compresión del concreto en un 13% y disminuyó la permeabilidad al agua en un 8.5%. Más recientemente, Tambunan et al. (2019) informaron un aumento en la resistencia a la compresión (60,87%) y la resistencia a la flexión (52,30%) al agregar SRB aislado de agua ácida doméstica. Sin embargo, la generación de H_2S puede provocar la corrosión de la estructura del hormigón, ya que reacciona con el oxígeno para formar azufre elemental o una especie de azufre parcialmente oxidada, que se consideran productos de corrosión de las superficies de hormigón (O'Connell et al., 2010).

2.5.1.5 Fotosintéticas

Las cianobacterias y microalgas son los principales microorganismos fotosintéticos responsables de MICP en el medio acuático. La precipitación de carbonato de calcio por microorganismos fotosintéticos ocurre debido al intercambio de HCO_3^- y CO_3^{2-} (Ec. 2.10-2.11). Esta reacción es catalizada por la anhidrasa carbónica, lo que lleva a un aumento del pH debido a la generación de OH^- , que junto con los iones de calcio presentes en el microambiente induce MICP (Ec. 2.12) (Dhami et al., 2014; Achal et al., 2015).



Sin embargo, cabe mencionar que la aplicación de microorganismos fotosintéticos como agentes del bioconcreto se puede lograr solo cuando las estructuras están expuestas al CO₂ y la luz solar, que son componentes principales para el proceso de fotosíntesis (Seifan et al., 2016).

2.5.1.6 Oxidación de metano

En los sedimentos marinos y de agua dulce, la concentración de dióxido de carbono es impulsada en gran medida por bacterias oxidantes del metano en condiciones aeróbicas y anóxicas. En condiciones aeróbicas, este proceso se inicia con la conversión de metano en metanol por la actividad de la metano monooxigenasa en presencia de oxígeno (Ec. 2.13-2.18) (Castro-Alonso et al., 2019).



Recientemente, Caesar et al. (2019) mostraron el potencial de MICP para mitigar la liberación de metano en la atmósfera debido a la oxidación anaeróbica de metano. Sin embargo, aún no existen estudios sobre el uso de este mecanismo en biohormigón.

2.5.2 Incorporación al hormigón

Hay ciertos factores que limitan la aplicación de bacteria en el hormigón autosanable: altos valores de pH en el hormigón, una matriz muy densa (con poros pequeños) y humedad inadecuada. Para superar estos obstáculos, se han desarrollado diversos métodos de protección de bacterias como el encapsulamiento y la inmovilización de bacterias en áridos porosos.

2.5.2.1 Microencapsulación

Aunque se ha reconocido que algunos polímeros sintéticos son perjudiciales para las bacterias, la resiliencia bien documentada de las endosporas (particularmente las del género *Bacillus*) ante efectos adversos es tal que la microencapsulación de esporas no crea muchos problemas. De hecho, la

microencapsulación de esporas es potencialmente más simple que la de polímeros o minerales porque las esporas son inertes, sólidas e insolubles en agua (De Belie et al., 2018).

La encapsulación de esporas se ha probado utilizando métodos de encapsulación comerciales que incluyen la encapsulación de *B. sphaericus* en microcápsulas a base de melamina (Wang et al. 2014) y de *B. pseudofirmus* y *B. subtilis* en microcápsulas sintetizadas de gelatina/goma de acacia que utilizan coacervación compleja (De Belie et al., 2017). También se ha desarrollado un sistema en el cual la celulosa microcristalina (MCC) se mezcla con esporas de *B. pseudofirmus* y se encapsula en una cáscara de etilcelulosa. Como con otras técnicas de microencapsulación, se demostró que las esporas sobrevivieron al proceso de mezcla y que algunas de las microcápsulas se rompieron al formarse la fisura (Liu et al., 2015). La supervivencia y la precipitación de carbonato cálcico fueron verificadas en todos los casos.

Mientras que la microencapsulación de esporas en el hormigón autosanable ha sido establecida, hay menos progreso en la encapsulación de nutrientes (urea, extracto de levadura y precursores de calcio) debido a que los materiales solubles en agua se escapan fácilmente en las fases iniciales de la encapsulación. Sin embargo, se ha logrado encapsular exitosamente extracto de levadura y acetato de calcio mediante coacervación compleja cuando primero son disueltos en una fase de agua con gelatina, estabilizando la emulsión. Más investigaciones para optimizar el proceso son necesarias (De Belie et al., 2018).

2.5.2.2 Inmovilización en materiales porosos

Wang et al. (2012) inmovilizaron células de *Bacillus subtilis* en tierra de diatomeas (Figura 12). En la mezcla, se emplearon los siguientes nutrientes: urea, extracto de levadura y $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Se produjeron morteros de 40x40x160mm que fueron prefisurados a los 14 días y puestos a sanar durante 40 días en dos ambientes: sumergidos en agua y sumergidos en un medio de deposición hecho de urea y $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Las fisuras con aberturas de 0.15-0.17mm cerraron parcial o completamente dependiendo del ambiente. Los precipitados en la fisura estaban principalmente compuestos de carbonato cálcico y, si el ambiente fue el medio de deposición, una pequeña cantidad de cristales de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ y urea. Se comprobó que la tierra de diatomeas funciona como un microambiente alrededor de la bacteria, donde el pH es menos agresivo que el ambiente de la matriz, permitiendo que descomponga la urea. Sin embargo, debido a su gran superficie específica, añadir cantidades de tierra de diatomeas superiores al 5% del peso de cemento en morteros hace que la trabajabilidad se reduzca considerablemente y los autores sugieren que, en caso de necesitar más cantidad de tierra de diatomeas, se sustituya la cantidad correspondiente de arena.

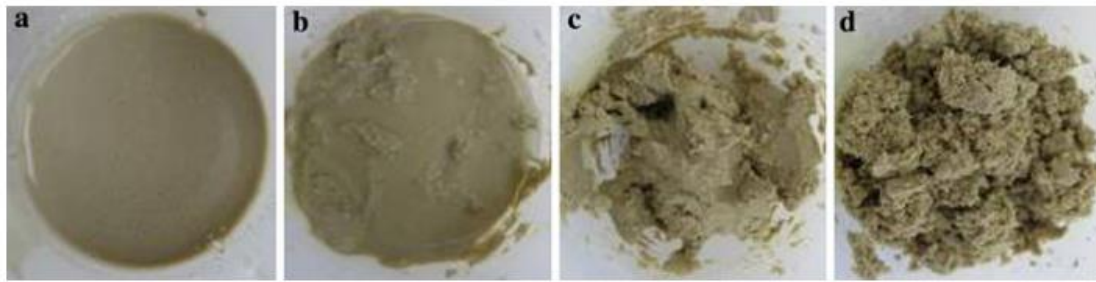


Figura 12. Proceso de impregnación de bacterias en tierra de diatomeas (Wang et al., 2012)

Zhang et al. (2017) analizaron la factibilidad de la perlita expandida (EP) como portador de bacterias *Bacillus cohnii*, comparándola con la arcilla expandida (EC), otro portador (Figura 13). Los resultados fueron positivos para la EP, logrando sanar fisuras de hasta 0.79mm después de sumergir los especímenes en agua durante 28 días, mientras que la EC solo pudo sanar fisuras de 0.45mm. Las características de mayor contenido de bacterias, menor cantidad incorporada y rentabilidad económica hacen que las partículas de EP sean más factibles que las partículas EC como material portador de bacterias, lo cual es prometedor para estructuras de hormigón a gran escala.

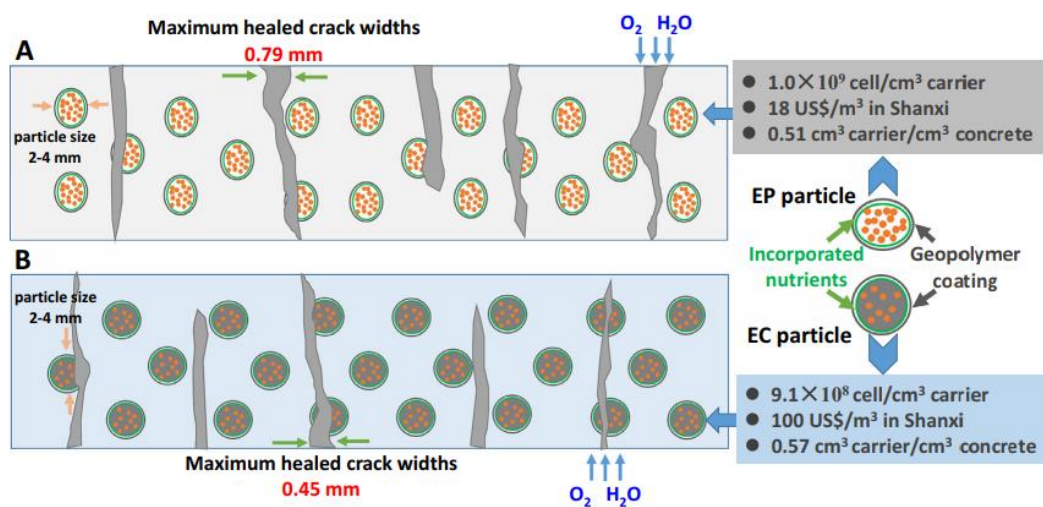


Figura 13. Medio comparativo entre la perlita expandida y la arcilla expandida, como portadoras de bacterias (Zhang et al., 2017)

Fibras naturales de bonote, lino y yute fueron seleccionadas para inmovilizar células de *Bacillus subtilis*, *Bacillus cohnii* y *Bacillus sphaericus* en el estudio de Rauf et al. (2020). Las bacterias fueron inmovilizadas en cada tipo de fibra con nutrientes, aplicando lactato cálcico para las bacterias *B. cohnii* y *B. subtilis* y una mezcla de lactato cálcico y urea para *B. sphaericus*. La concentración de bacteria fue de 6×10^8 células/ml. En este estudio, los especímenes cilíndricos de hormigón fueron prefisurados a edades de 7 y 28 días y puestos a sanar en agua durante 56 días, midiendo el grado de sanación cada 28 días. Los resultados demostraron que la inmovilización de las bacterias en las fibras conservó satisfactoriamente sus actividades metabólicas, lo que dio lugar a una adecuada

producción de CaCO_3 . Las fisuras de 0.8mm y 0.5mm lograron cerrarse luego del tiempo de sanación para las series prefisuradas a 7 y 28 días, respectivamente (Figura 14). Las fibras de lino fueron las que proveyeron mejor protección a las bacterias, evidenciado por un cierre de fisuras más eficiente. Las bacterias *B. sphaericus* lograron mejor eficiencia de sanado en el hormigón por su habilidad de formar más precipitados que las *B. cohnii* y *B. subtilis*.

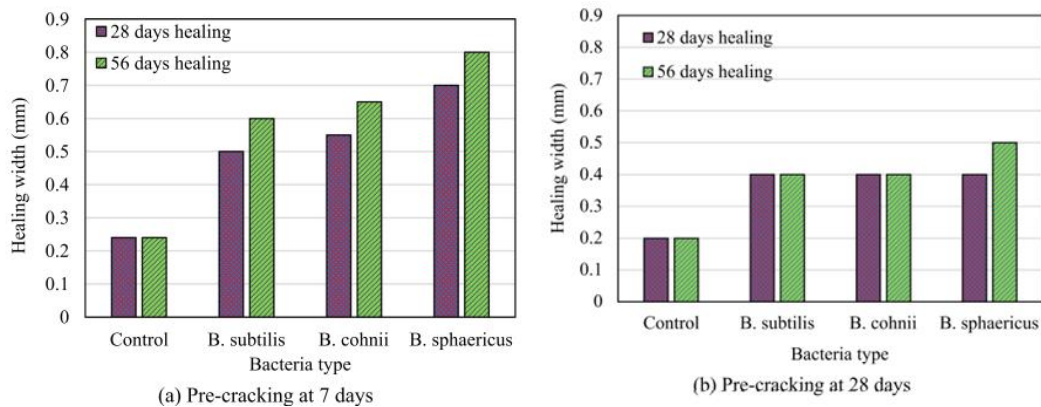


Figura 14. Sanación de abertura de fisura (mm) a) serie prefisurada a los 7 días b) serie prefisurada a los 28 días (Rauf et al., 2020)

2.5.2.3 Encapsulación en hidrogeles

El uso de hidrogeles biológicos que consisten en esporas encapsuladas dentro de geles de polímeros hidrofílicos fue estudiado por Wang et al (2014). Se incorporaron 10^8 esporas de *Bacillus sphaericus* por gramo de hidrogel. La viabilidad de las esporas no se redujo después de la encapsulación. El hidrogel tiene una buena capacidad de captura de células y puede evitar que más del 90% de las esporas encapsuladas se liberen durante el proceso de amasado. Al usarse en hormigón autosanable, con una dosificación del 5% del peso de cemento), mostraron ser un portador prometedor debido a su habilidad tanto de proteger a las esporas durante el amasado y el hormigonado como de expandirse y actuar como un reservorio de agua para la germinación de las esporas y la actividad bacteriana una vez se abra la fisura. La mayor abertura de fisura sanada fue de 0.5mm en 7 días en los especímenes con los hidrogeles con bacteria, comparados a los hidrogeles sin bacteria que solo lograron sanar una abertura de 0.3mm. La tasa de sanación para hidrogeles con bacteria tuvo un rango de 70-100% para fisuras de 0.3mm, siendo 50% mayor que la tasa de los hidrogeles sin bacteria.

2.5.3 Proyectos con hormigón autosanable con bacterias

Los efectos de las bacterias en el sanado del hormigón han sido tan prometedores que algunos grupos de investigación han decidido comercializar

productos que contengan microorganismos para inducir el autosanado, como es el caso de Basilisk, que trabaja en colaboración con Delft University of Technology. Basilisk ha creado el “Basilisk Healing Agent” (Figura 15), una adición biodegradable para mezclas de hormigón que contiene microorganismos y es capaz de sellar fisuras de hasta 1mm.



Figura 15. Producto Basilisk Healing Agent (Basilisk Self-Healing Concrete, 2021)

Van Mullem et al. (2020) han analizado el autosanado producido en un proyecto a gran escala de hormigón autosanable con bacterias, analizando una losa de techo en una cámara de inspección de una tubería de drenaje. El agente bacteriano empleado fue MUC+, desarrollado y producido por la empresa Avecom. El MUC+ consiste en un cultivo ureolítico mixto y bacterias anaeróbicas. Para promover la actividad del MUC+, se utilizaron urea y nitrato de calcio tetrahidratado como nutrientes. El mejor cierre de fisuras se dio en condiciones de humectación-secado, en comparación a las condiciones húmedas (95% HR) o de saturación permanente.

Silva et al. (2015a) analizaron los costos de producción de un producto denominado CERUP (Cyclic EnRiched Ureolytic Powder), un polvo que contiene una comunidad de bacterias ureolíticas, para cantidades de 5L y 50L (Figura 16). Se realizaron ensayos en morteros donde se compararon cuatro series: referencia, CERUP 5L, CERUP 50L y un cultivo axénico de *Bacillus sphaericus*. La producción de CERUP a escala de 5 L reveló buenos resultados tanto en términos de degradación de urea y precipitación de carbonato de calcio. Los resultados muestran que el CERUP producido a una escala de 50 L se puede comparar tanto en la actividad ureolítica como en la capacidad de precipitación de carbonato de calcio con el cultivo axénico utilizado como referencia. Se debe tomar en consideración que para obtener la misma precipitación utilizando CERUP y esporas axénicas de *B. sphaericus*, es necesario agregar el doble de CERUP. Sin embargo, el impacto del costo total de CERUP es todavía 40 veces menor que el de la cultura axénica.

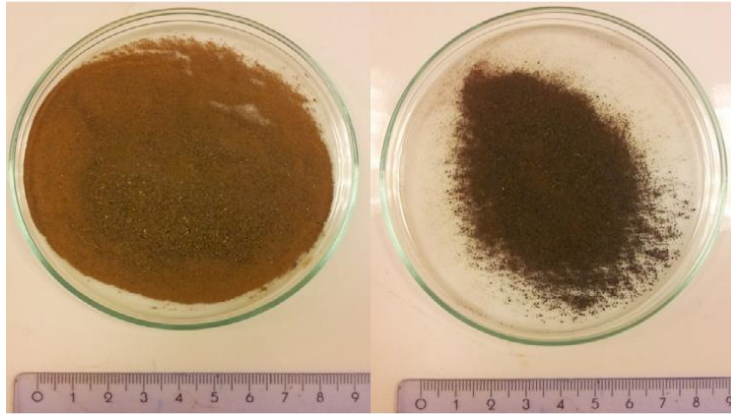


Figura 16. Producto CERUP de 5L (izq.) y 50L (der.) (Bravo Da Silva et al., 2015)

En otro estudio de Silva et al. (2015b), se compararon los costos de producción entre productos de autosanado con bacterias: el primero contenía un cultivo axénico puro de *Bacillus sphaericus* y el segundo contenía un cultivo mixto no axénico de bacterias ureolíticas. Los factores considerados para calcular el costo fueron la mano de obra, el gasto energético, la encapsulación, la adición de nutrientes, entre otros. El costo total del primer producto fue de 5760€/m³ de hormigón aplicado, mientras que el costo del segundo producto fue de 714€/m³. Lo que marcó la diferencia entre los productos fue la necesidad de condiciones asépticas para cultivar *Bacillus sphaericus*, lo cual requería un medio de crecimiento mucho más caro. El cultivo mixto del segundo producto no requería estas condiciones, por lo cual su precio se redujo considerablemente. Sin embargo, comparado al hormigón, que cuesta 60-75 €/m³, y a los costos estimados de reparación de 130 €/m³, es un costo que requiere disminuirse para que estos productos sean considerados en el mercado. Los autores concluyen que los costos de las esporas y los procesos de encapsulación deben reducirse a 2 €/kg, (peso en seco) y 15€, respectivamente, para lograrlo.

2.6 Discusión

Este capítulo ha presentado diferentes metodologías para conseguir el autosanado del hormigón, ya sea con las propiedades intrínsecas del material o añadiendo componentes especiales que fomenten el autosanado. Ambos puntos de vista, aunque útiles para prevenir o reducir costos de mantenimiento, no deben ser considerados para reparar estructuras con daños críticos.

En los mecanismos de autosanado autógeno, está demostrado que la carbonatación juega un papel importante para conseguir la mayor eficiencia de cierre de fisuras. Sin embargo, la carbonatación también afecta negativamente, reduciendo el pH del medio, lo cual vuelve vulnerables a las armaduras frente a la corrosión. La hidratación de las partículas de cemento sin hidratar sería la forma más segura de lograr el autosanado autógeno, sin embargo, su aporte en el autosanado no parece tan importante.

Los agentes que inducen el autosanado autónomo suelen tener mejores resultados que el autosanado autógeno. El desafío más importante que estos agentes deben superar es lograr que sus efectos sean reproducibles durante la vida útil de la estructura. Se intenta encapsular estos agentes para que se mantengan en condiciones prístinas hasta el momento que tengan que actuar para reparar la fisura, pero una vez que se rompe la cápsula y se liberan estos agentes, son de uso único. Las redes vasculares pueden seguir funcionando, pero siempre y cuando se reabastezca el suministro de agente cada cierto tiempo, lo cual requiere un grado de intervención humana. Los polímeros superabsorbentes también pueden cumplir sus funciones durante un tiempo prolongado, pero son muy dependientes del ambiente, específicamente de la cantidad de agua en el ambiente y su pH. Las bacterias, principalmente las que forman esporas, poseen las características necesarias para afrontar este desafío, ya que pueden durar una gran cantidad de años en ese estado. Las únicas limitantes serían una cantidad de nutrientes constante en el medio para que puedan reanimarse cada vez que aparezca una fisura y que haya espacio suficiente en la matriz para que la bacteria pueda subsistir, ya que, si los poros se cierran, las bacterias morirían.

3.1 Objetivo específicos

Este trabajo se centra en estudiar el efecto de los agentes microbiológicos en el autosanado. Para ello, fue de suma importancia adquirir bacterias. Se localizó y contactó a las empresas que comercializan bacterias para autosanado, algunas mencionadas en el capítulo anterior, pero no fue posible conseguir dichos productos, entre otras razones, por limitaciones de producción. Por esta razón, se recurrió a trabajar con productos disponibles en el mercado que utilizan bacterias. Los productos obtenidos fueron: Serenade Max, producto con bacterias encapsuladas en tierra de diatomeas utilizado en la agroindustria y Serbiotec, producto con bacterias en solución líquida utilizado en el tratamiento de aguas residuales. Este trabajo será el primero en analizar el efecto de productos con bacterias que nunca se habían empleado en el autosanado de hormigón.

Estos productos se incorporarán en hormigones y morteros de resistencias distintas, específicamente los de resistencia convencional ($f_{ck} < 50\text{MPa}$), de alta resistencia ($50\text{MPa} < f_{ck} < 100\text{MPa}$) y ultra alta resistencia ($f_{ck} > 100\text{MPa}$), que se denominarán de ahora en adelante como OPC, HPC y UHPC, respectivamente. De este modo, se pretende estudiar si la calidad de la matriz influye en la eficiencia de la reacción de las bacterias.

Los productos se agregarán a los hormigones y morteros en diferentes cantidades de sustitución, donde se sustituirá la arena más fina de la dosificación por Serenade Max y una fracción del agua de amasado por Serbiotec. El producto Serenade Max, al tener tierra de diatomeas, presenta limitaciones en cuanto a su uso, ya que altera significativamente la trabajabilidad de la mezcla al ser un material sumamente absorbente, por lo que se reemplazará en cantidades relativamente bajas. Como referencia, se utilizó el estudio de Wang et al (2011), donde se empleó el 5% de peso de cemento de la dosificación OPC en tierra de diatomeas y a partir de ese valor (15kg/m^3), la mitad y el doble también fueron considerados. Serbiotec, por otro lado, presenta limitaciones de disponibilidad y no se disponían de estudios similares de referencia, por lo cual se optó por no realizar sustituciones mayores al 50% de agua por producto.

Los objetivos específicos de este estudio son:

- Estudiar las dosificaciones viables para la introducción de dos productos con bacterias en hormigones de varias calidades.
- Evaluar el comportamiento de dos productos con bacterias en el autosanado.
- Evaluar las cantidades óptimas de producto para autosanado en hormigones y morteros.

- Evaluar el autosanado en las diferentes matrices de hormigón (OPC, HPC, UHPC).

3.2 Campaña experimental

A continuación, se explicará la campaña experimental planteada para los morteros y hormigones de esta investigación. A modo de resumen, se presenta la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen de campaña experimental.

Producto	Cantidad	Material	Tipo	Propiedades evaluadas
Serenade Max	0 kg/m ³ (REF)	Mortero	OPC HPC UHPC	Trabajabilidad
	7.5 kg/m ³ 15 kg/m ³ 30 kg/m ³	Hormigón	OPC HPC UHPC	Consistencia, resistencia a compresión, autosanado (permeabilidad y penetración de cloruros).
Producto	Cantidad	Material	Tipo	Propiedades evaluadas
Serbiotec	0%(REF) 10% 25% 50%	Mortero	OPC HPC UHPC	Trabajabilidad, resistencia a compresión, resistencia a flexión, autosanado (cierre de fisuras).
	25%	Hormigón	OPC HPC UHPC	Consistencia, resistencia a compresión, autosanado (permeabilidad)

3.2.1 Morteros

El producto Serbiotec se agregará a los morteros OPC, HPC y UHPC en porcentajes de sustitución de agua por producto. Los porcentajes serán de 0% (REF), 10%, 25% y 50% de producto. Cada amasada o serie consta de tres probetas prismáticas de 4x4x16mm (Figura 17).



Figura 17. Probetas prismáticas de mortero.

También se analizará la trabajabilidad de los morteros en la mesa de sacudidas, tanto para morteros con Serbiotec en las cantidades mencionadas anteriormente como para pequeñas amasadas de mortero con Serenade Max, con las siguientes cantidades de producto: 0 kg/m³ (REF), 7.5kg/m³, 15kg/m³ y 30kg/m³. En estos ensayos, el aditivo se mantendrá constante para analizar si las consistencias de las series varían según el contenido de bacterias.

3.2.2. Hormigones

El producto Serenade Max se agregará a los hormigones OPC, HPC y UHPC y su adición será en kg/m³, sustituyendo parte de la arena más fina en la dosificación (arena blanca para OPC y HPC, arena fina para UHPC) por el producto. Se analizarán cuatro cantidades: 0 kg/m³ (REF), 7.5kg/m³, 15kg/m³ y 30kg/m³. Cada amasada o serie consta de tres probetas cúbicas de 150x150x150mm para OPC y HPC y de 100x100x100mm para UHPC para el ensayo de resistencia a compresión y 9 probetas cilíndricas de Φ 100x200mm (Figura 18).

También se producirán tres series de hormigón, una por cada tipo de hormigón, con 25% de Serbiotec, para verificar su viabilidad a escala hormigón.

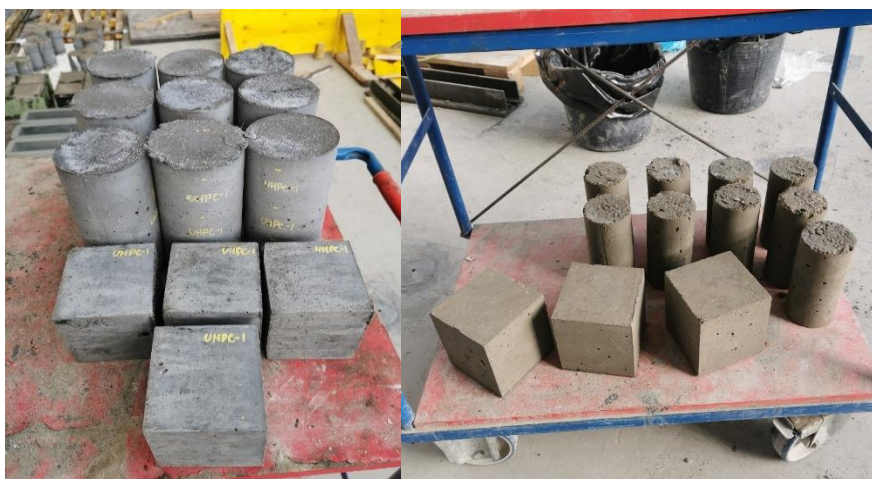


Figura 18. Probetas cúbicas y cilíndricas UHPC (izq.) y OPC (der.)

3.3 Materiales

En la Figura 19 se muestra el conjunto de materiales que constituyen las amasadas.

3.3.1 Cemento

El cemento utilizado en la dosificación proviene de LAFARGE S.A., es de tipo I, concretamente CEM I 42,5 R-SR5. Este cemento permite conseguir resistencias mayores a edades tempranas.



Figura 19. Materiales de una amasada de hormigón OPC (izq) y UHPC (der).

3.3.2 Agua

El agua utilizada proviene del grifo.

3.3.3 Áridos

Para las amasadas de OPC y HPC, se utilizó arena blanca y arena roja. Para las amasadas UHPC, se utilizaron arenas síliceas con granulometrías diferentes: una fina (0.5mm) y otra media (1.6mm).

3.3.4 Aditivos

Los aditivos superplastificantes utilizados para mejorar la trabajabilidad fueron ViscoCrete 5970 y ViscoCrete 20HE, ambos de Sika. El segundo es más potente que el primero, empleándose principalmente para las amasadas de hormigones de ultra-alta resistencia, donde el primero surte poco o ningún efecto.

3.3.5 Adiciones

Se utilizó humo de sílice Elkem Microsilica®. Se trata de humo de sílice seco, sin densificar, y su densidad está entre 200 y 350 kg/m³. Es un producto certificado por la norma ISO9001, asegurando la calidad de su composición química y física.

Se utilizó harina de cuarzo U-S 500, SIBELCO HISPANIA, compuesta en más de un 90% por sílice cristalina. La harina de cuarzo permite reducir el contenido de cemento, a la vez que complementa la curva granulométrica para los tamaños más pequeños.

3.3.6 Fibras

En este estudio, las fibras fueron necesarias para lograr controlar la abertura de fisura durante el proceso de prefisuración. Se optó por las fibras metálicas debido a su mejor desempeño en usos estructurales. Las fibras utilizadas en las amasadas de hormigón fueron las Dramix® RC 65/35 BN de Bekaert, con 35 mm de longitud y 0.55 mm de diámetro.

3.3.7 Bacterias

Serenade® Max, de la empresa Bayer, es un producto de origen natural a base de *Bacillus subtilis* cepa QST 713 (Figura 20), formulado como polvo mojable, para el control de enfermedades producidas por hongos o bacterias en los cultivos. Las bacterias están encapsuladas en tierra de diatomeas. El producto contiene 15.67% de bacterias y la concentración de bacterias es de 5.13×10^{10} CFU/g.



Figura 20. Producto Serenade Max.

El producto Serbiotec (Figura 21), es una mezcla de otros tres subproductos (Aqua Clean ACF-AD, Aqua Clean ACF-SC y Aqua Clean ACF-32) en un medio acuoso. Todos estos subproductos se emplean en el tratamiento de aguas residuales. En la Tabla 3, se presenta la ficha técnica de los subproductos donde se desglosa su composición.

Para conocer el contenido de bacterias por mililitro, se consultó con el proveedor del producto. El proveedor proporcionó la información del contenido de los subproductos por litro de Serbiotec y la densidad de estos. A partir de esto, utilizando la Ecuación 3.1, se realizaron los cálculos como se indican en el ejemplo de la Ecuación 3.2. Los resultados se resumen en la

Tabla 4, donde se obtiene que hay 1.166ml de bacterias por litro de Serbiotec (0.117%).

$$C_b = \frac{C_s}{\gamma} * P_b \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde C_b es el contenido de bacterias en la solución acuosa, en ml/L; C_s es el contenido del subproducto dentro de la solución acuosa, que será en g/L para ACF-AD y ml/L para ACF-SC y ACF-32, γ es la densidad del subproducto, en g/cm³ o g/ml (pero para efectos de cálculo, solo se utilizará para ACF-AD) y P_b es el porcentaje de bacterias que tiene cada subproducto, en %.

$$C_b = \frac{4.54 \text{ g/L}}{0.9 \text{ g/cm}^3} * 0.1 = 0.504 \frac{\text{cm}^3}{\text{L}} = 0.504 \frac{\text{ml}}{\text{L}} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Tabla 3. Composición de cada subproducto que contiene Serbiotec.

Subproducto	Especificaciones del subproducto	
	Componente	Porcentaje/conteo
AquaClean ACF-AD	Medio inerte	40%
	Cultivos de bacterias viables	10%
	<i>Bacillus</i> , UFC/g	1.5E+06
	Compuestos grado alimenticio	50%
	Metales pesados	0%
AquaClean ACF-SC	Agua/inertes	97.4%
	Cultivos de bacterias viables	2.5%
	<i>Bacillus</i> , UFC/ml	1.5E+06
	<i>Desnitrificantes</i> , UFC, ml	1.0E+06
	Compuestos residuales	0.1%
Metales pesados	0.0%	
AquaClean ACF-32	Agua/inertes	98.9%
	Cultivos de bacterias viables	1.0%
	<i>Bacillus</i> , UFC/ml	1.5E+06
	<i>Fotosintéticas</i>	1.0E+06
	<i>Desnitrificantes</i> , UFC, ml	1.0E+06
	Compuestos residuales	0.1%
	Metales pesados	0.0%

Tabla 4. Resumen de cálculo del contenido de bacterias en ml/L

Subproducto	Cs, g/L	γ , g/cm ³	Pb, %	Cb, ml/L
ACF-AD, g	4.54	0.9	10%	0.504
Subproducto	Cs, ml/L	γ , g/cm ³	Pb, %	Cb, ml/L
ACF-SC, ml	18.93	1	2.5%	0.473
ACF-32, ml	18.93	1	1.0%	0.189
ΣC_b, ml/L				1.166



Figura 21. Producto Serbiotec.

Luego, se procedió a calcular el total de UFC/ml del producto con las ecuaciones 3.3-3.4:

$$B_{UFC} = C_s * P_b * C_{UFC} \quad \text{Ec. 3.3}$$

$$B = \frac{\sum B_{UFC}}{\sum C_b} \quad \text{Ec. 3.4}$$

Donde B_{UFC} es la cantidad de células de bacteria en UFC/L, C_{UFC} es la cantidad de células de bacteria característico de cada subproducto, en UFC/g para ACF-AD y en UFC/ml para ACF-SC y ACF-32 y B es el contenido de células de bacteria en UFC/ml.

A modo de ejemplo, se muestra la ecuación 3.5 calculando un valor de B_{UFC} . Los resultados se resumen en la Tabla 5, se obtuvo que la concentración de bacterias es de 2.2×10^6 UFC/ml de Serbiotec.

$$B_{UFC} = 4.54 \frac{g}{L} * 0.1 * 1.5 \times 10^6 \frac{UFC}{g} = 6.81 \times 10^5 \frac{UFC}{L} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Tabla 5. Resumen de cálculo de bacterias (UFC/ml)

Subproducto	Cs, g/L	Pb, %	Tipo de bacteria	C_{UFC} , UFC/g	B_{UFC} , UFC/L
ACF-AD	4.54	10.0%	<i>Bacillus</i>	1.5E+06	6.8E+05
Subproducto	Cs, ml/L	Pb, %	Tipo de bacteria	C_{UFC} , UFC/ml	B_{UFC} , UFC/L
ACF-SC	18.93	2.5%	<i>Bacillus</i>	1.5E+06	7.1E+05
			<i>Desnitrificantes</i>	1.0E+06	4.7E+05
ACF-32	18.93	1.0%	<i>Bacillus</i>	1.5E+06	2.8E+05
			<i>Desnitrificantes</i>	1.0E+06	1.9E+05
			<i>Fotosintéticas</i>	1.0E+06	1.9E+05
				ΣB_{UFC} , UFC/L	2.5E+06
				B , UFC/ml	2.2E+06

Dentro de los tres tipos de bacterias presentes en el producto, las bacterias *Bacillus* son las más abundantes (Figura 22), ya que están presentes en los tres subproductos. Por esta razón, en el proceso de autosanado, los efectos de las bacterias *Bacillus* serían dominantes.

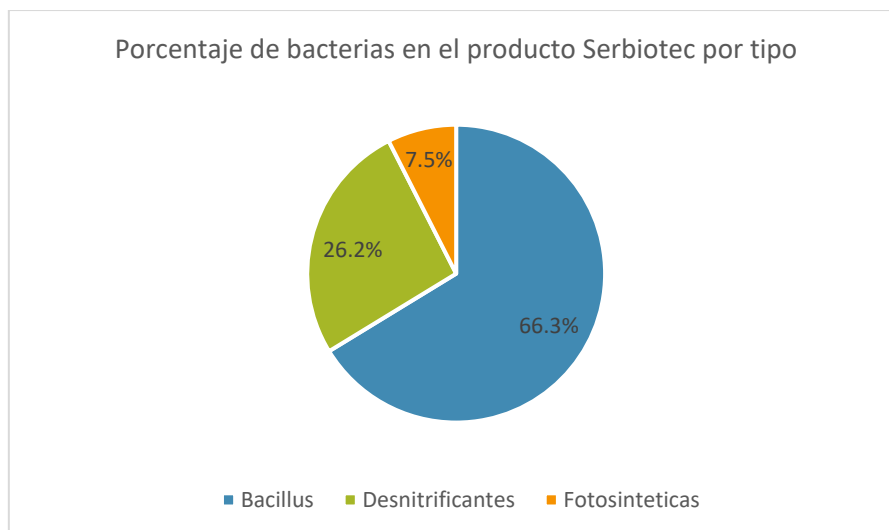


Figura 22. Porcentaje de bacterias en el producto Serbiotec por tipo

3.4 Metodología

3.4.1 Diseño de mezcla

3.4.1.1 Morteros con Serenade Max

Se fabricaron morteros de prueba con el producto Serenade Max para ensayar la trabajabilidad de estos. Se ensayaron cada una de las cantidades (0kg/m^3 , 7.5kg/m^3 , 15kg/m^3 y 30kg/m^3) en cada serie (OPC, HPC y UHPC). Para evaluar la consistencia de cada serie, se mantuvo constante la cantidad de aditivo. La cantidad del producto con bacterias se sustituye por la arena más fina en la dosificación. Teniendo en cuenta el grado de absorción de la tierra de diatomeas, se agregó agua extra igual al 20% del peso del producto.

Las dosificaciones de hormigón tuvieron que ser convertidas a dosificaciones de mortero ajustando el contenido de grava en los demás componentes, además de omitir el contenido de fibras. El único hormigón que no fue convertido a mortero fue el de UHPC, ya que su composición es la de un mortero al tener tamaño máximo de árido $<4\text{mm}$. Las dosificaciones aparecen en las Tablas 6-8.

Tabla 6. Dosificación de mortero OPC para Serenade Max.

OPC	Dosificación Hormigón, kg/m ³	Dosificación Mortero, kg/m ³	7.5kg/m ³	15kg/m ³	30kg/m ³
			kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
Cemento I 42,5 R-SR5	280	440			
Arena blanca	449	705.5	693.7	681.9	658.4
Arena roja	535	840.7			
Agua	185	290.7			
ViscoCrete 5970	2.3	2.8*			
Bacteria	0	0	11.8	23.6	47.1
Agua adicional	0	0	2.4	4.7	9.4
Fibra Dramix 65/35	40	0			
Grava 8/16	852	0			

*Se empleó esa cantidad de aditivo debido a que cantidades mayores segregan la mezcla.

Tabla 7. Dosificación de mortero HPC para Serenade Max

HPC	Dosificación Hormigón, kg/m ³	Dosificación Mortero, kg/m ³	7.5kg/m ³	15kg/m ³	30kg/m ³
			kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
Cemento I 42,5 R-SR5	400	631.4			
Humo de sílice Elkiem	40	63.1			
Arena blanca	310	489.3	477.5	465.7	442.2
Arena roja	549	866.5			
Agua	170	268.3			
ViscoCrete 20HE	3.8	3.2*			
Bacteria	0	0	11.8	23.6	47.1
Agua adicional	0	0	2.4	4.7	9.4
Fibra Dramix 65/35	40	0			
Grava 8/16	875	0			

*Se empleó esa cantidad de aditivo debido a la potencia de superplastificante.

Tabla 8. Dosificación de mortero UHPC para Serenade Max

UHPC	Dosificación Hormigón, kg/m ³	Dosificación Mortero, kg/m ³	7.5kg/m ³	15kg/m ³	30kg/m ³
			kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
Cemento I 42,5 R-SR5	800				
Humo de sílice Elkiem	175				
Harina Sibelco	225				
Arena fina	302		294.5	287	272
Arena gruesa	565				
Agua	160				
Aditivo 20HE	30				
Bacteria	0		7.5	15	30
Agua adicional	0		1.5	3	6
Fibras	160	0			

3.4.1.2 Morteros con Serbiotec

Se fabricaron probetas prismáticas para cada una de las cantidades (0%, 10%, 25% y 50% de Serbiotec respecto al agua) en cada serie (OPC, HPC y UHPC). Se realizó el ajuste correspondiente de la grava para convertir la dosificación de hormigón a una de mortero. No hay conversión a mortero para el hormigón de UHPC. Todos los morteros tendrán 40kg/m³ de fibras (en la dosificación original de hormigón). La cantidad de aditivo se mantendrá fija entre series para ensayar la consistencia.

Tabla 9. Dosificación de mortero OPC para Serbiotec

OPC	Dosificación Hormigón, kg/m ³	Dosificación Mortero, kg/m ³	10% bacteria	25% bacteria	50% bacteria
			kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
Cemento I 42,5 R-SR5	280	440			
Arena blanca	449	705.5			
Arena roja	535	840.7			
ViscoCrete 5970	2.3	1.7*			
Agua	185	290.7	261.6	218	145.35
Bacteria Serbiotec	0	0	29.1	72.7	145.35
Fibra Dramix 65/35	40	62.9			
Grava 8/16	852	0			

*Se empleó esa cantidad de aditivo debido a que cantidades mayores segregan la mezcla.

Tabla 10. Dosificación de mortero HPC para Serbiotec

HPC	Dosificación Hormigón, kg/m ³	Dosificación Mortero, kg/m ³	10% bacteria	25% bacteria	50% bacteria
			kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
Cemento I 42,5 R-SR5	400	631.4			
Humo de sílice Elkiem	40	63.1			
Arena blanca	310	489.3			
Arena roja	549	866.5			
ViscoCrete 5970	3.8	4*			
Agua	170	268.3	241.5	201.2	134.15
Bacteria Serbiotec	0	0	26.8	67.1	134.15
Fibra Dramix 65/35	40	62.9			
Grava 8/16	875	0			

*Se empleó esa cantidad de aditivo debido a que cantidades mayores segregan la mezcla.

Tabla 11. Dosificación de mortero UHPC para Serbiotec

UHPC	Dosificación Hormigón, kg/m ³	Dosificación Mortero, kg/m ³	10%	25%	50%
			bacteria kg/m ³	bacteria kg/m ³	bacteria kg/m ³
Cemento I 42,5 R-SR5	800				
Humo de sílice Elkem	175				
Harina Sibelco	225				
Arena fina	302				
Arena gruesa	575				
ViscoCrete 20HE	30				
Agua	160		144	120	80
Bacteria Serbiotec	0		16	40	80
Fibra Dramix 65/35	160		40		

3.4.1.3 Hormigones con Serenade Max

Se fabricó hormigón de las series OPC, HPC, UHPC para cada cantidad de producto Serenade Max (0kg/m³, 7.5kg/m³ y 15kg/m³). La cantidad del producto con bacterias se sustituye por la arena más fina en la dosificación. Teniendo en cuenta el grado de absorción que posee la tierra de diatomeas, se ha optado por añadirle agua igual al 20% del peso del producto. Además, con base en los resultados de las pruebas en mortero, que aparecen en el Capítulo 4, se aumentó la cantidad de aditivo en los hormigones que contenían Serenade Max para que la trabajabilidad se mantuviera similar a la del hormigón de referencia.

Se observó que había una diferencia notable entre las resistencias de las probetas de referencia respecto a las de 7.5kg/m³ y 15kg/m³. Analizando las dosificaciones, se encontró que la causa fue la gran cantidad de fibras en la mezcla, por lo que se decidió hacer una nueva amasada de referencia con 40kg/m³ de fibras, que será la verdadera referencia para las resistencias a compresión. En esta nueva amasada, solo se fabricó hormigón suficiente para realizar la prueba de escurrimiento y las probetas cúbicas. En las Tablas 12-14, se muestran las dosificaciones para cada tipo de hormigón.

Tabla 12. Dosificación para hormigón OPC con Serenade Max

Dosificación OPC	0kg/m ³ (REF)	7.5kg/m ³	15kg/m ³
Material	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
Cemento I 42,5 R-SR5	280		
Arena blanca	449	441.5	434
Arena roja	535		
Grava 8/16	852		
Agua	185		
ViscoCrete 5970	2.3	5	10
Fibra Dramix 65/35	40		
Bacteria Serenade Max	0	7.5	15
Agua adicional	0	1.5	3

Tabla 13. Dosificación para hormigón HPC con Serenade Max

Dosificación HPC	0kg/m ³ (REF)	7.5 kg/m ³	15 kg/m ³
Material	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
Cemento I 42,5 R-SR5	400		
Humo de sílice Elkem	40		
Arena blanca	310	302.5	295
Arena roja	549		
Grava 8/16	875		
Agua	170		
Aditivo	3.8*	2.7**	5.4**
Fibra Dramix 65/35	40		
Bacteria Serenade Max	0	7.5	15
Agua adicional	0	1.5	3

*Viscocrete 5970, **Viscocrete 20HE

Tabla 14. Dosificación para hormigón UHPC con Serenade Max

Dosificación UHPC	0 kg/m ³ (REF)	0 kg/m ³ (REF2)	7.5 kg/m ³	15 kg/m ³
Material	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
Cemento I 42,5 R-SR5	800			
Humo de sílice Elkem	175			
Arena fina	302		294.5	287
Arena gruesa	565			
Harina Sibelco	225			
Agua	160			
ViscoCrete 20HE	30			
Fibra Dramix 65/35	160		40	
Bacteria Serenade Max	0		7.5	15
Agua adicional	0		1.5	3

3.4.1.4 Hormigones con Serbiotec

Para los hormigones con Serbiotec, se hizo una serie de cada tipo de hormigón con 25% de producto. De estas amasadas, se fabricaron 3 probetas cúbicas y 6 probetas cilíndricas. Las dosificaciones de estos hormigones se detallan en las Tablas 15-17.

Tabla 15. Dosificación para hormigón OPC con 25% Serbiotec

Dosificación OPC	Referencia	25% Serbiotec
Material	kg/m³	kg/m³
Cemento I 42,5 R-SR5	280	
Arena blanca	449	
Arena roja	535	
Grava 8/16	852	
Agua	185	138.75
ViscoCrete 5970	2.3	
Fibra Dramix 65/35	40	
Bacteria Serbiotec	0	46.25

Tabla 16. Dosificación para hormigón HPC con 25% Serbiotec

Dosificación HPC	Referencia	25% Serbiotec
Material	kg/m³	kg/m³
Cemento I 42,5 R-SR5	400	
Humo de sílice Elkem	40	
Arena blanca	310	
Arena roja	549	
Grava 8/16	875	
Agua	170	127.5
ViscoCrete 5970	3.8	
Fibra Dramix 65/35	40	
Bacteria Serbiotec	0	42.5

Tabla 17. Dosificación para hormigón UHPC con 25% Serbiotec

Dosificación UHPC	Referencia	25% Serbiotec
Material	kg/m³	kg/m³
Cemento I 42,5 R-SR5	800	
Humo de sílice Elkem	175	
Arena fina	302	
Arena gruesa	565	
Harina Sibelco	225	
Agua	160	120
ViscoCrete 20HE	30	
Fibra Dramix 65/35	40	
Bacteria Serbiotec	0	40

3.4.1.5 Proceso de mezclado y ensayos de control realizados

La duración de cada amasada fue de 12 minutos para todas las series de OPC y HPC y 20 minutos para las series de UHPC. Para las amasadas OPC y HPC: se inicia amasando en seco el cemento, adiciones, áridos y bacterias por un

minuto. Inmediatamente después, se añade el agua sin detener la amasadora, tratando de mantener un flujo constante, sin formar charcos. La adición de agua no debería exceder los 20 segundos, aproximadamente. Al quinto minuto, se añade el aditivo rápidamente y sin detener la amasadora. Luego, se deja reaccionar la mezcla hasta que acabe el tiempo. Si la amasada lleva fibras, estas se agregan aproximadamente dos minutos después de añadir el aditivo, de forma lenta para asegurar que se puedan distribuir correctamente en la mezcla.

Para las amasadas de UHPC, las únicas diferencias, aparte del tiempo total de amasado, es que el agua y el aditivo se añaden simultáneamente después del primer minuto y que la adición de fibras darse después de que la mezcla haya reaccionado y tenga una consistencia homogénea, lo cual sucede entre los 6 y 9 minutos de amasado. En la Figura 23, se presenta un esquema de la duración de cada acción dentro del proceso de amasado.

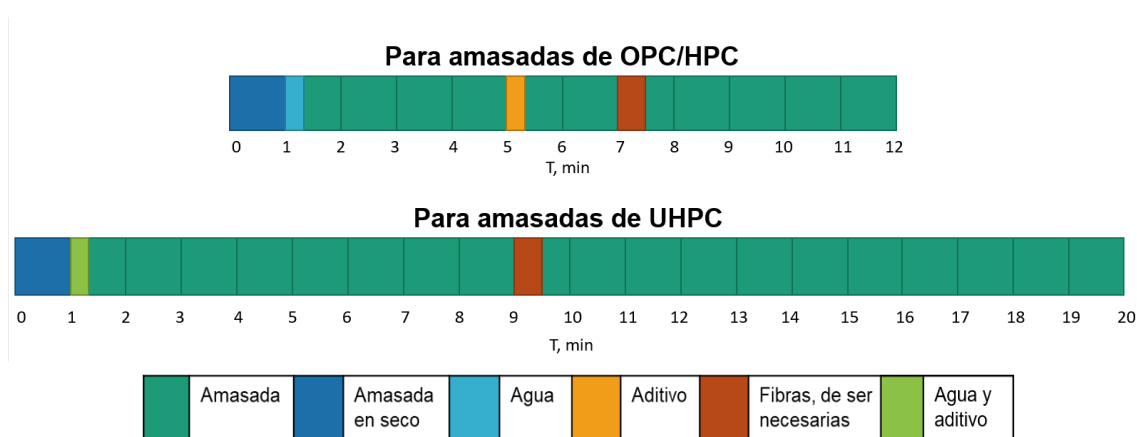


Figura 23. Esquema de amasado.

Los equipos para amasar se muestran en la Figura 24. La amasadora Ibertest se utilizó para los morteros, donde se produjo un volumen de 1.5L para las series de mortero con Serbiotec y 0.5L para las series de mortero con Serenade Max. La amasadora planetaria Inhera fue utilizada para los hormigones, donde se produjo un volumen de 33.2L para las series de OPC y HPC y 28L para las series de UHPC. En el caso de los morteros, después de amasar, se ensaya la trabajabilidad en la mesa de sacudidas según lo descrito en la Norma UNE EN 1015-3. Cabe resaltar que las amasadas de UHPC no requieren golpes ya que es una mezcla autocompactante, por lo que su diámetro después de levantar el molde equivale al diámetro final.

Para los hormigones, después de amasar, se realiza el ensayo del cono de Abrams según la norma UNE-EN 12350-2 para las series de OPC y HPC y el ensayo de escurrimiento para las series de UHPC. A partir de los resultados, se podrá clasificar la consistencia de los hormigones OPC y HPC según la Tabla 18 y de los hormigones UHPC según la Tabla 19.

Los ensayos de compresión realizados fueron basados en la norma UNE EN 196-1 para los morteros y la norma UNE EN 12390-3 para los hormigones. Los ensayos se realizaron en una máquina marca Ibertest, donde fue necesario el uso de un accesorio para comprimir correctamente las probetas de mortero

debido a su tamaño (Figura 25). Las velocidades de carga fueron 2400N/s y 0.6MPa/s para morteros y hormigones, respectivamente. Los hormigones fueron ensayados a los 28 días de edad; los morteros, a los 35 días de edad.



Figura 24. Amasadoras para morteros (izq) y hormigones (der)



Figura 25. Máquina Iberitest (izq) y accesorio para ensayar morteros a compresión (der).

Tabla 18. Consistencia de hormigones OPC y HPC (EHE-08)

Tipo de consistencia	Asentamiento en cm
Seca (S)	0-2
Plástica (P)	3-5
Blanda (B)	6-9
Fluida (F)	10-15
Líquida (L)	16-20

Tabla 19. Consistencia de hormigones UHPC (European Guidelines of Self Compacting Concrete)

Clase	Rango (mm)	Observaciones
SF1	550-650	Adecuado para secciones pequeñas y bombeo.
SF2	660-750	Adecuado para aplicaciones normales.
SF3	760-850	Valores superiores a 850mm pueden sufrir segregación.

3.4.2 Metodología de autosanado

3.4.2.1 Fase de prefisuración

Los prismas de mortero, después de 7 días de curado en cámara húmeda, se prefisurarán mediante un ensayo de tres puntos, para conseguir aberturas de fisura entre 0.05-0.3mm. En el programa que controla la máquina INSTRON, se introducen todos los parámetros necesarios para el ensayo, como las dimensiones de los prismas y la velocidad de carga (Figura 26). Para conseguir fisuras de diferentes tamaños, se podrá seguir cargando después de la primera aparición de fisura hasta que se verifique con un fisurómetro si tiene la abertura deseada. Se intentó seguir la velocidad de carga que indicaba la norma UNE-EN 196-1, que es de 50 N/s, pero la INSTRON no está configurada para cargar en unidades de carga por tiempo, solo desplazamiento por tiempo. Por lo tanto, para la etapa de prefisura, se programó la velocidad de carga a 0.2mm/min.

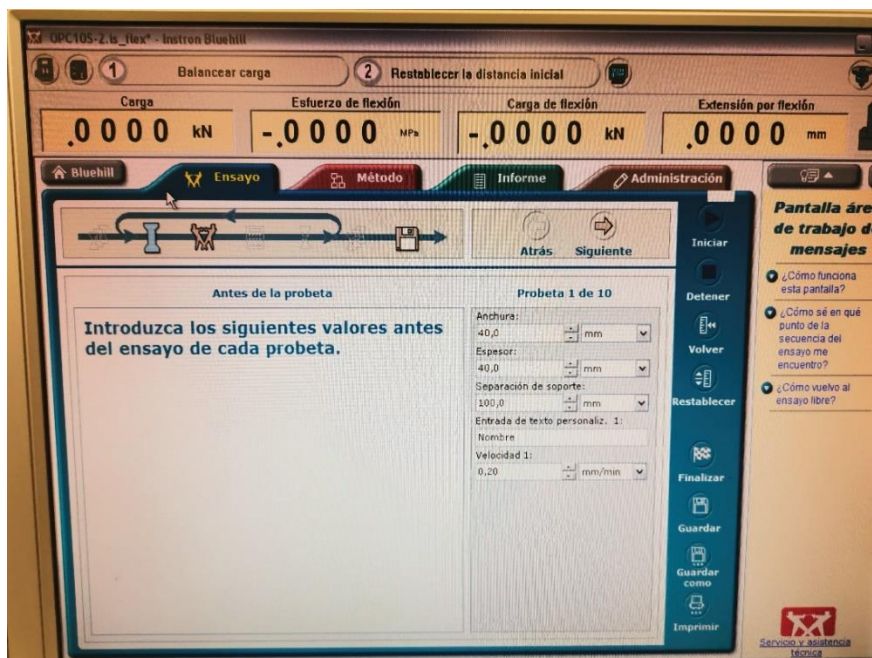


Figura 26. Introducción de parámetros para prefisurar morteros

Las probetas cilíndricas de hormigón, después de los 21 días de curado en cámara húmeda, serán cortadas cada una en tres discos de 50 ± 5 mm. Los discos de hormigón se prefisuran con la ayuda de una máquina marca Ibertest (diferente a la utilizada en los ensayos de compresión) mediante un splitting test para conseguir aberturas de fisura entre 0.1mm y 0.6mm para las series de OPC y HPC y entre 0.05mm y 0.3mm para las series de UHPC. Como la máquina opera de forma manual, no se puede regular la velocidad de carga confiablemente, por lo que es posible perder algunos discos durante el ensayo. Al menos dos discos de cada serie se dejan intactos para tener referencias para el ensayo de penetración de cloruros. Los equipos empleados se muestran en la Figura 27.

Se procede a tomarle fotos a los discos de hormigón y las probetas de mortero para medir digitalmente las fisuras. Una vez tomadas las fotos necesarias, las probetas de mortero se colocan en su ambiente de sanado mientras que los discos de hormigón se preparan para la prueba de permeabilidad.



Figura 27. Equipo para prefisurar morteros (INSTRON, izq) y discos de hormigón (Ibertest, der).

3.4.2.2 Medición de fisuras

Las fisuras en los discos de hormigón serán medidas en 6 puntos, 3 en cada cara, separados a 2cm uno de otro, aproximadamente. La abertura de fisura, w_0 , de cada disco será igual a la media de los 6 puntos. Para los prismas de mortero, se medirán dos puntos a 1cm de los extremos y w_0 será igual a la media de los dos puntos. Los esquemas de medición de ambos elementos aparecen en la Figura 28. En la Figura 29 se muestra un disco antes y después de sanar.

Las mediciones de las fisuras después del sanado se realizan en el mismo punto que se midió la primera vez. En caso de encontrar grandes cantidades de precipitado que entorpezcan la medición (Figura 30), se asumirá que la fisura cerró totalmente en ese punto.

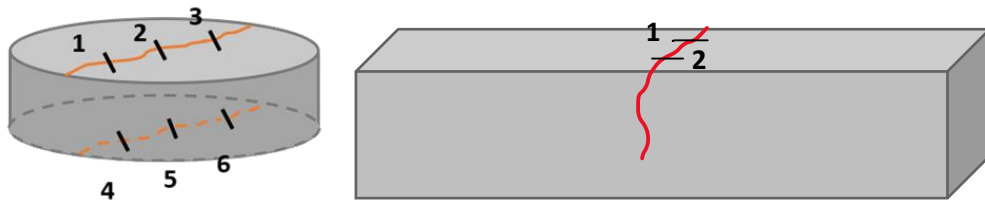


Figura 28. Esquema de medición de un disco de hormigón (izq) y un prisma de mortero (der)

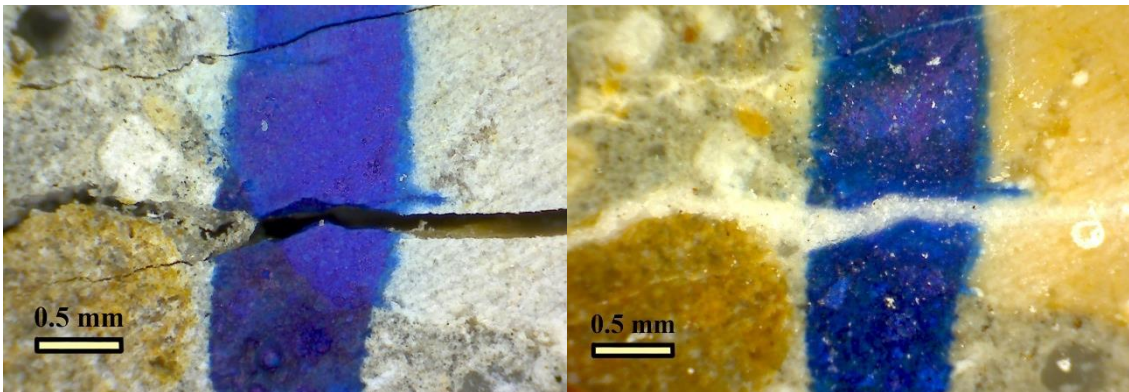


Figura 29. Medición de un disco antes (izq) y después (der) de sanar

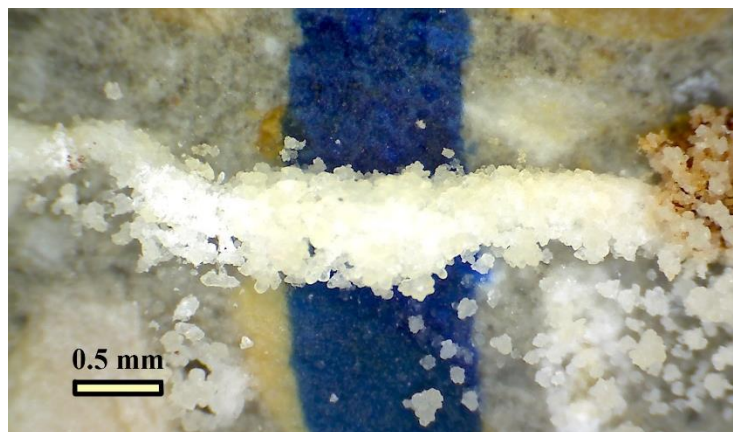


Figura 30. Exceso de precipitado sobre una fisura

3.4.2.3 Fase de sanado

El tiempo de sanado para todas las series es de 28 días, tanto para las de hormigón como las de mortero. Los ambientes de sanación para la campaña de hormigones (Figura 31), tanto con Serenade Max como con Serbiotec, serán dos:

- Ambiente A: ambiente sumergido en agua.
- Ambiente D: cámara húmeda con 95% de humedad relativa
 - En las series OPC de este grupo, los discos estuvieron 7 días en agua y 21 días en cámara húmeda. Se denominará a este grupo como D*.

Para la campaña de prismas de mortero con Serbiotec, el ambiente será sumergido en agua, idéntico al ambiente A de los hormigones.

Cabe resaltar que las probetas y discos fueron colocados en su ambiente de forma que el autosanado no se viera afectado, sobre todo en el ambiente A. Las fisuras de las probetas y discos permanecieron en una posición vertical para evitar la caída o desprendimiento del carbonato cálcico a lo largo del proceso de sanado. Además, se aseguró de mantener la fisura expuesta al ambiente, lejos de la base y lados de los contenedores y con una distancia prudente de otras probetas o discos.



Figura 31. Ambientes de sanado: inmersión en agua (izq) y cámara húmeda (der)

3.4.2.4 Ensayo de permeabilidad

Los discos prefisurados se pegan con SikaFlex a un extremo de un tubo PVC de $\Phi 100 \times 250 \text{ mm}$ para garantizar que no se escape el agua por ningún lugar que no sea la fisura durante el ensayo de permeabilidad. El disco se deja secando al menos un día. Todo este proceso de corte, prefisuración y pegado/secado se realiza después de los 21 días de edad del hormigón para tener los discos listos para ensayar a los 28 días de edad.

El ensayo de permeabilidad consiste llenar con agua el tubo unido al disco fisurado hasta un nivel de $200 \pm 20 \text{ mm}$ (Figura 32). Durante 30 minutos, se miden los niveles de agua en intervalos de 5 minutos, además de tomar la medida inicial ($t = 0$) y una medida en $t = 1 \text{ min}$. El ensayo de permeabilidad de cada disco termina cuando se completan los 30 minutos o cuando el tubo quede vacío. Este ensayo se realiza a los 28 y 56 días de edad del hormigón, es decir, antes y después del sanado.



Figura 32. Ensayo de permeabilidad

3.4.2.5 Ensayo de penetración de cloruros

El objetivo del ensayo de penetración de cloruros es observar si el sanado de la fisura es lo suficientemente efectivo para evitar el ingreso de agentes agresivos para el hormigón y/o la armadura. Se creó una solución de agua con sal para simular agua de mar. La salinidad del agua de mar tiene un rango de 33-38g de sal por kg de agua y su valor exacto es de 35.16504 g/kg (Millero et al, 2007). Para efectos de este trabajo, se trabajará con el límite inferior (33g/kg de sal).

Se sella la fisura del disco en el lado opuesto al tubo, independientemente si la fisura está totalmente cerrada o no por el carbonato cálcico, y se rellena el tubo con la solución hasta 200 ± 20 mm. El tubo permanece lleno durante tres días. Luego, se vacía y se despegga el tubo y se deja secar el disco durante 24h (Figura 33).



Figura 33. Ensayo de penetración de cloruros

Los discos secos se cortan perpendicularmente a la fisura, se rocía nitrato de plata (AgNO_3) en las caras expuestas por el corte y se introducen en un horno a 60°C durante 24 horas. Al sacar los discos del horno, el nitrato de plata y los cloruros habrán reaccionado. Los cambios de color se deben a reacciones químicas dependientes de los iones Cl^- (Farzad et al, 2019). Si los iones están presentes, se formará cloruro de plata, AgCl_2 , un precipitado blanco/incolore. Si están ausentes, en su lugar se formará óxido de plata, Ag_2O , un precipitado de color oscuro. En la Figura 34 se muestran discos recién salidos del horno.



Figura 34. Disco OPC penetrado por cloruros (izq) y disco UHPC no penetrado (der).

Para interpretar los resultados, se determinarán dos variables: P, la distancia de penetración de cloruros que provienen de la parte superior, y W, el espesor de penetración de cloruros que han entrado por la fisura. Se medirán P y W en los puntos señalados en la Figura 35, configurados de tal manera para descartar los extremos del disco y evitar medir una variable en el área de influencia de la otra. Cada disco tiene 8 medidas de P (4 por mitad) y 6 de W (3 por mitad), de los cuales se realizará una media para determinar la P y W de cada disco.

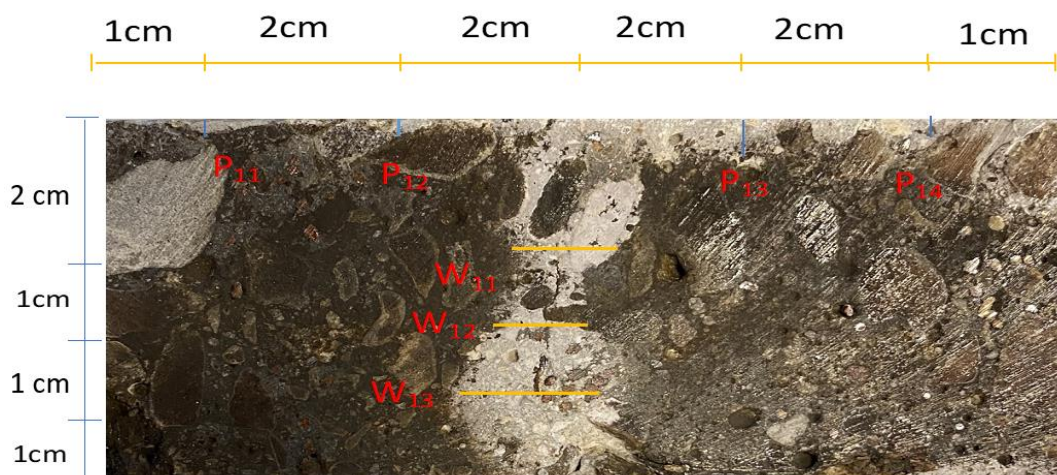


Figura 35. Esquema de medición de penetración de cloruros

Es importante mencionar que en este análisis se incluyen los discos sin fisurar que se habían reservado durante la etapa de prefisuración, para observar el

comportamiento de un disco intacto (Figura 36). Al no tener fisura, solo se tendrán valores de P. Los resultados de estos discos se representarán con una R en la leyenda. También cabe destacar que solo se presentarán los datos de los hormigones con Serenade Max, ya que no fue posible obtener los resultados de los hormigones con Serbiotec dentro del tiempo contemplado para realizar los ensayos en Valencia.



Figura 36. Discos OPC de referencia (R)

4.1 Introducción

En este capítulo, se presentarán los resultados y discusiones de la campaña experimental, empleando principalmente gráficas para presentar la información recabada en los ensayos.

4.2 Presentación de resultados

4.2.1 Ensayos de control en morteros

4.2.1.1 Trabajabilidad con Serenade Max

Después del proceso de amasado, se midió la consistencia de los morteros. Los componentes se pudieron mezclar bien y no hubo problemas con la amasadora. Se utilizó 0.25-0.5L de la mezcla para realizar el ensayo.

Los morteros OPC sufrieron reducciones de diámetro respecto a la referencia de 26% para los contenidos de 7.5kg/m³ y 15kg/m³ y 36% para el de 30kg/m³. Los diámetros de los morteros HPC se redujeron 21%, 30% y 33% para los contenidos de 7.5kg/m³, 15kg/m³ y 30kg/m³, respectivamente. Los morteros UHPC sufrieron reducciones de diámetro respecto a la referencia de 29%, 50% y 100% para los contenidos de 7.5kg/m³, 15kg/m³ y 30kg/m³, respectivamente.

Se observó que los diámetros se reducían considerablemente a medida que aumentaba la cantidad de producto. Esto se debe a la gran superficie específica que posee la tierra de diatomeas, haciendo que absorba agua y aditivo. De hecho, la absorción de agua y aditivo fue tal en la amasada UHPC con 30kg/m³ que le impidió reaccionar completamente durante el tiempo de amasado, como se muestra en la Figura 37. Por esta razón, se decidió descartar este contenido de producto en todas las series de hormigón, ya que necesitaría cantidades exorbitantes de aditivo para lograr el mismo nivel de trabajabilidad que un hormigón de referencia.

Para compensar con la pérdida de trabajabilidad causada por la tierra de diatomeas, se aumentará la cantidad de aditivo, como ya se explicó en el Capítulo 3. Adicionalmente, la pérdida del 50% de trabajabilidad en el mortero UHPC 15kg/m³ advierte que se tendrán que tomar medidas especiales para ese caso.

La Figura 38 muestra los resultados de dicha variación resumidos en una gráfica. Las Figuras 39-41 muestran la variación visual de los diámetros de cada serie (OPC, HPC, UHPC) según el contenido de producto.



Figura 37. Mortero UHPC con 30 kg/m³ de Serenade Max, sin reaccionar después del tiempo de amasado.

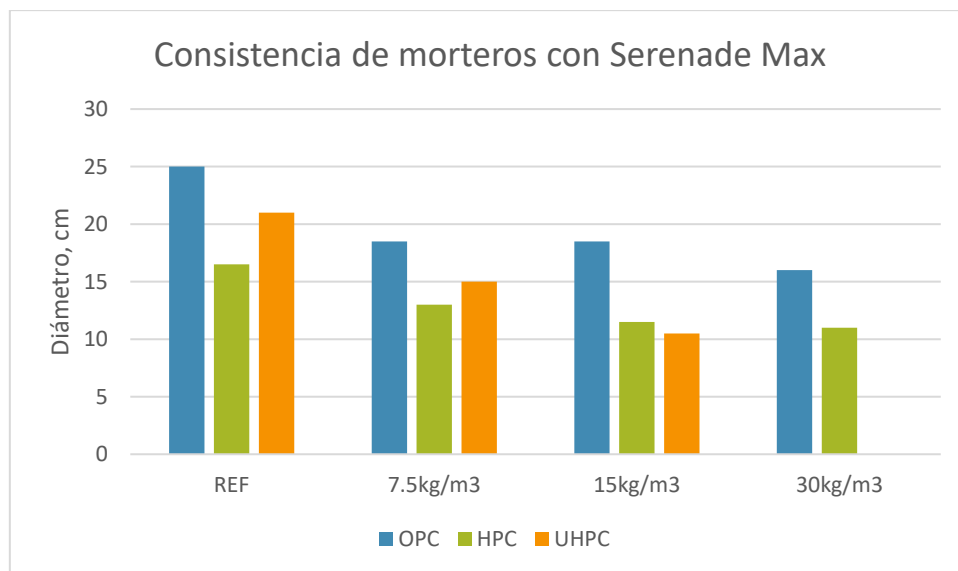


Figura 38. Consistencia de morteros con Serenade Max

Se observa en la Figura 38 que los valores de consistencia de los morteros con bacterias son siempre menores a los de referencia. El cambio es más drástico en las amasadas UHPC, donde la mezcla es muy sensible a las pérdidas de agua y aditivo debido a su baja relación agua/cemento.



Figura 39. Mediciones del mortero OPC en la mesa de sacudidas antes (izq) y después (der) de los golpes para contenidos de bacteria de a) 0 kg/m^3 b) 7.5 kg/m^3 c) 15 kg/m^3 d) 30 kg/m^3



Figura 40. Mediciones del mortero HPC en la mesa de sacudidas antes (izq) y después (der) de los golpes para contenidos de bacteria de a) 0 kg/m³ b) 7.5 kg/m³ c) 15 kg/m³ d) 30 kg/m³

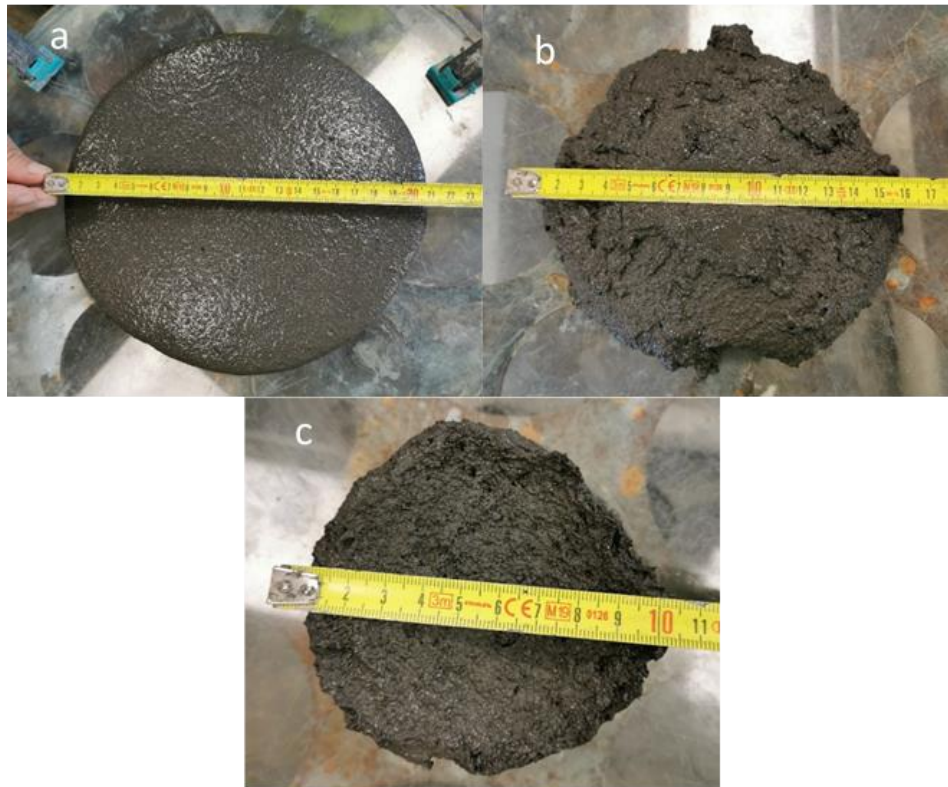


Figura 41. Mediciones del mortero UHPC en la mesa de sacudidas después de levantar el molde para contenidos de bacteria de a) 0 kg/m^3 b) 7.5 kg/m^3 c) 15 kg/m^3

4.2.1.2 Trabajabilidad con Serbiotec

Los componentes se pudieron mezclar bien y no hubo problemas con la amasadora, considerando que estas amasadas contenían fibras. El volumen de la amasada fue de 1.5L, donde 1L se destinó a los prismas y el resto al ensayo de trabajabilidad. Los morteros con este producto presentaron diferentes comportamientos. Algunos morteros aumentaron su diámetro respecto a la referencia de su tipo de hormigón en estas magnitudes: 6% (HPC-10%), 5% (OPC-25% y UHPC-25%) y 3% (HPC-25% y HPC-50%). Otros no sufrieron cambios (0%): OPC-10%, UHPC-10% y UHPC-50%. Sólo la serie de mortero OPC-50% experimentó una reducción de diámetro (12%). En las Figuras 42-44 se observan las mediciones realizadas y en la Figura 45, un gráfico donde aparecen los resultados.

Las amasadas de mortero con este producto resultaron ser muy similares en trabajabilidad a las de referencia, siendo la única excepción la amasada OPC-50%. Todos los materiales fueron pesados acorde a la dosificación y el proceso de amasado fue idéntico a las demás amasadas, por lo que se atribuye la diferencia a factores poco controlables, como la humedad del recipiente previa a la amasada, por ejemplo. Con base en los resultados, se mantendrá la cantidad de aditivo de la dosificación original para los hormigones.

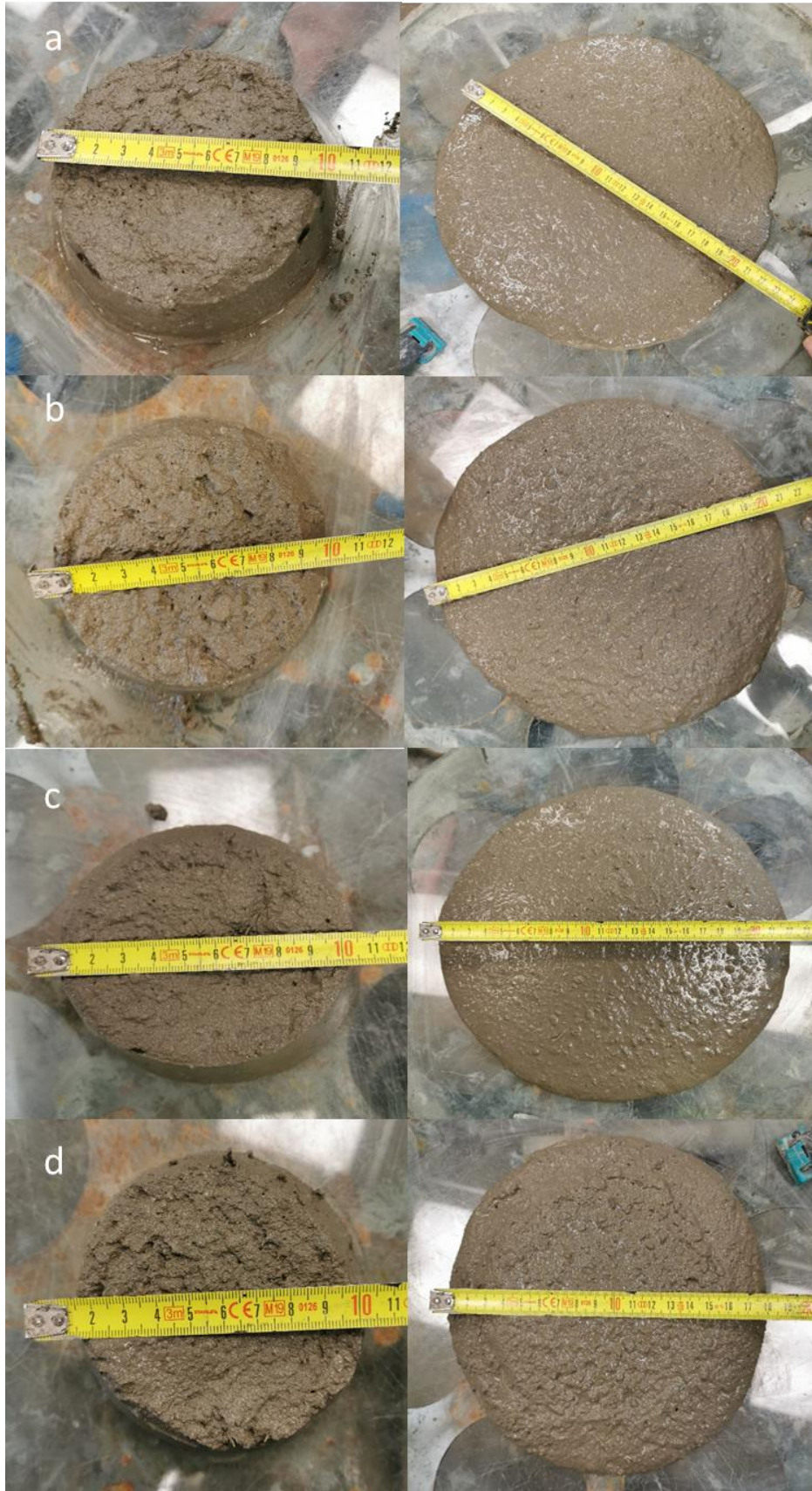


Figura 42. Mediciones del mortero OPC en la mesa de sacudidas antes (izq) y después (der) de los golpes para contenidos de bacteria de a)0% b)10% c)25% d)50%



Figura 43. Mediciones del mortero HPC en la mesa de sacudidas antes (izq) y después (der) de los golpes para contenidos de bacteria de a)0% b)10% c)25% d)50%



Figura 44. Mediciones del mortero UHPC en la mesa de sacudidas para contenidos de bacteria de a) 0% b) 10% c) 25% d) 50%

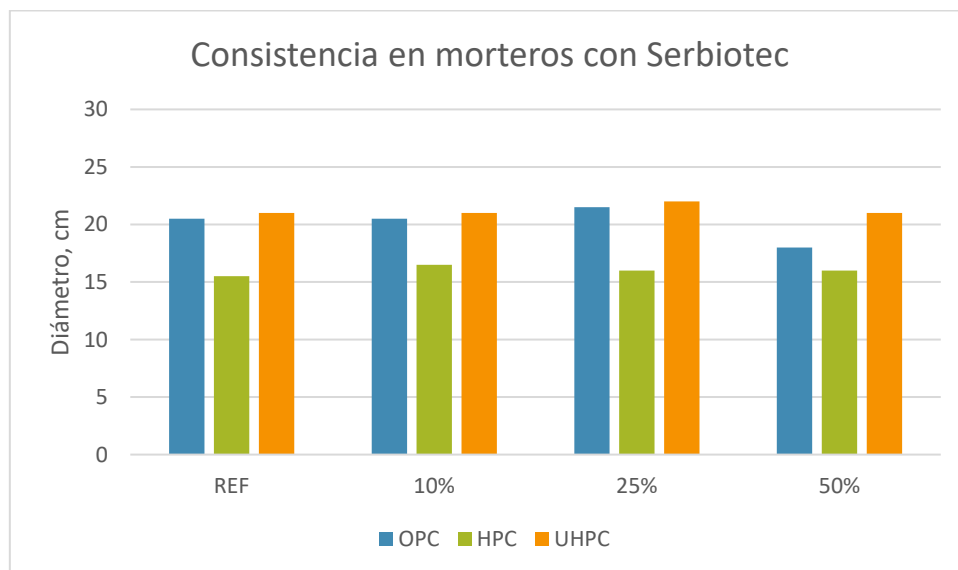


Figura 45. Trabajabilidad de morteros con Serbiotec

En la Figura 45, se observan que los valores de consistencia de los morteros con bacterias son muy similares a los de referencia. Esto parece indicar que el producto Serbiotec no afecta la trabajabilidad de la mezcla a nivel de mortero.

4.2.1.3 Resistencia a compresión

Los morteros con Serbiotec sufrieron una pérdida de resistencia a compresión respecto a la referencia. Las pérdidas fueron 10%, 14% y 20% para las series OPC-10%, OPC-25% y OPC-50%, respectivamente. HPC-10%, HPC-25% y HPC-50% experimentaron pérdidas de resistencia del 9%, 6% y 1% respecto a la referencia, respectivamente. Las series de UHPC son las menos afectadas, con pérdidas del 2%, 3% y 5% en las series UHPC-10%, UHPC-25% y UHPC-50%, respectivamente. Los resultados de las resistencias a compresión se muestran en la Figura 46.

La resistencia a compresión de los morteros con Serbiotec no se redujo de forma significativa en las series de HPC y UHPC, pero sí en las de OPC, que sufrieron las mayores pérdidas. Es posible que al tener una relación agua/cemento 1.5 veces superior a la de los morteros HPC y 3 veces superior a la de los morteros UHPC, los morteros OPC se vean más afectados por el producto.

Además, se observa que el comportamiento de los morteros HPC indica que las pérdidas son menores a mayores cantidades de producto. Esto contrasta con los resultados de las series OPC y UHPC. No está claro en este caso qué sucedería con porcentajes de sustitución mayores en los morteros HPC, ya que la resistencia podría subir, bajar o mantenerse igual.

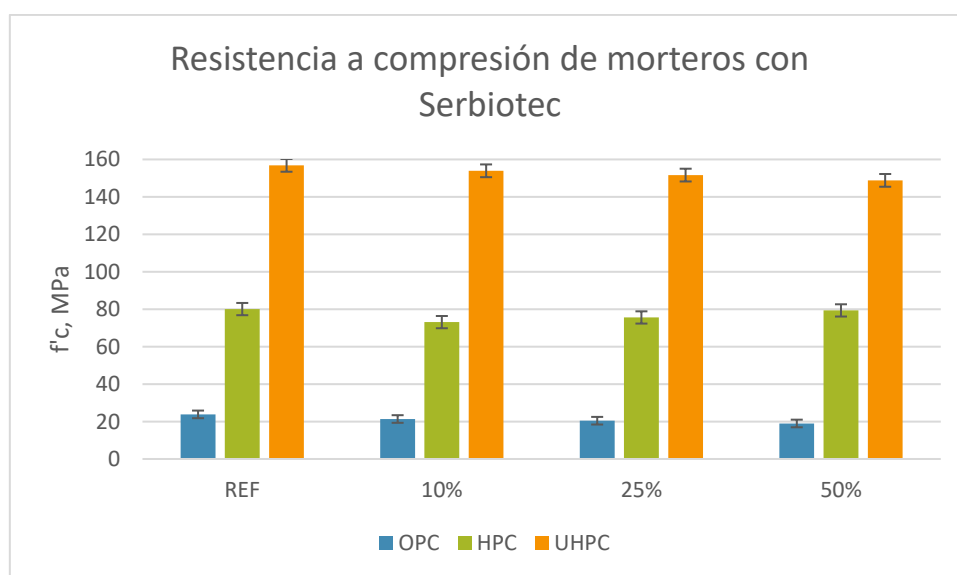


Figura 46. Resistencia a compresión de morteros con Serbiotec

4.2.2 Ensayos de control en hormigones

4.2.2.1 Consistencia con Serenade Max

Los conos obtenidos para la serie OPC fueron 20cm, 16cm y 18cm para los contenidos de producto de 0, 7.5 y 15kg/m³, respectivamente (Figura 47). Los

conos obtenidos para la serie HPC fueron 8cm, 7cm y 6cm para los contenidos de producto de 0, 7.5 y 15kg/m³, respectivamente (Figura 48). Según la Tabla 18, las amasadas OPC tienen una consistencia líquida (16-20cm) y las amasadas HPC, una consistencia blanda (6-9cm). Cabe resaltar que las amasadas con producto tienen cantidades crecientes de aditivo.



Figura 47. Ensayo de cono de los hormigones OPC a) 0 kg/m³, b) 7.5 kg/m³, c) 15 kg/m³



Figura 48. Ensayo de cono de los hormigones HPC a) 0 kg/m³, b) 7.5 kg/m³, c) 15 kg/m³

Se observó que los hormigones OPC y HPC con producto tardaban más de un día en fraguar y se debía esperar mínimo dos días para desmoldar las probetas. Este efecto de retraso en el fraguado puede estar causado por varias razones, entre ellas por el elevado contenido en aditivo fluidificante, la presencia de mayor contenido en tierra de diatomeas con bacterias o por otros efectos, como podría ser la absorción del aditivo por parte de la tierra diatomeas a medida que la mezcla se secaba.

Teniendo este conocimiento, para las amasadas de UHPC se consideró añadir un 5% extra de agua a la mezcla para mejorar la trabajabilidad y evitar retardar el fraguado con exceso de aditivo. Para la amasada de 7.5kg/m^3 no fue necesario añadir agua extra, ya que el escurrimiento fue de 56cm , lo que se consideró aceptable. Sin embargo, la amasada de 15kg/m^3 , sí tuvo una pérdida notoria de trabajabilidad, con un escurrimiento inicial de 38cm . Por lo tanto, la porción de hormigón utilizada para el ensayo se regresó a la amasadora, se agregó el 5% de agua y se siguió amasando durante dos minutos más. En ensayo se repitió y el escurrimiento fue de 51cm , lo cual se consideró como aceptable. El diámetro de la amasada de referencia fue de 61cm . Las amasadas UHPC de referencia y 7.5kg/m^3 entran en la clasificación SF1 ($550\text{-}650\text{mm}$). Sin embargo, la amasada de 15kg/m^3 no entra en esa clasificación, por lo que no se le puede considerar como hormigón autocompactante. Las mediciones se muestran en la Figura 49.

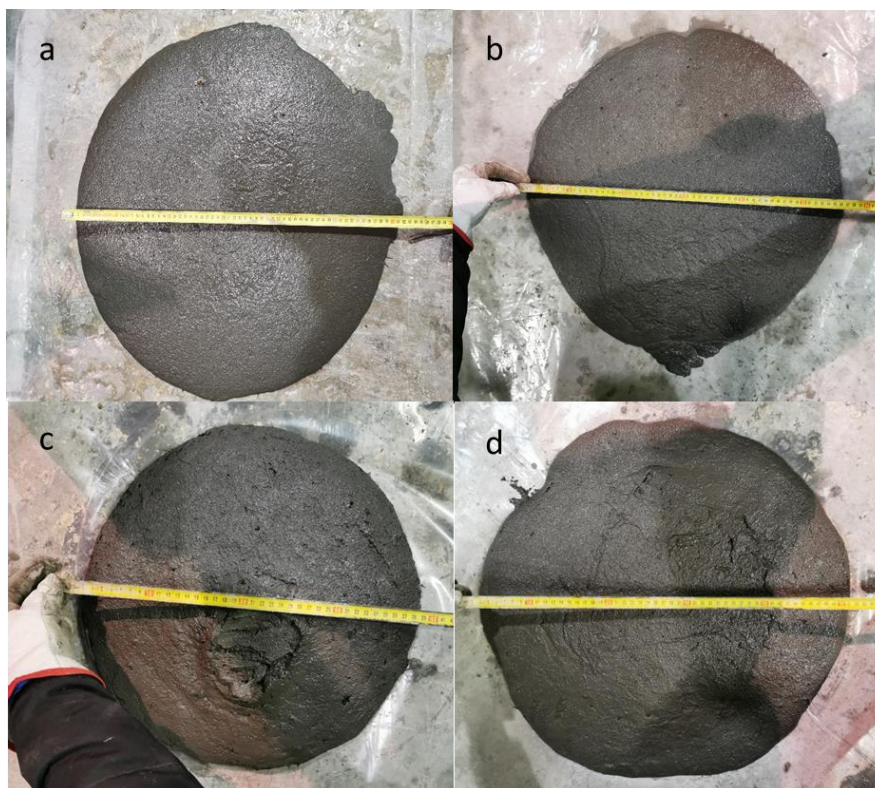


Figura 49. Ensayo de escurrimiento de los hormigones UHPC a) 0 kg/m^3 , b) 7.5 kg/m^3 , c) 15 kg/m^3 inicial, d) 15 kg/m^3 con agua extra

En la Figura 50 se observan los datos de consistencia obtenidos. Las amasadas OPC- 7.5kg/m^3 y OPC- 15kg/m^3 tuvieron pérdidas de trabajabilidad del 20% y 10%, respectivamente, respecto a la referencia. La trabajabilidad de las amasadas HPC- 7.5kg/m^3 y HPC- 15kg/m^3 se redujeron en un 12.5% y 25%, respectivamente, respecto a su referencia. Las amasadas UHPC- 7.5kg/m^3 y UHPC- 15kg/m^3 redujeron su trabajabilidad un 8% y 16%, respectivamente, respecto a su referencia.

Hay una relación proporcional entre la cantidad de Serenade Max y las pérdidas de trabajabilidad en las amasadas HPC y UHPC, ya que, al duplicarse la cantidad

de producto, se duplica la pérdida. Considerando la influencia del aditivo, cabe resaltar que en la referencia de las series HPC se utilizó un aditivo menos potente que el que contenían las amasadas con producto. Por lo tanto, a pesar de tener mayor cantidad de un aditivo más potente, la trabajabilidad de las amasadas con bacterias es inferior que la de referencia. En las amasadas UHPC, no se alteró la cantidad de aditivo, sino que se agregó agua extra. En las amasadas OPC, a pesar de que la cantidad de aditivo es proporcional a la cantidad de producto, OPC-15kg/m³ tuvo la mitad de la pérdida de trabajabilidad que OPC-7.5kg/m³, aún con el doble de producto.

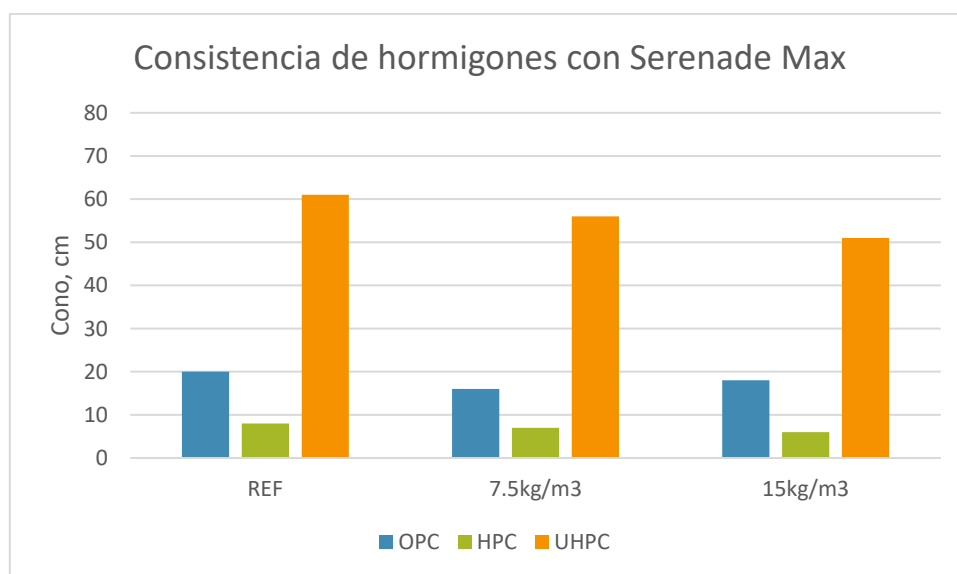


Figura 50. Consistencia de los hormigones con Serenade Max

4.2.2.2 Consistencia con Serbiotec

En las series de OPC y HPC con Serbiotec se obtuvieron mezclas inusualmente secas (7.5cm y 2cm, respectivamente) comparadas a las de referencia, incluso cuando los contenidos de aditivo fueron iguales a los de las amasadas de referencia a pesar del aparente aumento de trabajabilidad que se había observado en los morteros. Según la Tabla 18, la consistencia de la serie OPC es blanda, mientras que la de la serie HPC es seca. La EHE expresa que se debe evitar el empleo de la consistencia seca, salvo en aplicaciones específicas. Para efecto de este trabajo, se aceptará este resultado y se continuará trabajando con esta amasada. En contraste, el hormigón de la serie UHPC, con 69cm de diámetro, fue más fluido que el de referencia, a pesar de que las dosificaciones de mortero y hormigón fueron idénticas y se encuentra clasificado como SF2 (660-750mm). Se observan las mediciones en la Figura 51.

La serie OPC-25% perdió el 62.5% de su trabajabilidad respecto a su referencia; HPC-25%, el 75%. En cambio, la serie UHPC-25% aumentó su trabajabilidad en un 13% respecto a su referencia. En la Figura 52 se observan los datos de consistencia obtenidos.



Figura 51. Ensayo de cono de los hormigones a) OPC, b) HPC y c) ensayo de escurrimiento de UHPC

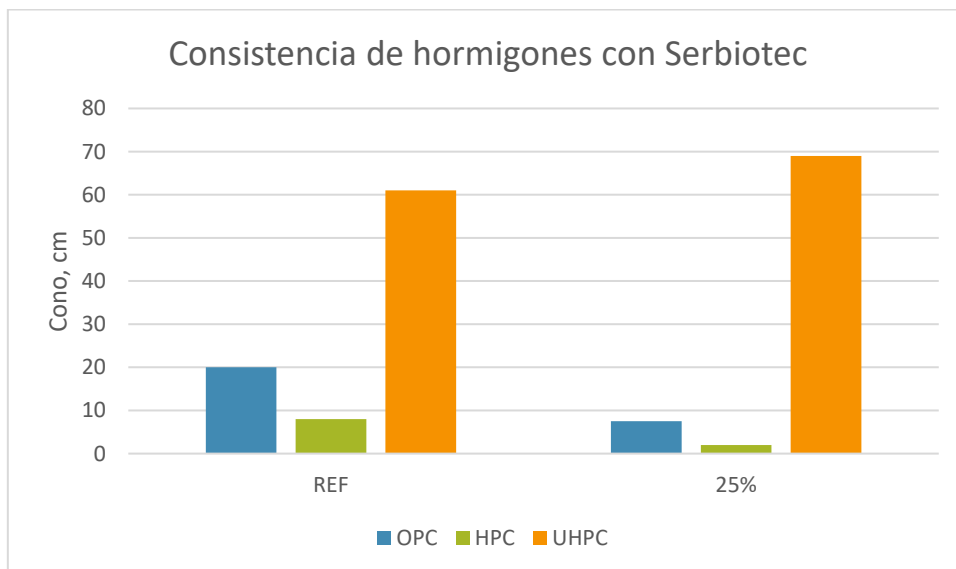


Figura 52. Consistencia de los hormigones con Serbiotec

4.2.2.3 Resistencia a compresión

Los resultados del ensayo de resistencia a compresión fueron variados. Las series OPC de 7.5kg/m^3 y 15kg/m^3 aumentaron su resistencia en un 10% y 3.3%, respectivamente. La resistencia de la serie HPC 7.5kg/m^3 aumentó un 3.7%, mientras que la de la serie HPC 15kg/m^3 disminuyó un 2.1%. En las series de UHPC si hay una tendencia clara a disminuir la resistencia a medida que aumenta la cantidad de producto, con pérdidas de 12.1% y 18.5% para las series de 7.5kg/m^3 y 15kg/m^3 , respectivamente. Esto puede deberse a que hay una cantidad importante de partículas de cemento sin hidratar debido a la absorción de agua de la tierra de diatomeas o a la propia sustitución de arena por la tierra de diatomeas con bacterias. En la serie UHPC 15kg/m^3 se añadió agua extra

para mejorar su trabajabilidad, lo que pudo tener influencia en la pérdida de resistencia detectada. En la Figura 53 se muestran los resultados obtenidos.

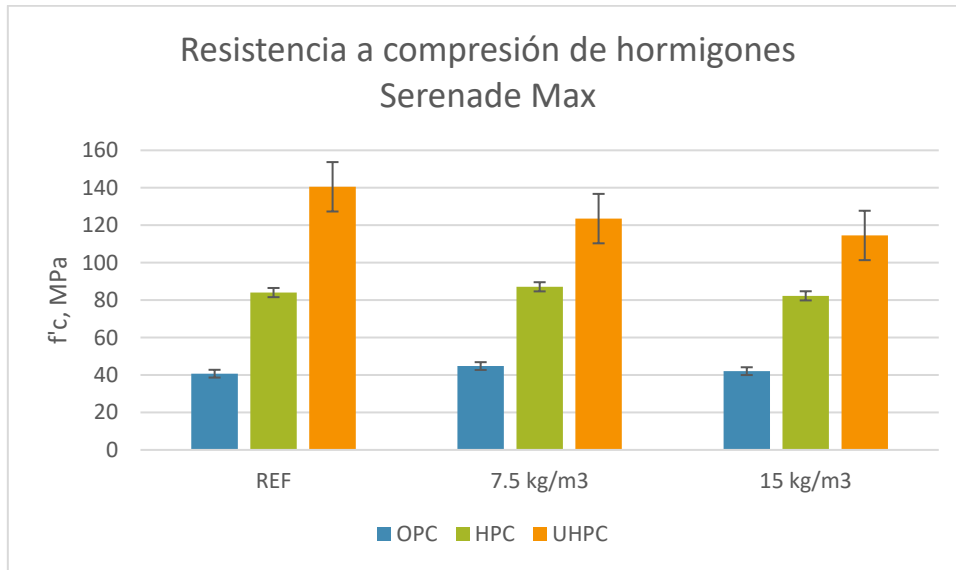


Figura 53. Resistencia a compresión de hormigones con Serenade Max

Para los hormigones con Serbiotec, se observan pérdidas de resistencia de 21% en las amasadas de OPC y HPC. Es posible que la sequedad de las mezclas no permitiera una correcta hidratación de las partículas de cemento o una correcta compactación, provocando este resultado. De hecho, en la Figura 55, se pueden observar algunos huecos en un par de discos de HPC-25% para la prueba de permeabilidad, aunque no se observaron en los discos de OPC-25%. La amasada de UHPC posee prácticamente la misma resistencia que la referencia, con una pérdida del 0.6%. En la Figura 54 se muestran los resultados obtenidos.

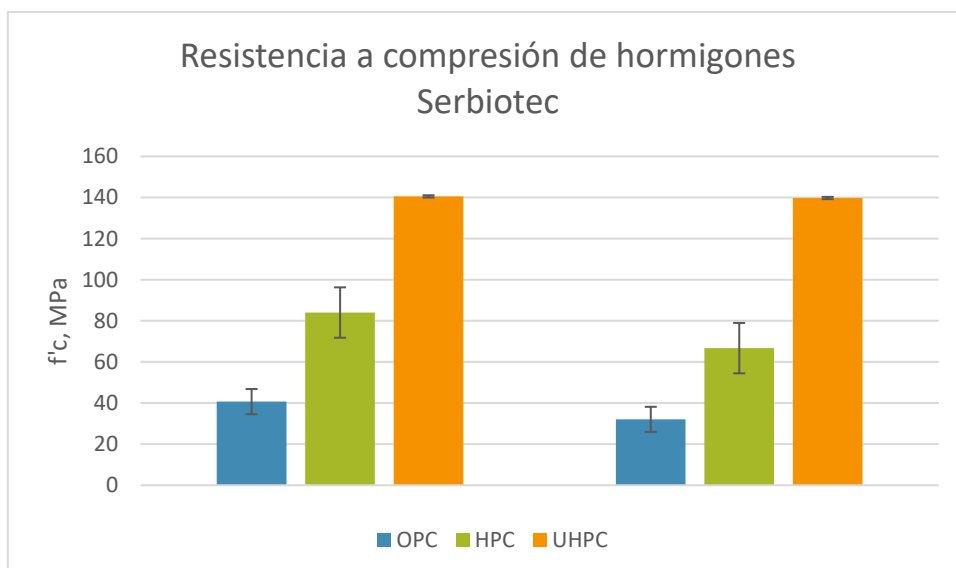


Figura 54. Resistencia a compresión de hormigones con Serbiotec



Figura 55. Huecos en la matriz del hormigón HPC-25%

4.2.3 Autosanado en morteros

4.2.3.1 Prefisuración y aberturas de fisura

La carga pico obtenida al momento de prefisurar a flexión los prismas se muestra en la Figura 56. Las series que obtuvieron mayores cargas pico que sus respectivas referencias son: OPC-25% (6%), UHPC-10% (5%) y UHPC-25% (8%). Las series que obtuvieron cargas pico inferiores a sus respectivas referencias fueron: OPC-10% (1%), OPC-50% (5%), HPC10% (6%), HPC-25% (12%), HPC-50% (17%) y UHPC-50% (16%).

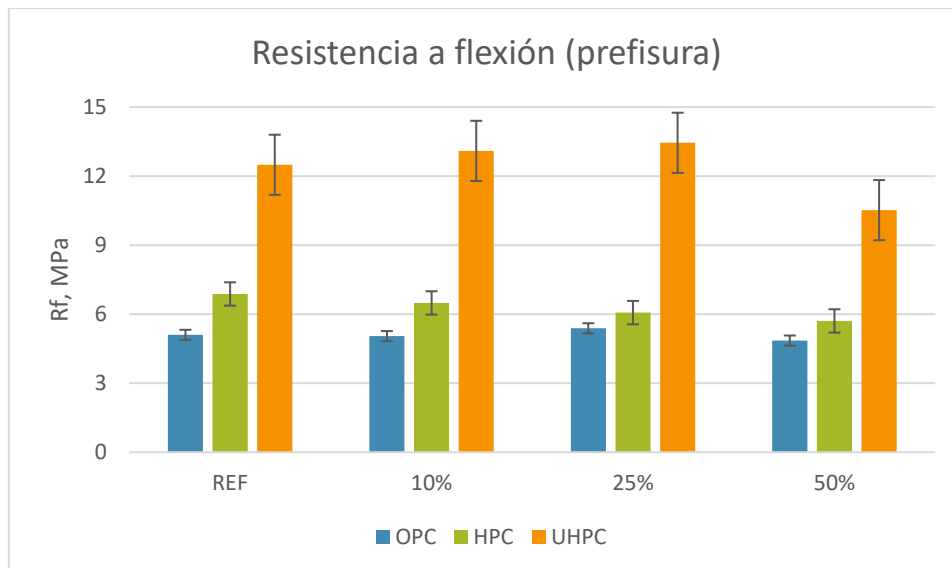


Figura 56. Resistencia a flexión de prismas con Serbiotec

Las aberturas de fisura iniciales (w_0) presentes en cada prisma se han recopilado en las Figura 57. Cada serie consta de 3 prismas, cada uno con dos medidas de fisuras, las cuales son clasificadas en uno de los siguientes rangos: $w_0 < 0.10\text{mm}$, $0.10\text{mm} \leq w_0 \leq 0.20\text{mm}$ y $w_0 > 0.20\text{mm}$.

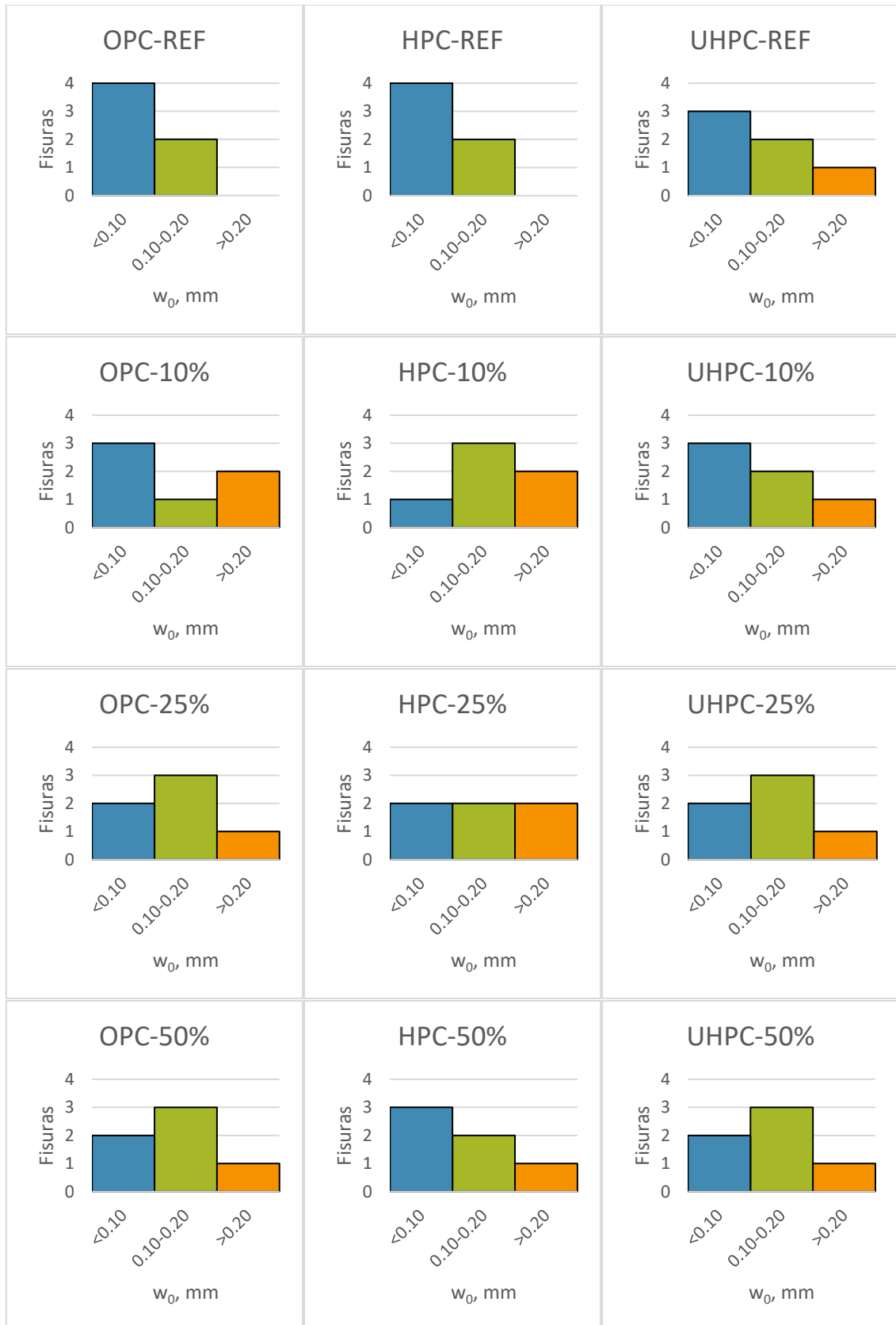


Figura 57. Aberturas de fisura en las series OPC-REF, HPC-REF, UHPC-REF, OPC-10%, HPC-10%, UHPC-10%, OPC-25%, HPC-25%, UHPC-25%, OPC-50%, HPC-50% y UHPC-50%

Como se puede observar en la Figura 57, casi todas las series tienen al menos una fisura por rango. OPC-REF y HPC-REF carecen de fisuras en el rango de fisuras mayores a 0.20mm, debido a la aleatoriedad del proceso de fisuración. Pero en general, las 12 series son lo suficientemente similares para ser comparables entre sí.

4.2.3.2 Evaluación del cierre de fisuras

Después de cumplirse el tiempo de sanado, los prismas fueron inspeccionados y el cierre de fisura se cuantificó mediante el análisis de fotos. Se calculó la eficiencia de cierre de fisuras con la Ecuación 4.1:

$$\mu = \left(1 - \frac{w_{28}}{w_0}\right) * 100 \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde μ es la eficiencia expresada en porcentaje, w_0 es la abertura de fisura inicial, en mm y w_{28} es la abertura de fisura a los 28 días de sanado, en mm.

La Figura 58 muestra todos los datos obtenidos y luego se desglosa en 4 gráficas adicionales que componen la Figura 59 para ver más claramente los siguientes escenarios:

- Las referencias de las series OPC, HPC y UHPC.
- Las series de mortero OPC
- Las series de mortero HPC
- Las series de mortero UHPC

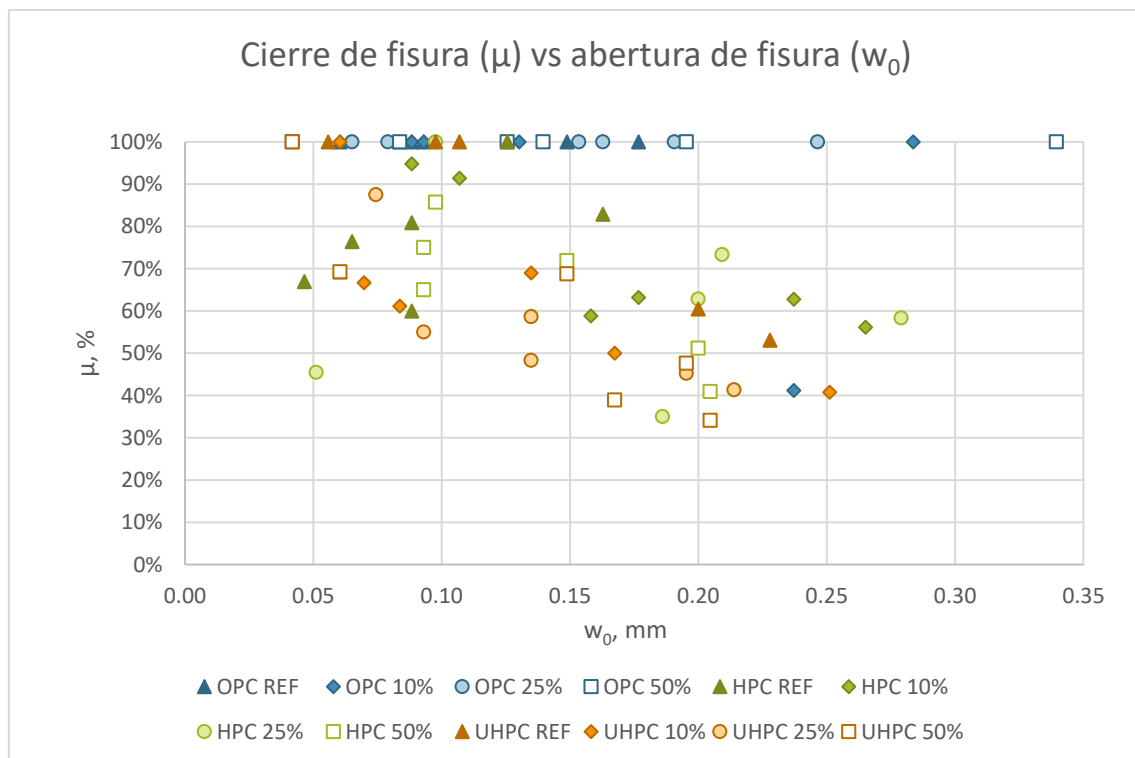


Figura 58. Cierre de fisura vs abertura de fisura inicial de morteros con Serbiotec

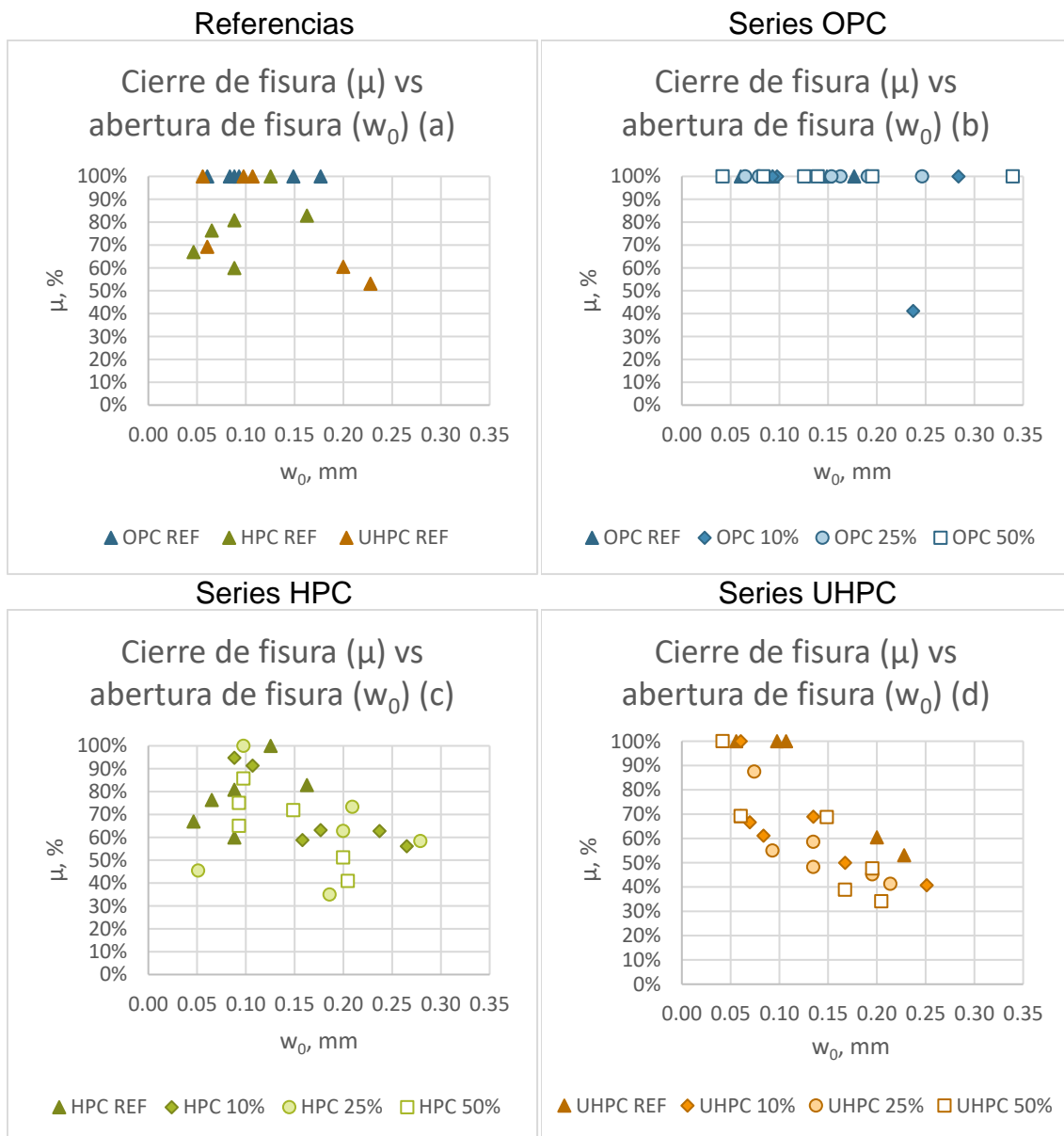


Figura 59. Cierre de fisura vs abertura de fisura de a) referencias, b) series OPC, c) series HPC, d) series UHPC

Comparando las referencias (Figura 59a), todas las fisuras de OPC-REF cerraron ($\mu=100\%$), ninguna de las fisuras de HPC-REF tienen un $\mu < 60\%$ y ninguna de las fisuras de UHPC-REF tienen un $\mu < 53\%$. Parece haber un valor óptimo de μ para valores de w_0 entre 0.10-0.15mm para HPC-REF, mientras que en UHPC-REF se ve un descenso de μ a partir de $w_0 > 0.10$ mm. Para OPC-REF, μ permanece constante independientemente de w_0 cuando $w_0 < 0.20$ mm.

En la Figura 59b, todas las series OPC lograron un cierre total de fisura, salvo una, de la serie OPC-10% con $\mu=41\%$. Nuevamente, μ permanece constante, esta vez con un rango mayor de w_0 , aunque se debe destacar que todos los morteros OPC con $w_0 > 0.20$ mm contienen bacterias y el mayor valor de w_0 fue cerrado por la serie OPC-50%, con la mayor cantidad de bacterias.

En la Figura 59c, las series HPC no tienen tendencias claras, pero se puede observar que la mayoría de los puntos con valores altos de μ se ubican cerca de $w_0=0.10\text{mm}$ y que ninguna serie tuvo un $\mu<30\%$. Además, para iguales valores de w_0 , μ es mayor en HPC-25%, seguido de HPC-10% y luego HPC-50% al final.

En la Figura 59d, las series UHPC muestran que, para iguales valores de μ , w_0 es mayor en UHPC-REF que en las series con bacterias. En todas las series UHPC se vio una tendencia clara donde aumenta μ conforme w_0 se reduce. No se observó ninguna serie con $\mu<30\%$. No se ven tendencias claras entre cual serie con bacterias se comporta mejor.

4.2.4 Autosanado en hormigones

4.2.4.1 Abertura inicial de fisura

Las aberturas de fisura iniciales (w_0) de los discos se han recopilado en las Figura 60-Figura 62. Los discos son clasificados en uno de los seis rangos de fisura que se analizarán:

- $w_0 < 0.10\text{mm}$
- $0.10\text{mm} \leq w_0 < 0.20\text{mm}$
- $0.20\text{mm} \leq w_0 < 0.30\text{mm}$
- $0.30\text{mm} \leq w_0 < 0.40\text{mm}$
- $0.40\text{mm} \leq w_0 < 0.50\text{mm}$
- $w_0 > 0.50\text{mm}$

Las series UHPC, tanto las del ambiente A o como las del D, con o sin bacterias, mantienen una distribución de fisuras muy similar entre sí. El resto de las series tienen distribuciones de fisuras más aleatorias, incluso llegando al punto de tener todas las fisuras en un solo rango (OPC 7,5kg/m³ D). Este resultado puede deberse a la propia aleatoriedad del proceso de fisuración, o también a la influencia de la cantidad o la orientación de fibras que tiene un papel importante en la apertura de fisura individual de cada disco.

Otro factor podría ser la cantidad de discos en cada serie y ambiente. La cantidad de discos está entre 6-13 discos para el ambiente A y entre los 5-7 discos para el ambiente D, lo que hace más probable que algunos rangos estén sobrerrepresentados cuando el número de discos es alto y haciendo que haya rangos sin representar cuando el número es bajo.

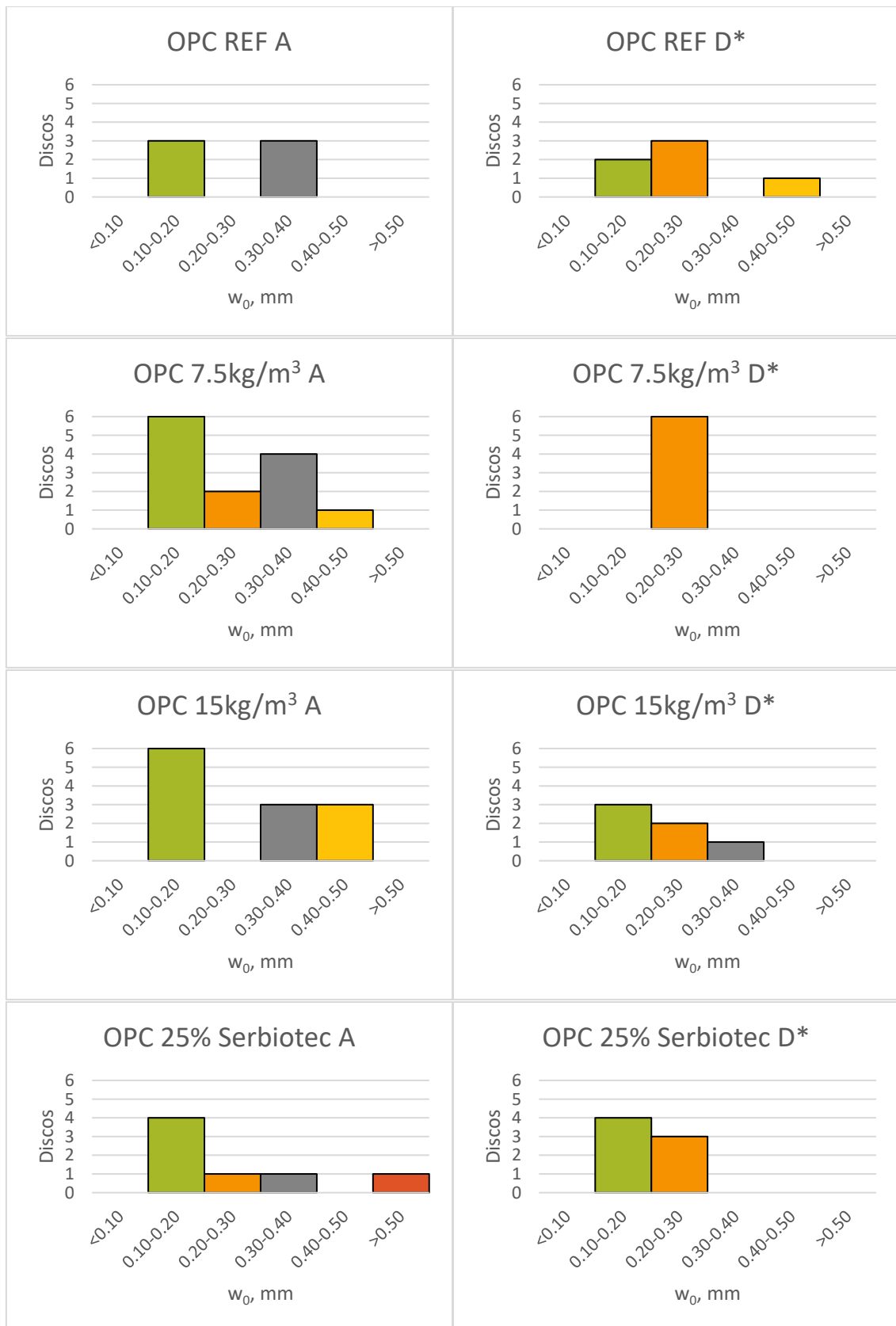


Figura 60. Aberturas de fisura de las series de hormigón OPC A (izq) y OPC D* (der)



Figura 61. Aberturas de fisura de las series de hormigón HPC A (izq) y HPC D (der)

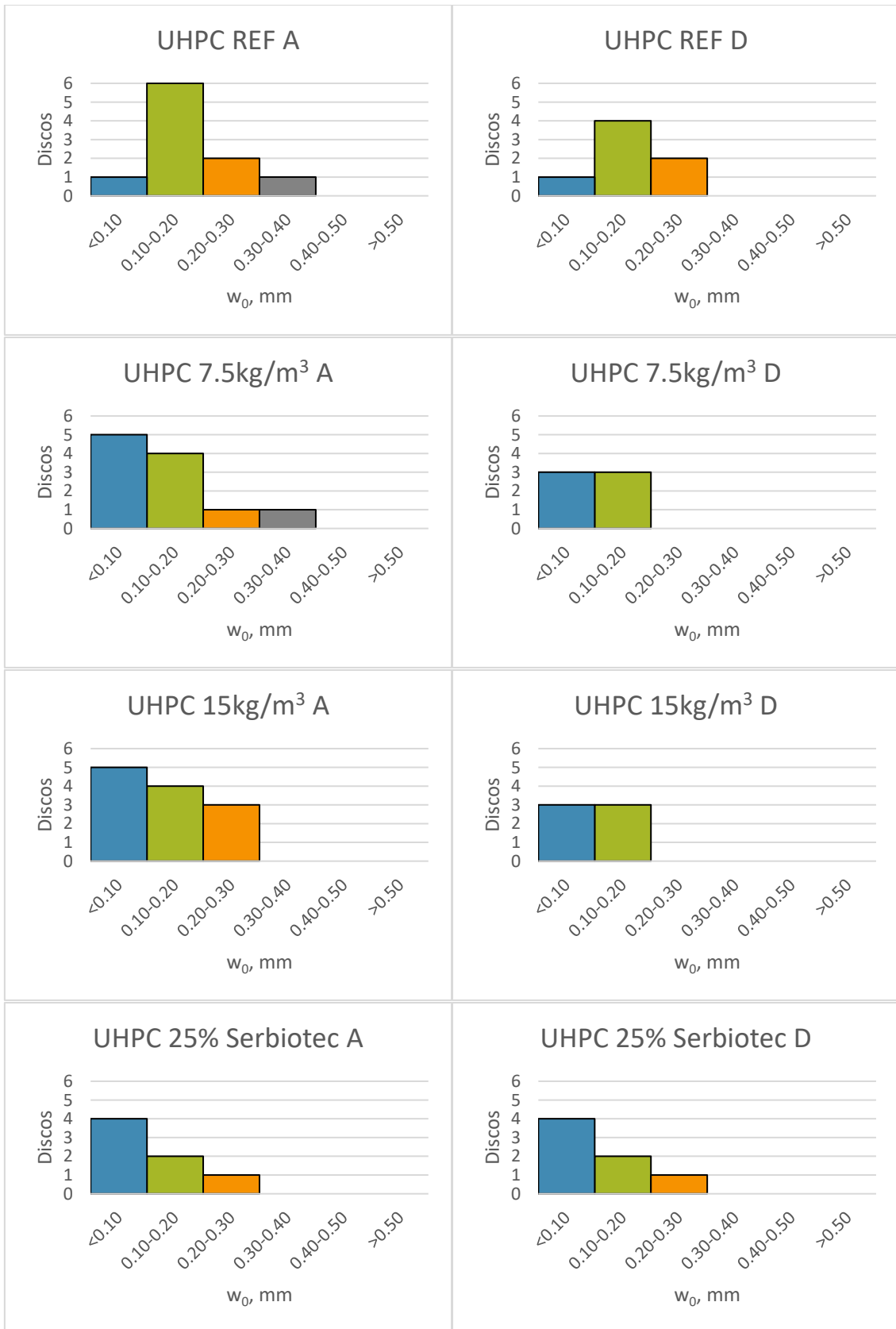


Figura 62. Aberturas de fisura de las series de hormigón UHPC A (izq) y UHPC D (der)

4.2.4.2 Permeabilidad

A partir de los datos recopilados en los ensayos de permeabilidad, se calcularon los flujos normalizados. Luego, se calculó la eficiencia para relacionar el flujo inicial con el final y determinar si hubo mejora. La ecuación es la siguiente:

$$V = A * (h_{n-1} - h_n) \quad \text{Ec. 4.2}$$

$$Q = \frac{\sum V}{A * h_0} \quad \text{Ec. 4.3}$$

$$\eta = \left(1 - \frac{Q_{28}}{Q_0}\right) * 100 \quad \text{Ec. 4.4}$$

Donde V es el volumen de agua en cm³, A es la sección transversal en cm², h_n es el nivel de agua en un determinado tiempo n, Q es el flujo normalizado, η es la eficiencia en %, Q₀ es el flujo normalizado inicial y Q₂₈ es el flujo normalizado a los 28 días de sanado.

Al calcular la eficiencia se adoptarán las siguientes reglas: si Q₂₈ = 0, η = 100%; si Q₂₈ = Q₀, η = 0 y si Q₂₈ > Q₀, se considerará que η = 0. En la Figura 63 se muestran los resultados. Las Figura 64 y Figura 65 son un desglose de la Figura 63.

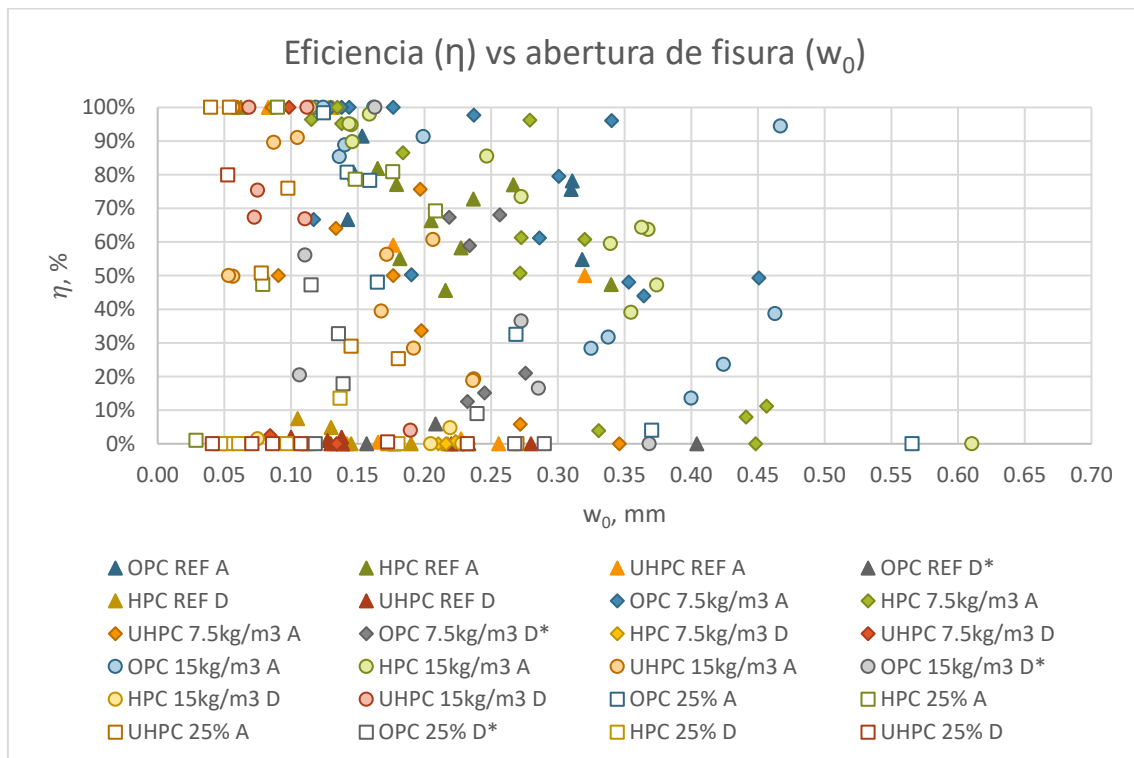


Figura 63. Eficiencia vs abertura de fisura inicial de hormigones

Un criterio en las gráficas de dispersión a partir de este punto es que se identificarán los datos según su tipo de hormigón (OPC, HPC, UHPC) y su ambiente (A=sumergido en agua, D=cámara húmeda, D*= 7días en agua y 21

días en cámara húmeda) con un color: azul para OPC A, gris para OPC D*, verde para HPC A, amarillo para HPC D, naranja para UHPC A y rojo para UHPC D.

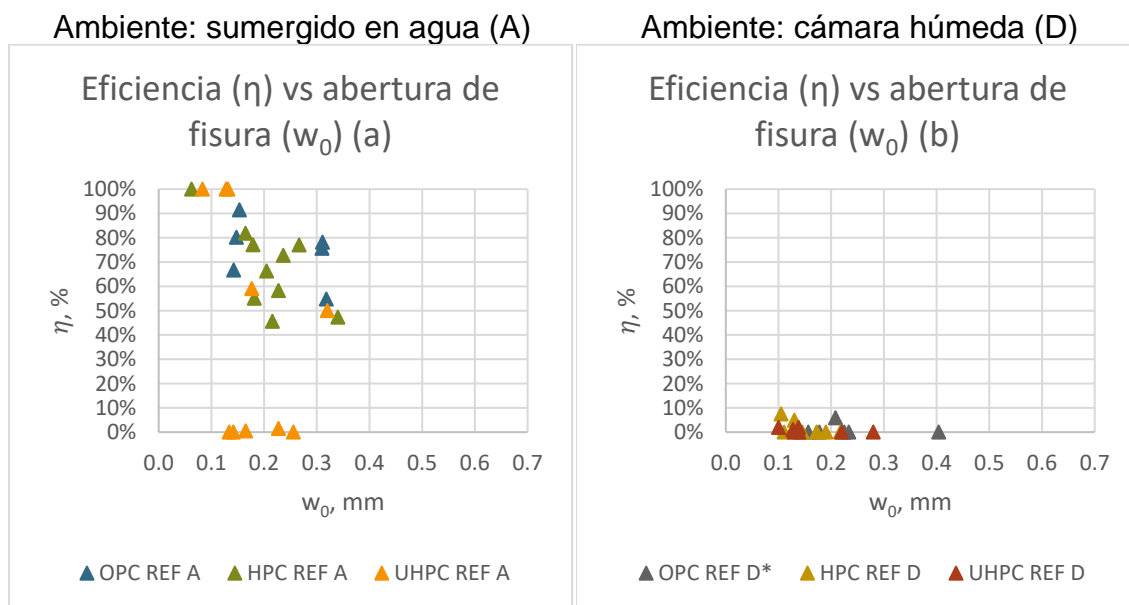


Figura 64. Eficiencia vs abertura de fisura a) referencias A, b) referencias D

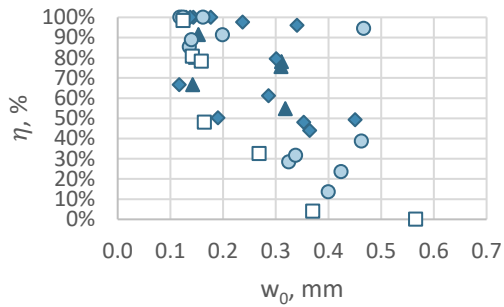
En la Figura 64a, HPC REF A muestra menos η a medida que w_0 aumenta. Es decir, las fisuras pequeñas tienen más eficiencia de sanado que las fisuras grandes. OPC REF A no muestra relaciones claras entre η y w_0 , principalmente por la distribución de las fisuras. La mitad de los discos UHPC REF A no sanaron ($\eta \approx 0\%$) y se ve un descenso en η cuando $w_0 > 0.10$ mm en los discos que sanaron parcialmente. Los valores de η de OPC-REF A y HPC-REF A no son inferiores a 50% y 40%, respectivamente. En cuanto a las referencias del ambiente D, todas las series tienen valores de η inferiores a 10%.

En la Figura 65c, en todas las series OPC del ambiente A se observa que η tiende a 100% cuando w_0 está entre 0.10-0.25 mm. La serie OPC-7.5kg/m³ presenta las mejores eficiencias, con todos sus discos por encima de $\eta = 40\%$ para valores de w_0 entre 0.10-0.45 mm. OPC-15kg/m³ y OPC-25% muestran descensos de η a medida que w_0 aumenta, aunque para $w_0 > 0.30$ mm, OPC-15kg/m³ tiene el mejor rendimiento entre las dos. En las series OPC del ambiente D*, las eficiencias más altas se encuentran en valores de w_0 entre 0.10-0.30 mm, aunque son inferiores a las obtenidas en el ambiente A. Solo un disco ha podido lograr máxima eficiencia (OPC-15kg/m³). Se observa que las series con bacterias poseen mejores eficiencias que la referencia, aunque no es claro cuál de esas series tiene el mejor comportamiento entre las tres.

En la Figura 65e, se ve una clara tendencia donde η disminuye a medida que w_0 aumenta todas las series HPC en el ambiente A, excepto en HPC-25%. Las eficiencias máximas aparecen en valores de w_0 entre 0.05-0.15 mm y los valores de η se mantienen por encima de 40% cuando $w_0 < 0.40$ mm, a partir de ese valor, η disminuye drásticamente. Para una misma η , w_0 es mayor en la serie HPC-15kg/m³ A. En el caso del ambiente D (Figura 65f), la máxima eficiencia obtenida fue $\eta = 13.5\%$ (HPC-25% D).

Ambiente: sumergido en agua (A)

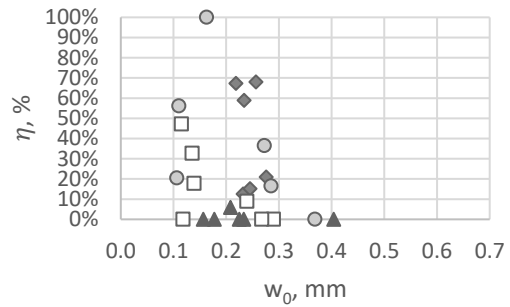
Eficiencia (η) vs abertura de fisura (w_0) (c)



▲ OPC REF A ◆ OPC 7.5kg/m3 A
● OPC 15kg/m3 A □ OPC 25% A

Ambiente: cámara húmeda (D*)

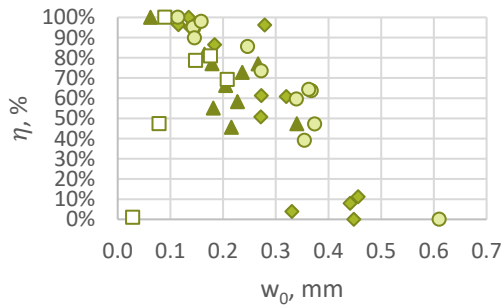
Eficiencia (η) vs abertura de fisura (w_0) (d)



▲ OPC REF D* ◆ OPC 7.5kg/m3 D*
● OPC 15kg/m3 D* □ OPC 25% D*

Ambiente: sumergido en agua (A)

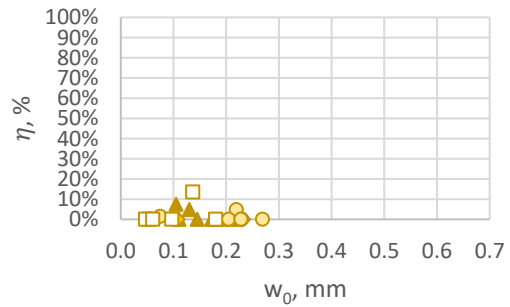
Eficiencia (η) vs abertura de fisura (w_0) (e)



▲ HPC REF A ◆ HPC 7.5kg/m3 A
● HPC 15kg/m3 A □ HPC 25% A

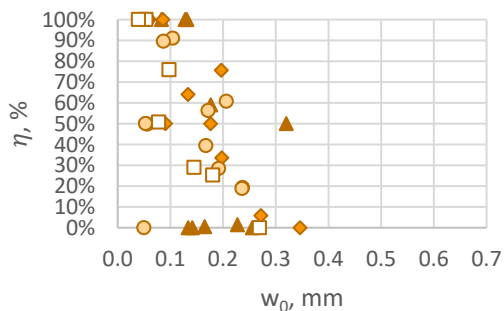
Ambiente: cámara húmeda (D)

Eficiencia (η) vs abertura de fisura (w_0) (f)



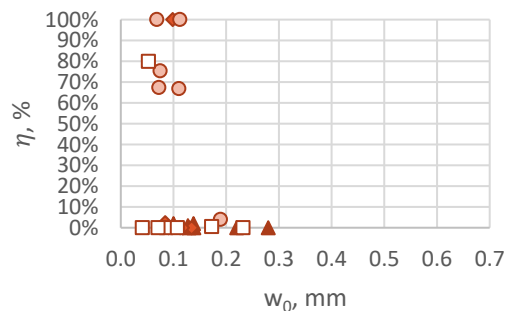
▲ HPC REF D ◆ HPC 7.5kg/m3 D
● HPC 15kg/m3 D □ HPC 25% D

Eficiencia (η) vs abertura de fisura (w_0) (g)



▲ UHPC REF A ◆ UHPC 7.5kg/m3 A
● UHPC 15kg/m3 A □ UHPC 25% A

Eficiencia (η) vs abertura de fisura (w_0) (h)



▲ UHPC REF D ◆ UHPC 7.5kg/m3 D
● UHPC 15kg/m3 D □ UHPC 25% D

Figura 65. Eficiencia vs abertura de fisura c) series OPC A, d) series OPC D*, e) series HPC A, f) series HPC D, g) series UHPC A, h) series UHPC D

En las series UHPC en el ambiente A (Figura 65g), se ve una tendencia donde η disminuye a medida que w_0 aumenta. Las eficiencias máximas aparecen en valores de w_0 entre 0.05-0.15mm. No se ve una tendencia clara entre cual serie tiene un mejor comportamiento entre la referencia y los hormigones con bacterias. En la Figura 65h, las series del ambiente D presentan, en su mayor parte, eficiencias bajas, excepto la serie UHPC-15kg/m³ donde la mayor parte de los discos tiene $\eta > 65\%$ y dos de ellos lograron eficiencias máximas con valores de w_0 entre 0.05-0.10mm.

4.2.4.3 Evaluación de cierre de fisuras

En las Figura 66-75, se muestran algunas fisuras antes y después del sanado de todas las series de hormigón, excepto las referencias de OPC y HPC.

Las fotos de las series OPC-7.5kg/m³ y OPC-15kg/m³ en el ambiente D* (Figura 66) y las medidas de fisura tomadas revelan que el autosanado se dio en su totalidad durante los 7 días que los discos estuvieron sumergidos en agua. Esto significa que el autosanado con bacterias ocurre a una velocidad bastante alta, al menos superficialmente. En general, las series OPC muestran una gran producción de precipitado, pero este se concentra fuera de la fisura, dejando gran parte de su interior, además de algunos puntos superficiales, sin sanar. Otra observación es que el precipitado no presenta un grado de adherencia muy alto y es fácil de quitar. Incluso en el momento cuando se sacaron los discos de agua, se desprendía de la superficie. Puede ser que el precipitado se haya formado en la parte del disco o que se haya formado dentro y se haya movido hasta el exterior del disco, acumulándose ahí.

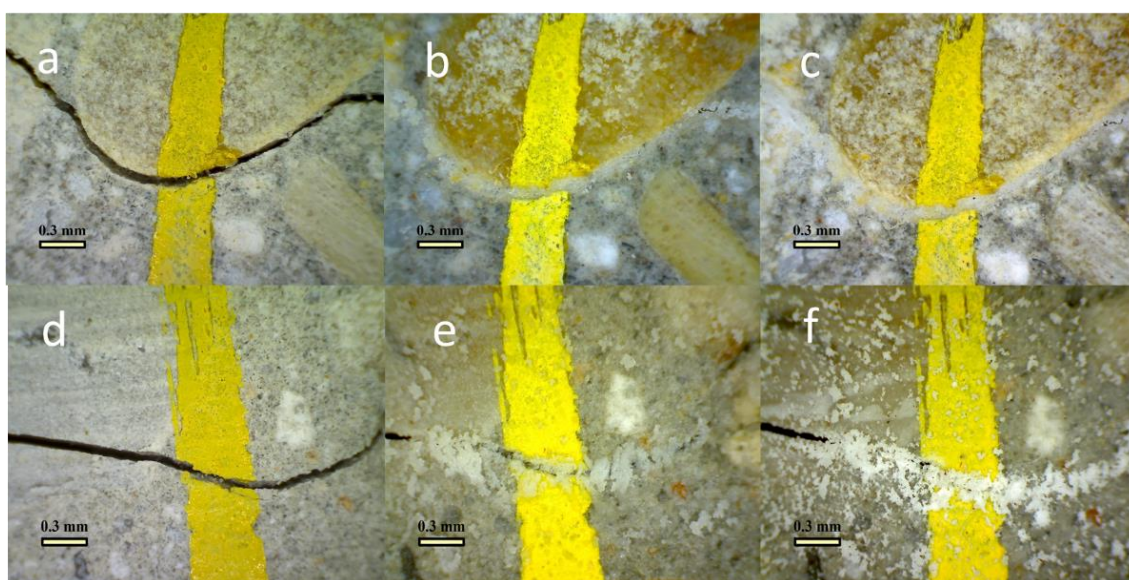


Figura 66. Fisuras antes (izq), después de 7 días (centro) y 28 días (der) del sanado en discos de hormigón OPC-7.5kg/m³ (a,b,c) y OPC-15kg/m³ (d,e,f) en el ambiente D* (7d agua + 21d cámara húmeda)

Las Figura 67b, 67d y 68b muestran patrones de cierre de fisura similares entre las series OPC con Serenade Max y las series OPC con Serbiotec, ambas en el ambiente A. Comparándolas también en el ambiente D* (Figuras 66c, 66f y 68d), también tienen un comportamiento similar.

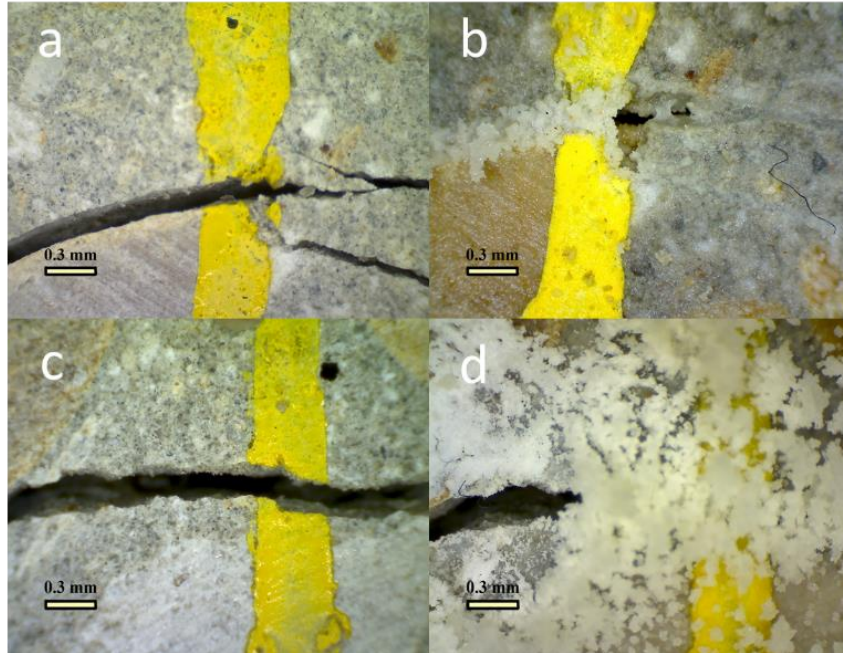


Figura 67. Fisuras antes (izq) y después (der) del sanado en discos de hormigón OPC-7.5kg/m³ (a,b) y OPC-15kg/m³ (c,d) en el ambiente A

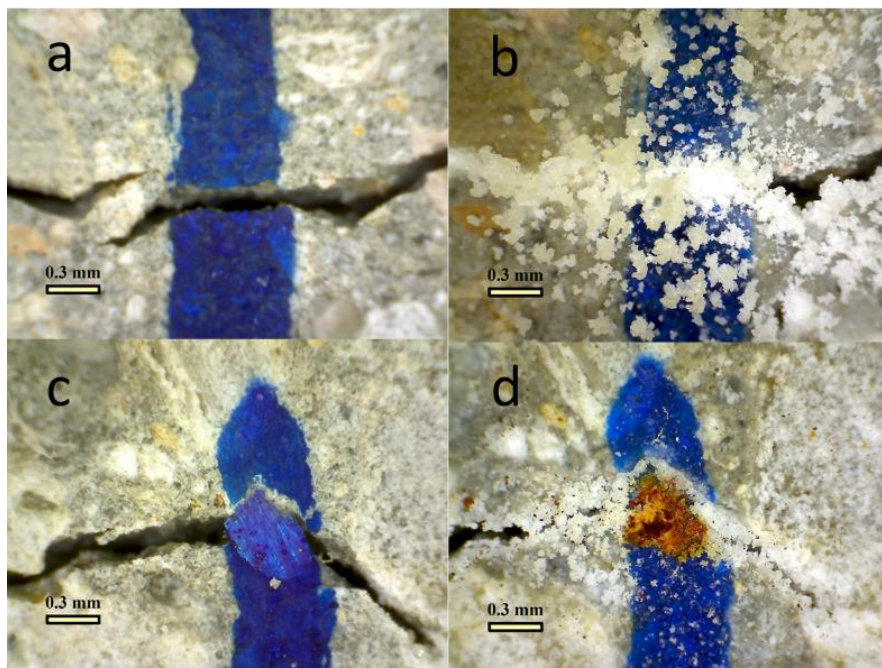


Figura 68. Fisuras antes (izq) y después (der) del sanado en discos de hormigón OPC-25% en el ambiente A (a,b) y en el ambiente D (c,d)

Los discos HPC (Figuras 69-71) en el ambiente A (sumergido en agua) presentan una baja producción de precipitado, al menos visible externamente, en

comparación a los OPC. En el ambiente D (cámara húmeda), es aun menor la producción visible de precipitado y las fisuras están prácticamente iguales. Normalmente, se esperaría una mayor producción de precipitado, ya que estos hormigones contienen más cemento, por lo tanto, más iones calcio que las bacterias pueden captar, pero no es el caso.

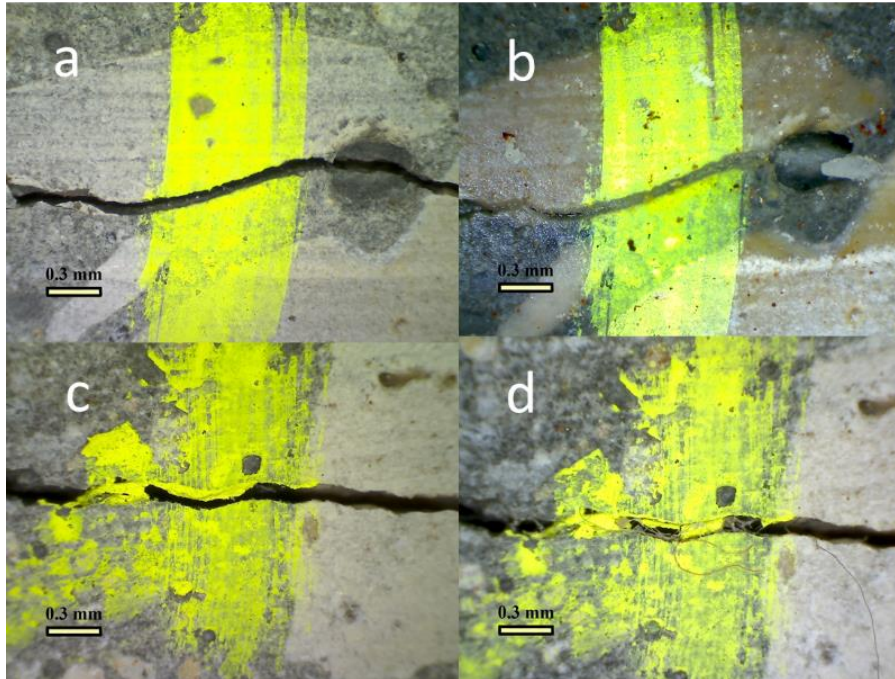


Figura 69. Fisuras antes (izq) y después (der) del sanado en discos de hormigón HPC-7.5kg/m³ en el ambiente A (a,b) y en el ambiente D (c,d)

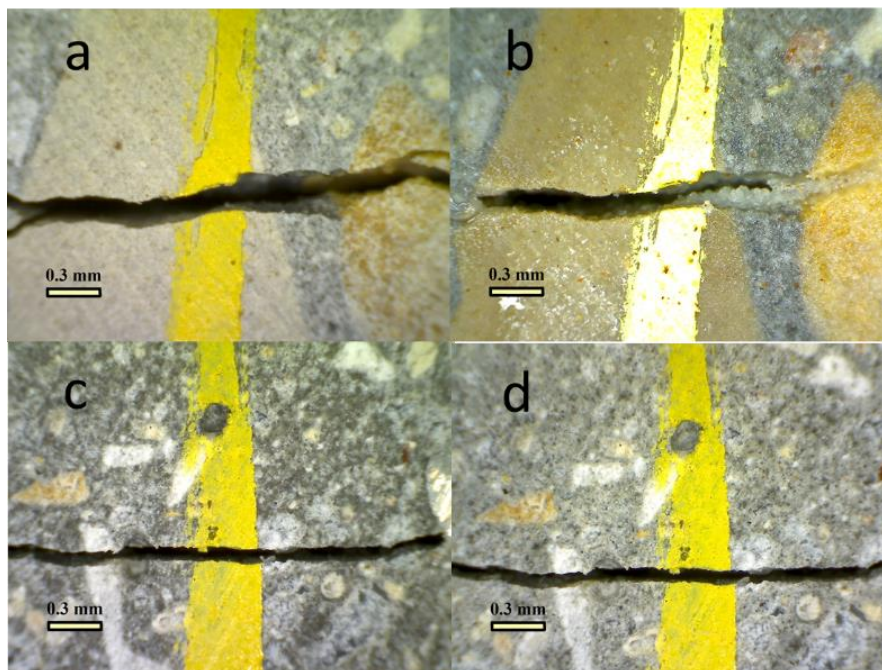


Figura 70. Fisuras antes (izq) y después (der) del sanado en discos de hormigón HPC-15kg/m³ en el ambiente A (a,b) y en el ambiente D (c,d)

En los hormigones UHPC (Figuras 72-75) no se observan diferencias marcadas entre el cierre de fisuras de la referencia y las series con bacterias. Tienen un comportamiento similar al de los hormigones HPC, ya que no producen suficiente precipitado para cerrar las fisuras incluso con altas cantidades de cemento. En el ambiente A, se ve que algunos discos han sanado parcialmente, mientras que en el ambiente D, las fisuras se mantienen iguales.

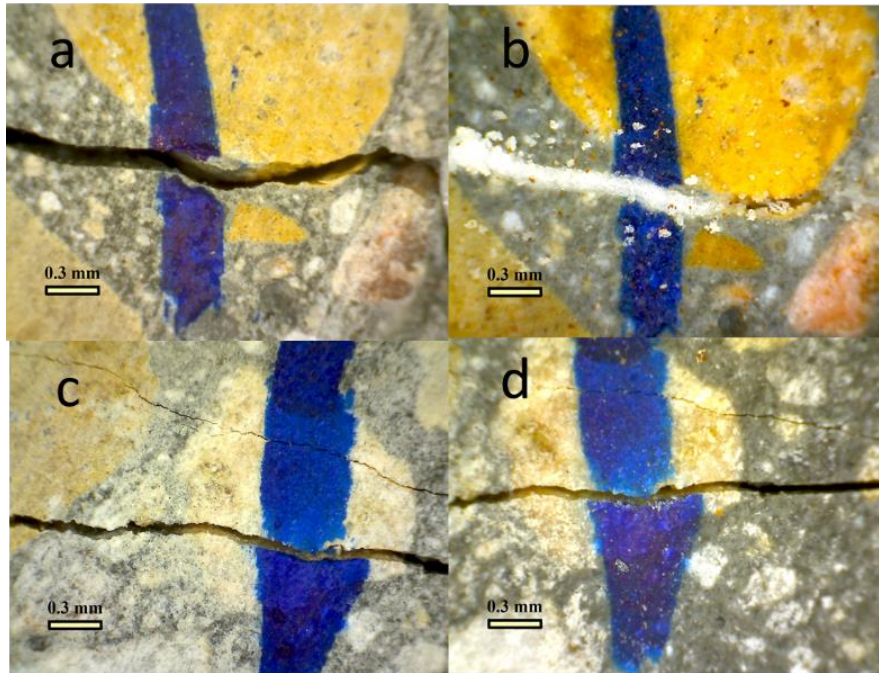


Figura 71. Fisuras antes (izq) y después (der) del sanado en discos de hormigón HPC-25% en el ambiente A (a,b) y en el ambiente D (c,d)

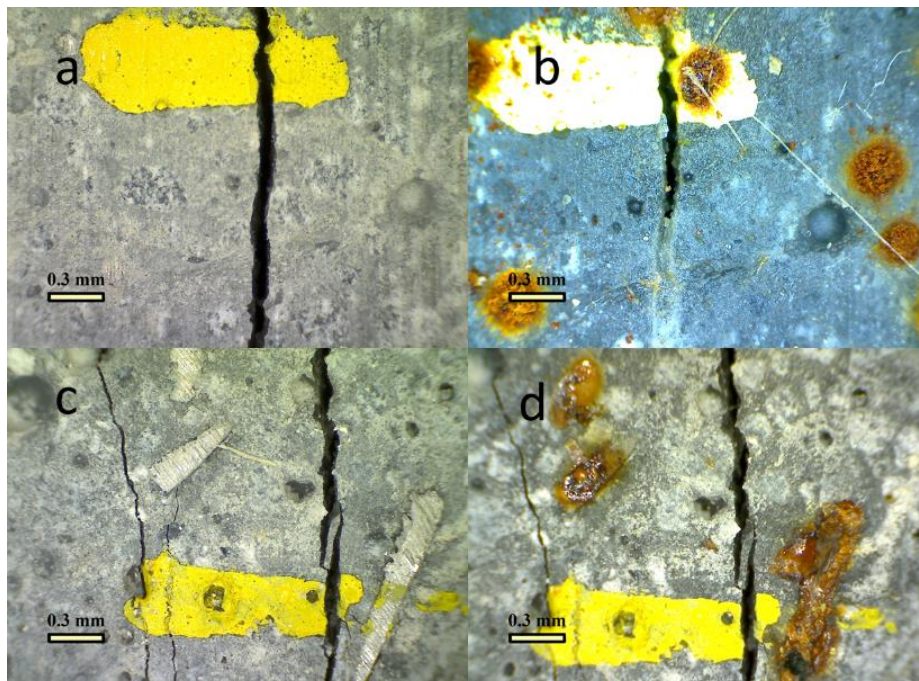


Figura 72. Fisuras antes (izq) y después (der) del sanado en discos de hormigón UHPC-REF en el ambiente A (a,b) y en el ambiente D (c,d)

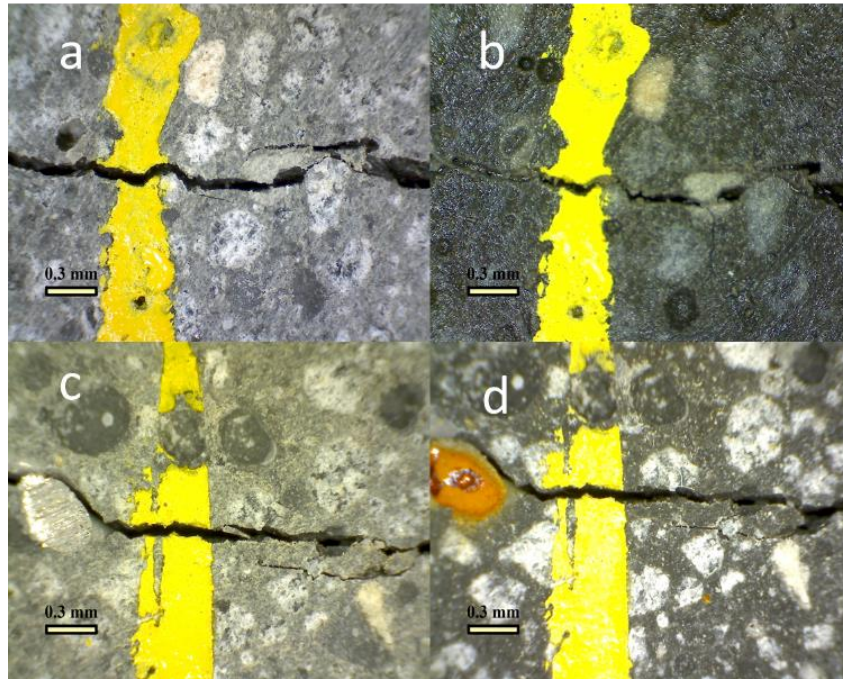


Figura 73. Fisuras antes (izq) y después (der) del sanado en discos de hormigón UHPC-7.5kg/m³ en el ambiente A (a,b) y en el ambiente D (c,d)

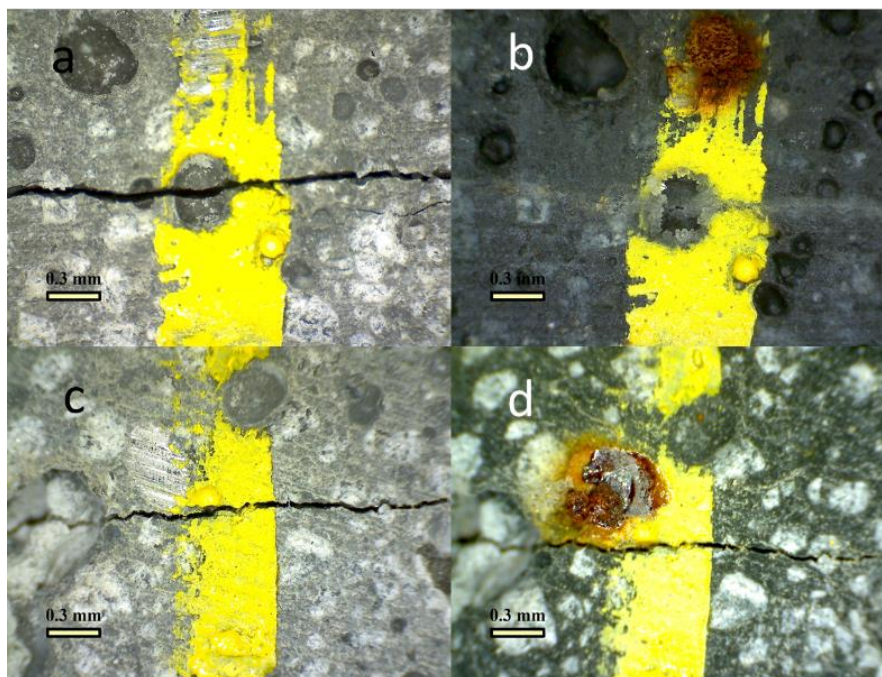


Figura 74. Fisuras antes (izq) y después (der) del sanado en discos de hormigón UHPC-15kg/m³ en el ambiente A (a,b) y en el ambiente D (c,d)

Se confeccionaron gráficas para analizar estos resultados. Se cálculo el valor de μ para cada serie con la ecuación 4.1. La Figura 76 muestra el conjunto de todos los resultados, mientras que las Figuras 77-78 son un desglose de la Figura 76.

Cabe resaltar que no se pudieron obtener las medidas de fisuras a los 28 días de las series OPC-REF y HPC-REF de ambos ambientes, por lo que se consultó bibliografía de otros autores.

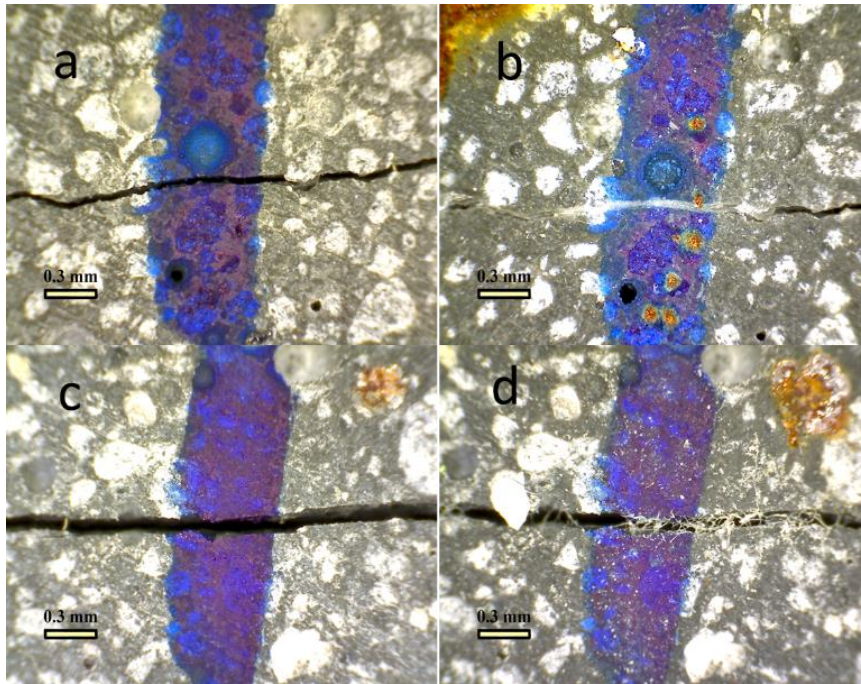


Figura 75. Fisuras antes (izq) y después (der) del sanado en discos de hormigón UHPC-25% en el ambiente A (a,b) y en el ambiente D (c,d)

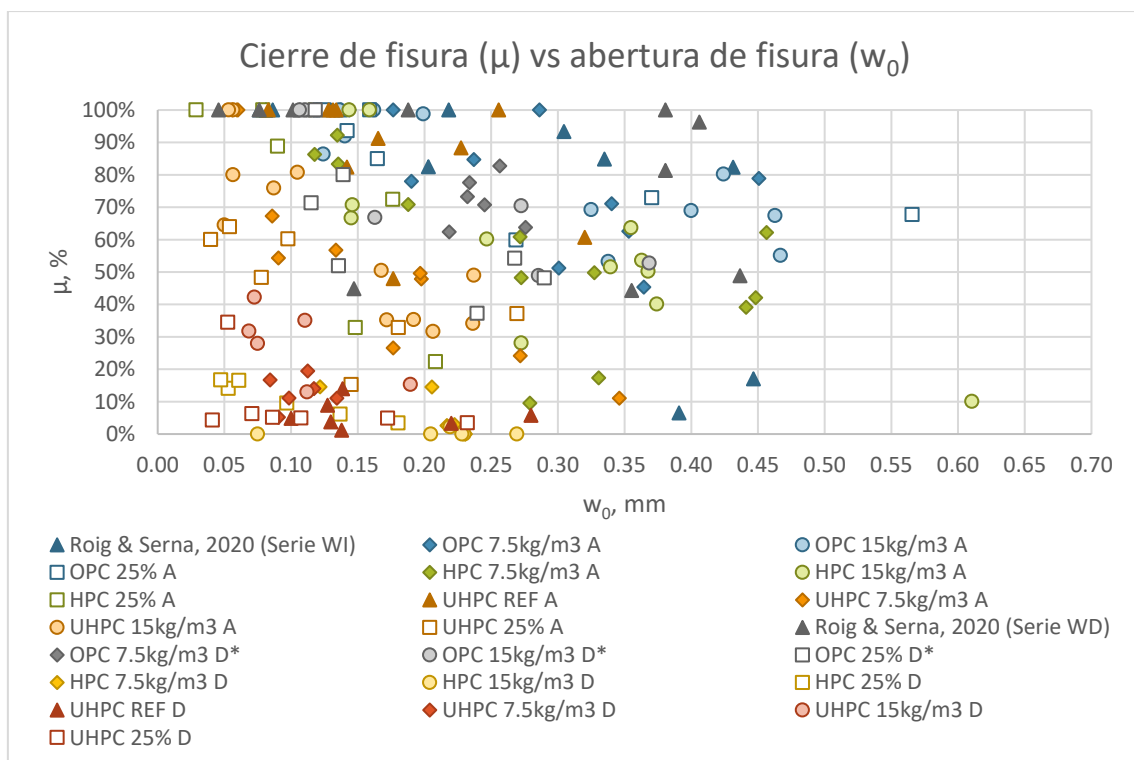


Figura 76. Cierre de fisura vs abertura de fisura inicial de hormigones

Para las series OPC-REF se utilizaron los datos de Roig & Serna (2020), ya que las resistencias del hormigón y ambientes de sanado de su estudio son similares al de este estudio. Los valores que se utilizarán de ese estudio corresponden a las series WI (inmersión en agua) y WD (ciclos secado-humectación, donde cada parte del ciclo dura 3.5 días). Se escogió esta última serie ya que era mucho más

comparable que los datos de la serie HC (cámara húmeda). Para las series HPC, no se encontraron estudios similares, por lo que no tendrá valores de referencia.

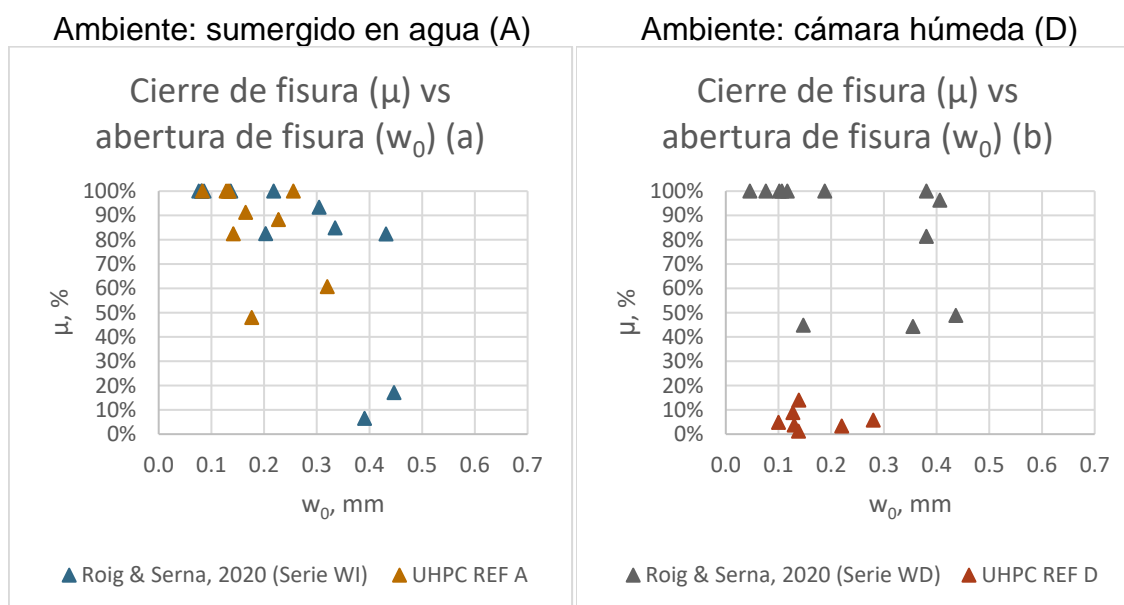


Figura 77. Cierre de fisura vs abertura de fisura inicial a) referencias A, b) referencias D

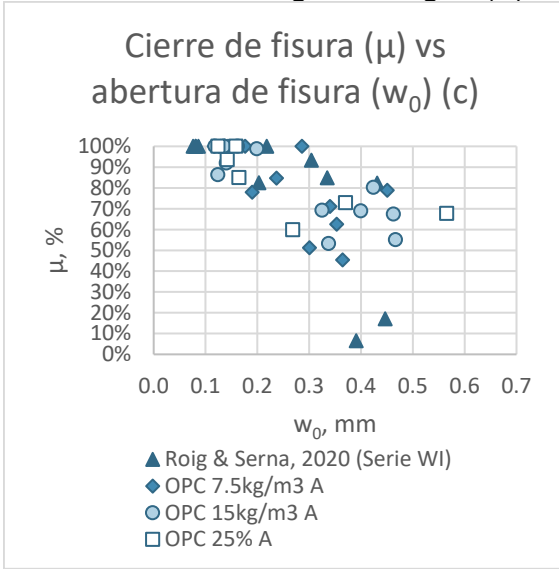
En las series de referencia (Figura 77a-b), los cierres totales de fisura ocurren en valores de w_0 entre 0.05-0.20mm para OPC-REF A y OPC-REF D y entre 0.05-0.25mm para UHPC-REF A. En todos los discos de UHPC-REF D, $\mu < 15\%$

En las series OPC (Figura 78c-d), los cierres totales de fisura ocurren en valores de w_0 entre 0.05-0.30mm en el ambiente A y entre 0.05-0.20mm en el ambiente D. Además, todas las series del ambiente A (excepto la referencia) tienen cierres de fisura superiores a 40%, mientras que todas las series del ambiente D tienen cierres de fisura superiores a 30%. La serie OPC-25% A ($w_0 < 0.60\text{mm}$, $\mu > 60\%$) tiene el mejor comportamiento de las series en el ambiente A, mientras que OPC-REF D ($w_0 < 0.45\text{mm}$, $\mu > 40\%$) tiene el mejor comportamiento en el ambiente D.

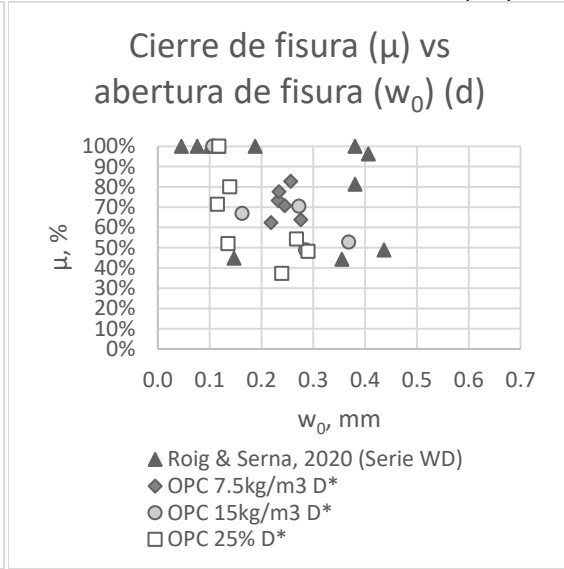
En las series de HPC (Figura 78e-f), se observa que μ disminuye a medida que w_0 aumenta para ambos ambientes, excepto en la serie HPC-15kg/m³ D, donde $\mu \approx 0$ en todos los discos. En general, $\mu < 20\%$ en todas las series en ambiente D. No se observan evidencias claras para determinar cuál serie con bacterias tiene el mejor comportamiento en el ambiente A, mientras que, para el ambiente D, la serie HPC-25% mostró el mejor comportamiento, aunque sus valores de μ sean muy bajos en comparación a los del ambiente A.

En las series UHPC (Figura 78g-h), se observa que μ disminuye a medida que w_0 aumenta. En el ambiente A, el comportamiento de la referencia ($w_0 < 0.35\text{mm}$, $\mu > 45\%$) fue el mejor. De hecho, de todas las series con bacterias, solo un disco (UHPC-15kg/m³ A) logró un cierre total de fisura, en comparación a los 5 discos de la referencia que tuvieron el mismo resultado. En el ambiente D, UHPC-15kg/m³ D ($w_0 < 0.20\text{mm}$, $\mu < 45\%$) presentó el mejor comportamiento.

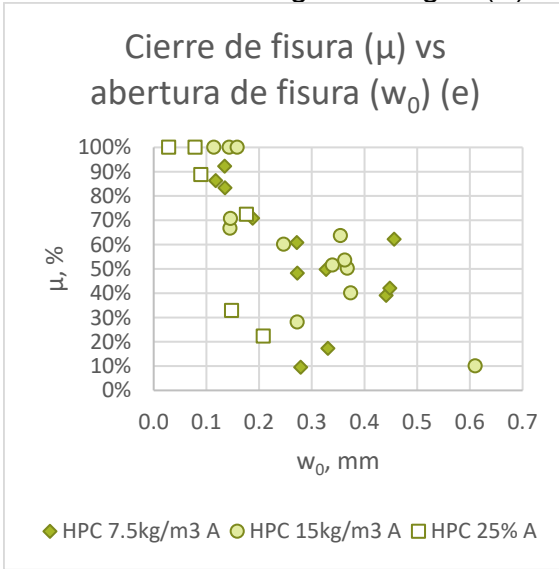
Ambiente: sumergido en agua (A)



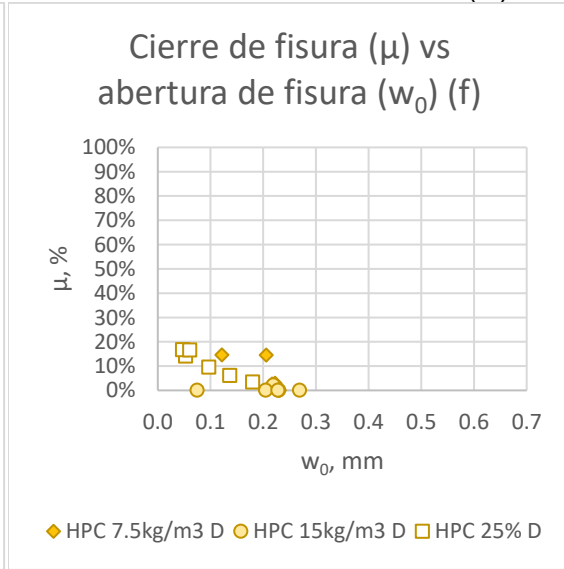
Ambiente: cámara húmeda (D*)



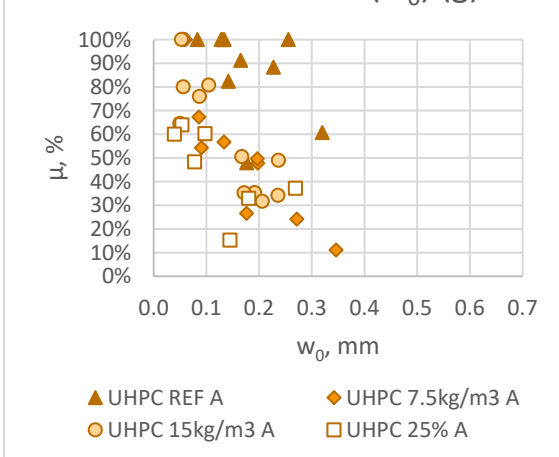
Ambiente: sumergido en agua (A)



Ambiente: cámara húmeda (D)



Cierre de fisura (μ) vs
abertura de fisura (w_0) (g)



Cierre de fisura (μ) vs
abertura de fisura (w_0) (h)

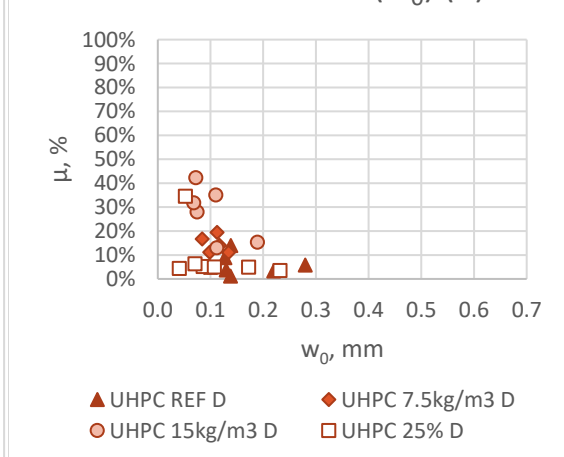


Figura 78. Cierre de fisura vs abertura de fisura inicial c) series OPC A, d) series OPC D*, e) series HPC A, f) series HPC D, g) series UHPC A, h) series UHPC D

Se realizó una comparación entre los morteros y hormigones con Serbiotec en la Figura 79, tomando en cuenta la misma cantidad de producto (25% de sustitución de agua por producto) y el mismo ambiente de sanado (ambiente A).

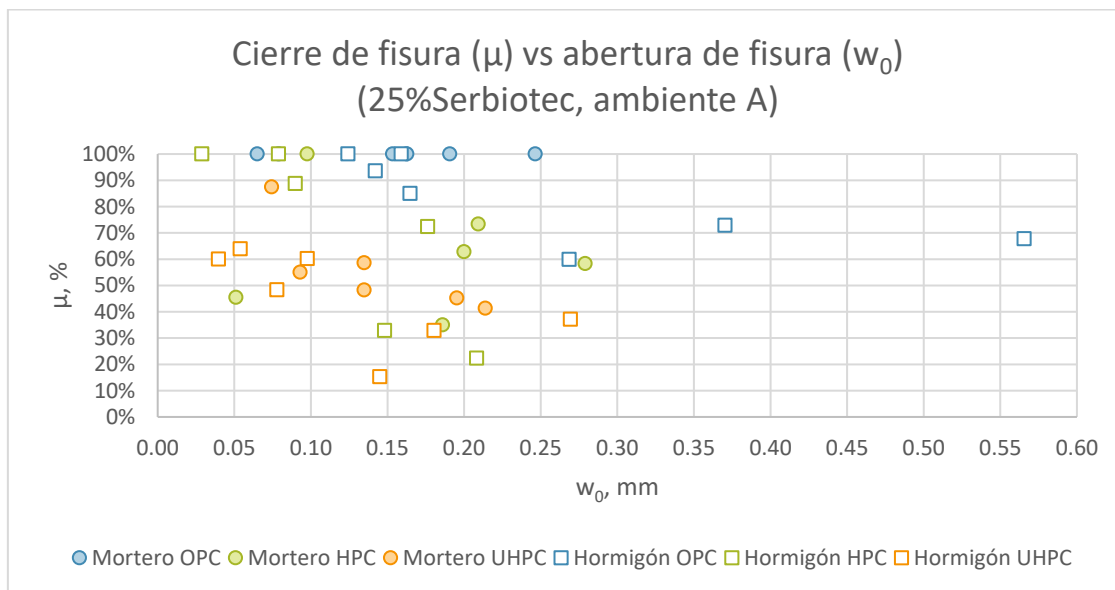


Figura 79. Cierre de fisura vs abertura de fisura inicial de hormigones y morteros con 25%Serbiotec, expuestos al ambiente A (sumergido en agua)

Se puede observar que las series OPC, tanto en hormigón como en mortero, tienen un mejor cierre de fisura que las series HPC y UHPC, pero entre ellas, la de mortero tiene un 100% de eficiencia. Esto puede deberse a la presencia de árido grueso en el hormigón, que aumenta las distancias que tendría que recorrer un agente sanador para sellar una fisura de forma efectiva o al mayor volumen total de pasta en el mortero. Esto también es válido para los hormigones de HPC. A pesar de tener exactamente la misma composición y tamaños de fisura muy similares, los morteros UHPC ($40\% < \mu < 90\%$) tienen mejores eficiencias que los hormigones UHPC ($10\% < \mu < 65\%$). Sin embargo, es posible que la edad de prefisuración influya, ya que la prefisuración de los hormigones fue después de 21 días, mientras que la de los morteros fue a los 7 días.

También se realizó una relación entre el cierre de fisura y el flujo final para verificar si el cierre visual de la fisura del disco estaba relacionado con una mejora en la impermeabilidad. El cierre de fisura representa el sanado externo de la fisura (un cierre superficial de la fisura), mientras que el flujo normalizado final representa una potencial mejora en la durabilidad. Se muestran los resultados en la Figura 80 y su desglose Figura 81).

No se tienen datos de flujo normalizado en el estudio de Roig & Serna (2020), por lo que no se podrán utilizar sus datos en estas gráficas y las series OPC no tendrán referencias. Lo mismo se aplica a las series HPC.

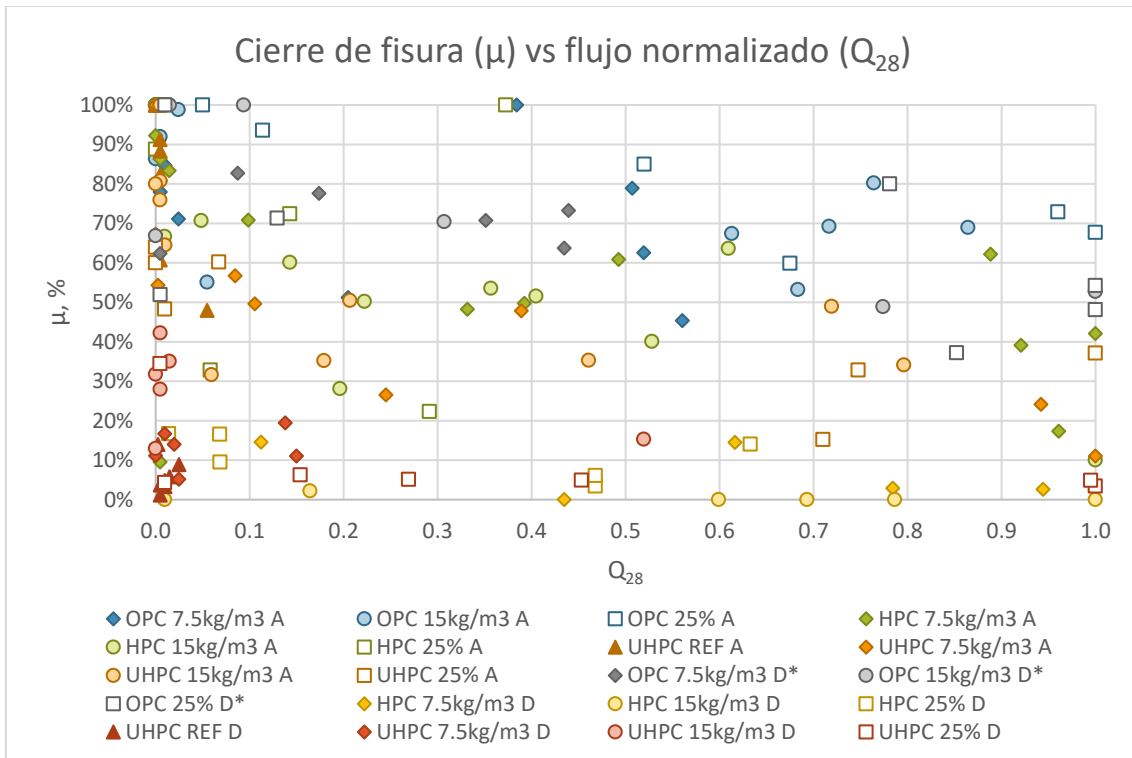


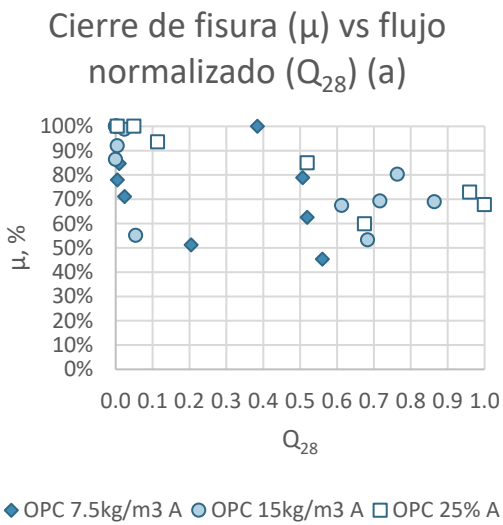
Figura 80. Cierre de fisura vs flujo normalizado final de hormigones

Se observa que el cierre superficial de fisuras no impide la pérdida de agua en las series OPC en ambos ambientes (Figura 81a-b). En la Figura 81c-d, los datos de las series HPC A están muy dispersos y las series HPC D presentan poco sanado en ambos aspectos, ya que tienen flujos altos y poco cierre superficial. En general, la falta de datos de referencia para estas series dificulta el análisis de los resultados.

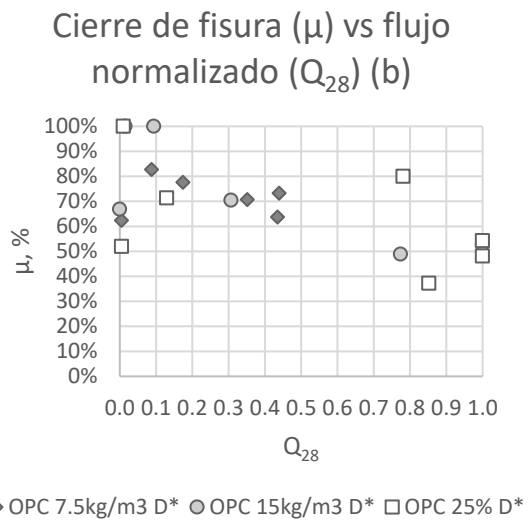
En la Figura 81e-f, las series UHPC A muestran que, en una gran cantidad de discos, no hay flujo de agua cuando $\mu > 50\%$, mientras que en las series UHPC D no hay flujo en la mayoría de los discos cuando $\mu < 50\%$. Debido a que tanto UHPC-REF A como UHPC-REF D se mantienen en el eje Y ($Q_{28}=0$), se puede inferir que la calidad del propio material hace que los flujos tiendan a 0. En las series UHPC, el reemplazo de una parte del árido por producto con tierra de diatomeas podría afectar la permeabilidad de la matriz, ya que solo las series con bacterias se alejan de $Q_{28}=0$, aunque esto también sucede con las bacterias en estado líquido. Cabe mencionar que el desempeño de UHPC-15kg/m³ D en el cierre de fisuras superficiales sobresale entre todas las series de su ambiente.

Finalmente, en las Figura 82-83, se ha realizado la relación entre la eficiencia y el cierre de fisuras para ver su efecto en la mejora de durabilidad. Cabe resaltar que nuevamente harán falta los datos de referencia de las series OPC y HPC.

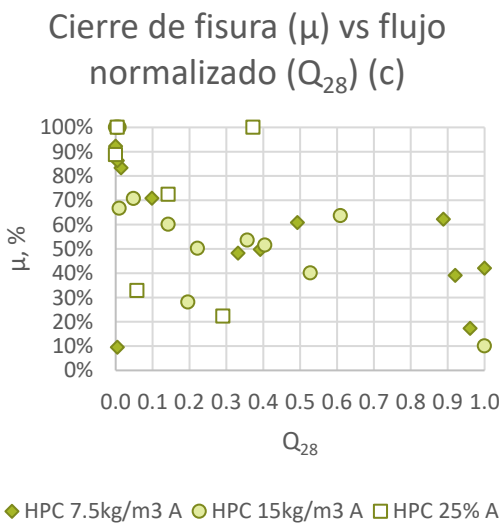
Ambiente: sumergido en agua (A)



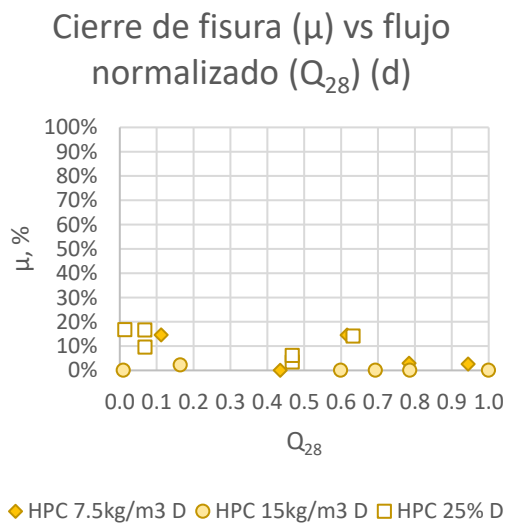
Ambiente: cámara húmeda (D*)



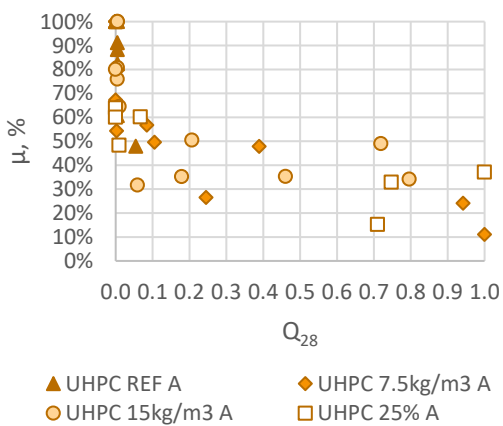
Ambiente: sumergido en agua (A)



Ambiente: cámara húmeda (D)



Cierre de fisura (μ) vs flujo normalizado (Q_{28}) (e)



Cierre de fisura (μ) vs flujo normalizado (Q_{28}) (f)

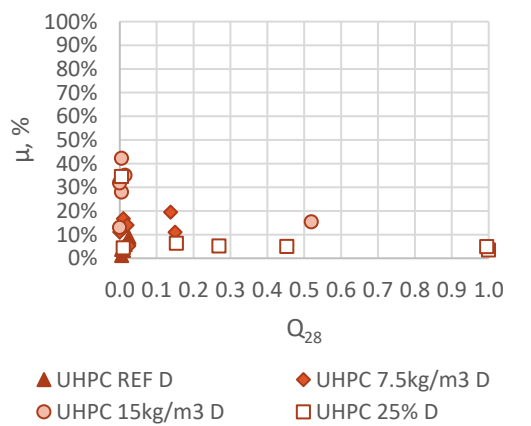


Figura 81. Cierre de fisura vs flujo normalizado final a) series OPC A, b) series OPC D*, c) HPC A, d) HPC D, e) UHPC A, f) UHPC D

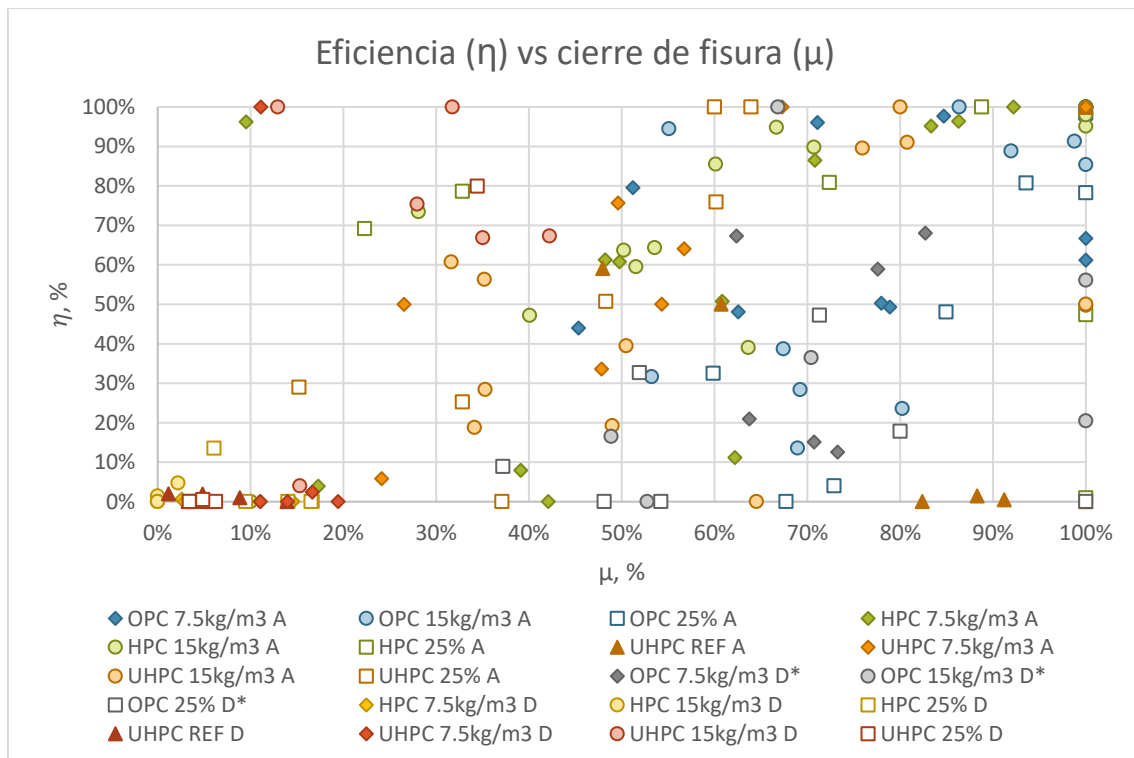


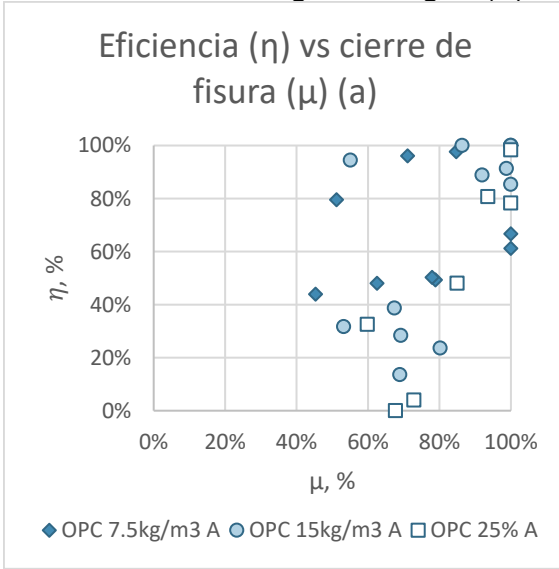
Figura 82. Eficiencia vs cierre de fisura de hormigones

En la Figura 83a-b, se observa que los datos se concentran en la parte derecha de las gráficas, lo que representa un buen cierre de fisura, pero tienen una cierta variabilidad en cuanto a su eficiencia. En el caso de las series OPC en el ambiente A, se observa una concentración de puntos en la parte superior a partir de $\mu > 80\%$, lo que puede significar que es más probable tener mejores eficiencias si la fisura está cerrada superficialmente. En las series del ambiente D*, los datos están más dispersos y no muchos logran eficiencias altas.

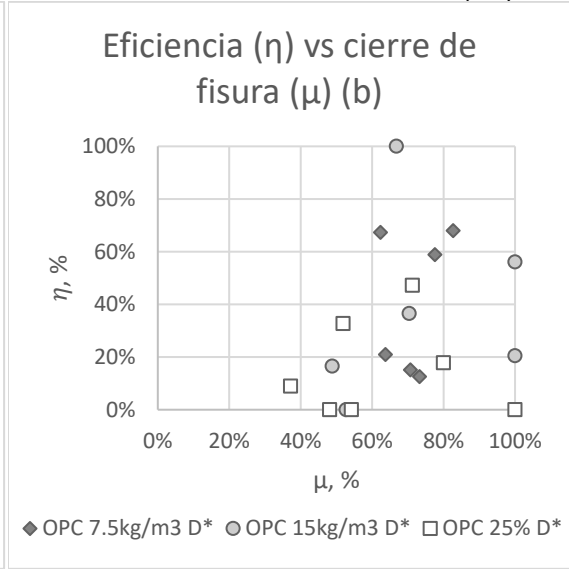
En la Figura 83c, las series HPC en ambiente A presentan una tendencia lineal a partir de $\mu > 40\%$, donde se ve un aumento casi proporcional de η respecto a μ . En la Figura 83d, todos los puntos se concentran cerca del origen, lo cual significa que no hubo un buen sanado interno ni externo en las series HPC en cámara húmeda.

En la Figura 83e, las series UHPC con bacterias en ambiente A también muestran una cierta linealidad. La mayoría de los discos de la serie de referencia se concentra en la esquina inferior derecha, lo que significa que, a pesar de un gran cierre de fisura, no son capaces de conservar agua. En la Figura 83f, la serie UHPC-15kg/m³ resalta por tener altas eficiencias para cierres de fisura intermedios, mientras que la mayoría de los puntos, incluidos los de referencia, se acumula en el origen.

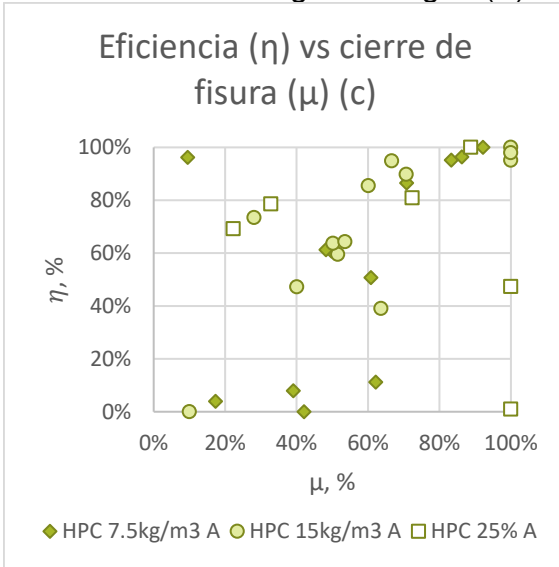
Ambiente: sumergido en agua (A)



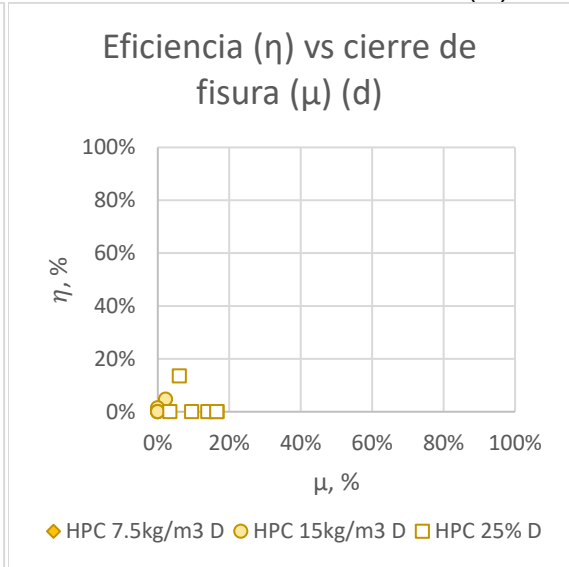
Ambiente: cámara húmeda (D*)



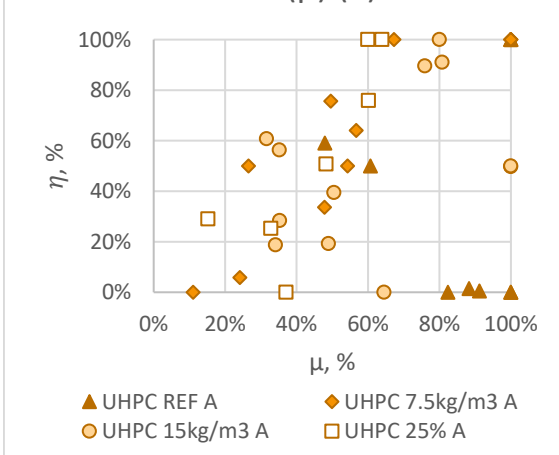
Ambiente: sumergido en agua (A)



Ambiente: cámara húmeda (D)



Efficiencia (η) vs cierre de fisura (μ) (e)



Efficiencia (η) vs cierre de fisura (μ) (f)

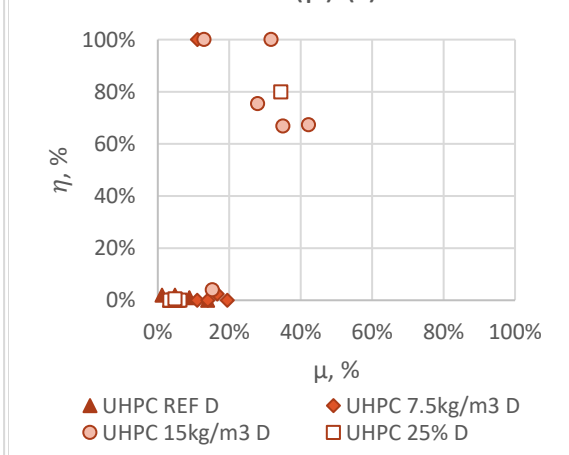


Figura 83. Eficiencia vs cierre de fisura de hormigones a) series OPC A, b) series OPC D*, c) HPC A, d) HPC D, e) UHPC A, f) UHPC D

4.2.4.4 Penetración de cloruros

El objetivo de P, la distancia de penetración de cloruros que ingresan a la parte superior del disco al estar en contacto con la columna de agua salada en el tubo, es proporcionar una medida base de la penetración de cloruros en cada tipo de hormigón, por lo que no se espera que tenga relación con la abertura de fisura. Los valores de P se muestran en la Figura 84. Se observan dispersiones en la mayoría de las series, principalmente en las de OPC y HPC. Esto puede deberse a la influencia del árido grueso en la penetración de agentes corrosivos. En UHPC-7.5kg/m³ D también se observa una notable dispersión, pero no contiene áridos gruesos en su matriz.

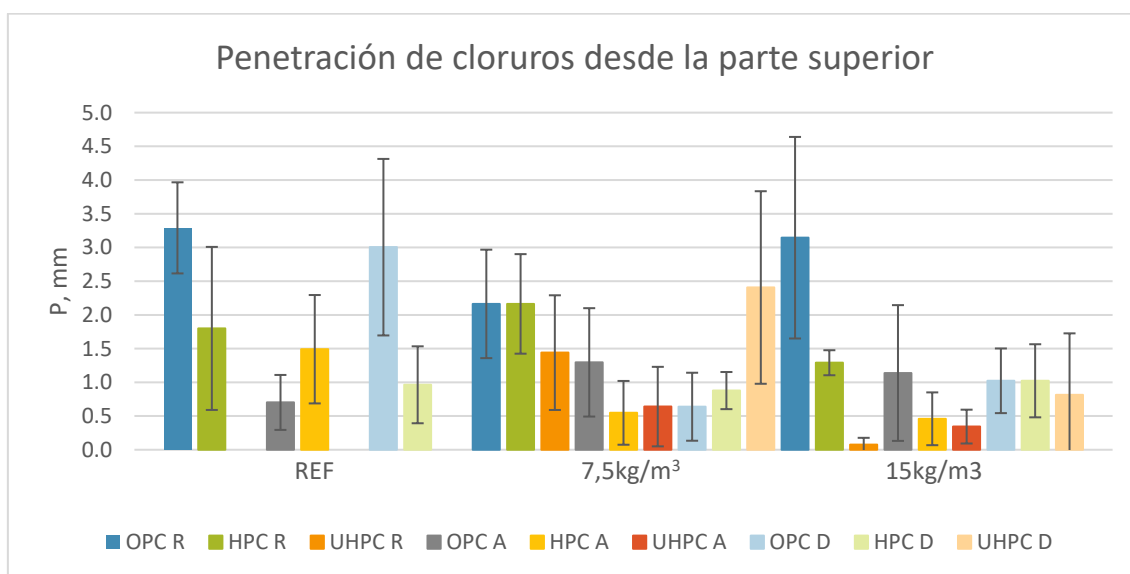


Figura 84. Penetración de cloruros P

Las reducciones de P de cada serie, calculadas a partir de sus respectivas referencias, son: OPC-7.5kg/m³ R (34%), OPC-7.5kg/m³ D* (79%), OPC-15kg/m³ R (4%), OPC-15kg/m³ D* (66%), HPC-7.5kg/m³ A (63%), HPC-7.5kg/m³ D (9%), HPC-15kg/m³ R (28%) y HPC-15kg/m³ A (69%). Los aumentos de P de cada serie, calculadas a partir de sus respectivas referencias, son: OPC-7.5kg/m³ A (85%), OPC-15kg/m³ A (62%), HPC-7.5kg/m³ R (20%) y HPC-15kg/m³ D (6%). Estos resultados indican que los ambientes que mejoran la impermeabilidad de las series OPC y HPC son el D* y A, respectivamente.

La serie UHPC-REF no tuvo penetración de cloruros (P=0), por ende, las series UHPC con bacterias tienen un peor comportamiento (P>0). Esto puede significar que la inclusión de tierra de diatomeas fue perjudicial, ya que puede ser posible que los cloruros entren a través de ella. Sin embargo, las series UHPC 15kg/m³ tienen menores valores de P que las series UHPC 7.5kg/m³, a pesar de tener el doble de producto. Las reducciones de P de las series UHPC 15kg/m³ respecto a las series UHPC 7.5kg/m³, son 95%, 46% y 66% para los ambientes R, A y D, respectivamente.

Las Figura 85-87 muestran la relación entre P y w₀.

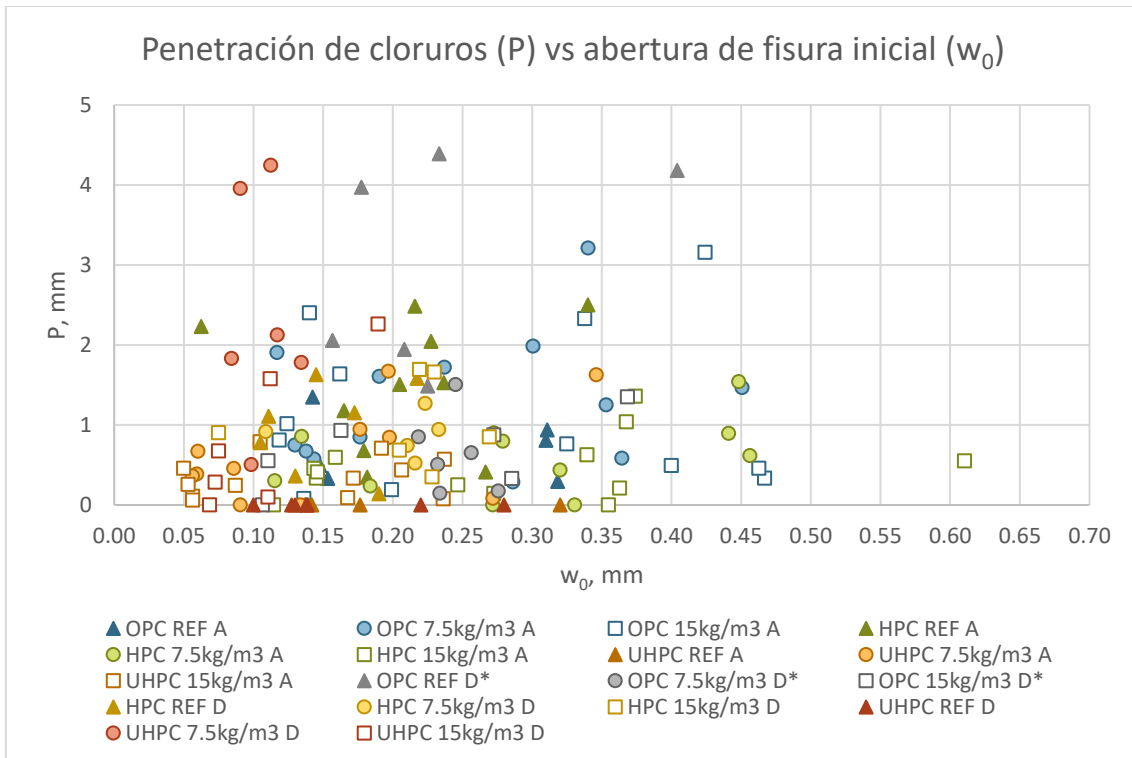


Figura 85. Penetración de cloruros (P) vs abertura de fisura inicial

Ambiente: sumergido en agua (A)

Ambiente: cámara húmeda (D)

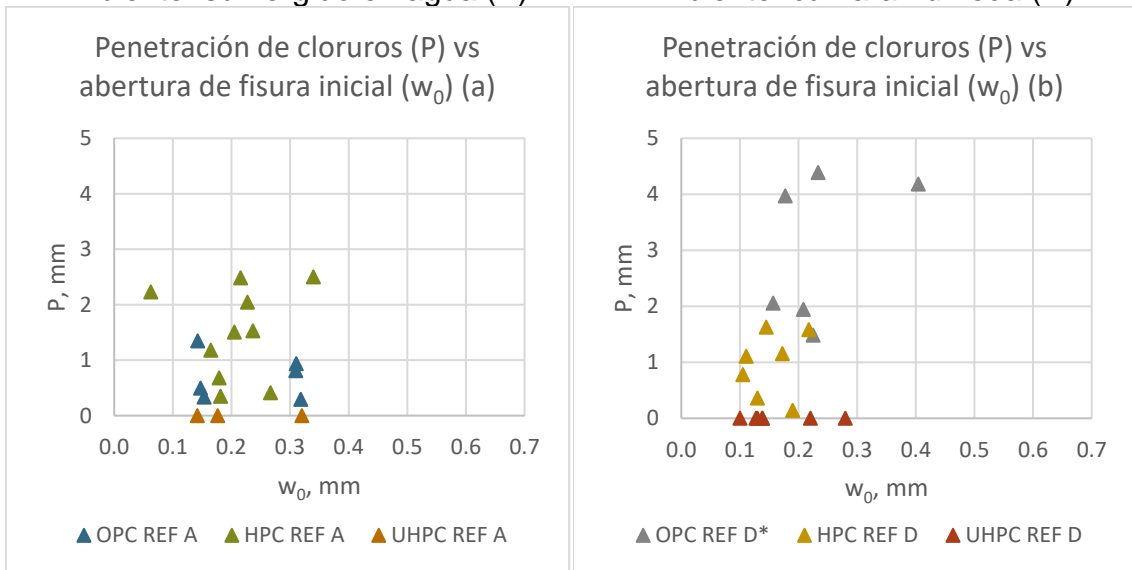
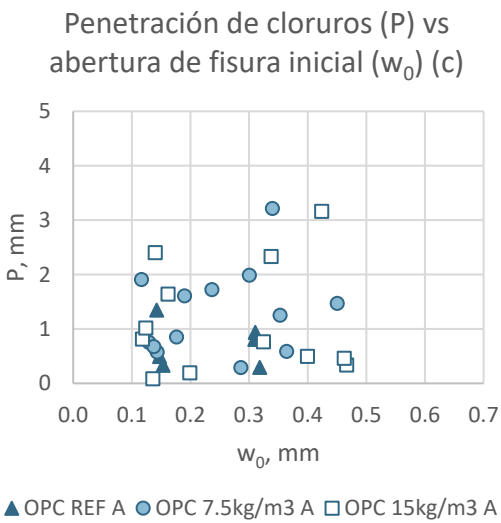


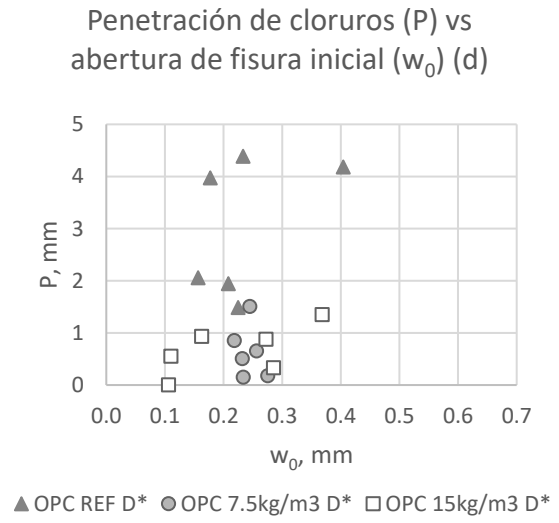
Figura 86. Penetración de cloruros (P) vs abertura de fisura inicial a) referencias A, b) referencias D

Se procede a analizar las gráficas en la Figura 86a-b. En el ambiente D, las diferencias de calidad entre hormigones están muy marcadas y los valores de P aumentan cuando la calidad del hormigón es menor, por lo que los hormigones OPC tienen altos valores de P , los hormigones HPC tienen valores intermedios y los hormigones UHPC no tienen penetración alguna. Comparando los hormigones en ambos ambientes, se observa que los hormigones OPC en el ambiente A son los únicos que cambian su comportamiento. No se observó relación entre P y w_0 .

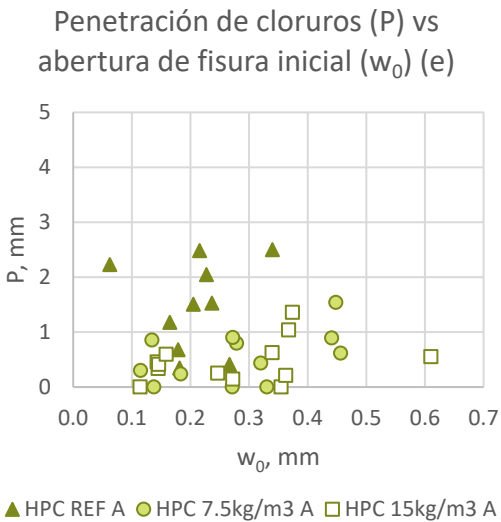
Ambiente: sumergido en agua (A)



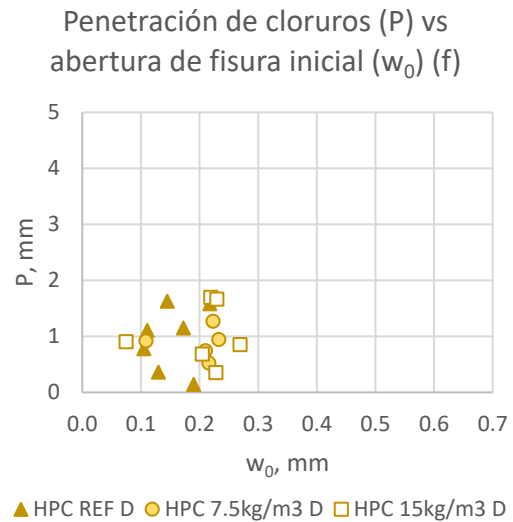
Ambiente: cámara húmeda (D*)



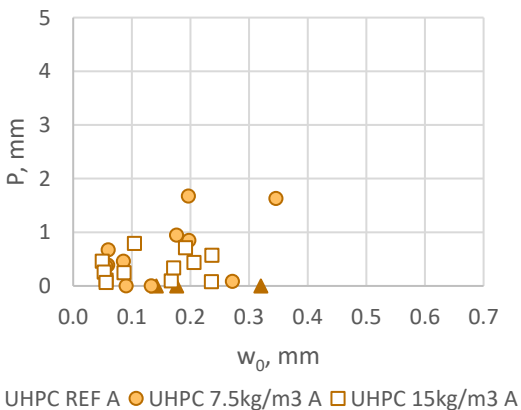
Ambiente: sumergido en agua (A)



Ambiente: cámara húmeda (D)



Penetración de cloruros (P) vs abertura de fisura inicial (w_0) (g)



Penetración de cloruros (P) vs abertura de fisura inicial (w_0) (h)

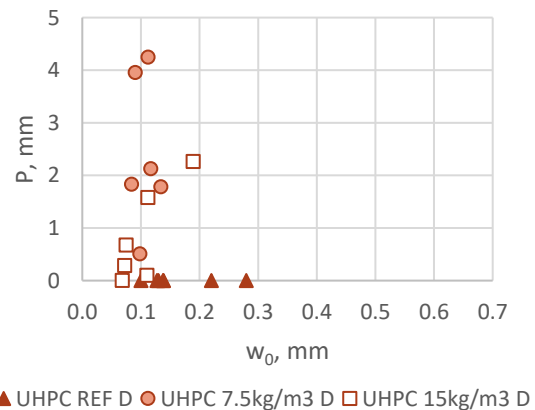


Figura 87. Penetración de cloruros (P) vs abertura de fisura inicial c) series OPC A, d) series OPC D*, e) series HPC A, f) series HPC D g) series UHPC A, h) series UHPC D

En las series OPC (Figura 87c-d), la referencia tiene menores P que las series con bacterias en el ambiente A. Lo opuesto es cierto para el ambiente D. Las series con bacterias, para un mismo ambiente, presentan resultados muy similares entre sí.

En las series HPC (Figura 87e-f), para el ambiente A, la referencia presenta mayores P que las series con bacterias y las series con bacteria son muy similares entre sí. En el ambiente D, las tres series presentan el mismo comportamiento.

En la (Figura 87g-h), las series UHPC de referencia tuvieron los mejores resultados, independientemente del ambiente. Las series UHPC-15kg/m³ tuvieron el mejor desempeño entre las series con bacterias, en ambos ambientes.

A continuación, se analizará si hay relación entre W y w₀ (Figura 88-90)

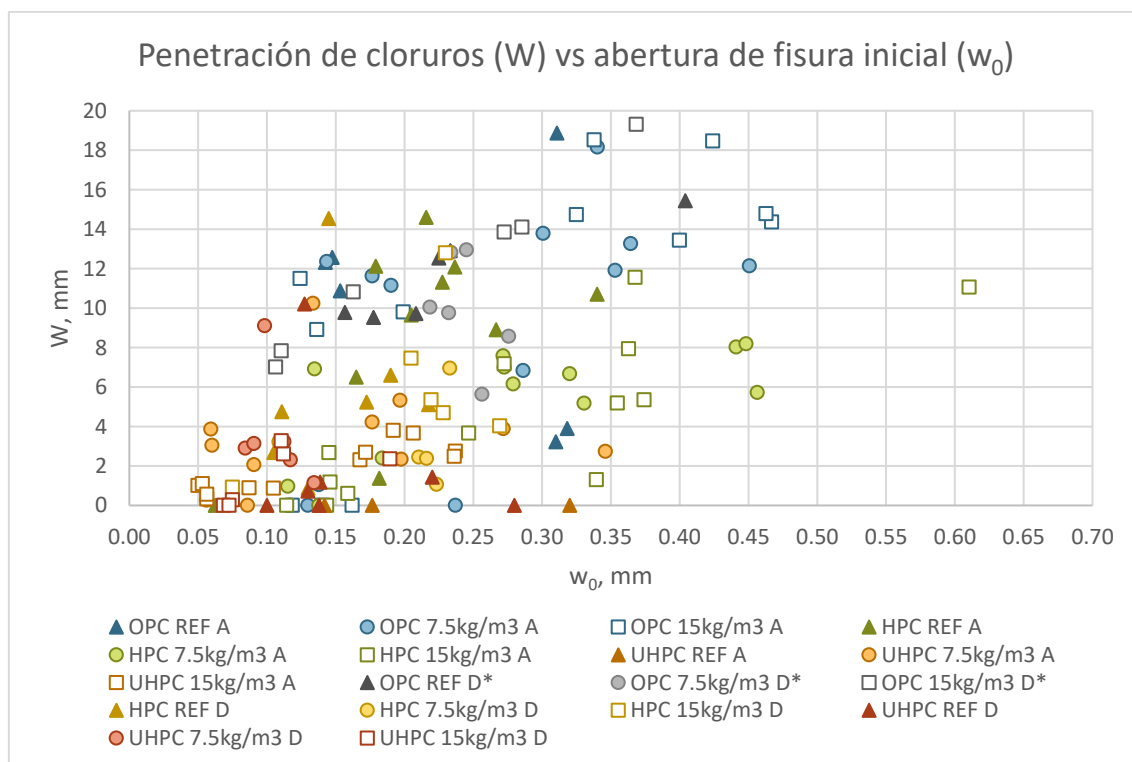


Figura 88. Penetración de cloruros (W) vs abertura de fisura inicial

La medida de W, el espesor de penetración de cloruros que han entrado por la fisura, debe mostrar alguna relación con la abertura de fisura en el disco, ya que, a mayor abertura de fisura, mayor volumen de agua con cloruros pasará y la penetración será mayor.

En las series de referencia (Figura 89a-b), se observan diferencias entre los tipos de hormigón en el ambiente D, pero los resultados de las series OPC y HPC ocupan rangos similares de W en el ambiente A. Los hormigones UHPC tienen los menores valores de W. Solo en HPC-REF D* se observa una relación entre W y w₀.

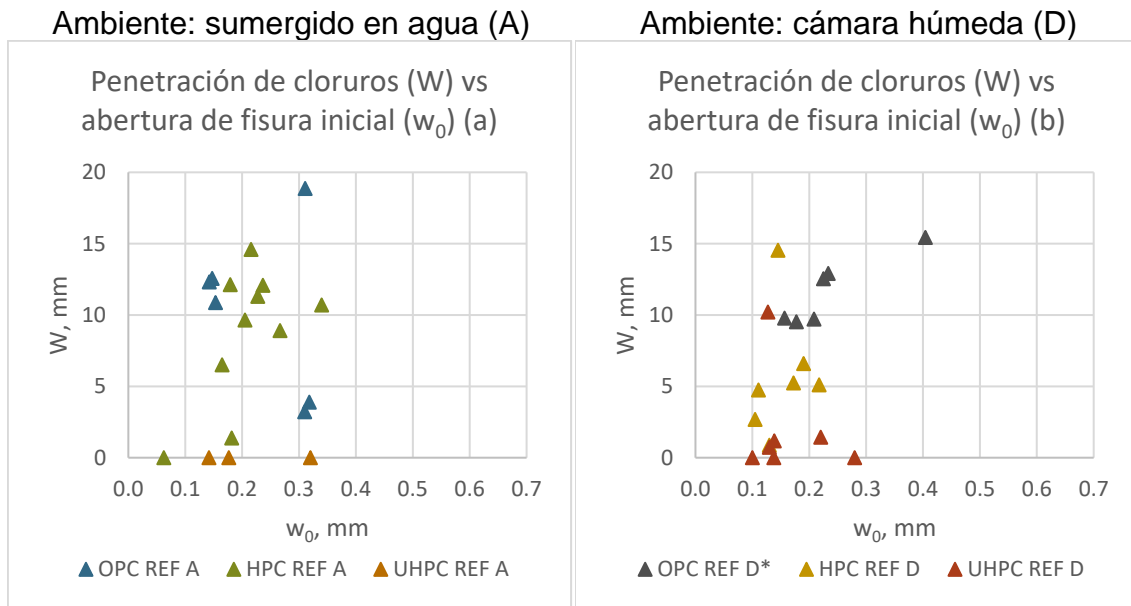


Figura 89. Penetración de cloruros (W) vs abertura de fisura inicial a) referencias A, b) referencias D

En las series OPC (Figura 89c-d), se observa una relación clara entre W y w_0 en el ambiente D* (7d agua + 21d cámara húmeda), excepto en OPC-7.5kg/m³ D*, debido a su mala distribución de fisuras. En el ambiente A también se puede observar esa relación en las series con bacterias, aunque los puntos están más dispersos.

En todas las series HPC del ambiente A se observa que W aumenta cuando w_0 aumenta (Figura 90e). En el ambiente D (Figura 90f), no se observa ninguna relación, ya que muchos datos que corresponden a un mismo valor de w_0 tienen diferentes valores de W.

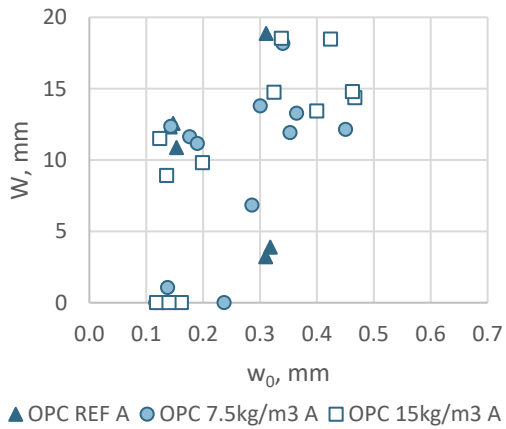
En UHPC-15kg/m³ A y UHPC-15kg/m³ D se observa que aumenta W cuando w_0 aumenta (Figura 90g-h). En los datos de UHPC-7.5kg/m³ A no se ve este comportamiento claramente y, en UHPC-7.5kg/m³ D, W se reduce cuando w_0 aumenta. W=0 es constante para UHPC-REF A. En general, los valores de W no suelen superar los 5mm en las series UHPC.

A continuación, se analizará si hay relación entre P y W (Figura 91-93). Estas variables podrían tener relación, ya que P es una medida de la calidad del material y W depende de la calidad del material.

En la Figura 92, se observan las relaciones entre P y W para las series de referencia. En las referencias HPC, en ambos ambientes, W aumenta cuando P aumenta. Las referencias UHPC en ambos ambientes se mantienen en valores de P y W que tienden a 0. No se ve una relación clara entre P y W para las referencias OPC.

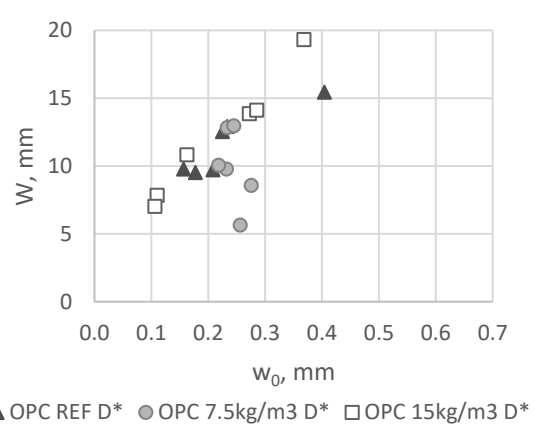
Ambiente: sumergido en agua (A)

Penetración de cloruros (W) vs
abertura de fisura inicial (w_0) (c)



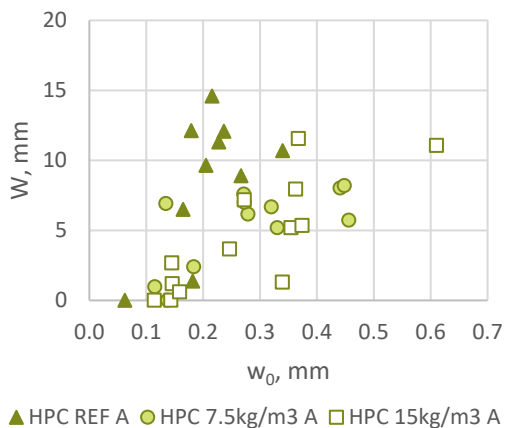
Ambiente: cámara húmeda (D*)

Penetración de cloruros (W) vs
abertura de fisura inicial (w_0) (d)



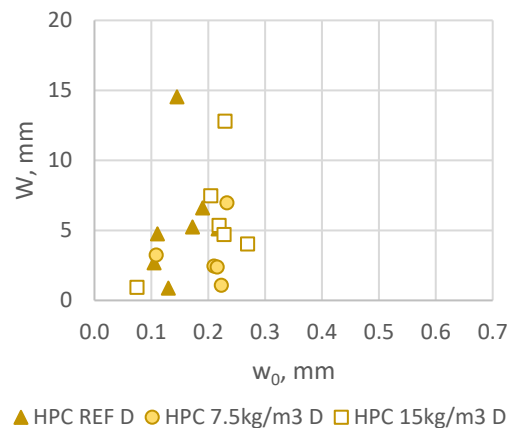
Ambiente: sumergido en agua (A)

Penetración de cloruros (W) vs
abertura de fisura inicial (w_0) (e)

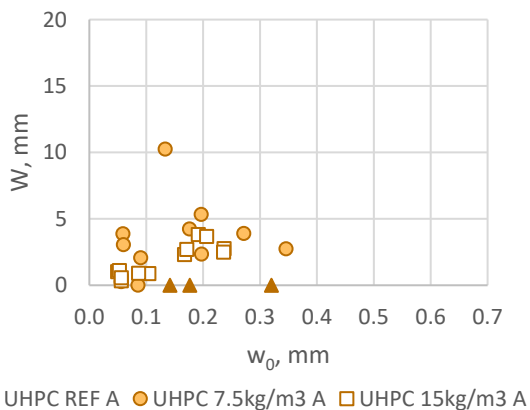


Ambiente: cámara húmeda (D)

Penetración de cloruros (W) vs
abertura de fisura inicial (w_0) (f)



Penetración de cloruros (W) vs
abertura de fisura inicial (w_0) (g)



Penetración de cloruros (W) vs
abertura de fisura inicial (w_0) (h)

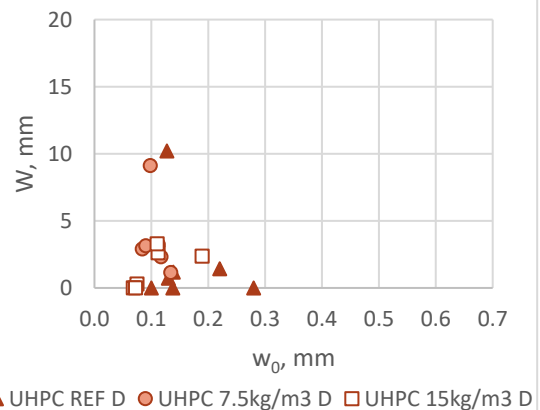


Figura 90. Penetración de cloruros (W) vs abertura de fisura inicial c) OPC A, d) OPC D*, e) HPC A, f) HPC D, g) UHPC A, h) UHPC D

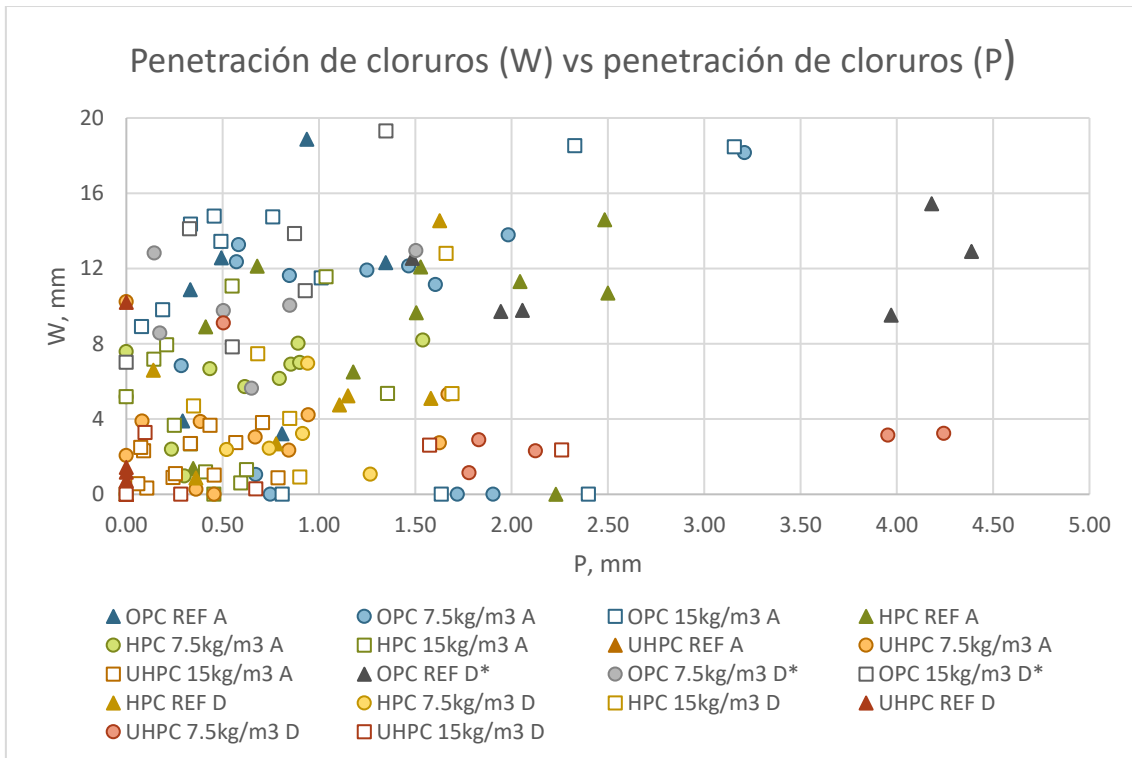


Figura 91. Penetración de cloruros (W) vs penetración de cloruros (P)

Ambiente: sumergido en agua (A)

Ambiente: cámara húmeda (D)

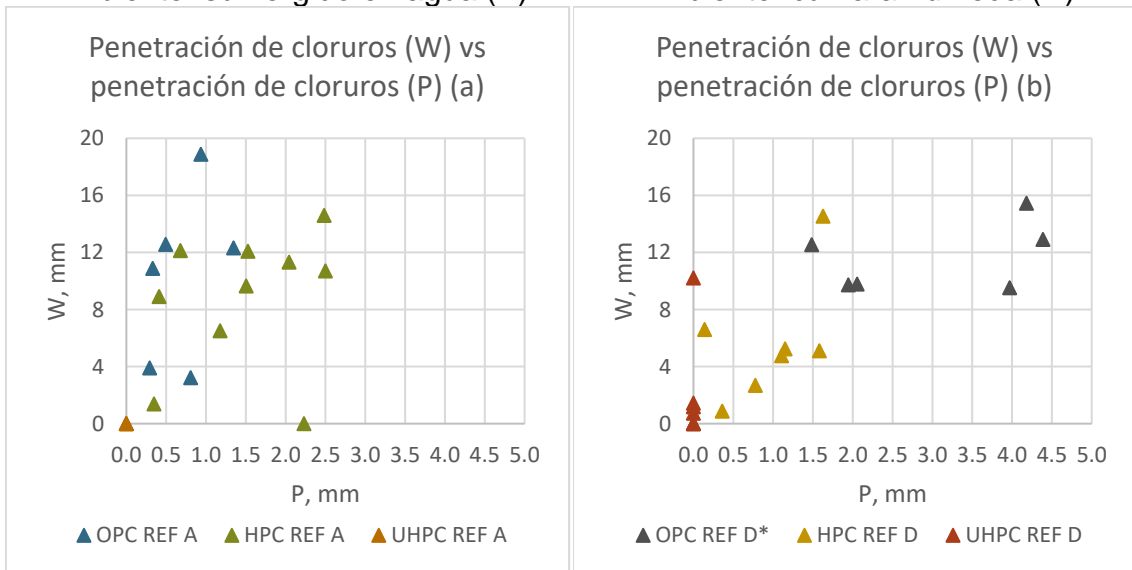
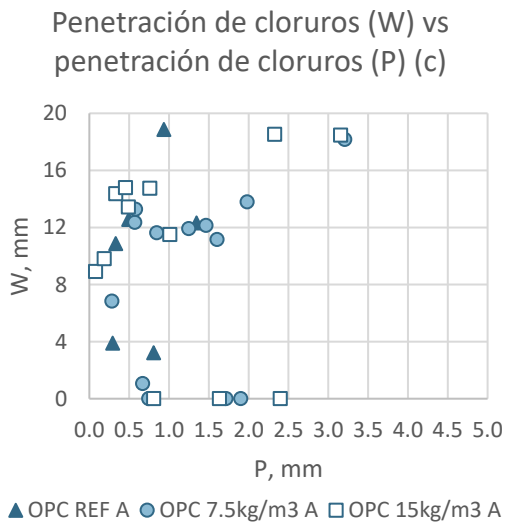


Figura 92. Penetración de cloruros (W) vs penetración de cloruros (P) a) referencias A, b) referencias D

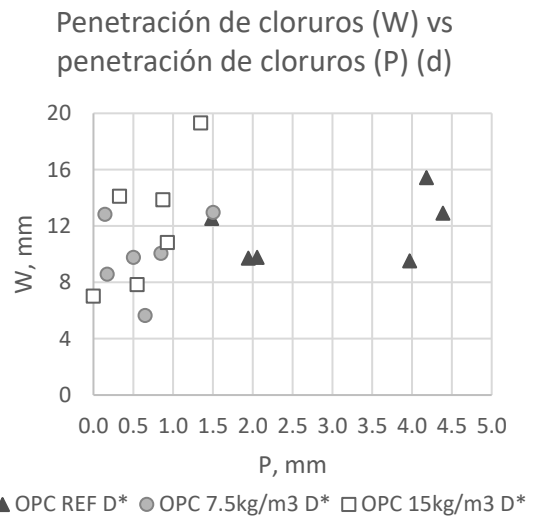
En la Figura 93c-d, se observa que W aumenta cuando P aumenta en las series OPC del ambiente A, pero solo se ve claramente cuando $W > 4$ mm. También se ve este comportamiento en el ambiente D*, excepto para OPC-REF D*.

En las series HPC (Figura 93e-f), las series con bacterias en el ambiente A se concentran cerca del origen, lo que podría significar que las bacterias promueven la reducción de P y W. Esto ocurre también en el ambiente D, pero la referencia también está cerca del origen.

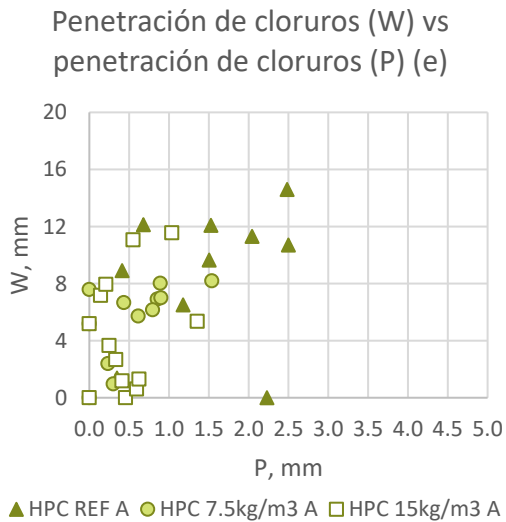
Ambiente: sumergido en agua (A)



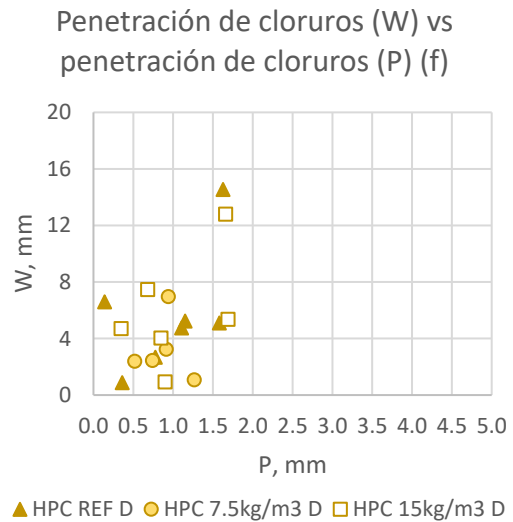
Ambiente: cámara húmeda (D*)



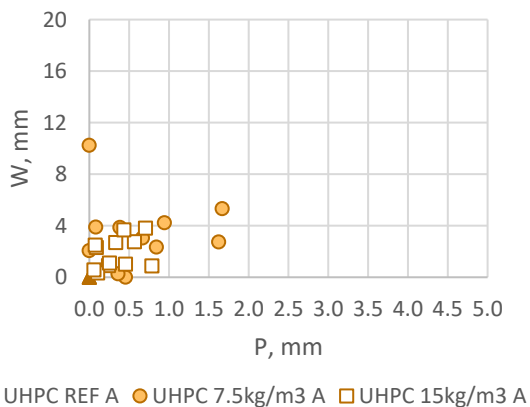
Ambiente: sumergido en agua (A)



Ambiente: cámara húmeda (D)



Penetración de cloruros (W) vs penetración de cloruros (P) (g)



Penetración de cloruros (W) vs penetración de cloruros (P) (h)

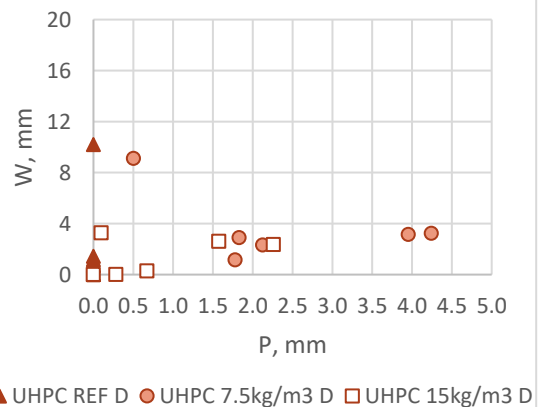


Figura 93. Penetración de cloruros (W) vs penetración de cloruros (P) c) OPC A, d) OPC D*, e) HPC A, f) HPC D, g) UHPC A, h) UHPC D

En la Figura 93g-h, en las series UHPC de ambos ambientes, exceptuando UHPC-7.5kg/m³ D, los datos se concentran cerca del origen, donde tanto P como W tienden a 0. En el ambiente D, se puede observar un ligero aumento de W cuando P>1mm en UHPC-15kg/m³ D, pero en UHPC-7.5kg/m³ D no se ven relaciones entre P y W.

En las Figura 94-96, se analiza la relación entre la penetración de cloruros en la fisura (W) y el flujo normalizado final en las series de referencia.

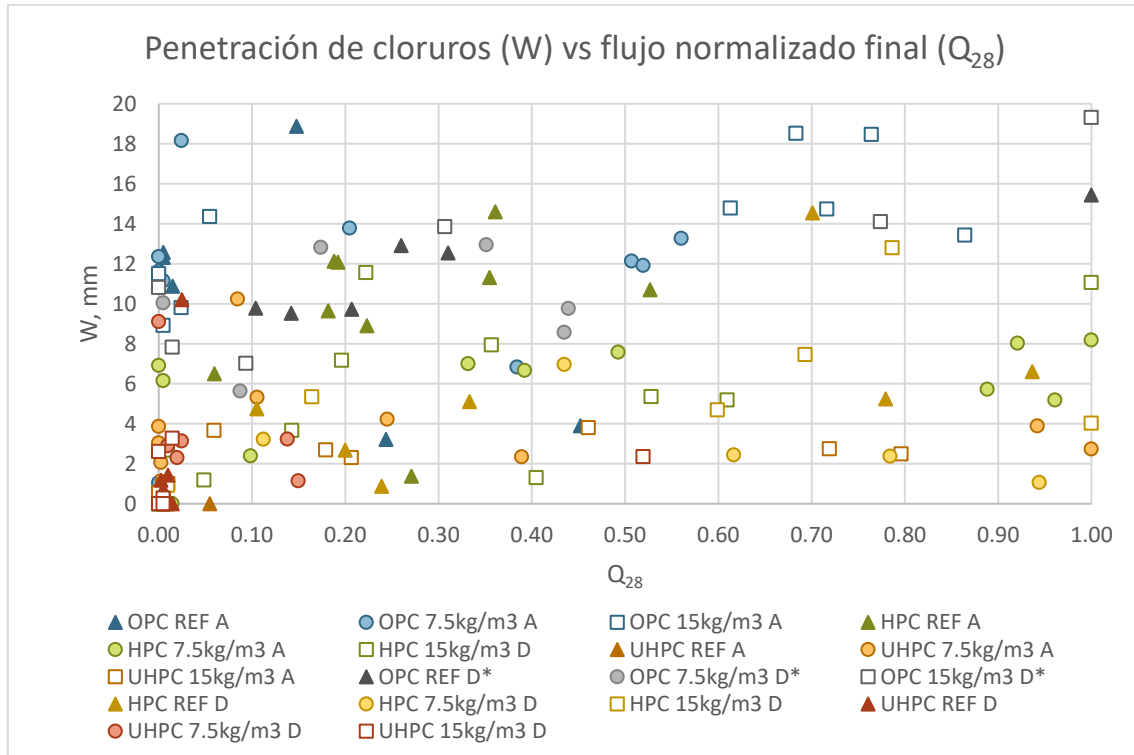


Figura 94. Penetración de cloruros (W) vs flujo normalizado final

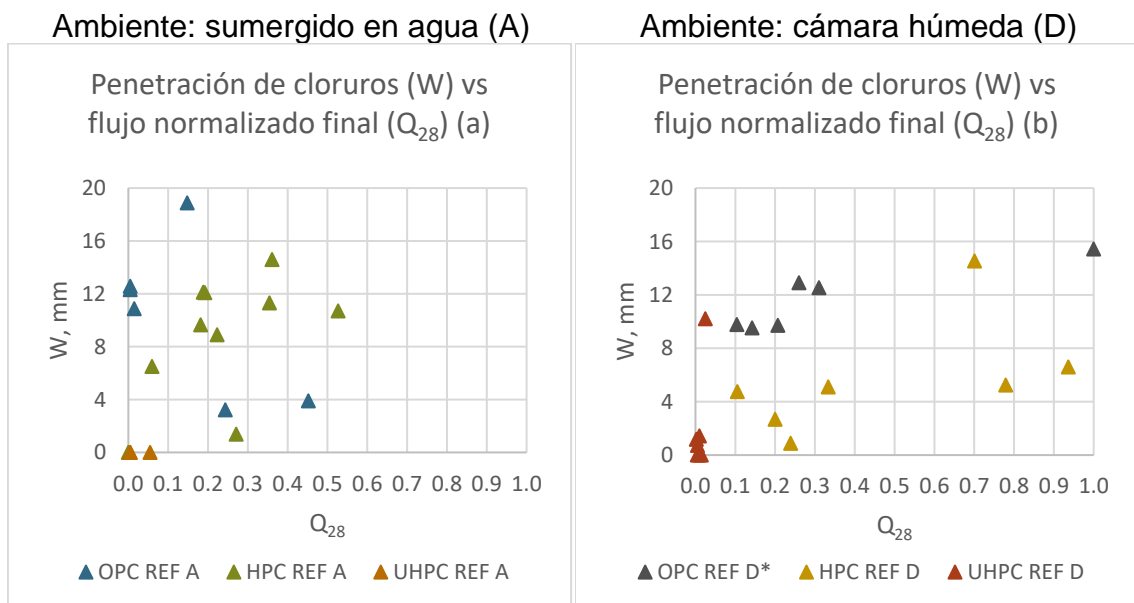
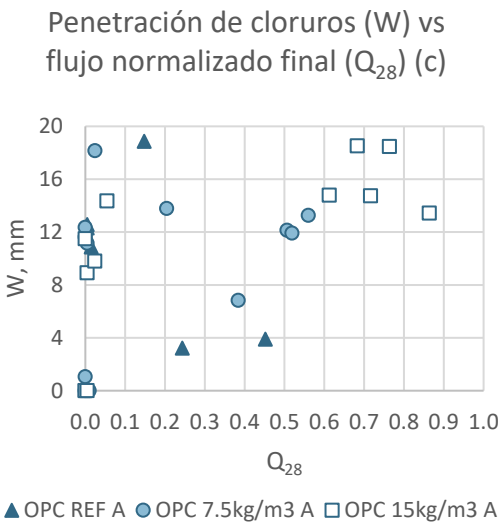
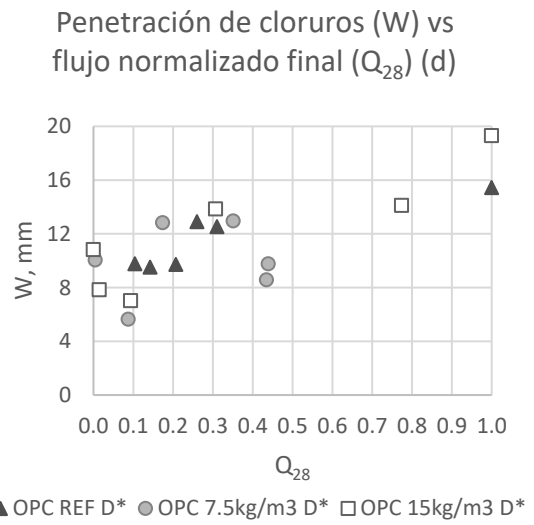


Figura 95. Penetración de cloruros (W) vs flujo normalizado final a) referencias A, b) referencias D

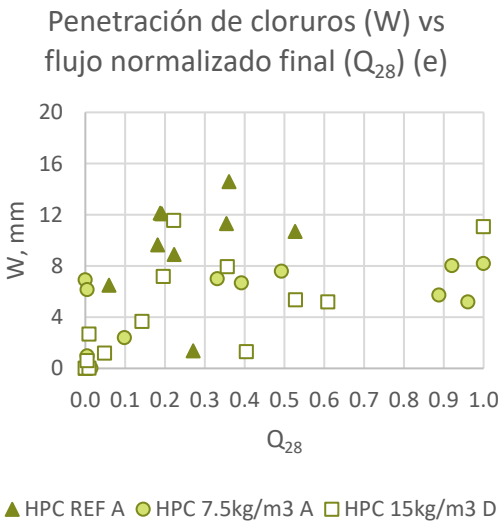
Ambiente: sumergido en agua (A)



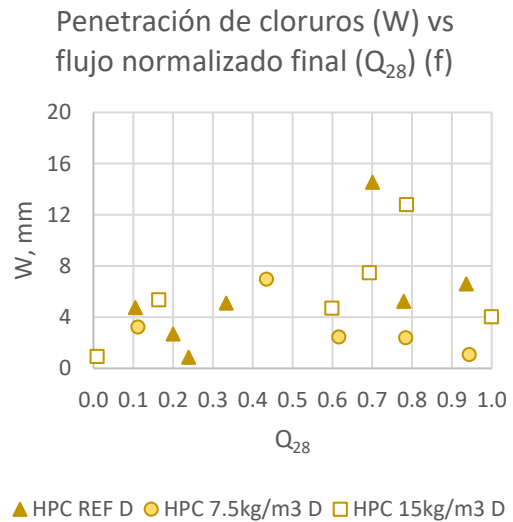
Ambiente: cámara húmeda (D*)



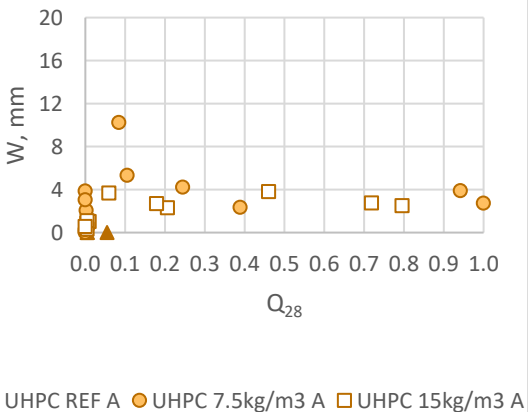
Ambiente: sumergido en agua (A)



Ambiente: cámara húmeda (D)



Penetración de cloruros (W) vs flujo normalizado final (Q_{28}) (g)



Penetración de cloruros (W) vs flujo normalizado final (Q_{28}) (h)

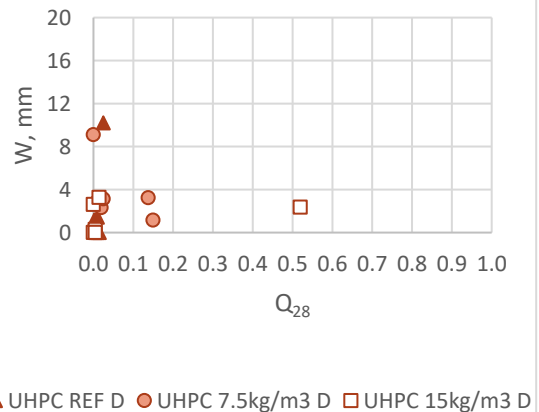


Figura 96. Penetración de cloruros (W) vs flujo normalizado final c) OPC A, d) OPC D*, e) HPC A, f) HPC D, g) UHPC A, h) UHPC D

En la Figura 95a-b, OPC-REF D*, HPC-REF A y HPC-REF D aumentan W cuando Q_{28} aumenta. Las series UHPC tienden a agruparse en el origen. OPC-REF A no muestra una relación clara entre las variables.

En la Figura 96c-h, las únicas series con una relación visible entre W y Q_{28} son todas las series OPC-D* y HPC-REF A. Todas las series UHPC del ambiente D y la serie UHPC-REF A se concentran en el origen. Las demás series no son suficientemente claras.

Finalmente, se analizará si hay relación entre la eficiencia (η) y la penetración de cloruros W en las Figura 97-99.

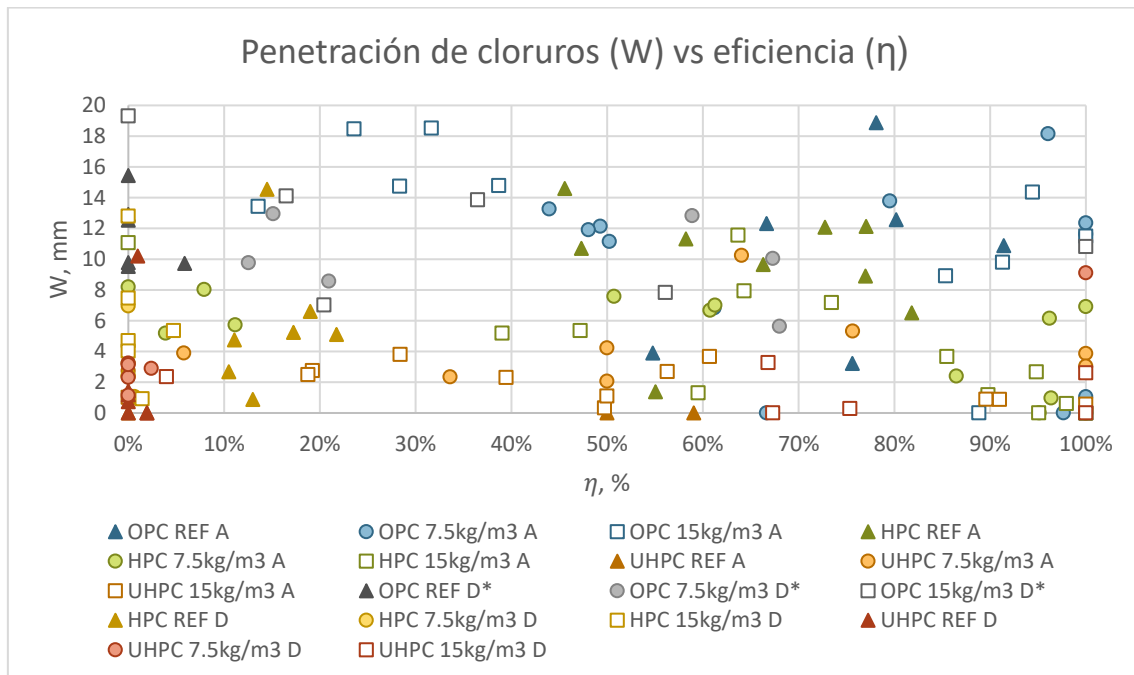


Figura 97. Penetración de cloruros (W) vs eficiencia

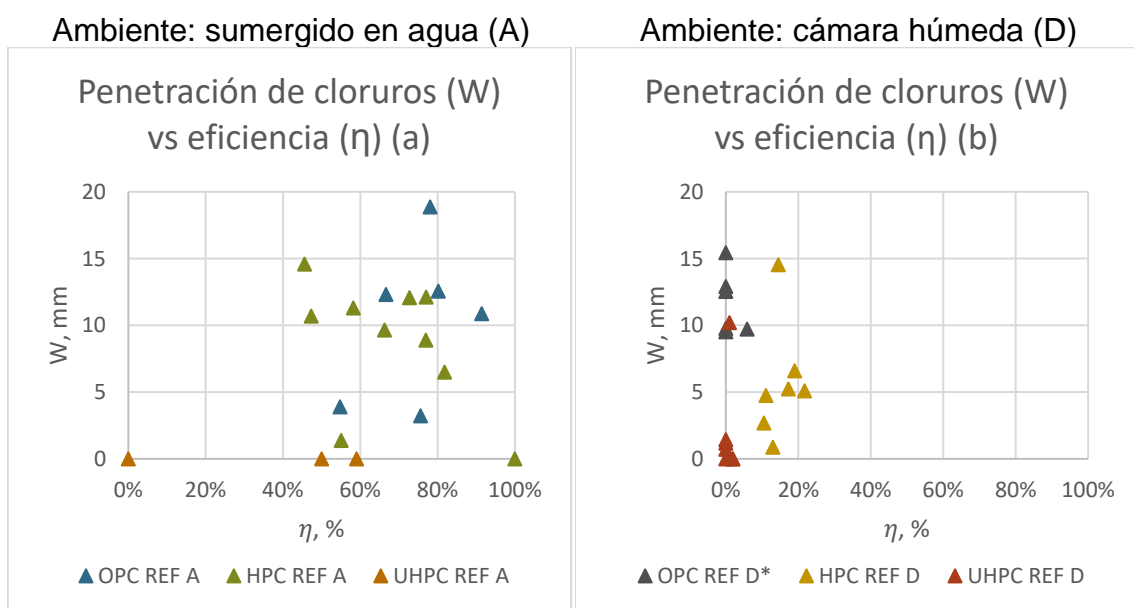
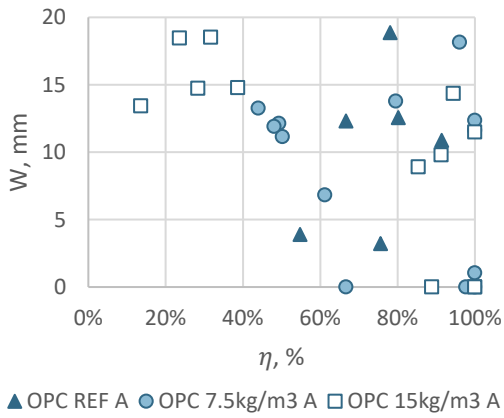


Figura 98. Penetración de cloruros (W) vs eficiencia a) referencias A, b) referencias D

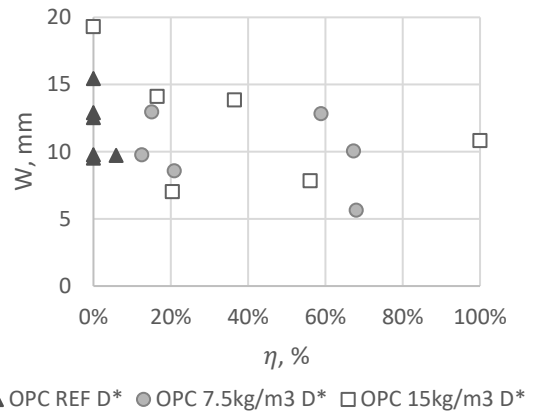
Ambiente: sumergido en agua (A)

Penetración de cloruros (W) vs eficiencia (η) (c)



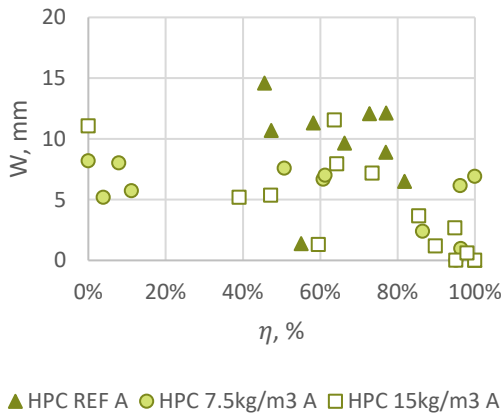
Ambiente: cámara húmeda (D*)

Penetración de cloruros (W) vs eficiencia (η) (d)



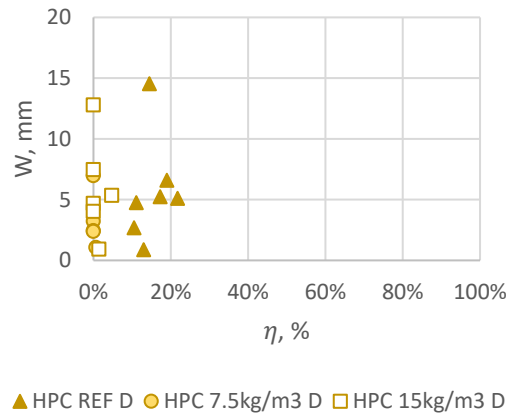
Ambiente: sumergido en agua (A)

Penetración de cloruros (W) vs eficiencia (η) (e)

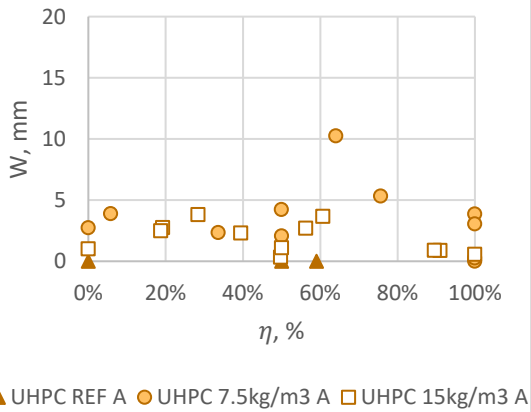


Ambiente: cámara húmeda (D)

Penetración de cloruros (W) vs eficiencia (η) (f)



Penetración de cloruros (W) vs eficiencia (η) (g)



Penetración de cloruros (W) vs eficiencia (η) (h)

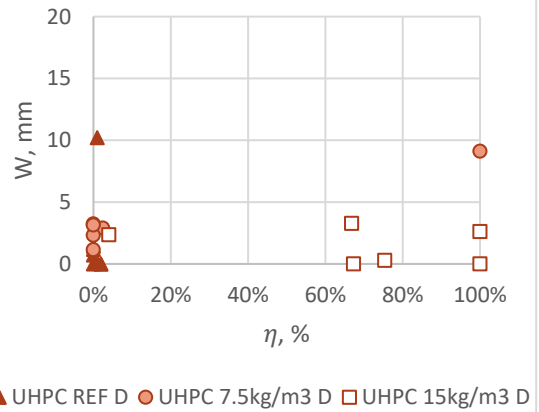


Figura 99. Penetración de cloruros (W) vs eficiencia c) OPC A, d) OPC D*, e) HPC A, f) HPC D, g) UHPC A, h) UHPC D

En la Figura 98a-b, se observa que W disminuye cuando η aumenta en la serie HPC-REF A. El resto de las series no presenta relaciones entre las variables.

En la Figura 99c, se observa que W disminuye cuando η aumenta en las series OPC con bacterias en ambiente A (sumergido en agua). En el ambiente D* (7 días en agua y 21 días en cámara húmeda), los datos no muestran relación entre variables.

En la Figura 99e, cuando $\eta > 40\%$, se observa que W disminuye hasta llegar a 0 cuando $\eta > 100\%$, en el ambiente A. En el ambiente D (Figura 99f), no se observa relación entre variables.

En la Figura 99h, la serie UHPC-15kg/m³ D es la única que se concentra en la esquina inferior derecha, donde hay poca W y mayor eficiencia. Las demás series UHPC no muestran relación entre W y η .

Además de analizar las variables presentes en los ensayos de penetración de cloruros, se ha registrado el recorrido de los iones cloruro a través de los discos, donde se mide W . Se han reportado un total de 4 patrones comunes que los discos presentan después del ensayo, como se muestra en la Figura 100:

- Patrón A: es el paso total de los cloruros, donde aparece una línea blanca/incolora atravesando totalmente el espesor del disco.
- Patrón B: sin paso de cloruros. No hay línea blanca/incolora ($W=0$). Es el patrón ideal, ya que es un posible indicador que el disco ha sanado en su interior completamente.
- Patrón C: es el paso parcial de los cloruros. La línea inicia ancha en la parte superior, pero se reduce a medida que atraviesa el disco y no llega hasta el final. Usualmente tiene forma de V. Puede deberse a un bloqueo en la fisura, una reducción en la abertura de fisura en el interior del disco debida a la tortuosidad de la fisura, o a un sanado incompleto.
- Patrón D: es el paso bifurcado de los cloruros. Sucede cuando aparecen fisuras internas en el disco, que actúan como otra ruta de paso para los agentes agresivos. Pueden o no atravesar todo el espesor del disco.
- Patrón E: otros. Aquí se incluye cualquier otro patrón que no esté definido en los 4 primeros.

A continuación, las Figura 101-102 muestran cuantos patrones se encontraron por serie de hormigón y ambiente de sanado.

El patrón A es el más frecuente, representando en muchos casos la mayoría de los discos que componen cada serie. El patrón B, que es el deseado en estos ensayos, aparece con más frecuencia en los discos expuestos al ambiente A. El patrón C es más frecuente en los hormigones UHPC. Esto puede ser por la baja permeabilidad del propio hormigón o por las aberturas de fisura relativamente pequeñas, haciéndolas más propensas a bloquearse. El patrón D es el menos frecuente y podría ser más dependiente del proceso de prefisuración que del autosanado. El patrón E, aunque no es tan frecuente, suele aparecer más en los hormigones de HPC y UHPC.

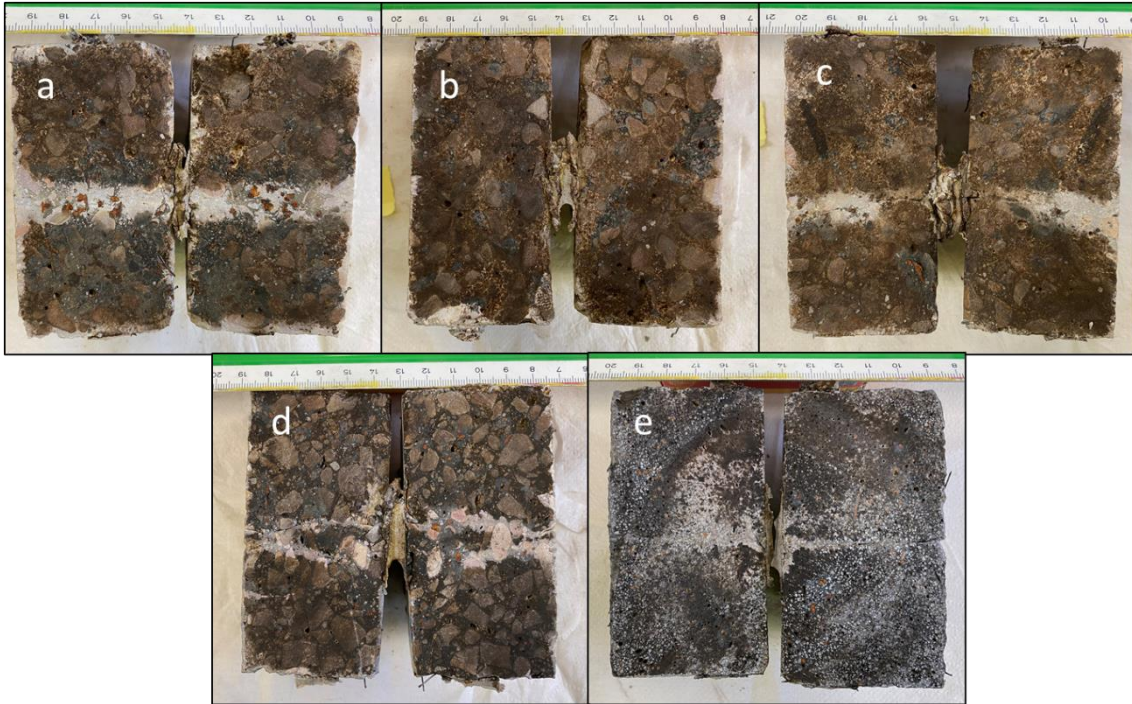


Figura 100. Recorrido de los cloruros a través de los discos de hormigón a) paso total, b) sin paso c) paso parcial, d) paso bifurcado, e) otros

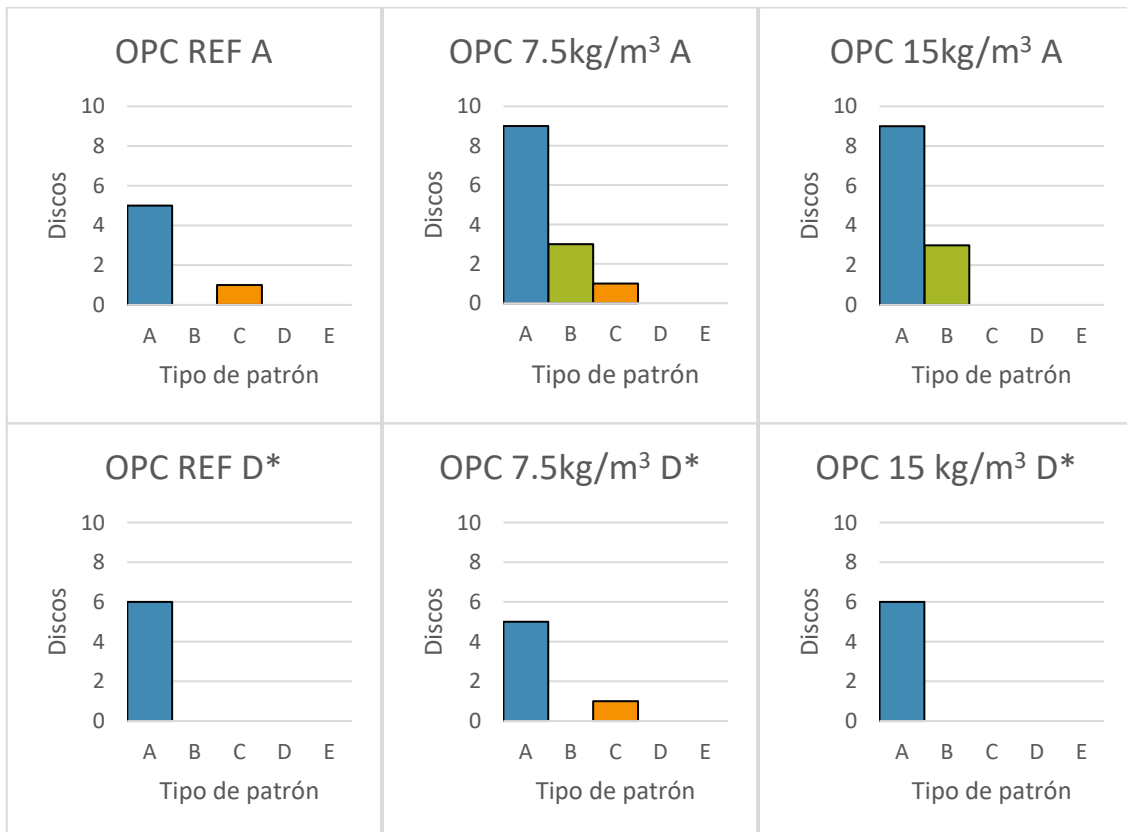


Figura 101. Cantidad de patrones de penetración de cloruros encontrados en las series OPC A y OPC D

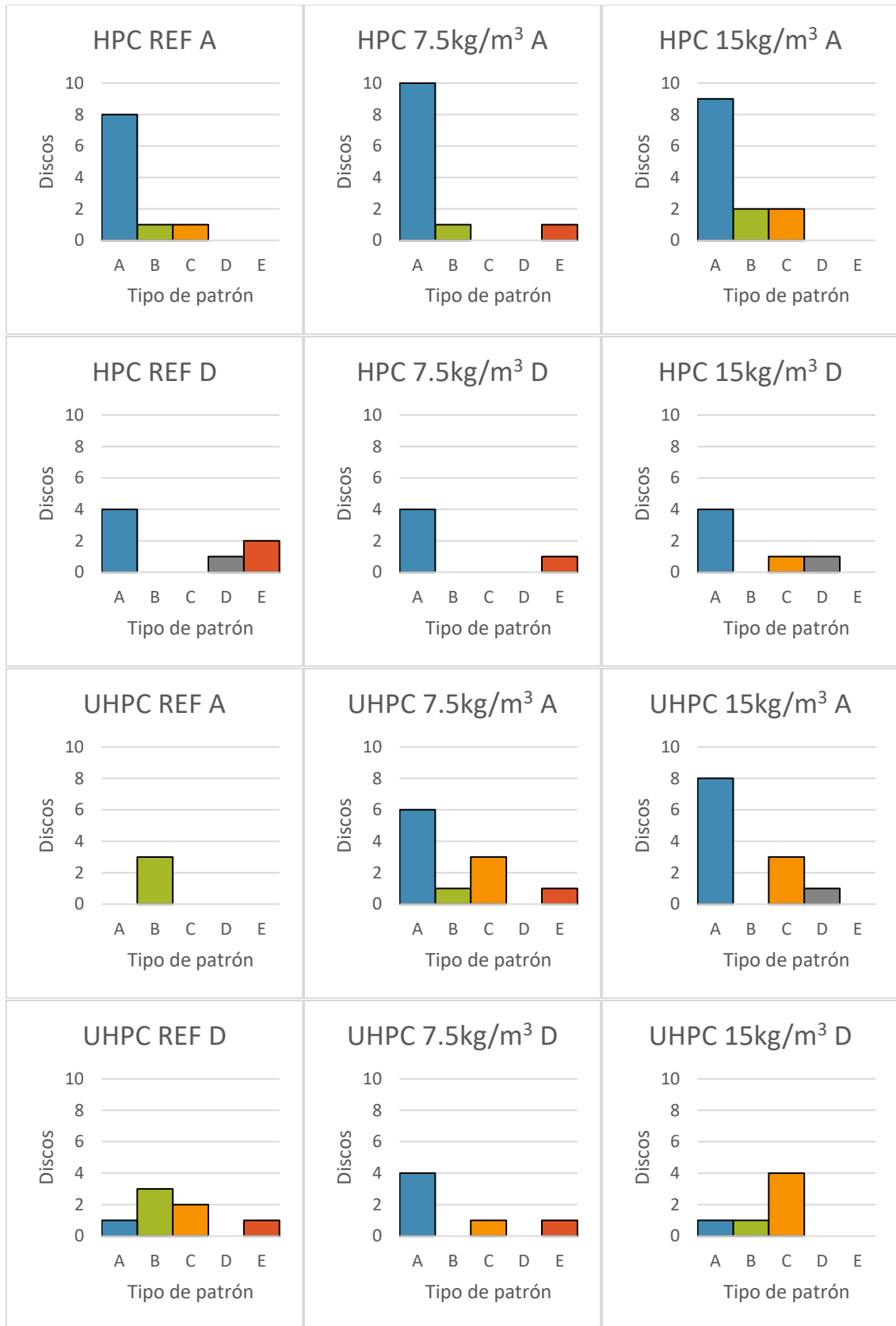


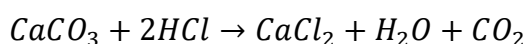
Figura 102. Cantidad de patrones de penetración de cloruros encontrados en las series HPC A, HPC D, UHPC A y UHPC D

Se observa que, en comparación a sus respectivas referencias, las series OPC-7.5kg/m³ A, OPC-15kg/m³ A y HPC-15kg/m³ A tienen un aumento de discos B de 23%, 25% y 54%, respectivamente. Las series HPC-7.5kg/m³ A, UHPC-7.5kg/m³ A, UHPC-7.5kg/m³ D, UHPC-15kg/m³ A y UHPC-15kg/m³ D, en comparación a sus respectivas referencias, tienen una reducción de discos B de 17%, 91%, 100%, 100% y 61%, respectivamente.

4.2.4.5 Análisis adicionales

Se realizaron algunos análisis secundarios que complementan los estudios de la campaña experimental planteada.

El primero fue confirmar si el precipitado del autosanado era carbonato cálcico. Para ello, se realizó una evaluación cualitativa química igual a la de Roig-Flores & Serna (2015), donde se aplicó ácido clorhídrico sobre el carbonato cálcico, provocando una reacción que libera CO₂ como uno de sus productos como lo expresa la ecuación 4.5:



Ec. 4.5



Figura 103. Evaluación química de los precipitados del autosanado

La muestra de precipitado fue tomada raspando los discos que tenían exceso de precipitado en su superficie, para no alterar los ensayos de penetración de cloruros. La Figura 103 muestra el procedimiento. Primero se colocó una porción de la muestra en un tubo de ensayo. Luego, se aplicaron unas gotas de HCl en la muestra. La reacción empezó en cuestión de segundos y se formaron burbujas de CO₂. Después de un tiempo, las burbujas se esparcieron en el aire y solo quedó agua con CaCl₂ diluido. Por ende, los precipitados están, efectivamente, compuestos de CaCO₃.

Otro análisis que se realizó fue una microscopía de una pequeña cantidad del producto Serenade Max y un trozo de hormigón que contenía este producto. En las fotos tomadas no se observan claramente las células de bacterias, pero en la Figura 104, con un aumento de 771x, se observó una especie de hilo sobre un

grano de tierra de diatomeas. En el trozo de hormigón (Figura 105), con aumentos de 500x y 3000x, se observaron formas similares a las de la Figura 88. Tampoco se logró ver células individuales de bacterias, pero era posible suponer que estas formaciones tienen algo que ver con las bacterias. En la Figura 106, las bacterias se agrupan formando una especie de cadena. Es posible que lo que aparece en las imágenes de la microscopía sean bacterias agrupadas y que el aumento no permita ver las divisiones de cada célula individual.

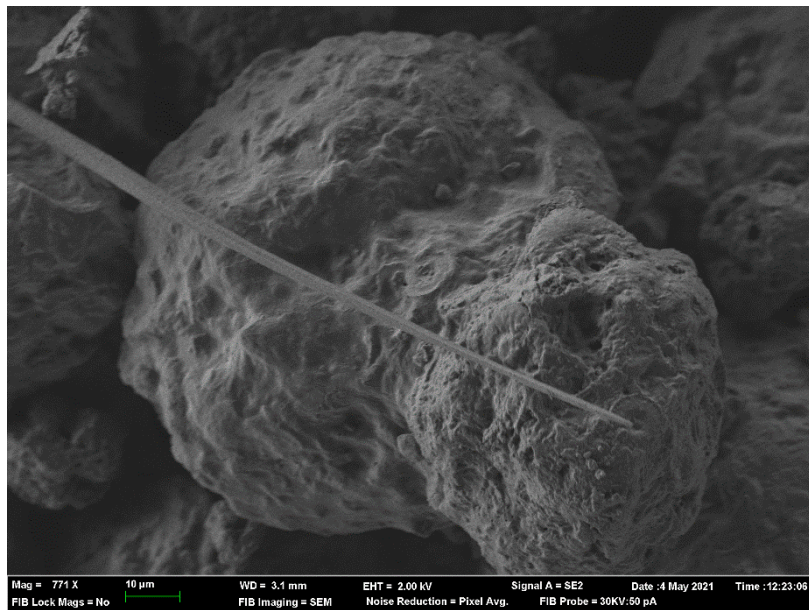


Figura 104. Microscopía de un grano de tierra de diatomeas con bacterias *Bacillus subtilis*

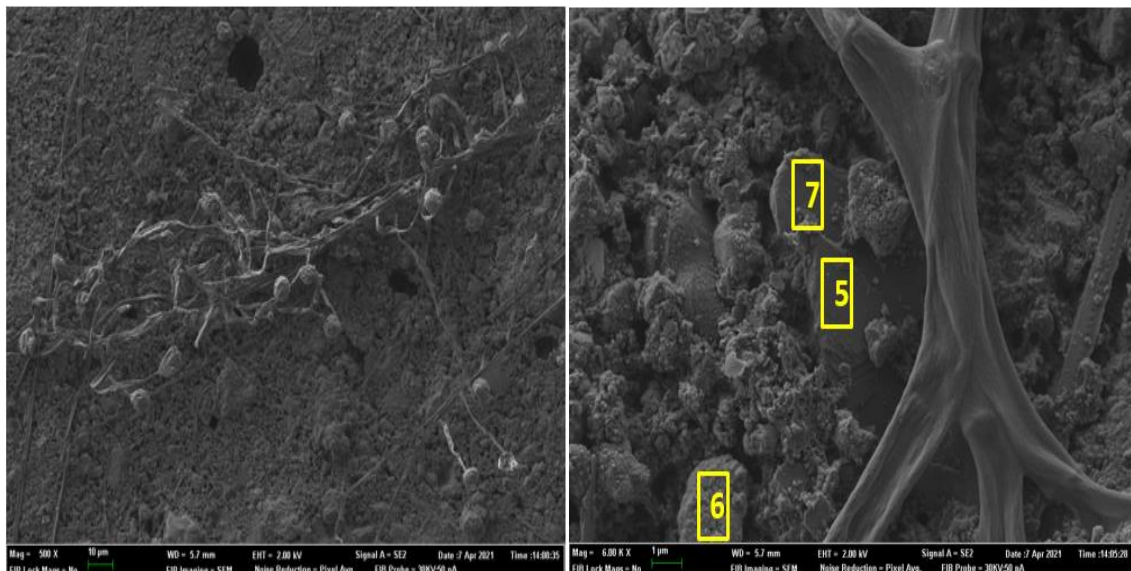


Figura 105. Microscopía de las bacterias *Bacillus subtilis* en el producto *Serenade Max* con 500 aumentos (izq) y 3000 aumentos (der)

Un estudio de Torres et al. (2012) documentó una foto de celulosa bacteriana formando redes en 3-D (Figura 107). Su apariencia es parecida a filamentos de carbonato cálcico encontrados en las series UHPC del ambiente D (Figura 108),

sobre todo en UHPC-15kg/m³ de Serenade Max y UHPC-25% de Serbiotec, que contiene 66% de bacterias *Bacillus*. Es posible que las bacterias se agruparan en cadena y, con la humedad del ambiente, formarían carbonato cálcico. La producción de CaCO₃ no fue tanta como para sellar la fisura superficialmente, debido al ambiente, pero fue lo suficientemente constante para avanzar de tal forma que los filamentos de CaCO₃ sobresalieran de la fisura y de la superficie del hormigón. Esto podría explicar por qué los discos de estas series de hormigón tenían bajos flujos a pesar de su bajo porcentaje de cierre de fisura: el sanado podría estar ocurriendo de adentro hacia afuera. De todos modos, todos estos resultados necesitan de estudios específicos para confirmar el mecanismo de funcionamiento de las bacterias de este trabajo cuando se introducen en el hormigón.

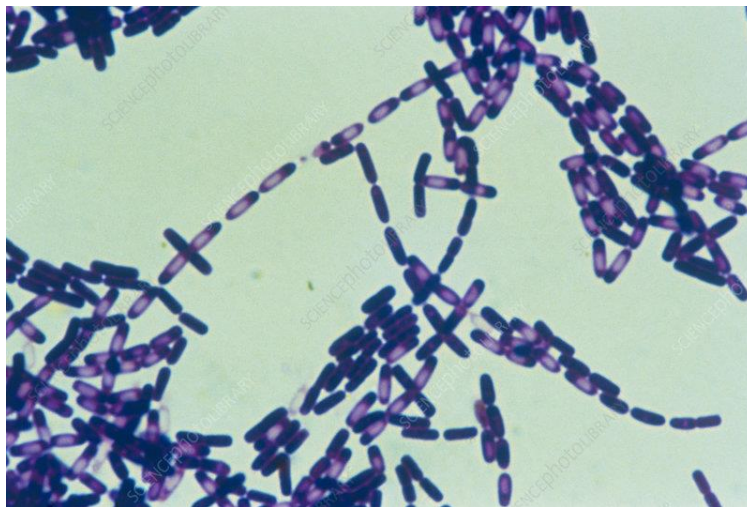


Figura 106. Colonia de *Bacillus subtilis* (SciencePhotoLibrary, 2021)

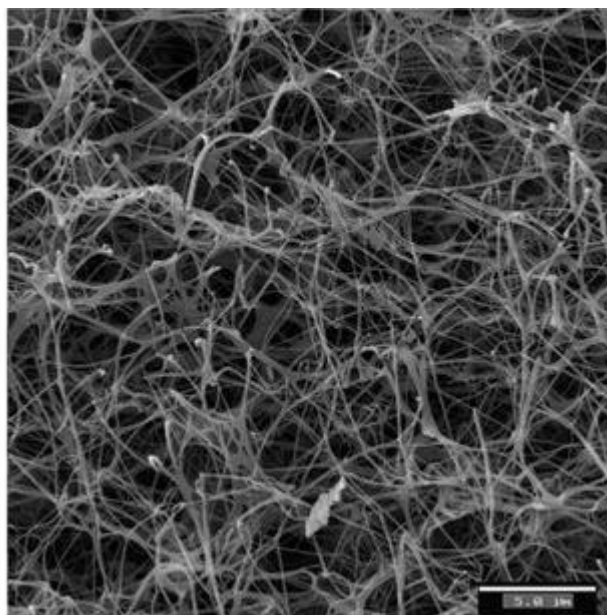


Figura 107. Microscopía de una muestra de celulosa bacteriana formando red 3-D (Torres et al., 2012)

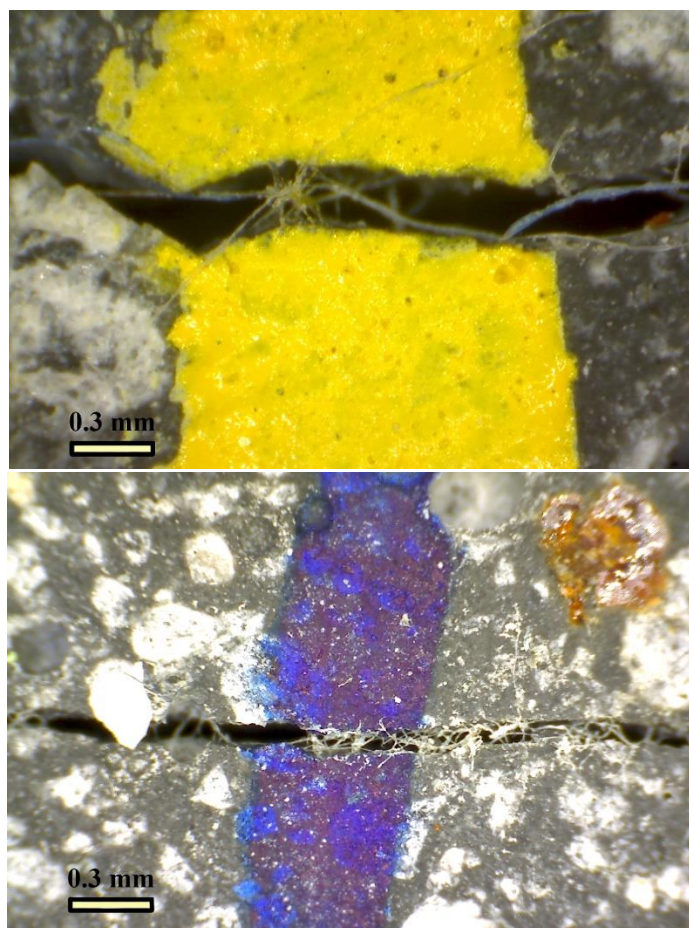


Figura 108. Formación de cadenas de carbonato cálcico en discos UHPC-15kg/m³ D (sup) y UHPC-25% D (inf)

4.3 Discusión

En este apartado se compararán algunos resultados de esta investigación con los obtenidos por otros autores y se discuten los resultados obtenidos.

En el estudio de Mondal et al (2017), se analizó el efecto de las bacterias *Bacillus subtilis* (en concentraciones de 10^3 , 10^5 y 10^7 CFU/ml) en la resistencia a compresión de hormigones convencionales ($f_c=30$ MPa a los 28 días). Se vio un aumento de resistencia respecto a la referencia de 18%, 25% y 34%, respectivamente (Figura 109). En esta investigación, se vio un aumento en la resistencia respecto a la referencia de 10% y 3% en las series OPC-7.5kg/m³ y OPC-15kg/m³, respectivamente. Cabe resaltar que el producto Serenade Max tiene una concentración de $5,13 \times 10^{10}$ CFU/g, que equivaldría a 1.15×10^{11} CFU/ml al multiplicar por la densidad de la tierra de diatomeas (2.25g/ml). Esto significa que, aun teniendo entre 1.15×10^4 - 1.15×10^8 veces la cantidad de bacterias del estudio citado, los aumentos de resistencia son muy inferiores. Es posible que la tierra de diatomeas mitigue el efecto positivo de las bacterias al reemplazar parte del árido. En el caso de la serie OPC-25% de Serbiotec, producto que contiene 2.2×10^6 CFU/ml, de los cuales 66% son bacterias *Bacillus*, se experimentó una

pérdida de resistencia, aunque esto se atribuye a la baja consistencia de la mezcla.

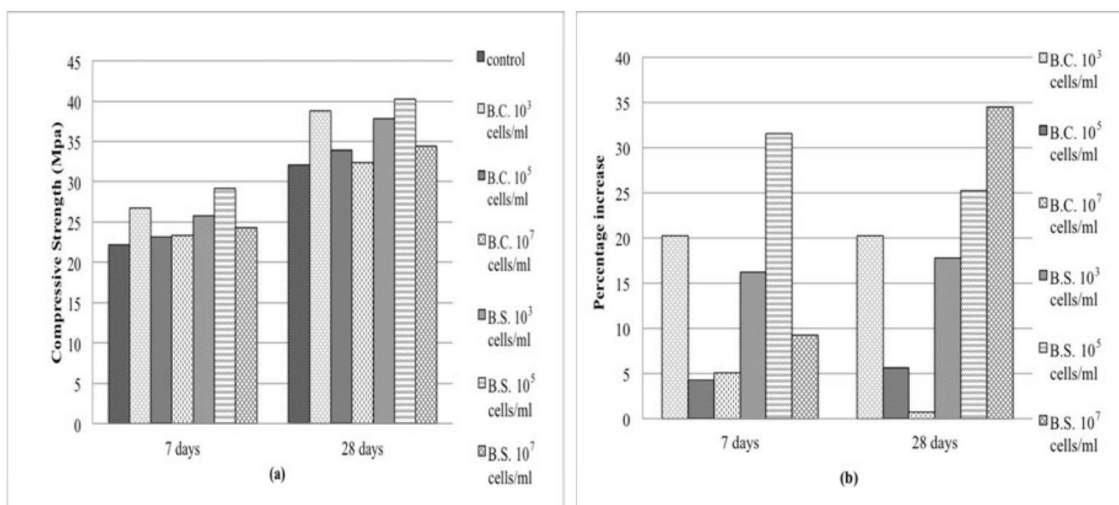


Figura 109. Resultados de resistencia a compresión de hormigones con *B. subtilis* Mondal et al. (2017)

Wang et al. (2012) estudiaron el efecto de *Bacillus subtilis* encapsuladas con nutrientes en tierra de diatomeas. Se fabricaron prismas de mortero (4x4x16cm) que se prefisuraron a los 14 días, obteniendo fisuras de 0.15-0.17mm. Por 40 días, los prismas se expusieron a dos ambientes: sumergido en agua y sumergido en un medio de deposición simulado con urea y nitrato de calcio. Las fisuras sanaron parcialmente en el agua y totalmente en el medio simulado. La concentración de las bacterias fue de 1×10^9 CFU/ml (1.7×10^9 CFU/g en la concentración más eficiente del estudio (60% peso de tierra de diatomeas por volumen de solución con bacterias). En comparación, las series OPC-7.5kg/m³ A y OPC-15kg/m³ A logró cierres totales de fisura cuando w_0 estaba entre 0.1-0.2mm y, en aquellos discos que sanaron parcialmente, el porcentaje de cierre de fisuras fue siempre superior al 75%. La concentración de bacterias del estudio citado es 30 veces menor que la del producto Serenade Max (cuando se expresa en CFU/ml), pero tuvo 12 días más de sanado, por lo que es más influyente la concentración de bacterias. Adicionalmente, casi todos los prismas de mortero con Serbiotec tienen un cierre de fisura total, con una concentración de bacterias aproximadamente 1000 veces menor y fisuras el doble de anchas. Cabe resaltar que los autores de dicho estudio tuvieron problemas de trabajabilidad de la mezcla al trabajar con tierra de diatomeas y recomiendan realizar sustituciones de árido fino cuando el contenido de tierra de diatomeas supera el 5% del peso de cemento, consejo que se siguió en este trabajo, además de incluir un 20% del peso de la tierra de diatomeas en agua.

Rauf et al. (2020) inmovilizaron *B. subtilis*, *B. cohnii* y *B. sphaericus* en tres tipos de fibras naturales para inducir el autosanado. La concentración de cada una de las bacterias es de 6×10^8 CFU/ml. Se fabricaron cubos de hormigón de 10x10x10cm que fueron prefisurados con una carga de compresión a los 7 y 28 días de edad. Las aberturas de fisuras no fueron controladas, así que los

resultados del autosanado se presentan anchos de sanado definidos solo como la diferencia entre la abertura inicial y la final. El ambiente de sanado fue inmersión en agua durante 28 días. En las series de hormigones fisurados a los 7 días, *B. sphaericus*, *B. cohnii* y *B. subtilis* lograron anchos de sanado de 0.7mm, 0.55mm y 0.50mm, respectivamente, mientras que la referencia logró 0.24mm. En los hormigones fisurados a los 28 días, todas las series con bacterias lograron un ancho de sanado de 0.4mm, mientras que la referencia logró 0.20mm. Si bien es cierto que estos anchos de sanado no definen si una fisura está cerrada totalmente, indican hasta que aberturas de fisura podrían sanar completamente. El autosanado inducido por los dos productos utilizados en esta investigación puede conseguir un cierre de fisuras superficial completo cuando $w_0 < 0.20\text{mm}$ en un ambiente de inmersión en agua. A partir de ese valor, las fisuras solo se cierran parcialmente.

En el estudio de Roig Flores & Serna (2015), las series de hormigón expuestas al ambiente de la cámara húmeda no tuvieron un buen desempeño, con cierres de fisura máximos de 0.027mm. En esta investigación, se ha corroborado que el ambiente de la cámara húmeda no es muy efectivo en comparación al inmerso en agua.

En el estudio de Farzad et al (2019), se determinó que no se podía capturar la penetración de cloruros en una muestra de hormigón UHPC principalmente por su notable impermeabilidad (Figura 110). Esto explica por qué los valores de P y W de las referencias de UHPC son 0. También puede significar que las P y W observadas en las series UHPC con bacterias son producto de los materiales porosos y absorbentes que se encuentran en la matriz (tierra de diatomeas). Aun así, debido a su elevada impermeabilidad, sus anchos de W son mucho menores que los de las series OPC y HPC.

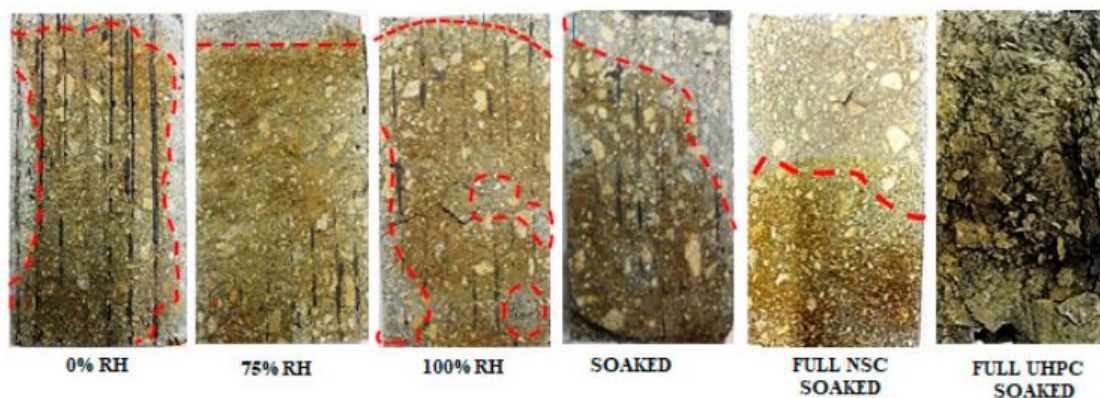


Figura 110. Medidas de penetración de cloruros (Farzad et al,2019)

Un estudio realizado por Jacobsen et al. (1995) demuestra que el autosanado es menos evidente en hormigones con humo de sílice. Esto es porque el humo de sílice consume portlandita, reduciendo la cantidad de portlandita disponible para el autosanado en comparación a un hormigón convencional. Los hormigones de las series HPC y UHPC han mostrado una baja producción de carbonato cálcico en comparación a los de las series OPC, impactando su potencial para cerrar

fisuras. No es muy evidente en los hormigones porque hay datos de referencia que hacen falta, pero es muy claro en los morteros. OPC-REF sanó perfectamente ($\mu=100\%$), mientras que HPC-REF y UHPC-REF solo habían cerrado parcialmente las fisuras ($\mu>50\%$).

A pesar de que muchos autores concuerdan en que sumergir los especímenes en agua es la mejor manera de conseguir el autosanado, se debe tener en cuenta que la portlandita es muy soluble en agua, por lo que puede escaparse por la fisura, limitando la capacidad de sanado. Se piensa que esto pudo ocurrir en muchos de los discos de hormigón en el ambiente A, ya que tenían acumulaciones de carbonato cálcico en la parte externa del disco, pero poco precipitado dentro de la fisura. Esto fue especialmente frecuente en los discos con fisuras más anchas. Se necesitarían estudios específicos para clarificar estas ideas.

En este trabajo se estudiaron indicadores de autosanado como cierre de fisuras, permeabilidad y penetración de cloruros en hormigones y morteros con diferentes calidades de matriz y con diferentes productos disponibles en el mercado que contienen bacterias: Serenade Max y Serbiotec. En los siguientes párrafos se discutirá acerca de los resultados obtenidos en los ensayos realizados.

Comparando los cierres de fisura entre ambos productos, se debe tener en cuenta si los elementos son de hormigón o mortero. Para discos de hormigón en ambientes de sanado idénticos, los discos con Serenade Max, independientemente de la cantidad de producto, superaban a los de Serbiotec. Esto puede ser por la notoria diferencia de sus concentraciones de bacteria. Serbiotec contiene 2.2×10^6 CFU/ml, mientras que Serenade Max contiene 5.13×10^{10} CFU/g de producto (1.15×10^{11} CFU/ml), casi 1×10^5 veces más. En la Figura 79 se realizó una comparación entre hormigones y morteros con la misma cantidad de producto (25% de sustitución de agua por Serbiotec) y en el mismo ambiente (sumergido en agua). Los morteros tuvieron un mejor desempeño que los hormigones, posiblemente porque en el mortero hay un mayor volumen total de pasta, aumentando la efectividad de la limitada concentración de bacterias. Los áridos en el hormigón también pueden influir, ya que aumenta las distancias que tendría que recorrer un agente sanador para sellar una fisura de forma efectiva. Queda por definir el potencial de autosanado de un mortero con Serenade Max.

Comparando los cierres de fisura entre las series de referencia y las series con bacterias, expuestas a un mismo ambiente, las bacterias son capaces de cerrar aberturas de fisura más anchas que las que se pueden cerrar con autosanado autógeno en matrices de hormigón OPC y HPC. En un ambiente sumergido en agua, pueden lograr cierres parciales de fisura superiores al 50% hasta aberturas de fisura de 0.6mm en hormigones OPC y se logran cierres totales con aberturas menores a 0.25mm. Al no tener referencias de cierres de fisura en hormigones HPC, solo se puede especular, pero, en este estudio, las bacterias lograron cierres parciales superiores al 40% con aberturas de fisura de 0.5mm, lo cual es

muy probable que supere lo que el autosanado autógeno conseguiría a ese nivel de abertura. El comportamiento cambia cuando la matriz es de alta calidad. En un ambiente sumergido en agua, los hormigones UHPC logran un mejor cierre de fisuras con el autosanado autógeno que con bacterias. En el ambiente D* (7 días en agua y 21 días en cámara húmeda), las bacterias tienen un buen desempeño en los hormigones OPC, comparable a los resultados de un ciclo secado-humectación, además de demostrar que el proceso de autosanado con bacterias es rápido, cerrando casi la totalidad de la fisura durante el tiempo que los discos permanecieron en agua. En un ambiente de solo cámara húmeda, el hormigón se comportó igual independientemente de si contenía bacterias o no. Para los hormigones UHPC en cámara húmeda, la máxima cantidad de bacterias (15kg/m³) permite obtener resultados mejores que la referencia.

En los ensayos de permeabilidad, los hormigones con bacteria son capaces de obtener mejores eficiencias, es decir, pierden mucha menos agua en el ensayo final de permeabilidad en comparación al ensayo inicial. Esto es cierto para todos los tipos de hormigón en el ambiente sumergido en agua y para las series OPC en el ambiente D* (7 días en agua, 21 días en cámara húmeda). Todos los hormigones HPC en cámara húmeda obtuvieron bajas eficiencias, tuvieran bacterias o no. En el hormigón UHPC, la serie UHPC-15kgm³ en cámara húmeda logra buenos resultados, comparada a su referencia y a las demás series con bacterias.

En los ensayos de penetración de cloruros, la adición de Serenade Max al hormigón UHPC aumenta la penetración de cloruros, principalmente porque el producto contiene tierra de diatomeas, un material muy poroso y absorbente que facilita el ingreso de agentes corrosivos. Para estos hormigones es más conveniente el autosanado autógeno, independientemente del ambiente de sanado, aunque la serie UHPC-15kgm³ en cámara obtuvo resultados comparables y, en algunos casos, hasta mejores que los de la referencia. En los hormigones HPC se observan mejoras con las bacterias respecto a la referencia, en un ambiente sumergido en agua. En la cámara húmeda, tanto las referencias como las series con bacterias se comportan igual. En las series OPC sumergidas en agua, no es muy claro cual tipo de autosanado es mejor debido a lo dispersos que están los datos y a los comportamientos similares que tienen las series con bacterias y la referencia.

5.1 Conclusiones

Este trabajo presenta un estado del arte y los resultados del estudio sobre el autosanado de hormigones y morteros con bacterias. Los análisis se han enfocado en el cierre de fisuras, la permeabilidad y la penetración de cloruros de distintos tipos de hormigón y mortero con diferentes contenidos de bacterias y expuestos a diferentes ambientes. Los objetivos eran analizar las opciones comerciales disponibles y comprobar que el autosanado autónomo era más eficiente que el autógeno, determinando para qué tamaños de fisura y para qué ambiente lo es.

De este trabajo se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- Todavía no resulta fácil obtener productos bacterianos pensados para producir el autosanado. Sin embargo, existen productos con bacterias disponibles en mercados ajenos a la industria de la construcción que tienen cierta capacidad de inducir el autosanado autónomo en hormigones y morteros.
- El autosanado autónomo con bacterias es mejor que el autógeno en cuanto a la permeabilidad de los hormigones. En concreto, se han detectado mejoras en los siguientes casos:
 - En ambiente sumergido en agua, las bacterias mejoran la permeabilidad de los hormigones OPC y HPC cuando $w_0 < 0.40\text{mm}$ y UHPC cuando $w_0 < 0.30\text{mm}$ en comparación al autosanado autógeno que solo mejoran la permeabilidad cuando $w_0 < 0.20\text{mm}$ en hormigones OPC y HPC y $w_0 < 0.10\text{mm}$ en hormigones UHPC.
 - En el ambiente de solo cámara húmeda, la serie UHPC con 15kg/m^3 de Serenade Max fue la única que obtuvo resultados favorables ($w_0 < 0.12\text{mm}$, $\mu > 65\%$).
 - En cámara húmeda después de una semana en agua (series OPC D), las bacterias mejoran la permeabilidad cuando $w_0 < 0.30\text{mm}$.
- No se puede concluir si el cierre de fisuras es mejor en el autosanado autógeno o en el autónomo debido a que hay falta de datos de referencia y los datos que hay son muy similares entre sí.
 - En este estudio también se ha obtenido que, para cada serie, los morteros lograron un mejor cierre de fisura que los hormigones de su mismo tipo, ambiente y contenido de bacterias.
- El autosanado autógeno es mejor evitando la penetración de cloruros en hormigones UHPC en los ambientes estudiados. El autosanado autónomo con bacterias funciona mejor que el autógeno en hormigones HPC

sumergidos en agua. En los hormigones OPC, el comportamiento de los dos mecanismos de autosanado es similar.

- El ambiente sumergido en agua es más apto para promover el autosanado que el ambiente de la cámara húmeda, pero habría que verificar cuál es el ambiente más apto para promover el autosanado interno y evitar que los precipitados se formen principalmente en la superficie exterior de la fisura.

5.2 Futuras líneas

Esta investigación puede servir como base para nuevos trabajos. Algunas posibles líneas de investigación que se podrían estudiar a continuación para completar o mejorar los resultados obtenidos en este primer estudio podrían ser:

- Evaluar el autosanado de productos provenientes de empresas que comercialicen bacterias especialmente diseñadas para el autosanado.
- Analizar el efecto de estos agentes microbiológicos en otros ambientes, por ejemplo, ambiente marino.
- Evaluar el autosanado promovido mediante agentes microbiológicos en elementos con tamaños mayores de fisura.
- Emplear mayores dosificaciones de agentes microbiológicos y añadir nutrientes para potenciar su efecto.
- Analizar el autosanado de los productos microbiológicos empleados en función de la recuperación de características mecánicas.
- Plantear metodologías que permitan mejorar la distribución de fisuras en los discos de hormigón.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achal, V., & Mukherjee, A. (2015). A review of microbial precipitation for sustainable construction. *Constr Build Mater.* 93, 1224–1235. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.051
- ACI Committee 212, 2010. Report on chemical admixtures for concrete. American Concrete Institute (ACI), Chapter 15(Report ACI 212-3R-10), pp. 46-50.
- AENOR, 2000. Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas). UNE-EN 1015-3:2000.
- AENOR, 2001. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia. UNE-EN 12390-2:2001.
- AENOR, 2003. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. UNE-EN 12390-3:2003.
- AENOR, 2005. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas. EN 196-1:2005.
- AENOR, 2009. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento. UNE-EN 12350- 2:2009.
- Adolphe, J. P., Loubière, J. F., Paradas, J., & Soleilhavoup, F. (1990) Procédé Detraitement Biologique d'une Surface Artificielle. París: Francia European Patent 90400G97.0. (after French patent 8903517, 1989)
- Alghamri, R., Kanellopoulos, A., & Al-Tabbaa, A. (2016) Impregnation and encapsulation of lightweight aggregates for self-healing concrete. *Constr. Build. Mater.* 124, 910-921. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.143>
- Alshalif, A. F., Irwan, J. M., Othman, N., & Anneza, L. H. (2016). Isolation of Sulphate Reduction Bacteria (SRB) to Improve Compress Strength and Water Penetration of Bio-Concrete. *MATEC Web Conf.* 47:01016. doi: 10.1051/mateconf/20164701016
- Basilisk Self-Healing Concrete 2021, *Products*, imagen, visitado 9/9/2021 <<https://www.basiliskconcrete.com/en/products/>>
- Bernier, F., Li, X. L., Bastiaens, W., Ortiz, L., van Geet, M., Wouters, L., Frieg, B., Blümling, P., Desrues, J., Viaggiani, G., Coll, C., Chanchole, S., de Greef, V., Hamza, R., Malinsky, L., Vervoort, A., Vanbrabant, Y., Debecker, B., Verstraelen, J., ... Bühler, C. (2007). *Fractures and Self-healing within the Excavation Disturbed Zone in Clays (SELFRAC)*.
- Boquet, E.; Boronat, A. & Ramos-Cormenzana, A. (1973) Production of Calcite (Calcium Carbonate) Crystals by Soil Bacteria is a General Phenomenon. *Nature* 1973, 246, 527–529

- Caesar, K. H., Kyle, J. R., Lyons, T. W., Tripathi, A., & Loyd, S. J. (2019). Carbonate formation in salt dome cap rocks by microbial anaerobic oxidation of methane. *Nat. Commun.* 10:808. doi: 10.1038/s41467-019-08687-z
- Castro-Alonso, M. J., Montañez-Hernandez, L. E., Sanchez-Muñoz, M. A., Macias Franco, M. R., Narayanasamy, R., & Balagurusamy, N. (2019). Microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) and its potential in bioconcrete: Microbiological and molecular concepts. In *Frontiers in Materials* (Vol. 6). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00126>
- Chekroun, K. B., Rodríguez-Navarro, C., González-Muñoz, M. T., Arias, J. M., Cultrone, G., & Rodríguez-Gallego, M. (2004). Precipitation and growth morphology of calcium carbonate induced by *Myxococcus xanthus*: implications for recognition of bacterial carbonates. *J Sediment Res.* 74, 868–876. doi: 10.1306/050504740868
- Comisión permanente del Hormigón (2011). Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08
- Cuenca, E., & Serna, P. (2021). Autogenous self-healing capacity of early-age ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Sustainability (Switzerland)*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/su13063061>
- de Belie, N., Gruyaert, E., Al-Tabbaa, A., Antonaci, P., Baera, C., Bajare, D., Darquennes, A., Davies, R., Ferrara, L., Jefferson, T., Litina, C., Miljevic, B., Otlewska, A., Ranogajec, J., Roig-Flores, M., Paine, K., Lukowski, P., Serna, P., Tulliani, J. M., ... Jonkers, H. M. (2018). A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures. In *Advanced Materials Interfaces* (Vol. 5, Issue 17). Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/admi.201800074>
- de Rooij, M., van Tittelboom, K., de Belie, N., & Schlangen, E. (2013). *Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee*. <http://www.springer.com/series/8780>
- Dhami, N. K., Reddy, M. S., & Mukherjee, A. (2014). Application of calcifying bacteria for remediation of stones and cultural heritages. *Front. Microbiol.* 5:304. doi: 10.3389/fmicb.2014.00304
- Dry, C. M. (2000). *Three designs for the internal release of sealants, adhesives, and waterproofing chemicals into concrete to reduce permeability*.
- Ersan, Y., Boon, N., & De Belie, N. (2015). “Microbial self-healing concrete: denitrification as an enhanced and environment-friendly approach,” in 5th International Conference on Self-Healing Materials, ed K. Nicholson (Ghent).
- Ersan, Y. C., Boon, N., & De Belie, N. (2018). “Granules with activated compact denitrifying core (ACDC) for self-healing concrete with corrosion protection functionality,” in *Microorganisms-Cementitious Materials Interactions: Final*

- Conference of RILEM TC 253-MCI., eds A. Bertron and H. Jonkers (Toulouse: RILEM Publications), 475–484.
- European Project Group, (2005). The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use.
- Farzad, M., Fancy, S. F., Lau, K., & Azizinamini, A. (2019). Chloride penetration at cold joints of structural members with dissimilar concrete incorporating UHPC. *Infrastructures*, 4(2). <https://doi.org/10.3390/infrastructures4020018>
- Hammes, F., & Verstraete, W. (2002). Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2002, 1, 3–7.
- Hearn, N. (1998). Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: What is the difference? In *Materials and Structures/Matériaux et Constructions* (Vol. 31).
- Hearn, N., & Morley, C. T. (1997). *Self-sealing property of concrete Experimental evidence* (Vol. 30).
- Hong, G., & Choi, S. (2017). Rapid self-sealing of cracks in cementitious materials incorporating superabsorbent polymers. *Construction and Building Materials*, 143, 366–375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.133>
- Igarashi, S., Kunieda, M., & Nishiwaki, T. (2009). *Technical Committee on Autogenous Healing in Cementitious Materials*.
- Jacobsen, S., Marchand, J., & Hornain, H. (1995). Sem observations of the microstructure of frost deteriorated and self-healed concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(8), 1781–1790. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00174-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00174-3)
- Jimenez-Lopez, C. J., Jroundi, F., Rodríguez-Gallego, M., Arias, J. M., & Gonzalez-Muñoz, M. T. (2007). “Biomíneralization induced by Myxobacteria,” in Proceedings of the II International Conference on Environmental, Industrial and Applied Microbiology (BioMicroWorld2007), ed A. Mendez-Vilas (Seville: World Scientific), 143–154. doi: 10.1142/7133
- Joseph, C., Jefferson, A. D., Isaacs, B., Lark, R., & Gardner, D. (2010). Experimental investigation of adhesive-based self-healing of cementitious materials. *Magazine of Concrete Research* 62(11), 831–843
- Kang, S. H., Hong, S. G., & Moon, J. (2018). Importance of monovalent ions on water retention capacity of superabsorbent polymer in cement based solutions. *Cement and Concrete Composites*, 88, 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.01.015>
- Klemm, A. J., & Sikora, K. S. (2013). The effect of Superabsorbent Polymers (SAP) on microstructure and mechanical properties of fly ash cementitious mortars. *Construction and Building Materials*, 49, 134–143. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.039>

- Lauer, K. R., & Slate, F. O. (1956). *Autosoldadura de las pastas y hormigones de cemento*. <http://materconstrucc.revistas.csic.es>
- Lee, H. X. D., Wong, H. S., & Buenfeld, N. R. (2010a). Self-sealing of cracks in concrete using superabsorbent polymers. *Cement and Concrete Research*, 79, 194–208. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.09.008>
- Lee, H. X. D., Wong, H. S., & Buenfeld, N. R. (2010b). Potential of superabsorbent polymer for self-sealing cracks in concrete. *Advances in Applied Ceramics*, 109(5), 296–302. <https://doi.org/10.1179/174367609X459559>
- Liu, H., Huang, H., Wu, X., Peng, H., Li, Z., Hu, J., & Yu, Q. (2019). Effects of external multi-ions and wet-dry cycles in a marine environment on autogenous self-healing of cracks in cement paste. *Cement and Concrete Research*, 120, 198–206. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.014>
- Millero, F. J., Feistel, R., Wright, D. G., & McDougall, T. J. (2008). The composition of Standard Seawater and the definition of the Reference-Composition Salinity Scale. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 55(1), 50–72. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2007.10.001>
- Mondal, S., Das, P., & Chakraborty, A. K. (2017). Application of Bacteria in Concrete. In *Materials Today: Proceedings* (Vol. 4). www.sciencedirect.comwww.materialstoday.com/proceedings2214-7853
- O'Connell, M., McNally, C., & Richardson, M. G. (2010). Biochemical attack on concrete in wastewater applications: a state of the art review. *Cem. Concr. Comp.* 32, 479–485. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.05.001
- Ostos Ortiz, O. L., Rosas Arango, S. M., & González Devia, J. L. (2018). *Aplicaciones biotecnológicas de los microorganismos*.
- Perito, B., & Mastromei, G. (2011). "Molecular basis of bacterial calcium carbonate precipitation," in *Molecular Biomineralization: Aquatic Organisms Forming Extraordinary Materials*, ed. W. E. G. Müller (Berlin; Heidelberg: Springer), 113–139. doi: 10.1007/978-3-642-21230-7_5
- Ramachandran, S.K., Ramakrishnan, V., Bang, S.S. (2001). Remediation of Concrete Using Micro-organisms. *ACI Mater. J.* 98, 3–9
- Rauf, M., Khaliq, W., Khushnood, R. A., & Ahmed, I. (2020). Comparative performance of different bacteria immobilized in natural fibers for self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119578>
- Rodriguez-Navarro, C., Rodriguez-Gallego, M., Chekroun, K. B., & Gonzalez-Muñoz, M. T. (2003). Conservation of ornamental stone by *Myxococcus xanthus*-induced carbonate biomineralization. *Appl. Environ. Microbiol.* 69, 2182–2193. doi: 10.1128/AEM.69.4.2182-2193.2003

- Roig Flores, M., & Serna Ros, P. (2015). *Study of the Feasibility of Self-Healing Concrete with and without Crystalline Admixtures*.
- Roig-Flores, M., Formagini, S., & Serna, P. (2021). Self-healing concrete-what is it good for? *Materiales de Construcción*, 71(341). <https://doi.org/10.3989/MC.2021.07320>
- Roig-Flores, M., Moscato, S., Serna, P., & Ferrara, L. (2015). Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments. *Construction and Building Materials*, 86, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.091>
- Roig-Flores, M., & Serna, P. (2020). Concrete early-age crack closing by autogenous healing. *Sustainability (Switzerland)*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/su12114476>
- Schlangen, E., ter Heide, N. & van Breugel, K., 2006. Crack Healing of early age cracks in concrete. In: M. Konsta-Gdoutos, ed. *Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties*. s.l.:Springer, p. 273–284.
- SciencePhotoLibrary 2021, *Colony of Bacillus subtilis bacteria*, imagen, visitado 9/9/2021. <<https://www.sciencephoto.com/media/10904/view/colony-of-bacillus-subtilis-bacteria>>
- Seifan, M., Samani, A. K., & Berenjian, A. (2016). Bioconcrete: next generation of self-healing concrete. *Appl Microbiol. Biotechnol.* 100, 2591–2602. doi: 10.1007/s00253-016-7316-z
- Silva, F. B., de Belie, N., Boon, N., & Verstraete, W. (2015a). Production of non-axenic ureolytic spores for self-healing concrete applications. *Construction and Building Materials*, 93, 1034–1041. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.049>
- Silva, F. B., Boon, N., de Belie, N., & Verstraete, W. (2015b). Industrial application of biological self-healing concrete: Challenges and economical feasibility. *Journal of Commercial Biotechnology*, 21(1), 31–38. <https://doi.org/10.5912/jcb662>
- Snoeck, D., Van Tittelboom, K., Steuperaert, S., Dubruel, P., & De Belie, N. (2014a). Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*
- Snoeck, D., Schaubroeck, D., Dubruel, P., & De Belie, N. (2014b). Effect of high amounts of superabsorbent polymers and additional water on the workability, microstructure and strength of mortars with a water-to-cement ratio of 0.50. *Construction and Building Materials*, 72, 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.012>
- Speck, O., & Speck, T. (2019). An Overview of Bioinspired and Biomimetic Self-Repairing Materials. *Biomimetics*, 4(1), 26. <https://doi.org/10.3390/biomimetics4010026>

- Sun, L., Yu, W. Y., & Ge, Q. (2011). Experimental research on the self - Healing performance of micro - Cracks in concrete bridge. *Advanced Materials Research*, 250–253, 28–32. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.28>
- Tambunan, T., Juki, M. I., & Othman, N. (2019). Mechanical properties of sulphate reduction bacteria on the durability of concrete in chloride condition. *MATEC Web Conf. EDP Sci.* 258:01024 doi: 10.1051/mateconf/201925801024
- Tsangouri, E. (2019). A Decade of Research on Self-Healing Concrete. In *Sustainable Construction and Building Materials*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.82525>
- Tsuji, M., Shitama, K., & Isobe, D. (1999). *Basic Studies on Simplified Curing Technique, and Prevention of Initial Cracking and Leakage of Water through Cracks of Concrete by Applying Superabsorbent Polymers as New Concrete Admixture*.
- Turick, C. E., & Berry, C. J. (2016). Review of concrete biodeterioration in relation to nuclear waste. *J. Environ. Radioact.* 151, 12–21. doi: 10.1016/j.jenvrad.2015.09.005
- Van Mullem, T.; Gruyaert, E.; Caspeele, R. & De Belie, N. (2020) First large scale application with self-healing concrete in belgium: Analysis of the laboratory control tests. *Materials*. 13 [4], 997. <https://doi.org/10.3390/ma13040997>.
- Van Tittelboom, K., Adesanya, K., Dubruel, P., van Puyvelde, P., & de Belie, N. (2011a). Methyl methacrylate as a healing agent for self-healing cementitious materials. *Smart Materials and Structures*, 20(12). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/20/12/125016>
- Van Tittelboom, K., de Belie, N., van Loo, D., & Jacobs, P. (2011b). Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent. *Cement and Concrete Composites*, 33(4), 497–505. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.01.004>
- Van Tittelboom, K., Snoeck, D., Wang, J., & de Belie, N. (2013). *Most recent advances in the field of self-healing cementitious materials*.
- Wang, J., De Belie, N. & Verstraete, W. (2011): Self-healing of mortar by bacteria encapsulated in diatomaceous earth. In: Godbout, S., Potvin, L. (eds.) Proceedings of the 7th International Symposium on Concrete for a Sustainable Agriculture (CSA), Quebec, September 18-21, pp. 17–24
- Wang, J.Y., De Belie, N. & Verstraete, W. (2012): Diatomaceous earth as a protective vehicle for bacteria applied for self-healing concrete. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 39, 567–577
- Wang, J. Y., Soens, H., Verstraete, W., & De Belie, N. (2014). Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. *Cem. Concr. Res.* 56, 139–152. doi: 10.1016/j.cemconres.2013.11.009

- Witjaksono, M. (2020). *Comparative Study of Self-Sealing and Self-Healing in Clay and Concrete 2020*.
- Yıldırım, G., Khiavi, A. H., Yeşilmen, S., & Şahmaran, M. (2018). Self-healing performance of aged cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 87, 172–186. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.01.004>
- Zabanoot, M. S. S. (2020). Review of autogenous and autonomous self-healing concrete technologies for marine environments. *WIT Transactions on the Built Environment*, 196, 31–38. <https://doi.org/10.2495/HPSM200041>
- Zhang, M., Han, N., Xing, F., Wang, X. & Schlangen, E. (2013). Evaluation of a Microcapsule based self-healing system for cementitious materials. International Conference on Self-Healing Materials (ICSHM2013).
- Zhang, J., Zhou, A., Liu, Y., Zhao, B., Luan, Y., Wang, S., et al. (2017). Microbial network of the carbonate precipitation process induced by microbial consortia and the potential application to crack healing in concrete. *Sci. Rep.* 7:14600. doi: 10.1038/s41598-017-15177-z
- Zhu, T., and Dittrich, M. (2016). Carbonate precipitation through microbial activities in natural environment, and their potential in biotechnology: a review. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 4:4. doi: 10.3389/fbioe.2016. 00004