



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

# DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE HORMIGÓN PARA IMPRESIÓN 3D CON FIBRAS Y ÁRIDOS RECICLADOS

Trabajo realizado por:

**Jhordan Santos Goycochea Marchena**

Dirigido por:

**Eduardo Galeote Moreno y Nikola Tomic**

Máster en:

**Ingeniería Estructural y de la Construcción**

Barcelona, mayo 2023

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

**TRABAJO FINAL DE MÁSTER**

## DEDICATORIA

En principio, dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y haber permitido llegar hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mi madre, porque siempre estuvo conmigo demostrándome todo su amor y apoyo incondicional, por sus consejos, valores y por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien.

A mi hermano, por darme todo su amor, comprensión, respeto y apoyo en todo lo que me proyecto, siguiendo mis consejos desde siempre.

A mi padre, porque, a pesar de nuestra distancia, es una gran persona y siempre me apoyó en lo que tenía en mente y proyectado para un futuro.

A mi abuelita Julia, que, a pesar de nuestra distancia física, siempre quiso verme como una persona correcta, formada y profesional, siempre me apoyó en todo momento y confió en mí, desde el cielo, tú me guías y yo te recuerdo siempre.

A mi novia Carolina, por entenderme en todo, y por su amor, apoyo y motivación constante a lo largo de este proceso investigativo.

# AGRADECIMIENTOS

Siempre fue mi anhelo profundizar más allá de los conocimientos técnicos y es en estos momentos, donde puedo seguir aprendiendo y especializando más estos aspectos de mi profesión, para así seguir aprendiendo nuevas cosas y contribuir al mundo con mis ideas e iniciativa.

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han sido partícipes en la realización del presente trabajo, en especial a los PhD. Ing. Eduardo Galeote y Nikola Tomic, motivadores de esta investigación, por la orientación y el seguimiento de esta, y que sin su ayuda, compromiso y supervisión continua no hubiera sido posible hacer realidad este trabajo.

Quisiera hacer extensiva mi gratitud a la institución Pronabec por el apoyo brindado en toda la etapa del máster y por las facilidades de desarrollar la investigación. Un agradecimiento muy especial merece la comprensión, paciencia y el ánimo recibido de mi familia y amigos.

A todos ellos, muchas gracias.

# RESUMEN

La impresión 3D de hormigón es un avance tecnológico muy importante en los últimos años y que cada vez se está utilizando más en el sector de la construcción. Esta tecnología crea objetos tridimensionales de hormigón y es especialmente importante en proyectos de construcción de gran escala, ya que ofrece una forma eficiente y económica de crear estructuras complejas con formas específicas y diseños personalizados. Además, la impresión 3D de hormigón tiene ventajas adicionales como la reducción en los residuos de materiales, una mayor precisión en la construcción y una mayor velocidad en la producción. También puede ser utilizada en la reparación y renovación de edificios existentes. Los equipos de construcción pueden crear secciones de hormigón en el sitio y reemplazar partes dañadas o envejecidas de una estructura sin tener que demoler las estructuras complejas.

Por otro lado, para que esta tecnología avance se tiene que enfocar en el desarrollo de diversas investigaciones y estudiar todos los parámetros posibles. Muchos de estos parámetros incluyen que los materiales usados sean los más sostenibles posibles, que no sea perjudicial para el medio ambiente, y que brinde oportunidades para una economía circular.

En la presente investigación se desarrolló una campaña experimental para el desarrollo y caracterización del hormigón para impresión 3D. La campaña experimental constó de cuatro etapas: hormigón gris, hormigón blanco, hormigón con fibras metálicas y hormigón con árido reciclado. Para las primeras etapas, se desarrollaron probetas de hormigón gris y blanco, y en base a los resultados se optó por el de mejor comportamiento mecánico. Posteriormente, se desarrolló una optimización en impresión con el uso de tres aditivos: cal, éter y modulador de viscosidad, siendo el éter el de mejor comportamiento a impresión 3D. Luego, se desarrollaron las etapas de hormigón con fibras metálicas y árido reciclado con el fin de obtener su comportamiento mecánico a flexión y compresión (y flexo – tracción en el caso de inclusión de fibras). Por último, se cuantificaron y analizaron los resultados.

# ABSTRACT

The 3D printing of concrete is a very important technological advance in recent years and is being used more and more in the construction sector. This technology creates three-dimensional objects out of concrete and is especially important in large-scale construction projects as it offers an efficient and cost-effective way to create complex structures with specific shapes and custom designs. In addition, 3D printing of concrete has additional advantages such as reduced material waste, higher construction precision, and faster production speed. It can also be used in the repair and renovation of existing buildings. Construction crews can create on-site concrete sections and replace damaged or aging parts of a structure without having to demolish the complex structures.

On the other hand, for this technology to advance, it has to focus on the development of various investigations and study all possible parameters. Many of these parameters include that the materials used are as sustainable as possible, that it is not harmful to the environment, and that it provides opportunities for a circular economy.

In the present investigation, an experimental campaign was developed for the development and characterization of concrete for 3D printing. The experimental campaign consisted of four stages: gray concrete, white concrete, concrete with metallic fibers and concrete with recycled aggregate. For the first stages, gray and white concrete specimens were developed, and based on the results, the one with the best mechanical behavior was chosen. Subsequently, a printing optimization was developed with the use of three additives: lime, ether and viscosity modulator, ether being the one with the best behavior for 3D printing. Then, the stages of concrete with metallic fibers and recycled aggregate were developed in order to obtain their mechanical behavior in flexion and compression (and flexural bending in the case of inclusion of fibers). Finally, the results were quantified and analyzed.

# ÍNDICE

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. PRÓLOGO .....	1
1.2. PROBLEMÁTICA (REALIDAD PROBLEMÁTICA) .....	2
1.3. OBJETIVOS .....	3
1.3.1. Objetivo general .....	3
1.4. METODOLOGÍA .....	4
CAPÍTULO II. ESTADO DEL CONOCIMIENTO .....	6
2.1. INTRODUCCIÓN .....	6
2.2. IMPRESIÓN 3D .....	7
2.2.1. Generalidades .....	7
2.2.2. Impresión 3D con fibras .....	8
2.2.3. Impresión 3D con árido reciclado.....	13
2.3. DISEÑO DE MEZCLAS.....	20
2.3.1. Generalidades .....	20
2.3.2. Diseño de mezclas imprimibles.....	21
2.3.3. Influencia de la composición del hormigón en la reología .....	22
2.4. AHORRO DE COSTES Y SOSTENIBILIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN: IMPRESIÓN 3D .....	26
2.4.1. Generalidades .....	26
2.4.2. Ciclo de vida del hormigón para impresión 3D.....	26
2.4.3. Sostenibilidad y LCA en 3DPC .....	28
2.4.4. Ahorro de costes y tiempo en 3DPC .....	31
CAPÍTULO III. CAMPAÑA EXPERIMENTAL .....	34
3.1. INTRODUCCIÓN .....	34
3.2. PLANTEAMIENTO .....	35
3.3. HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA.....	38
3.3.1. Materiales.....	38
3.3.1.1. <i>Materiales de la mezcla usando hormigón gris.....</i>	38
3.3.1.2. <i>Materiales de la mezcla usando hormigón blanco.....</i>	38
3.3.2. Dosificaciones para UHPC .....	38
3.3.2.1. <i>Dosificaciones usadas para hormigón gris.....</i>	39
3.3.2.2. <i>Dosificaciones usadas para hormigón blanco.....</i>	39
3.3.3. Fabricación y curado de probetas.....	40
3.3.3.1. <i>Fabricación de probetas.....</i>	40
3.3.3.2. <i>Curado de probetas.....</i>	41

3.3.4.	Descripción del equipo de ensayo .....	42
3.3.4.1.	<i>Serie AUTOTEST: Ensayos de compresión y flexión</i> .....	42
3.3.4.2.	<i>Ventajas técnicas</i> .....	43
3.3.5.	Caracterización mecánica en estado endurecido.....	43
3.3.5.1.	<i>Ensayo de flexión</i> .....	43
3.3.5.2.	<i>Ensayo de compresión</i> .....	45
3.3.6.	Optimización en impresión 3D y ensayo de probetas .....	46
3.3.6.1.	<i>Impresión 3D con cal</i> .....	46
3.3.6.2.	<i>Impresión 3D con Éter</i> .....	46
3.3.6.3.	<i>Impresión 3D con Modulador de viscosidad (MasterMatrix 175)</i> .....	47
3.3.6.4.	<i>Ensayo de flexión</i> .....	48
3.3.6.5.	<i>Ensayo de compresión</i> .....	49
3.4.	HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA CON FIBRAS METÁLICAS .....	51
3.4.1.	Materiales.....	51
3.4.2.	Dosificaciones para UHPC blanco con fibras.....	52
3.4.3.	Fabricación y curado de probetas.....	53
3.4.3.1.	<i>Fabricación de probetas</i> .....	53
3.4.3.2.	<i>Curado de probetas</i> .....	54
3.4.4.	Descripción del equipo de ensayo .....	54
3.4.4.1.	<i>INSTRON: Ensayos a la tracción por flexión</i> .....	54
3.4.4.2.	<i>Serie AUTOTEST: Ensayos de compresión</i> .....	54
3.4.5.	Caracterización mecánica en estado endurecido.....	55
3.4.5.1.	<i>Ensayo de resistencia a la tracción por flexión</i> .....	55
3.4.5.2.	<i>Ensayo de compresión</i> .....	56
3.4.6.	Ensayo de probetas.....	56
3.4.6.1.	<i>Ensayos de flexión y flexo – tracción</i> .....	56
3.4.6.2.	<i>Ensayo de compresión</i> .....	57
3.5.	HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA CON ÁRIDO RECICLADO .....	58
3.5.1.	Materiales.....	58
3.5.1.1.	Materiales de la mezcla usando hormigón blanco .....	58
3.5.1.2.	Granulometría del árido reciclado.....	59
3.5.1.3.	Densidades del árido reciclado .....	62
3.5.2.	Dosificaciones para UHPC blanco con áridos reciclados .....	63
3.5.3.	Fabricación y curado de probetas.....	63
3.5.3.1.	<i>Fabricación de probetas</i> .....	63
3.5.3.2.	<i>Curado de probetas</i> .....	64
3.5.4.	Descripción del equipo de ensayo .....	65
3.5.4.1.	<i>Serie AUTOTEST: Ensayos de compresión y flexión</i> .....	65

3.5.5.	Caracterización mecánica en estado endurecido.....	65
3.5.5.1.	<i>Ensayo de flexión</i> .....	65
3.5.5.2.	<i>Ensayo de compresión</i> .....	66
3.5.6.	Ensayos de probetas .....	66
3.5.6.1.	<i>Ensayo de flexión</i> .....	66
3.5.6.2.	<i>Ensayo de compresión</i> .....	67
CAPÍTULO IV. RESULTADOS .....		69
4.1.	INTRODUCCIÓN .....	69
4.2.	HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA.....	70
4.2.1.	Ensayos de probetas de hormigón gris.....	70
4.2.1.1.	<i>Ensayo a flexión</i> .....	70
4.2.1.2.	<i>Ensayo a compresión</i> .....	70
4.2.1.3.	<i>Análisis de resultados</i> .....	71
4.2.2.	Ensayos de probetas de hormigón blanco .....	75
4.2.2.1.	<i>Ensayo a flexión</i> .....	75
4.2.2.2.	<i>Ensayo a compresión</i> .....	76
4.2.2.3.	<i>Análisis de resultados</i> .....	77
4.2.3.	Optimización en impresión 3D .....	80
4.2.3.1.	<i>Impresión 3D con Cal</i> .....	81
4.2.3.2.	<i>Impresión 3D con Éter</i> .....	82
4.2.3.3.	<i>Impresión 3D con Modulador de viscosidad</i> .....	86
4.3.	HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA CON FIBRAS METÁLICAS .....	87
4.3.1.	Ensayos de probetas .....	87
4.3.1.1.	<i>Ensayo a flexión</i> .....	87
4.3.1.2.	<i>Ensayo a flexo – tracción</i> .....	88
4.3.1.3.	<i>Ensayo a compresión</i> .....	90
4.3.1.4.	<i>Análisis de resultados</i> .....	91
4.4.	HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA CON ÁRIDO RECICLADO .....	99
4.4.1.	Ensayos de probetas .....	99
4.4.1.1.	<i>Ensayo a flexión</i> .....	99
4.4.1.2.	<i>Ensayo a compresión</i> .....	100
4.4.1.3.	<i>Análisis de resultados</i> .....	101
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES .....		107
5.1.	INTRODUCCIÓN .....	107
5.2.	CONCLUSIONES GENERALES .....	108
5.3.	CONCLUSIONES ESPECÍFICAS .....	109
5.3.1.	Incorporación de fibras metálicas .....	109
5.3.2.	Sustitución de árido reciclado .....	109



---

5.3.3. Incorporación de éter .....	110
5.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	111
BIBLIOGRAFÍA.....	112

# LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades físicas de los áridos usados [30].	14
Tabla 2. Total de probetas a ensayos y tipos de ensayos contemplados en función del tipo de hormigón.	37
Tabla 3. Dosificaciones para hormigón gris.	39
Tabla 4. Dosificaciones para hormigón blanco.	39
Tabla 5. Dosificaciones para hormigón blanco con cal.	46
Tabla 6. Dosificaciones para hormigón blanco con éter.	46
Tabla 7. Dosificaciones para hormigón blanco con modulador de viscosidad.	47
Tabla 8. Dosificaciones para hormigón blanco con fibras metálicas.	53
Tabla 9. Granulometría de RAC 0 – 0.63 mm.	61
Tabla 10. Granulometría de RAC 0.63 – 2 mm.	61
Tabla 11. Dosificaciones para hormigón blanco con áridos reciclados.	63
Tabla 12. Resultados de ensayo a flexión de probetas de hormigón gris a 1, 7, 14 y 28 días.	70
Tabla 13. Resultados de ensayo a compresión de probetas de hormigón gris a 1, 7, 14 y 28 días.	71
Tabla 14. Resultados de resistencias a flexión y COV de probetas de hormigón gris.	71
Tabla 15. Resultados de resistencias a compresión y COV de probetas de hormigón gris.	73
Tabla 16. Resultados de ensayo a flexión de probetas de hormigón gris a 1, 7, 14 y 28 días.	75
Tabla 17. Resultados de ensayo a compresión de probetas de hormigón gris a 1, 7, 14 y 28 días.	76
Tabla 18. Resultados de resistencias a flexión y COV de probetas de hormigón blanco.	77
Tabla 19. Resultados de resistencias a compresión y COV de probetas de hormigón blanco.	79
Tabla 20. Resultados de ensayo a flexión y flexo – tracción de probetas de hormigón blanco con fibras metálicas a 1, 7, 21 y 28 días.	87
Tabla 21. Resultados de ensayo a flexo – tracción de probetas de hormigón con fibras metálicas de dosificación SP2.5_s/E_F20.	89
Tabla 22. Resultados de ensayo a flexo – tracción de probetas de hormigón con fibras metálicas de dosificación SP6_E0.5_F20.	89
Tabla 23. Resultados de ensayo a flexión y flexo – tracción de probetas de hormigón blanco con fibras metálicas a 1, 7, 21 y 28 días.	90
Tabla 24. Resumen de resultados de ensayo a flexión de probetas de hormigón blanco con fibras metálicas.	91
Tabla 25. Resumen de resultados de ensayo a compresión de probetas de hormigón blanco con fibras metálicas.	97
Tabla 26. Resultados de ensayo a flexión de probetas de hormigón blanco con árido reciclado a 1, 7, 21 y 28 días.	99

Tabla 27. Resultados de ensayo a flexión de probetas de hormigón blanco con árido reciclado a 1, 7, 21 y 28 días. ....	100
Tabla 28. Resultados de resistencias a flexión y COV de probetas de hormigón blanco con árido reciclado. ....	101
Tabla 29. Resultados de resistencias a compresión y COV de probetas de hormigón blanco con árido reciclado.....	104

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la metodología para la investigación desarrollada. ....	5
Figura 2. Muestra de una 3DPC con filamentos perpendiculares a la dirección de carga [13]. ....	10
Figura 3. Distribución de fibras de especímenes impresos y moldeados [15]. ....	11
Figura 4. Muestras de corte de elementos impresos en 3D [16]. ....	12
Figura 5. Resultados de las pruebas reológicas con una velocidad de corte constante de 0.2 s-1. El eje horizontal superior es la tensión de corte y el eje horizontal inferior es la duración del corte [29]. ....	16
Figura 6. Distribución 3D de poros en el área de interfaz entre capas a los 0 min y 60 min.[31]. ....	17
Figura 7. Distribución de poros con la altura de la capa en el espacio 3D [31]. ....	18
Figura 8. Resultados de las pruebas de resistencia a la compresión para diferentes edades, relaciones de reemplazo y direcciones de carga [33]. ....	19
Figura 9. Arena de río y arena reciclada [34]. ....	20
Figura 10. Proceso iterativo de preparación de una mezcla de hormigón imprimible [36]. ....	22
Figura 11. Esquema de un proceso de extrusión por capas con hormigón [27]. ....	24
Figura 12. Comparación de constituyentes (por volumen) utilizados en hormigón convencional, hormigón autocompactante y mezclas de hormigón imprimibles en 3D [36]. ....	25
Figura 13. Boceto esquemático del ciclo de vida de una estructura impresa en 3D [27]. ....	27
Figura 14. Edificio de impresión 3D más alto del mundo [71]. ....	33
Figura 15. Esquema de planteamiento de las diferentes mezclas para evaluar. ....	36
Figura 16. Fabricación de probetas de UHPC gris. ....	40
Figura 17. Molde típico prismático [73]. ....	40
Figura 18. Máquina de reamasado. ....	41
Figura 19. Aplicación de desencofrante al molde. ....	41
Figura 20. Probetas en cámara de humedad. ....	42
Figura 21. Máquina IBERTEST serie AUTOTEST [75]. ....	42
Figura 22. Disposición de cargas en las proyectas de ensayo (punto central de carga) [76]. ....	44
Figura 23. Probeta ensayada a flexión con equipo de ensayo utilizado (punto central de carga). ....	44
Figura 24. Máquina de ensayo a compresión y sistema de lectura. ....	45
Figura 25. Probeta ensayada a compresión con equipo de ensayo utilizado. ....	45
Figura 26. Ensayos a flexión por cada dosificación para hormigón gris. ....	48
Figura 27. Ensayos a flexión por cada dosificación para hormigón blanco. ....	49
Figura 28. Ensayos a compresión por cada dosificación para hormigón gris. ....	50
Figura 29. Ensayos a compresión por cada dosificación para hormigón blanco. ....	51

Figura 30. Fibras metálicas Dramix OL.....	52
Figura 31. Fabricación de probetas de UHPC blanco con fibras. ....	53
Figura 32. Ensayos a flexión y flexo – tracción por cada dosificación para hormigón blanco con fibras.....	57
Figura 33. Ensayos a compresión por cada dosificación para hormigón blanco con fibras. ....	58
Figura 34. Tamizadora electromagnética BA 400 N.....	59
Figura 35. RAC 0 – 0.63 mm. y RAC 0.63 – 2 mm., respectivamente.....	60
Figura 36. Tamizadora AS 300 Control.....	60
Figura 37. Curva granulométrica de RAC 0 – 0.63 mm. y RAC 0.63 – 2 mm. ....	61
Figura 38. Registro del frasco LeChatelier y la muestra.....	62
Figura 39. Fabricación de probetas de UHPC blanco con 50% RA, con y sin éter.....	64
Figura 40. Máquina de reamasado con mezcla de hormigón blanco con áridos reciclados. ....	64
Figura 41. Probetas curadas por cada dosificación para hormigón blanco con áridos reciclados. ....	65
Figura 42. Ensayos a flexión por cada dosificación para hormigón blanco con áridos reciclados. ....	67
Figura 43. Probetas ensayadas a flexión por cada dosificación para hormigón blanco con áridos reciclados.....	67
Figura 44. Ensayos a compresión por cada dosificación para hormigón blanco con áridos reciclados. ....	68
Figura 45. Resultados de ensayo a flexión de probetas de hormigón gris.....	73
Figura 46. Resultados de ensayo a compresión de probetas de hormigón gris.....	75
Figura 47. Resultados de ensayo a flexión de probetas de hormigón blanco.....	78
Figura 48. Resultados de ensayo a compresión de probetas de hormigón blanco.....	80
Figura 49. Máquina amasadora para impresión 3D manual.....	81
Figura 50. Impresión 3D manual.....	81
Figura 51. Impresión 3D de hormigón blanco con cal. ....	81
Figura 52. Impresión 3D con cal de las 6 dosificaciones, primera muestra. ....	82
Figura 53. Impresión 3D con cal de las 6 dosificaciones, segunda muestra.....	82
Figura 54. Impresión 3D con cal de 5/6 dosificaciones, tercera muestra.....	82
Figura 55. Impresión 3D con éter de la muestra 1. ....	82
Figura 56. Impresión 3D con éter de la muestra 2. ....	83
Figura 57. Impresión 3D con éter de la muestra 3. ....	83
Figura 58. Impresión 3D con éter de la muestra 4. ....	83
Figura 59. Impresión 3D con éter de la muestra 5. ....	83
Figura 60. Impresión 3D con éter de la muestra 6. ....	84
Figura 61. Impresión 3D con éter de la muestra 7. ....	84
Figura 62. Impresión 3D con éter de la muestra 8. ....	84

Figura 63. Soporte de propio peso de la muestra 8 en estado fresco. ....	85
Figura 64. Impresión 3D con modulador de viscosidad de la muestra 1.....	86
Figura 65. Impresión 3D con modulador de viscosidad de la muestra 2.....	86
Figura 66. Impresión 3D con modulador de viscosidad de la muestra 3.....	86
Figura 67. Impresión 3D con modulador de viscosidad de la muestra 4.....	86
Figura 68. Impresión 3D con modulador de viscosidad de la muestra 5.....	86
Figura 69. Impresión 3D con modulador de viscosidad de la muestra 6.....	86
Figura 70. Impresión 3D con modulador de viscosidad de la muestra 7.....	87
Figura 71. Impresión 3D con modulador de viscosidad de la muestra 8.....	87
Figura 72. Resultados de ensayo a flexión y flexo – tracción de probetas de hormigón blanco con fibras metálicas.....	92
Figura 73. Diagrama de resistencia – CMOD a 7, 21 y 28 días de la dosificación SP2.5_s/E_F20.....	93
Figura 74. Diagrama de resistencia – CMOD a 7, 21 y 28 días de la dosificación SP6_E0.5_F20. ....	94
Figura 75. Comparación flexo – tracción de dosificación SP2.5_s/E_F20 y SP6_E0.5_F20 a 7 días.....	94
Figura 76. Comparación flexo – tracción de dosificación SP2.5_s/E_F20 y SP6_E0.5_F20 a 21 días.....	95
Figura 77. Comparación flexo – tracción de dosificación SP2.5_s/E_F20 y SP6_E0.5_F20 a 28 días.....	96
Figura 78. Resultados de ensayo a compresión de probetas de hormigón blanco con fibras metálicas. ....	98
Figura 79. Resultados de ensayo a flexión de probetas de hormigón con árido reciclado. ....	103
Figura 80. Resultados de ensayo a compresión de probetas de hormigón con árido reciclado. ....	106

## LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

3D	Tres dimensiones
3DPC	Impresión 3D de hormigón – 3D Printing Concrete
3DPRAC	Hormigón de árido grueso reciclado impreso en 3D – 3D printed recycled coarse aggregate concrete
ACP	Polvo de Carbón Activado – Activated Carbon Powder
a/c	Relación agua – cemento
CC	Construcción Perimetral – Contour Crafting
CDW	Residuos de Construcción y Demolición – Construction and Demolition Waste
CNC	Control Numérico Computarizado
CT	Tomografía computarizada – Computed Tomography
cw	Peso del hormigón – Concrete Weight
ECC	Compuesto Cementoso de Ingeniería – Engineered Cementitious Composite
FBP	Pultrusión basada en flujo – Flow-Based Pultrusion
ITZ	Zona de Transición de Interfaz – Interface Transition Zone
LCA	Evaluación del Ciclo de Vida – Life Cycle Assessment
LWECC	Compuestos de hormigones ligeros – Lightweight Engineered Cementitious Composites
MOR	Módulo de ruptura – Modulus of rupture
NA	Áridos naturales – Natural Aggregates
RA	Áridos reciclados – Recycled Aggregates
NCA	Áridos gruesos naturales – Natural Coarse Aggregates
PP	Polipropileno – Polypropylene
PVA	Alcohol polivinílico – Polyvinyl alcohol
RAC	Hormigón con áridos reciclados – Recycled Aggregate Concrete
RCA	Áridos gruesos reciclados – Recycled Coarse Aggregates
RH	Humedad Relativa – Relative Humidity
SCC	Hormigón autocompactante – Self-Compacting Concrete
SF	Fibra de acero – Steel Fiber
SP	Superplastificante
SSD	Superficie saturada seca – Saturated surface dry condition
UHP FRC	Hormigones reforzados con fibra de ultra alta resistencia – Ultra-High-performance Fiber Reinforced Concretes

UHPC	Hormigón de muy alto rendimiento – Ultra High Performance Concrete
Prom.	Promedio – Average
SD	Desviación estándar – Standard deviation
COV	Coefficiente de variación – Coefficient of variation
CMOD	Desplazamiento del borde de la fisura – Crack Mouth Opening Displacement



# CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

## 1.1. PRÓLOGO

A lo largo de las últimas décadas, se han venido realizando diversos estudios sobre el hormigón convencional y sus aplicaciones. Sin embargo, el impulso de la automatización y la digitalización de la industria de la construcción en los últimos años hace que se requieran nuevos hormigones con el fin de mejorar y adaptar sus propiedades a los nuevos procesos productivos. Estas adaptaciones a las nuevas tendencias conllevan alteraciones en el proceso constructivo, lo que tiene un impacto en los costes, tiempo y en la sostenibilidad

A raíz de las adiciones y la digitalización en la industria del hormigón, es que la impresión 3D se está convirtiendo en una tecnología con más acogida para aplicaciones en las que se requieran formas más complejas y elementos únicos.

Por otro lado, la industria del hormigón es la más contaminante en edificación y construcción, por lo que el uso de la impresión 3D puede conseguir reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y, además, con la implementación de esta tecnología se consigue suprimir y reducir materiales y/o elementos de obra, además de evitar el transporte y el gasto de energía en la producción.

Por consiguiente, las organizaciones y los grupos de investigación de universidades cada vez innovan más con el paso del tiempo, pero también se debe adecuar a las necesidades del cliente y la sostenibilidad con el medio ambiente.

El presente trabajo de investigación se centra en el desarrollo y caracterización experimental del hormigón. Dicho hormigón es de alta resistencia con el fin de obtener una resistencia a tracción y flexión más adecuada, y al ser imprimible carece de árido grueso. Consta de dos fases, la primera con fibras metálicas y la segunda con áridos reciclados finos. Con el fin de conseguir una sostenibilidad óptima para futuro en cuanto a fabricación de mezcla y construcción.

## **1.2. PROBLEMÁTICA (REALIDAD PROBLEMÁTICA)**

La impresión 3D en la industria de la construcción es un campo de desarrollo e innovación con elevado potencial. Si bien la tecnología del hormigón se trata de un área en continua evolución, en el ámbito de la impresión 3D resulta necesario desarrollar nuevas dosificaciones que permitan optimizar el sistema de fabricación y mejorar las propiedades del material extruido con el fin de utilizarse para fines estructurales. Es por ello que, a pesar de que, la impresión 3D muestra un gran potencial, la tecnología está en sus inicios y, por ende, falta aún más por innovar y desarrollarse.

De hecho, la mayoría de las impresoras 3D que procesan hormigón todavía se están probando y ajustando en la actualidad. Aún no están diseñadas para fines de fabricación, pese a que existe el potencial para construir aditivamente todo. Desde las fundaciones hasta paredes o muros y puentes, optimizando el tiempo de construcción y siendo más sostenible en el diseño, fabricación y montaje de los elementos impresos con el paso del tiempo. Además, la tecnología de la impresión 3D no está del todo avanzado, por lo que no existe alguna normatividad o guía constructiva para estandarizar procesos en la fabricación y puesta en obra de los elementos.

Por otro lado, los requerimientos de las organizaciones de impresión 3D se hacen cada vez más frecuentes dado que hay varias ventajas en la utilización de esta tecnología. Por eso, es necesario la investigación, el desarrollo y la estandarización para llevar a cabo con éxito el alcance que el cliente necesite. Por todo lo descrito, se requieren que las dosificaciones de impresión 3D tengan ciertas propiedades para alcanzar un material extruible y de alta resistencia. Esto se logra con ayuda de adiciones como las fibras metálicas o árido reciclado, lo cual es motivo de estudio en esta presente investigación.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo general**

- Desarrollar y caracterizar experimentalmente hormigón de alta resistencia para impresión 3D con fibras metálicas y hormigón de alta resistencia para impresión 3D con áridos reciclados.

#### **1.3.2. Objetivo específico**

Los objetivos específicos planteados son:

##### **1.3.2.1. *Objetivos referentes al estado del arte***

- Transmitir información relevante sobre antecedentes de investigación que sirvan de soporte al presente trabajo.
- Exponer los casos de experimentación en cuanto a la implementación de elementos estructurales conformados a partir de la fabricación aditiva.

##### **1.3.2.2. *Objetivos referentes a la campaña experimental***

- Definir el tipo de ensayos a realizar, el número y tamaño de probetas que serán estudiadas, así como todas aquellas condiciones de contorno que correspondan.
- Caracterizar el hormigón de alta resistencia para impresión 3D, estudiando sus dosificaciones y sus propiedades mediante los ensayos realizados.
- Analizar ensayos existentes sobre el comportamiento mecánico a flexión, compresión y flexo – tracción de los elementos de hormigón de alta resistencia para impresión 3D con fibras metálicas y hormigón de alta resistencia para impresión 3D con áridos reciclados.

### 1.3.2.3. **Objetivos referentes al análisis de resultados y conclusiones**

- Presentar y analizar los resultados obtenidos en los ensayos realizados respecto a las resistencias a la compresión, flexión y flexo – tracción, que permitan obtener un indicio en cuanto a la explicación del comportamiento observado.
- Demostrar la fiabilidad mecánica e imprimible con los resultados obtenidos del hormigón para impresión 3D con fibras metálicas y hormigón para impresión 3D con áridos reciclados.
- Concluir sobre los resultados obtenidos con el objetivo de profundizar en la influencia de la incorporación de hormigón de impresión 3D con fibras y hormigón de impresión 3D con áridos reciclados.

## 1.4. **METODOLOGÍA**

La metodología seguida para el desarrollo y el alcance de estos objetivos ha sido la siguiente, lo cual se resume en el esquema de la *Figura 1*:

1. **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.** Presentación del tema a desarrollar, además del planteamiento de los objetivos a alcanzar para la realización de la investigación y de la metodología, esquematizando su estructura.
2. **CAPÍTULO II. ESTADO DEL CONOCIMIENTO.** Recopilación de información extraída de artículos de investigación, tesis de especialidad, revistas y otro tipo de fuentes, para el conocimiento detallado de la línea de investigación, lo cual se organiza y redacta en el **CAPÍTULO II**, donde se presenta el estado del conocimiento acerca de la reología del hormigón, la sostenibilidad y ahorro de costos en impresión 3D, diseños de mezclas e impresión 3D con fibras y áridos reciclados.
3. **CAPÍTULO III. CAMPAÑA EXPERIMENTAL.** Desarrollo y caracterización experimental de hormigón de alta resistencia para impresión 3D, hormigón de alta resistencia para impresión 3D con fibras metálicas y hormigón de alta resistencia para impresión 3D con áridos reciclados. Con las dosificaciones adecuadas para la elaboración de las probetas y los ensayos correspondientes a realizar, además de las muestras de impresión 3D, descritos en el **CAPÍTULO III**. La campaña experimental fue realizada en el Laboratorio de Tecnología de Materiales (LATEM) de la UPC.
4. **CAPÍTULO IV. RESULTADOS.** Análisis y resultados obtenidos de la campaña experimental, descritos en el **CAPÍTULO IV**, a través de los ensayos realizados. Se

pretende analizar cuáles de las dosificaciones de los hormigones estudiados presentan un mejor comportamiento en función de los esfuerzos mecánicos externos, tales como compresión, tracción y flexo – tracción.

5. CAPÍTULO V. CONCLUSIONES. Por último, se presentan las conclusiones de este trabajo de investigación, dando respuesta a los objetivos a través de los resultados, y se proponen las futuras líneas de investigación que pudieran ser aporte en este trabajo.



Figura 1. Esquema de la metodología para la investigación desarrollada.

# CAPÍTULO II. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

## 2.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo II se aborda el estado del conocimiento con el objetivo de transmitir información relevante sobre antecedentes de investigación y exponer los casos de experimentación de materiales cementosos conformados a partir de la fabricación aditiva. Dicha información recopilada es referente a impresión 3D (generalidades, impresión 3D con fibras e impresión 3D con áridos reciclados). Como segundo punto se aborda los análisis y características de las dosificaciones y el diseño de mezclas (generalidades, diseño de mezclas imprimibles e influencia de la composición del hormigón en la reología). Y, por último se aborda el análisis de costes y sostenibilidad (generalidades, ciclo de vida del hormigón para impresión 3D, sostenibilidad y LCA en 3DPC y, ahorro de costes y tiempo en 3DPC).

## 2.2. IMPRESIÓN 3D

### 2.2.1. Generalidades

La impresión 3D consiste en producir objetos tridimensionales superponiendo diferentes materiales [1]. Un hito en el desarrollo de la tecnología de impresión 3D tuvo lugar cuando usaron el CC mostrando cómo las tecnologías de extrusión en capas pueden funcionar en construcciones a gran escala, un proyecto de investigación realizado en la Universidad del Sur de California [1].

La impresión 3D de hormigón basada en extrusión (3DPC) es una técnica de fabricación aditiva emergente que combina tecnologías digitales y de materiales de vanguardia para construir estructuras a través de un proceso de deposición capa por capa [2]–[5]. Las ventajas potenciales, como la libertad geométrica, la reducción de residuos y costes, junto con el aumento de la velocidad de construcción, han convertido a 3DCP en una atractiva alternativa futurista para la industria de la construcción [6].

La formación vertical de la estructura se define como "capacidad de construcción" en la impresión 3D. La edificabilidad ideal es cuando el hormigón conserva su forma después de la extrusión y puede soportar las cargas superiores sin deformarse. Los materiales con buena capacidad de construcción pueden aprovechar al máximo la impresión 3D para una construcción rápida. Por el contrario, pueden ocurrir grandes deformaciones, o incluso colapsos, en el proceso de impresión. Los cambios en las propiedades del material a lo largo del tiempo y sus comportamientos tempranos de tensión-deformación son clave en la edificabilidad [7].

Por otro lado, los componentes impresos generalmente no cumplen con los estándares de construcción o los principios básicos de confiabilidad, y no se usan comúnmente como componentes de carga [8].

En cuanto a la impresión, se debe establecer los parámetros. Los efectos del tamaño de la boquilla de extrusión, la velocidad de impresión cartesiana y la fracción de volumen de fibra sobre la orientación de las fibras se evalúan mediante análisis de imágenes digitales [5]. La velocidad de la boquilla de impresión y el caudal dependen de la longitud de la ruta de impresión y del comportamiento reológico del hormigón. Además, la

configuración de la abertura de la boquilla de impresión debe estar alineada con el contenido y el tamaño de los áridos para evitar obstrucciones.

Las soluciones tecnológicas actuales pueden imprimir casas y edificios de poca altura, pero no permitieron la construcción de rascacielos. Hasta ahora, un edificio de cinco pisos es un logro máximo. Por lo tanto, es fundamental encontrar nuevas estrategias para reforzar la resistencia a la tracción de las estructuras de hormigón impresas en 3D [9].

### 2.2.2. Impresión 3D con fibras

En la actualidad, hay muchas investigaciones de impresión 3D con distintos tipos de fibras con el fin de obtener una resistencia óptima y adecuar a las necesidades que se requieran.

Las fibras de vidrio, carbono y basalto se pueden utilizar directamente (sin impregnación de polímeros) como componentes de tejidos técnicos utilizados en sustitución de barras de refuerzo más rígidas. Las fibras son más fáciles de manipular y moldear (geometrías complejas), pero también menos eficientes estructuralmente ya que las técnicas clásicas de vertido dificultan obtener una buena impregnación de “rovings” (unión de miles de microfibras que se cortan y se depositan aleatoriamente en la matriz) y una buena transferencia de resistencia en el hormigón [8].

Las fibras cortas mezcladas en el hormigón fresco antes del vertido, como en los hormigones reforzados con fibra de ultra alto rendimiento (UHP FRC), son hoy en día una solución clásica y eficiente y proporcionan un comportamiento posterior a la fisuración. Sin embargo, debido a la necesaria trabajabilidad de la mezcla fresca, las proporciones de fibra siguen siendo bajas, alrededor del 1, 2 o 3% del peso del hormigón, pero representan una deficiente trabajabilidad en el sitio [8].

Muchos estudios se refieren a estos temas y permiten vincular los fenómenos de multifisuras, el comportamiento de pseudoendurecimiento por deformación o el aumento de la ductilidad con el tipo o la relación de volumen de las fibras [10].

Con la adición de fibras cortas en el hormigón se podría mejorar el comportamiento de agrietamiento, incluso si en la literatura se destaca un aumento de la resistencia a la



tracción por flexión. Las fibras se mezclan antes del bombeo y, por lo tanto, se dispersan homogéneamente en la sección. Su proporción máxima está limitada a un pequeño porcentaje debido a los requisitos de bombeabilidad. Panda y Manuel, muestran que la impresión alinea significativamente las fibras en la dirección del flujo, lo cual conduce a un comportamiento anisótropo homogéneo del cordón reforzado, que podría cambiar radicalmente el diseño de las estructuras de hormigón y conducir a innovaciones revolucionarias. [11], [12].

### **Hormigón con polvo de carbón**

En esta investigación, Zhang y Aslani, proponen un polvo de carbón activado (ACP) reforzado con fibra de alcohol polivinílico (PVA) para 3DCP. Se preparó y probó siete mezclas con contenidos variables de PVA (1 y 1.5% en vol.) y ACP (0.5 y 1% en peso) mediante la preparación tradicional. Se evaluaron las propiedades frescas, como el flujo de asentamiento y las propiedades mecánicas. Luego se eligió una mezcla preferida con la mayor resistencia a la flexión y se optimizó mediante la recalibración del uso de aditivos químicos. Se preparó un grupo de muestras de la mezcla ajustada por 3DCP y se probaron y compararon las propiedades antes mencionadas con las del molde. Los resultados muestran que las muestras impresas tenían menos resistencia a la compresión, pero seguían siendo competitivas en comparación con las muestras vertidas, mientras que su resistencia a la flexión mejoraba sustancialmente [13].

Se estudió la anisotropía de la estructura de la mezcla impresa, lo que llevó a la conclusión de que cuando el filamento estaba perpendicular a la dirección de carga, se obtenían mayores resistencias a la compresión y a la flexión tal como se muestra en la *Figura 2*, en comparación con la posición paralela del filamento con respecto a la dirección de carga [13].



Figura 2. Muestra de una 3DPC con filamentos perpendiculares a la dirección de carga [13].

### **Hormigones ligeros**

Por otro lado, Sun y los demás autores, realizaron una investigación compuestos de hormigones ligeros (LEWCC) reforzados con fibras de PVA combinando con la tecnología de la impresión 3D. Las fibras de PVA redujeron significativamente la pérdida de asentamiento (de 229 mm. a 150 mm.) y acortaron el tiempo de fraguado de 70 min a 51 min, aumentando el potencial del procedimiento 3DP. Con el fin de obtener el hormigón ligero, las fibras de PVA incorporadas (longitud 18mm.) redujeron la densidad a 1613 kg/m<sup>3</sup> del hormigón. Esto debido a los vacíos de aire introducidos, pero mejoraron el comportamiento mecánico en cuanto a la resistencia a compresión (34 MPa), resistencia a la flexión (8 MPa) y la ductilidad hacia las fracturas [14].

### **Absorción del agua**

Con respecto a la absorción del agua cuando se utilizan fibras de acero en una 3DPC, a través del ensayo X-CT. El método utilizado podría usarse de manera efectiva para monitorear continuamente la evolución del ingreso de agua en los materiales cementicios. La adición de fibra de acero (con longitud de 13 mm. y diámetro de 0.2 mm.) reduce ligeramente el % de absorción de agua en las muestras impresas. Además, en comparación con la muestra moldeada, la alineación de las fibras mejora significativamente la sorción de la muestra impresa, tal como se puede ver en la *Figura 3*. Cabe resaltar que, se realizó una mezcla de 3DPC con SF (al 0.4%), una mezcla de 3DPC sin SF y una mezcla de hormigón moldeada con SF (al 0.4%) [15].

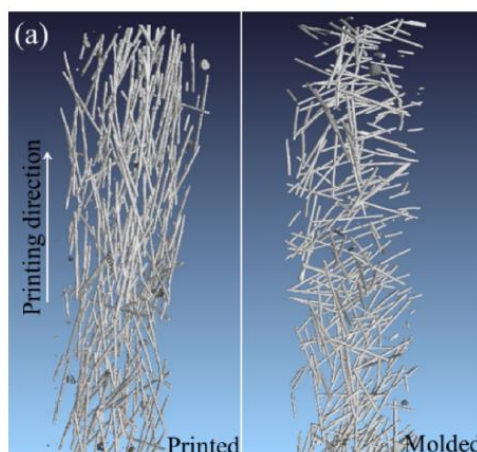


Figura 3. Distribución de fibras de especímenes impresos y moldeados [15].

En comparación con la muestra impresa con SF, la muestra sin SF muestra una absorción de agua ligeramente rápida, mientras que la muestra moldeada con SF muestra una absorción capilar lenta debido a la distribución aleatoria de las fibras [15].

### **Retracción**

En cuanto a la retracción de una 3DPC, Ma y los demás autores, realizaron una investigación con el objetivo de comprender el efecto de la fibra de polipropileno (fibra PP) en la contracción total de 3DPC bajo secado. Usaron los parámetros reológicos, las propiedades mecánicas, la RH interna, la distribución del tamaño de los poros y la orientación de las fibras del 3DPC para compararlos con el hormigón vertido. Notaron que, sin fibra de PP, la retracción total de las muestras impresas es similar a las de hormigón vertido. La adición de fibra de PP redujo la retracción total de las muestras vertidas más significativamente que las muestras impresas. Este fenómeno se explica tanto desde la perspectiva de la estructura de los poros como de la orientación de las fibras [16].

También, se observó una menor retracción total en muestras cortadas a lo largo de la dirección de impresión en comparación con aquellas cortadas perpendicularmente a la dirección de impresión debido a la mayor cantidad de fibra orientada a lo largo de la dirección de impresión (ver

*Figura 4*). La retracción total de 3DPC se encuentra inversamente proporcional al factor de orientación de la fibra [16].

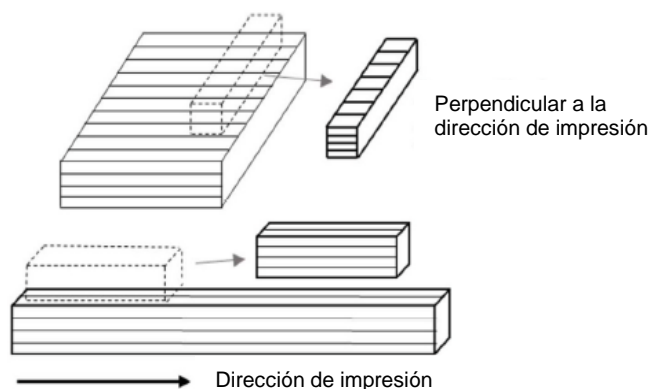


Figura 4. Muestras de corte de elementos impresos en 3D [16].

Concluyeron que, la adición de fibra de PP aumentó el límite elástico estático y la viscosidad plástica dentro de un cierto rango. Además, el proceso de extrusión obligó a las fibras a alinearse a lo largo de la dirección de impresión, lo que indujo una mayor resistencia a la flexión de las muestras impresas medidas a lo largo de la dirección de impresión en comparación con las muestras vertidas. Por último, la adición de fibra de PP aumenta la RH interna e inhibe la evaporación de la humedad [16].

### **Orientación de fibras**

Arunothayan y los otros autores, realizaron una investigación de los efectos de orientación de las fibras de un hormigón reforzado con fibra de ultra alto rendimiento imprimible en 3D (UHP FRC). Los resultados se compararon con los de las muestras coladas en molde convencional. Los resultados revelaron que el tamaño de boquilla más pequeña (10mm. de diámetro) y la fracción de volumen de fibra más alta mejoraron significativamente la alineación de fibra paralela a la dirección de impresión. Además, dicha alineación de fibras condujo a un rendimiento mecánico superior de los especímenes impresos con respecto a los especímenes vertidos en molde [5].

Asimismo, los mismos autores realizaron otras investigaciones con UHP FRC donde la resistencia a la compresión (>150 MPa) ayuda a la impresión de perfiles volumétricos intrincados con secciones delgadas. Se tuvo que el módulo de ruptura fue muy alto (MOR > 30 MPa) lo cual reemplazaría parcialmente al refuerzo convencional. Como resultado se obtuvo un rendimiento de flexión superior en la dirección de impresión en comparación con las muestras vertidas en molde equivalentes [17], [18]. En cuanto a la extrusión, las fibras más cercanas a las paredes de la boquilla más pequeña se alinearon

más hacia la dirección de impresión que las fibras cercanas al centro de la boquilla. Las boquillas más grandes (30 y 40mm.) existieron una diferencia de alineación más significativa [5].

De los mismos autores, la orientación de las fibras tiene un impacto directo en el hormigón. Reduce la eficiencia de las fibras en el hormigón endurecido, considerando que las fibras están dispersas en tres grados de libertad, mientras que los esfuerzos de flexión/tracción en la mayoría de los casos actúan en una dirección específica [19]. También, se mostró que, vertido en molde, al alinear estas fibras de acero cortas paralelas a la dirección principal de la tensión de tracción en un elemento estructural, se puede mejorar la capacidad de carga y la abertura de grietas [20], [21].

La orientación de las fibras puede verse influenciada y adaptada por muchos parámetros. Las propiedades reológicas de la matriz fresca [22], el tiempo de mezclado y la geometría del encofrado [23], el procedimiento de mezclado y los métodos de colocación [24] y las fuerzas electromagnéticas externas [25], [26] son muestras de estos parámetros.

### **2.2.3. Impresión 3D con árido reciclado**

El uso de áridos gruesos reciclados en formulaciones de hormigones imprimibles puede brindar oportunidades para una economía circular y ayudar a mejorar la sostenibilidad de las mezclas imprimibles en 3D [27], [28]. La mayoría de los estudios sobre reología de materiales y edificabilidad de materiales impresos se basan en morteros. Por lo tanto, el contenido de materiales cementosos, especialmente hormigones, representa una alta proporción en la proporción de la mezcla, lo que no se ajusta al concepto de construcción verde.

Además, debido a la retracción después del endurecimiento, la estructura es propensa a agrietarse. La adición de áridos gruesos en morteros impresos en 3D es una de las estrategias para superar los desafíos descritos. La contradicción entre la acumulación masiva de CDW, así como el suministro insuficiente de recursos naturales es cada vez más prominente. Es por esto por lo que, el uso de áridos gruesos reciclados (RCA) en lugar de áridos gruesos naturales (NCA) es una excelente estrategia para resolver esta contradicción [29].

## **Retracción**

Rahul y los demás autores, examinaron el efecto del uso de áridos gruesos naturales y reciclados en el diseño de hormigón imprimible en 3D. Evaluaron el comportamiento reológico utilizando un reómetro de corte dinámico. Observaron que la adición de áridos gruesos disminuyó significativamente el límite elástico y la viscosidad plástica. Esto debido al aumento en el espesor de la película de agua y de la pasta con la adición de áridos más grandes [30].

Por lo tanto, los autores realizaron una reducción en la dosis de superplastificante. Todo esto para obtener mezclas de áridos gruesos con un límite elástico y una trabajabilidad similares a la mezcla de control. Las propiedades mecánicas se evaluaron utilizando muestras de vigas y cubos recortadas de los elementos de pared impresos. En la *Tabla 1* se muestran las propiedades físicas de los áridos usados [30].

*Tabla 1. Propiedades físicas de los áridos usados [30].*

Propiedades	Áridos finos	Árido grueso natural	Árido grueso reciclado
Tamaño de partícula máximo nominal (mm)	2	8	8
Absorción de agua (%)	0.0	0.1	4.4
Gravedad específica en SSD	2.7	2.6	2.4
Densidad aparente suelta en SSD (kg/m <sup>3</sup> )	1575.4	1636.5	1371.9
Módulo de finura	3.0	5.7	5.6
Valor agregado de trituración (%)	-	12.5	29.4

Evaluaron la retracción total y autógena la cual se realizaron utilizando muestras prismáticas moldeadas. Las mezclas de árido grueso presentaron menor retracción total y autógena. En particular, la adición de áridos reciclados saturados redujo significativamente la retracción autógena, posiblemente debido al curado interno [30].

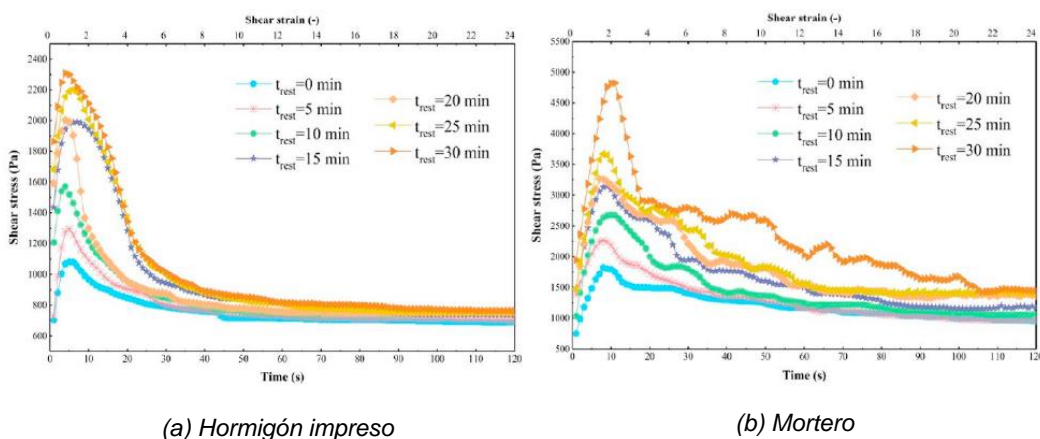
En cuanto a la evaluación del comportamiento de retracción utilizando muestras de moldes indica que la retracción libre total es menor para mezclas con áridos gruesos naturales y reciclados atribuido al efecto de restricción de los áridos gruesos. Se produjo una reducción significativa de la retracción autógena especialmente con la adición de áridos gruesos reciclados. Esto puede atribuirse al curado interno derivado de su mayor absorción de agua [30].

Por último, los autores revelaron que los áridos gruesos se pueden utilizar con éxito en formulaciones de hormigones imprimibles para lograr beneficios económicos y mejorar la resistencia al agrietamiento por retracción. Para niveles de reemplazo más bajos (30% vol.), el uso de áridos reciclados puede ser una buena alternativa al uso de áridos naturales sin causar una reducción significativa en las propiedades mecánicas [30].

### Propiedades reológicas

Wu y los demás autores, investigaron las propiedades reológicas del hormigón de árido reciclado (RAC) impreso en 3D. Evaluaron el comportamiento reológico cuando se somete a corte, la tendencia del crecimiento del límite elástico y el módulo de corte con tiempo de reposo. Y con base en los parámetros reológicos, evaluaron la capacidad de construcción de RAC con diferentes proporciones de reemplazo del 0%, 50% y 100% del árido natural. Se concluyó que el límite elástico del RAC aumentó exponencialmente con el tiempo de reposo, mientras que el módulo de corte aumentó linealmente con el tiempo de reposo [29].

Además, dentro de los primeros 15 minutos de impresión, el RAC tuvo una mejor trabajabilidad con una proporción de reemplazo creciente, sin embargo, el tiempo abierto se redujo, tal como se puede observar en la *Figura 5*. También, se evaluó la relación entre la fluidez y el límite elástico del material de impresión. En comparación con la relación lineal del mortero, se encontró que la relación entre la fluidez y el límite elástico es exponencial en RAC [29].



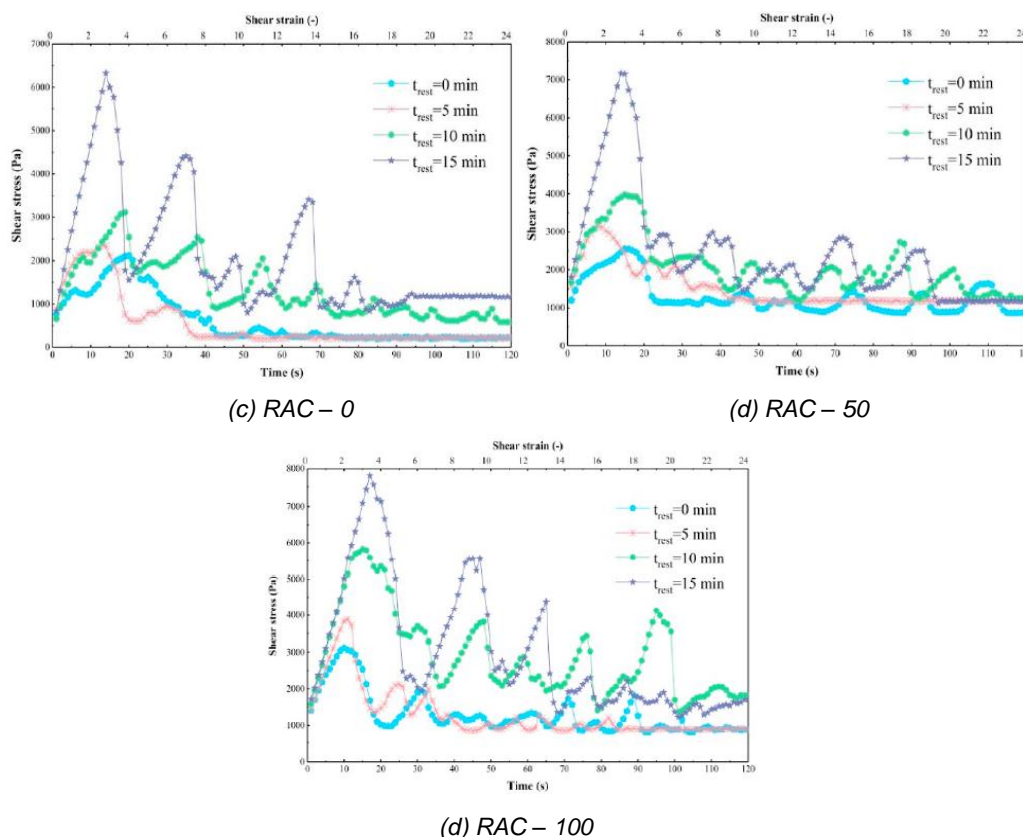


Figura 5. Resultados de las pruebas reológicas con una velocidad de corte constante de  $0.2 \text{ s}^{-1}$ . El eje horizontal superior es la tensión de corte y el eje horizontal inferior es la duración del corte [29].

### Unión entre capas

Otra investigación de Wu y los demás autores prepararon un hormigón impreso en 3D con RCA. Investigaron las propiedades de unión entre capas considerando diferentes proporciones de reemplazo de RCA, intervalos de tiempo entre capas y alturas de capa. Los resultados mostraron que RCA y el intervalo de tiempo de impresión degradaron la fuerza de unión entre capas. No se encontró una correlación clara con la altura de la capa [31].

La incorporación de RCA cambió significativamente el sistema de unión entre capas y el patrón de agrietamiento. La fuerza de unión entre capas del hormigón de árido grueso reciclado impreso en 3D fue sustancialmente mayor que la del mortero impreso en 3D. La incorporación de RCA aumentó sustancialmente la rugosidad de la superficie del filamento de impreso en 3D. Los poros de gran volumen se introdujeron más fácilmente en el área de interfaz entre capas durante la deposición, tal como se muestra en la *Figura 6* [31].



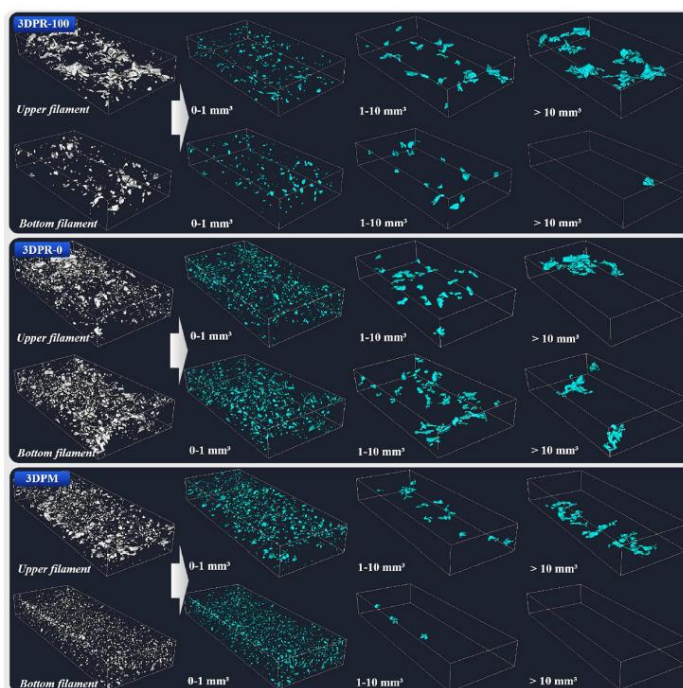


Figura 6. Distribución 3D de poros en el área de interfaz entre capas a los 0 min y 60 min.[31].

El aumento en el intervalo de tiempo de impresión de la capa intermedia degradó significativamente la fuerza de unión de la capa intermedia del 3DPRAC tal como se muestra en la *Figura 7*. No se mostró una correlación clara del efecto con la variación de la altura de la capa. Por otro lado, la fuerza de unión entre capas de 3DPRAC disminuyó con el aumento de la proporción de reemplazo de RCA. Esto debido a las débiles propiedades mecánicas del mortero viejo y las ITZ [31].

Con una tasa de reemplazo del 100 %, la fuerza de unión entre capas se mantuvo sustancialmente mayor que la del mortero impreso en 3D. Esto se debe principalmente a que el RCA a través de las capas incrustadas en la interfaz de capa intermedia amplía el área de enlace y fuerza la ruta de transferencia en la interfaz de capa intermedia de 3DPRAC. Lo que mejora el rendimiento de enlace de capa intermedia de 3DPRAC en general [31].

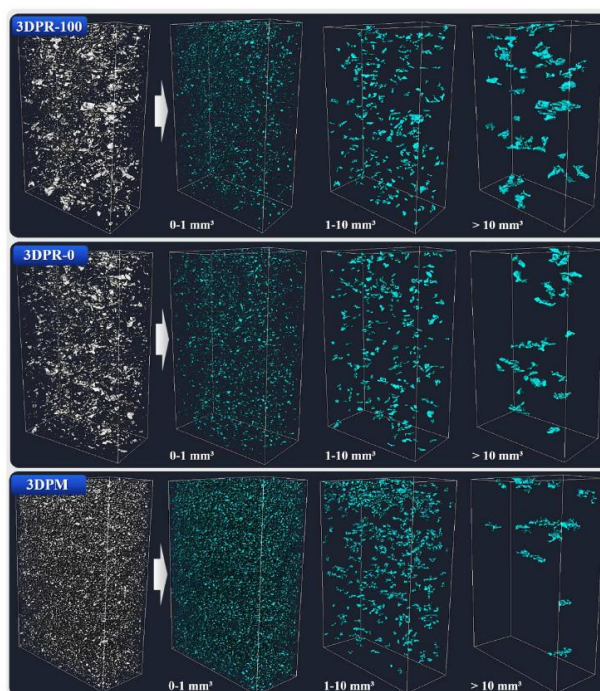


Figura 7. Distribución de poros con la altura de la capa en el espacio 3D [31].

Bai y los demás autores, utilizaron una impresión 3D de hormigón ecológico que contiene sólidos infrautilizados y de desecho como áridos. La incorporación de sólidos infrautilizados y/o sólidos de desecho como áridos es una forma de obtener los máximos beneficios ambientales y económicos de la tecnología emergente de impresión del hormigón en 3D [32].

Se utilizó arena del desierto, arena de sedimentos de río y hormigón reciclado para su uso como áridos en 3DPC. Los autores diseñaron tres mezclas con gradaciones continuas, abiertas e interrumpidas de sólidos. Los resultados de la prueba mostraron que el efecto esquelético de autosoporte formado por las partículas graduadas reduce la fluidez de las mezclas, pero se mejoró el rendimiento de acumulación estructural/capacidad de construcción. La distribución de capas intermedias y el esqueleto del árido graduado contribuyeron a mejorar el efecto de entrelazado interfacial y la unión por contacto entre capas, lo cual se valida a través de una CT. Por otro lado, la adición de áridos reduce la proporción de compuestos cementosos y, por lo tanto, mitiga de manera efectiva la contracción de la matriz del cemento [32].

## Propiedades mecánicas

Liu y los demás autores obtuvieron un nuevo material de impresión 3D basado en extrusión mediante la preparación de 3DPRAC utilizando RCA. Se investigó las propiedades de compresión y flexión en diferentes proporciones de reemplazo de RCA, edades y formas de construcción. La porosidad, la distribución del volumen de los poros y las características de la geometría de los poros se analizaron mediante rayos X – CT. Los resultados mostraron que las resistencias a la compresión y a la flexión tienen características anisotrópicas evidentes [33].

Con el aumento de la relación de reemplazo, las resistencias a la compresión y a la flexión generalmente disminuyeron. La preparación de 3DPRAC mediante la incorporación de RCA con materiales respecto con el medio ambiente puede reducir el consumo de hormigón y arena natural en comparación con el mortero impreso en 3D. Esto no solo reduce el coste de la materia prima, sino que también puede reducir la carga sobre el medio ambiente. Resulta útil para realizar el desarrollo sostenible de la construcción de edificios digitales [33].

La *Figura 8* muestra los resultados de resistencia a la compresión para diferentes edades, proporciones de reemplazo y direcciones de carga. Se puede observar que en el día 1 las resistencias son similares, independientemente del % de árido reciclado. Para el día 7, las resistencias comienzan a diferir siendo la dosificación con NAC el de mayor resistencia a la compresión. Para el día 21, se observa que la mayor resistencia a la compresión es la dosificación con NAC, seguida de RAC – 50 y por último de RAC – 100. La variación de la dosificación con NAC y RAC – 100 es del 18% respecto a la resistencia a la compresión.

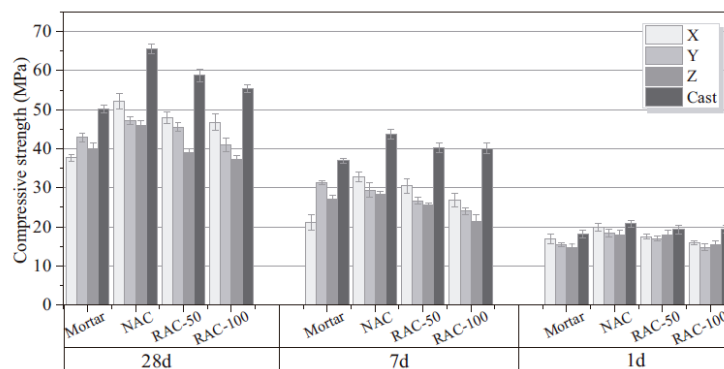
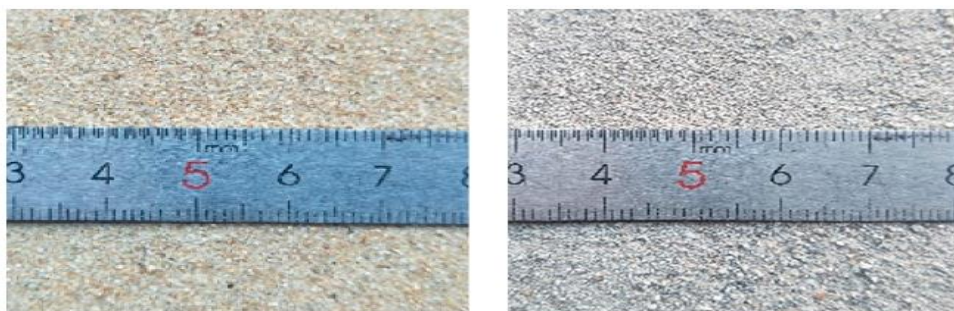


Figura 8. Resultados de las pruebas de resistencia a la compresión para diferentes edades, relaciones de reemplazo y direcciones de carga [33].

## **Arena reciclada**

Zou y los demás autores, proponen la imprimibilidad del mortero de impresión 3D con arena 100% reciclada. Se evaluó su fluidez, extrudabilidad, trabajabilidad y resistencia. Se comparó con mortero de impresión 3D con arena natural, tal como se muestra en la *Figura 9*. Se agregó gluconato de sodio al mortero de impresión con arena 100% reciclada. El resultado muestra que este mortero no solo puede cumplir con los requisitos de imprimibilidad de impresión 3D sino que también tiene una trabajabilidad más prolongada y una mayor resistencia que el mortero con arena 100% natural [34].

Reemplazar la arena natural con solo arena 100% reciclada (sin gluconato de sodio) no solo disminuye la fluidez inicial del mortero de impresión, sino que también aumenta su tasa de pérdida de fluidez. Esto acorta su trabajabilidad, lo cual no es propicio para la impresión práctica del mortero reciclado [34].



*Arena de río*

*Arena reciclada*

*Figura 9. Arena de río y arena reciclada [34].*

## **2.3. DISEÑO DE MEZCLAS**

### **2.3.1. Generalidades**

Según Mohan y otros, para evaluar el efecto de estas estrategias de mejora, se requiere un riguroso estudio de impacto ambiental y económico de las mezclas. Aunque la evaluación de la sostenibilidad de las mezclas de hormigón colado en molde convencional se ha estudiado ampliamente, tales estudios no son muchos en el caso de las mezclas de hormigón imprimibles en 3D [35].

Una de las principales razones de esto es la necesidad de un mayor conocimiento al hacer una elección adecuada de los requisitos funcionales para 3DCP; lo cual es esencial para la evaluación comparativa de diferentes mezclas de hormigón. En el hormigón moldeado, los requisitos funcionales se pueden elegir en función de la

trabajabilidad (por ejemplo, el valor de asentamiento), la resistencia a la compresión y los índices de durabilidad. Sin embargo, en el caso de 3DPC, se deben considerar requisitos adicionales para cumplir con las demandas de imprimibilidad [35].

La producción exitosa de las estructuras impresas depende de la idoneidad de las propiedades del hormigón en estado fresco. Es fundamental establecer el diseño de la mezcla, los aditivos químicos, el volumen y tamaño de los áridos. Un diseño de mezcla inadecuado puede resultar en un hormigón incapaz de soportar el peso de las siguientes capas (baja edificabilidad), o un endurecimiento prematuro, lo que resulta en uniones débiles entre las capas (juntas frías). Además, el uso exclusivo de áridos finos permite imprimir geometrías de formas complejas con mejores acabados, pero aumenta sustancialmente el coste del hormigón y la huella de carbono, mientras que los áridos gruesos son más adecuados para imprimir geometrías sencillas, como muros [9].

### 2.3.2. Diseño de mezclas imprimibles

Por lo general, las mezclas para impresión 3D están diseñadas con un mayor contenido de aglutinante y árido fino que las mezclas de hormigón convencionales y SCC para aumentar su límite elástico y su capacidad de retención de forma. El diseño de una mezcla de hormigón imprimible es un proceso iterativo. La compatibilidad de una mezcla de hormigón con las necesidades del proceso de impresión (bombeo, extrusión, retención de forma, tiempo abierto, trabajabilidad) se verifica en pasos secuenciales, como se muestra en la *Figura 10*. Si se encuentra una mezcla de hormigón compatible con el requisito anterior, luego se prueba para el siguiente requisito. De lo contrario, se cambia el diseño de la mezcla variando los ingredientes y, nuevamente, se observa su desempeño. Este proceso continúa hasta que la mezcla de hormigón cumple con todos los requisitos de la operación de impresión [36].

Las mezclas de hormigón imprimibles suelen tener un límite elástico dinámico bajo para ayudar en las fases de bombeo y extrusión, pero tienen un alto comportamiento tixotrópico después de la extrusión para aumentar el límite elástico estático, lo que permite que el hormigón soporte el peso propio y el peso de las capas impresas posteriores [37]–[39].

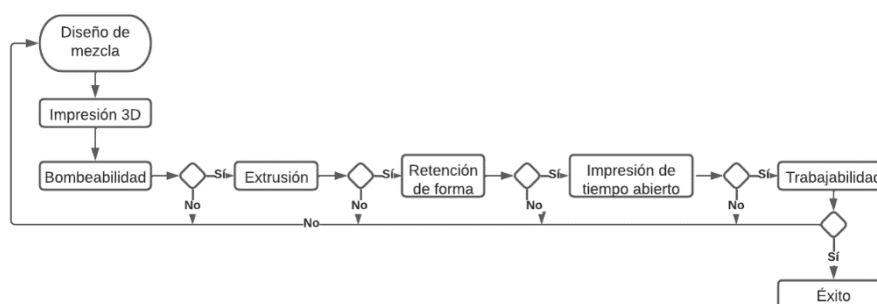


Figura 10. Proceso iterativo de preparación de una mezcla de hormigón imprimible [36].

### 2.3.3. Influencia de la composición del hormigón en la reología

Las proporciones imprimibles de la mezcla están destinadas a ser rígidas y mostrar una mayor resistencia para soportar el peso de las capas sucesivas sin colapso plástico. Para ello, se utiliza una relación agua-aglomerante más baja y una relación aglomerante-arena más alta. La reología para el hormigón se ajusta aún más para la imprimibilidad y la capacidad de construcción vertical mediante el uso de una alta dosis de aditivos químicos, como aditivos modificadores de la viscosidad, superplastificantes, aceleradores y nanomateriales [40], [41].

La mayoría de los diseños de mezcla para impresión 3D limitan el tamaño del árido para evitar el bloqueo durante las etapas de bombeo y extrusión. Esto es debido a que la bomba de tornillo excéntrico generalmente se adopta como extrusora en 3DCP, y sus componentes, rotor y estator solo pueden admitir tamaños de grano limitados. Así, generalmente el tamaño del árido en la mayoría de las mezclas es inferior a 2mm. [36].

Algunos estudios han utilizado tipos especiales de hormigón, como hormigón celular, hormigón imprimible bajo el agua, hormigón de geopolímero, hormigón de fosfato, de magnesio y potasio y materiales a base de tierra. La relación agua-aglutinante frecuente informada se encuentra dentro del rango de 0.30 a 0.40, mientras que la relación arena-aglutinante frecuente se encuentra dentro del rango de 1.2 a 2.0. Los investigadores también han desarrollado mezclas imprimibles con una alta dosis de fibras para reforzar el hormigón [36].

Por otro lado, otras investigaciones orientadas a la optimización de dosificaciones han utilizado la incorporación de fibras. No obstante, el uso de fibras reduce la trabajabilidad del hormigón, lo que reduce la fluidez del hormigón y dificulta las etapas de bombeo y extrusión [36].

## **Definición**

Se debe tener en cuenta la definición de reología, que es parte de la física que estudia la viscosidad, la plasticidad, la elasticidad y el derrame de la materia en estudio. La reología analiza el flujo de materiales, incluidos los estudios de deformación del hormigón endurecido, el manejo y colocación del hormigón recién mezclado y el comportamiento de lechadas, pastas y similares [42]. Es por ello que se desprende del estudio de la reología que ésta tendrá una influencia relevante durante la impresión.

Asimismo, se debe tener en cuenta siempre la velocidad de endurecimiento y la adherencia entre capa y capa de la extrusión, de modo que éstas sean capaces de resistir el peso de las capas posteriores a imprimir. Si bien esto se consigue disminuyendo la fluidez del hormigón, a la vez genera la desventaja de ser demasiado seco o rígido para ser impreso [9].

Si bien es cierto, las mezclas deben presentar baja fluidez para que puedan ser imprimibles, por lo que se debe tener claro las siguientes propiedades reológicas: tensión de fluencia, tixotropía y viscosidad plástica [42].

Respecto a los hormigones imprimibles, éstos deben tener la mayor consistencia posible y ser bombeables a la misma vez, se debe medir estos aspectos: consistencia y trabajabilidad mediante alguna prueba que verifique estos dos factores. La prueba de asentamiento es el método más común. Además, la deformación debe ser casi nula en las capas del hormigón impreso para asegurar la trabajabilidad y la fluidez de los hormigones [9]. Según Tay, Qian y Tan, la trabajabilidad de los morteros mediante ensayos de asentamiento y flujo de asentamiento para definir la región imprimible están entre 4 a 8mm. y 150 a 190mm. respectivamente, dando una superficie lisa y una alta trabajabilidad [43].

Así pues, Reales y otros, mostraron que las nanopartículas, como las nanoarcillas y la nanosílice, se pueden usar para aumentar los parámetros asociados con la acumulación estructural de morteros impresos en 3D, como el límite elástico estático y la tasa de acumulación tixotrópica [44].

## **Tensión de fluencia, tixotropía y límite elástico**

Resulta importante resaltar la diferencia entre el límite elástico estático y el límite elástico dinámico. El límite elástico estático se puede describir como la fuerza necesaria

para iniciar el flujo y el límite elástico dinámico se representa como la fuerza requerida para mantener el flujo [45]. A pesar de que ambos límites elásticos son importantes para la impresión, el límite estático conlleva mayor importancia debido a que define la estabilidad, la forma y el tamaño de la extrusión, además que después de la impresión la capa debe soportar las siguientes [9].

Por tanto, el rango óptimo de una mezcla para que sea imprimible y tenga un correcto flujo es el límite elástico. Por debajo de este límite, la muestra podría sufrir deformación plástica y por encima del límite elástico, la muestra podría fluir como un líquido [46].

En cuanto a la impresión, para controlar la acumulación de tensión con el tiempo mientras se aplica una deformación en constante aumento (velocidad de cizallamiento constante) es posible realizarla con la prueba de crecimiento por cizallamiento, que es uno de los métodos más rápidos y sencillos para analizar la acumulación estructural mediante mediciones de la tensión de fluencia estática [47].

La tixotropía es el incremento reversible de la viscosidad, cuando el material está en estado de reposo, es decir, cuando la viscosidad disminuye al aumentar la presión a la cual se somete [9]. Según Wangler y otros, una pared impresa hecha de filamentos impresos apilados de 80 a 150cm. de alto y 1 a 3cm. de espesor requiere un aumento en el límite elástico entre 25 y 150 veces. Además, los autores describieron la velocidad horizontal máxima ( $V$ ) según la tasa de acumulación, expresada por:

$$V < \sqrt{3} \frac{LA_{thix}}{\rho gh}$$

Donde  $L$  es la longitud del filamento [48], tal como se muestra en la *Figura 11*.

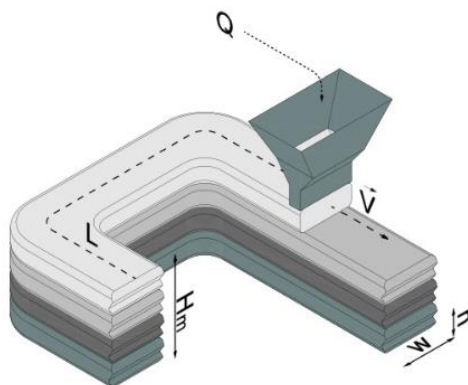


Figura 11. Esquema de un proceso de extrusión por capas con hormigón [27].

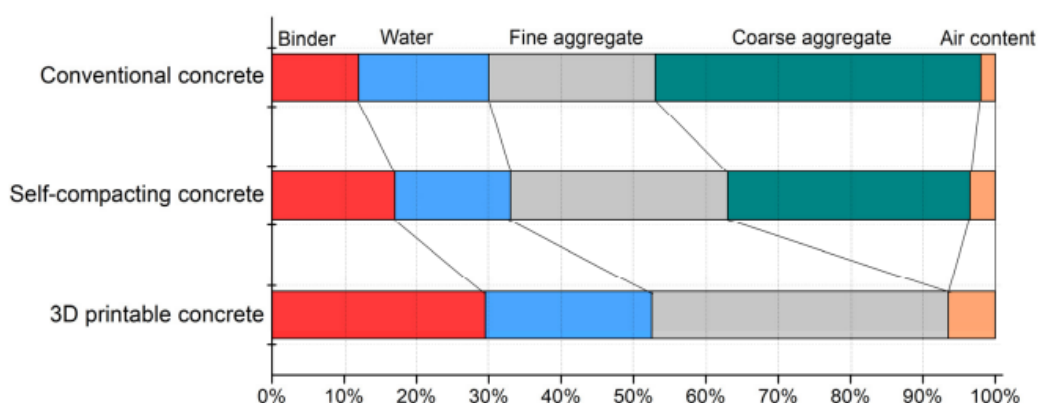


En la *Figura 11* se muestra un cabezal de extrusión controlado digitalmente que se mueve a una velocidad  $V$ , creando capas de altura  $h$  y ancho  $w$  individuales. La altura total,  $H_m$ , depende de la velocidad y la longitud del contorno,  $L$  [48].

El límite elástico es el parámetro reológico que mejor representa la edificabilidad dado que el proceso de hidratación del cemento es progresivo y continuo, por lo que hay un periodo limitado entre el comienzo de hidratación y la mezcla se vuelve demasiado rígida para ser extruida, definiéndose como el tiempo abierto para la impresión 3D de hormigón. Si se producen largas pausas en el periodo de impresión, el intervalo de tiempo excesivo entre las capas impresas puede provocar la formación de juntas frías con enlaces entre capas más débiles [42].

### **Composición del hormigón**

Una de sus principales deficiencias en el 3DPC es el mayor contenido de aglutinante que se utiliza actualmente en las mezclas imprimibles, tal como se muestra en *Figura 12*. Las estrategias para reducir el impacto medioambiental y económico de las mezclas de hormigón imprimibles en 3D incluyen reducir el contenido de aglutinante aumentando el contenido de áridos, utilizando sistemas de aglutinantes más ecológicos, cambiando la gradación de los áridos incorporando áridos gruesos naturales y áridos de hormigón reciclado, etc [36].



*Figura 12. Comparación de constituyentes (por volumen) utilizados en hormigón convencional, hormigón autocompactante y mezclas de hormigón imprimibles en 3D [36].*

## 2.4. AHORRO DE COSTES Y SOSTENIBILIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN: IMPRESIÓN 3D

### 2.4.1. Generalidades

El tratamiento de la sustentabilidad en términos de los tres pilares de impactos económicos, ambientales y sociales se ha aceptado universalmente, con procedimientos para cuantificar los impactos. Las más factibles de cuantificar son las consecuencias económicas, especialmente en el contexto de la construcción, y las más complicadas son las implicaciones sociales [27].

El uso de la impresión 3D en la construcción, además de tener la ventaja de imprimir formas complejas de forma libre, hace que los procesos constructivos sean más limpios y ordenados, con menos desperdicio de materiales, clasificándose como sostenible con el medio ambiente. Además de haber reducción de desperdicios, implica una gran reducción de costos, básicamente por la eliminación de encofrados, disminución de mano de obra y tiempo de construcción [42].

Si bien es cierto que, existen incentivos a través de programas gubernamentales de viviendas para personas de bajos ingresos en diversos países, estas iniciativas no son suficientes para superar el creciente déficit habitacional. Por lo tanto, la posibilidad de construir estructuras de forma compleja y de bajo costo, como casas populares, será el detonante de una amplia difusión de la tecnología de impresión 3D en edificios comerciales [9].

Por ejemplo, la industria de la construcción de rápido crecimiento en países como Arabia Saudita, está empujando al gobierno hacia la adopción de métodos de construcción avanzados que puedan cumplir con la nueva agenda de desarrollo. Se espera, por tanto, que la creciente demanda aumente sustancialmente el consumo de energía con las consiguientes implicaciones ambientales [49]. Esto hace que sea aún más imperativo estudiar el impacto ambiental de la industria de la construcción [1].

### 2.4.2. Ciclo de vida del hormigón para impresión 3D

El ciclo de vida del hormigón/material utilizado para la 3DPC se muestra esquemáticamente en la *Figura 13*. Los procesos de los que consta este ciclo de vida son: extracción de materias primas utilizadas en la producción de hormigón y áridos, el

transporte de hormigón y otros materiales, la producción de electricidad, el bombeo de hormigón, impresión, construcción, mantenimiento y demolición o desmantelamiento al final de su vida útil [27].

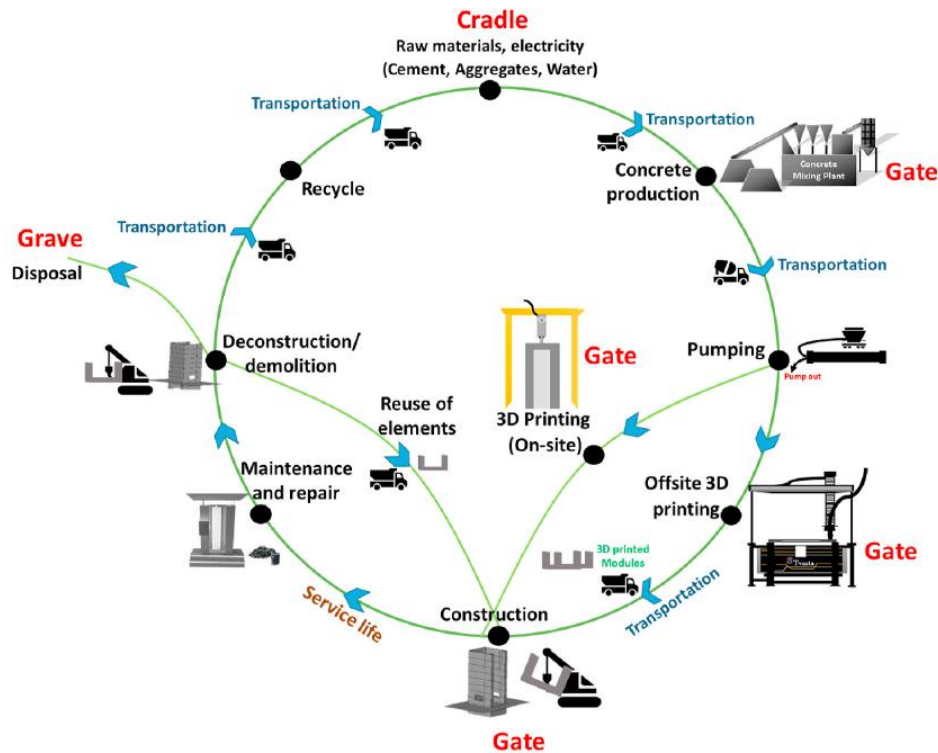


Figura 13. Boceto esquemático del ciclo de vida de una estructura impresa en 3D [27].

Los diferentes sistemas que se podrían considerar se pueden clasificar en cradle-to-gate (ground-to-gate), gate-to-gate, cradle-to-grave y cradle-to-cradle, y se eligen los límites del sistema para responder al alcance y propósito de la evaluación. Con referencia a la Figura 13, se pueden contemplar varios límites de sistemas en el contexto de la evaluación de la sostenibilidad de la tecnología de impresión 3D. El sistema ideal, aunque inédito en la construcción, sería el de la cradle-to-cradle, ya que se iniciaría un nuevo ciclo, como es la separación de todo el hormigón de la estructura demolida en áridos que pueden sustituir a los áridos naturales, y pasta de cemento hidratada que se puede utilizar en la fabricación de cemento [27].

Con respecto a la tecnología de la impresión 3D, la Figura 13 da cabida a diferentes alternativas posibles. Un ejemplo es que el hormigón podría fabricarse en el mismo lugar donde se realiza la impresión 3D o podría adquirirse premezclado, lo que implica una entrada (gate) en el ciclo. Otro ejemplo podría ser la adquisición de módulos impresos en

3D de una fábrica de prefabricación; es decir, una entrada (gate) con el ensamblaje de la estructura en el sitio en lugar de imprimirla en 3D en el sitio [27].

Cuando la evaluación de la sostenibilidad se realiza solo para comparar diferentes mezclas de hormigón imprimibles, deben tener un rendimiento similar. Se deben definir en términos de los requisitos funcionales del proceso de impresión. Pueden clasificarse como requisitos de estado fresco (extrusión, edificabilidad), requisitos de estado endurecido (resistencia de unión entre capas, resistencia a la flexión, resistencia a la compresión, etc.) y requisitos de rendimiento a largo plazo (resistencia a la entrada de cloruro, carbonatación y entrada de agua). La unión entre las capas impresas también desempeña un papel fundamental en el rendimiento de la estructura tanto a corto como a largo plazo [27].

### 2.4.3. Sostenibilidad y LCA en 3DPC

El sector de la construcción de edificios y sus operaciones representaron el 40% de las emisiones de CO<sub>2</sub> y el 36% del uso global de energía en 2018 [1]. Además, se estima que la industria de la construcción contribuirá con el 10% de las emisiones antropogénicas totales de CO<sub>2</sub> y el 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero para 2030 [50]. Un aspecto importante que permanece insuficientemente explorado hasta la fecha son los impactos ambientales y el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de las tecnologías 3DP en la construcción [51]. Por lo tanto, existe la necesidad de investigar el impacto ambiental del diseño, los materiales, la tecnología, las normas y los códigos de construcción impresos en 3D [52].

La producción de hormigón representa alrededor del 5% de las emisiones de CO<sub>2</sub> provocadas por el hombre en todo el mundo, sin embargo, el hormigón tiene una huella de carbono baja a comparación de otros materiales [9]. Actualmente, la principal práctica de las impresoras 3D en edificios a gran escala es en la construcción de muros verticales, por lo que se hace las comparaciones entre las emisiones gaseosas de la producción del hormigón (3DPC) con ladrillos cerámicos (convencional). La producción del cemento Portland libera alrededor de 0.819 kg CO<sub>2</sub> equivalente (kg CO<sub>2</sub>/Kg producto), mientras que los hormigones típicos son responsables de 0.137 kg CO<sub>2</sub> eq., siendo la mitad de lo que genera la producción de ladrillos ordinarios con 0.271 kg CO<sub>2</sub> eq. Por lo que el uso de áridos gruesos en 3DPC da como resultado una reducción sustancial en la huella de carbono [53].

Hasta la fecha, se ha realizado un número limitado de estudios para evaluar las implicancias ambientales de aplicar métodos de fabricación digital y 3DPC en la construcción [52]. Además, los investigadores generalmente se han centrado en el impacto ambiental a pequeña escala [1]. El caso de Kreiger y Pearce, quienes estudiaron los beneficios ambientales de distribuir la impresión convencional y 3D de productos poliméricos [54]. Otro estudio realizado fue el de Faludi y otros, quienes compararon los impactos ambientales de dos tipos de máquinas de fabricación aditiva frente al CNC y demostraron que hay una reducción en el uso de energía y el desperdicio en las máquinas de fabricación aditiva en comparación con el CNC [55].

Desde el punto de vista ambiental, el sistema de 3DPC demanda más energía que el sistema convencional, pero a la vez reduce el desperdicio de materiales, por lo que la sostenibilidad ambiental variará significativamente de un lugar a otro, según las fuentes de generación de electricidad. Así pues, en países donde la generación de electricidad se basa en la quema de combustibles fósiles, el impacto ambiental será mayor [9].

Además, Yao y otros, compararon la tecnología de geopolímeros de impresión 3D y el uso de hormigón ordinario en cuatro escenarios utilizando un método de evaluación del ciclo de vida (LCA). El estudio reveló que las tecnologías de impresión 3D tienen un mejor desempeño ambiental y posiblemente conducen a una reducción de los desechos al crear componentes de construcción complejos. Sin embargo, el hormigón ordinario se desempeñó ambientalmente mejor que el geopolímero impreso en 3D cuando se trataba de construir paredes simples [56].

Agustí – Juan y Habert, estudiaron la evaluación del ciclo de vida de arquitecturas fabricadas digitalmente y construcciones convencionales, y concluyeron que, un hormigón fibrorreforzado autocompactante emite más del triple de CO<sub>2</sub> equivalente respecto al hormigón tradicional basado en CEM I 42.5. Por otro lado, demostraron que es posible reducir la huella de carbono de los hormigones de alto rendimiento con diseño computacional mediante la creación de estructuras de alto rendimiento notando un gran ahorro de material utilizando una estructura de hormigón ultrafino sin barras de refuerzo en un piso en forma funicular, lo cual redujo el impacto ambiental [57].

En cuanto a la investigación de Ji y otros, en la cual usó una impresora para construir una subestación de distribución de energía, los residuos generados se redujeron

en un 60%, además se notó una reducción en la contaminación por polvo, lo cual aseguró un sitio de construcción más limpio y ordenado [58].

Según Alhumayani y otros, el impacto ambiental del hormigón convencional se debe principalmente a sus barras de acero de refuerzo. Cambiar la cantidad de refuerzo de acero y hormigón (pero manteniendo los estándares requeridos para un edificio de un piso) reduciría el impacto ambiental del hormigón convencional. El impacto ambiental del sistema 3DPC depende principalmente de la proporción de los componentes de la mezcla, por lo tanto, en el futuro, las mezclas modificadas pueden reducir aún más el impacto ambiental del 3DPC. [1].

Asimismo, Long y otros, demostraron que los cementos de arcilla calcinada con piedra caliza, producidos con arcilla calcinada, polvo de piedra caliza y humo de sílice, pueden contribuir a reducir el contenido de cemento Portland y conducir al desarrollo de materiales imprimibles más sostenibles [59]. Además, Sikora y otros, evaluaron los efectos de la nanosílice en las propiedades frescas y endurecidas de morteros imprimibles en 3D concluyendo que aumentan los parámetros asociados con la acumulación estructural de morteros impresos [60].

Por otro lado, investigadores muestran que los residuos de construcción y demolición (CDW) se pueden utilizar como áridos y rellenos para producir hormigones más sostenibles para la impresión 3D [32]. Según Zou y otros, el uso de arena 100% reciclada puede reducir la ventana de imprimibilidad, lo cual es un factor desfavorable para la impresión 3D. Sin embargo, este problema se puede resolver agregando gluconato de sodio al mortero reciclado, lo que puede aumentar tanto la ventana de imprimibilidad como la resistencia a la compresión a edades tempranas [34].

Zhang y Vieira estudiaron el LCA del hormigón con áridos reciclados. Según ambos autores, la distancia de transporte desde la planta de procesamiento de residuos y la unidad funcional son parámetros importantes que pueden afectar los resultados del LCA al comparar áridos naturales y reciclados [61], [62]. El LCA de hormigones activados con álcalis fue evaluado por Robayo-Salazar y otros, que demostraron que la producción y el transporte de activadores alcalinos son la principal fuente de emisión de CO<sub>2</sub> de estos materiales. El uso de activadores más sostenibles, derivados de métodos menos intensivos en energía, sería una alternativa para reducir sus impactos ambientales [63].

La comunidad científica intenta continuamente evitar el hormigón ordinario y modificarlo con materiales más sostenibles, como escoria de alto horno, cenizas volantes, lodos de mármol, hormigón reciclado y RCD. Como se comentó en el párrafo anterior, Mohan y otros, concluye que, la mayoría de los áridos reciclados han identificado la distancia de transporte como una variable significativa a los impactos ambientales, por lo que se prefiere ambientalmente la producción in situ o en las cercanías de áridos reciclados [64].

Tinoco y otros, realizaron un estudio sobre el LCA para el sistema 3DPC concluyendo que los impactos ambientales del hormigón en la impresión 3D se concentran en el cemento (debido a la gran cantidad de cemento en las mezclas de hormigón) y el acero de refuerzo. También concluyeron que los materiales basados en la tierra, como la mazorca, surgen como alternativas prometedoras para reducir los impactos ambientales de las construcciones impresas en 3D, ya que no utilizan cantidades sustanciales de aglutinantes químicos pero que se debería evaluar mejor la viabilidad de estos materiales para aplicaciones a gran escala. Precisaron que hace falta líneas de investigación sobre la degradación de los materiales impresos en 3D y la durabilidad de las estructuras con el fin de predecir la vida útil y el fin de vida de las estructuras impresas [65].

Dicho todo esto, existen pocos estudios que evalúen el impacto ambiental de 3DPC a lo largo de su ciclo de vida. Por lo tanto, una revisión sobre este tema es importante para establecer una línea de base ambiental de 3DPC comparándolo con la construcción convencional [65].

#### **2.4.4. Ahorro de costes y tiempo en 3DPC**

La fabricación de estructuras y elementos de 3DPC está especialmente relacionado con la mano de obra. Si bien el desarrollo de esta tecnología conlleva una reducción de la mano de obra, también implica la incorporación de trabajadores con un mayor nivel de especialización, mejorando así las condiciones laborales de los trabajadores [9].

Según Schutter y otros, si bien es cierto hay ahorro de costes en materiales como en los encofrados, materiales tales como nano arcilla, nano sílice u otros aditivos químicos especiales pueden aumentar el precio del hormigón debido a su precio [66]. Además, no existe una comprensión general de como calcular el costo total de las construcciones

impresas en 3D, ya que no hay una lista estructurada de cantidades ni una base de precios para la impresión 3D del hormigón, lo que podría resultar en una gran variación en el cálculo del costo real [67].

Según Mechtcherine y otros, afirmaron que los encofrados corresponden alrededor del 25% al 35% del costo total de las obras estructurales incluyendo para configuraciones geométricas simples, por lo que el 3DPC puede proporcionar un gran ahorro de costos [68]. Dicho porcentaje es coherente con Schmitt, que concluyó a los encofrados como responsables del 28% de los costos, los cuales pueden ser mayores dependiendo de la complejidad debido a los costos de mano de obra y tiempo demandado [9].

Como ejemplo en ahorro de costes se tiene una comparación de costos y productividad de la tecnología Contour Crafting (CC) frente al método de hormigonado tradicional. Dicho estudio consistió en una construcción hipotética de un muro de cimentación de 20m. de ancho, 30cm. de espesor y 4m. de altura. Cabe resaltar que se consideraron los costos de mano de obra, equipos, gastos generales (excepto accidentes, capacitación en seguridad y carga laboral) y promedio de ganancias. A través del estudio se determinó que el costo total de producción del sistema CC es similar al del sistema convencional (US\$ 40/m<sup>3</sup> y US\$ 39/m<sup>3</sup>, respectivamente). Sin embargo, el sistema CC mostró un rendimiento diario superior de 27% respecto al del sistema convencional (98 y 77 m<sup>3</sup>/día respectivamente). Por último, si se comparan los costos de ambos sistemas para la misma producción diaria, el sistema CC resulta más económico dado que el menor tiempo de construcción también repercute en una disminución de gastos [9].

Según Ji y otros, usó una impresora de desarrollo propio para construir una subestación de distribución de energía. Los autores informaron de una reducción en el tiempo de ejecución del 30% en comparación con los métodos de construcción tradicionales, dado que mediante el sistema convencional se tuvo una duración de 54 días mientras que el tiempo de construcción con la impresión 3D fue inferior a 35 días [58]. De todas maneras, el análisis comparativo definitivo de esta tecnología con los sistemas de construcción convencionales no es eficiente debido a las pocas construcciones impresas a gran escala [9].



Yingchuang Building Technique, ubicado en Shanghai – China, es una de las constructoras pioneras en arquitecturas de impresión 3D. Según la compañía, esta tecnología reduce el consumo total de energía y el volumen de desechos. En este aspecto, estiman que la impresión 3D podría reducir hasta un 60 % de los materiales de construcción, entre un 50 % a un 70 % del tiempo de construcción y entre un 50 % a un 80 % de los costos de mano de obra. Además, para la construcción de su conocido edificio de cinco plantas impreso en 3D en China, se utilizaron residuos de construcción en la formulación del hormigón, tal como se muestra en la *Figura 14* [67], [69]. Por otro lado, el uso de la tecnología 3DPC debe ser el 25% de todas las construcciones en Dubái en 2030 [70].



*Figura 14. Edificio de impresión 3D más alto del mundo [71].*

De la *Figura 14*, se observa el edificio de impresión 3D más alto del mundo con 5 plantas en tierra y 5 plantas debajo de tierra, lo que demuestra que la tecnología 3D puede imprimir varias plantas. El edificio está adoptado de una estructura de marco y se imprimió estrictamente de acuerdo con el estándar de mampostería reforzada [71].

Por otro lado, en la actualidad, los gerentes de las empresas constructoras no cuentan con herramientas de decisión adecuadas para evaluar la competitividad en costos de 3DPC frente a otras alternativas tecnológicas. Se necesita trabajo futuro para crear modelos técnico-económicos integrales que tengan en cuenta no solo los costos asociados con la producción de 3DPC, sino también aspectos relacionados con la calidad, la mano de obra y el mantenimiento [72].

# CAPÍTULO III. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

## 3.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo III se aborda la campaña experimental de la investigación que consta de cuatro etapas secuenciales: hormigón gris, hormigón blanco, hormigón blanco con fibras metálicas y hormigón blanco con árido reciclado. En cada etapa se describen los materiales usados, las dosificaciones realizadas, el proceso de fabricación y curado de probetas, los equipos de ensayos utilizados y la descripción de los ensayos realizados. En la etapa de hormigón blanco se realizó una optimización en impresión 3D con el fin de optar con el aditivo óptimo para las siguientes fases. Los ensayos realizados para todas las etapas fueron los ensayos a flexión y a compresión, salvo en la etapa del hormigón blanco con fibras metálicas en la cual se realizaron ensayos a la flexión por tracción (flexo – tracción) con el fin de obtener el comportamiento de las fibras metálicas en las muestras y las resistencias residuales según el CMOD.

### 3.2. PLANTEAMIENTO

De entre todas las posibles adiciones a la matriz del hormigón, y con el objetivo de desarrollar un hormigón que sea imprimible, se planteó la utilización de materiales, tales que, por sus propiedades pueda otorgar propiedades de fluidez y trabajabilidad en un escenario real, de cara a una posible fabricación industrial para impresión 3D.

Por tal motivo, se realiza la campaña experimental con el uso de materiales que puedan tener un desempeño y criterio de aceptación óptimo. En la presente investigación se trabajó añadiendo solo fibras metálicas y, por otra parte, añadiendo solo áridos reciclados, tomando en cuenta experiencias de investigaciones previas con este tipo de materiales.

Para la evaluación de los hormigones realizados para impresión 3D se han propuesto tres principales tipos de hormigón: el primero, un UHPC; el segundo, un UHPC con fibras metálicas; y el tercero, un UHPC con áridos reciclados.

La *Figura 15* muestra un esquema de cada una de las mezclas propuestas, incluidos los UHPC, UHPC con fibras metálicas y UHPC con áridos reciclados.

Para cada una de las mezclas anteriores, se fabricaron 12 probetas prismáticas de dimensiones 160 x 40 x 40 mm. 3 probetas fueron ensayadas en el día 1, 3 probetas en el día 7, 3 probetas en el día 14 y 3 probetas en el día 28. Para el UHPC y el UHPC con áridos reciclados, cada probeta se ensayó a flexión simple. De cada probeta ya ensayada a flexión se obtuvieron 2 probetas que se ensayaron a compresión simple. Para el UHPC con fibras metálicas, cada probeta se ensayó a flexo – tracción, obteniendo 2 probetas que se ensayaron a compresión simple.

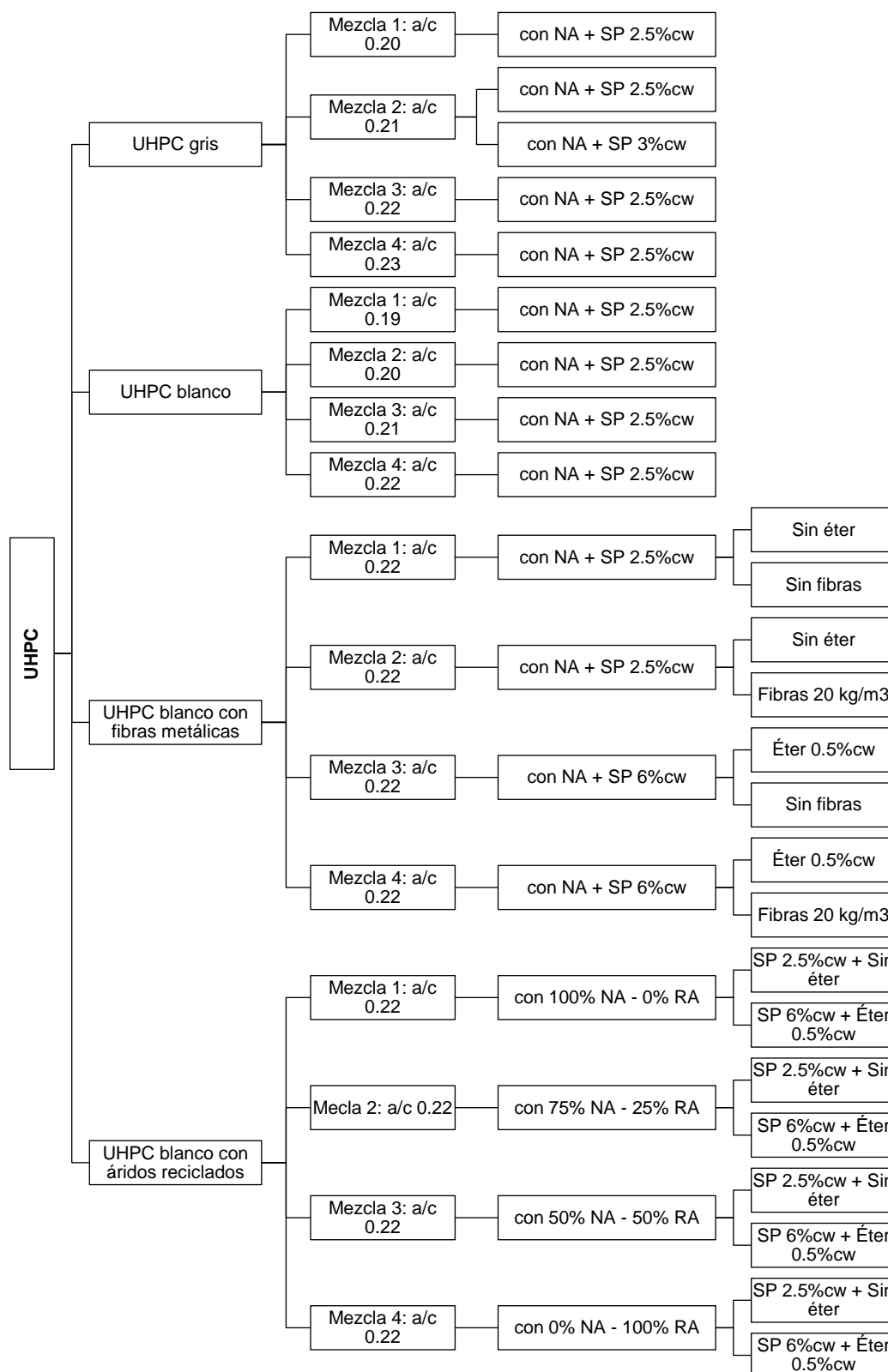


Figura 15. Esquema de planteamiento de las diferentes mezclas para evaluar.

De todas las probetas fabricadas que se enlistan en la *Tabla 2*, para los ensayos a flexión y flexo – tracción corresponden 3 probetas, mientras que para los ensayos a compresión corresponden 6 probetas, todo esto, por cada dosificación y cada tipo de hormigón.

*Tabla 2. Total de probetas a ensayos y tipos de ensayos contemplados en función del tipo de hormigón.*

<b>UHPC GRIS</b>						
Prueba	Tipo de probeta	Dimensiones	Nº dosificaciones	Nº probetas x mezcla	Nº días a ensayar	Total de probetas
Resistencia a flexión de probetas UNE-EN 12390-5:2020	Prismática	160 x 40 x 40	5	3	4	60
Resistencia a la tracción por flexión UNE-EN 14651:2007+A1	Prismática	160 x 40 x 40	No	No	No	-
Resistencia a compresión de probetas UNE-EN 12390-3:2020	Prismática	160 x 40 x 40	5	6	4	120
<b>UHPC BLANCO</b>						
Prueba	Tipo de probeta	Dimensiones	Nº dosificaciones	Nº probetas x mezcla	Nº días a ensayar	Total de probetas
Resistencia a flexión de probetas UNE-EN 12390-5:2020	Prismática	160 x 40 x 40	4	3	4	48
Resistencia a la tracción por flexión UNE-EN 14651:2007+A1	Prismática	160 x 40 x 40	No	No	No	-
Resistencia a compresión de probetas UNE-EN 12390-3:2020	Prismática	160 x 40 x 40	4	6	4	96
<b>UHPC BLANCO CON FIBRAS METÁLICAS</b>						
Prueba	Tipo de probeta	Dimensiones	Nº dosificaciones	Nº probetas x mezcla	Nº días a ensayar	Total de probetas
Resistencia a flexión de probetas UNE-EN 12390-5:2020	Prismática	160 x 40 x 40	2	3	4	24
Resistencia a la tracción por flexión UNE-EN 14651:2007+A1	Prismática	160 x 40 x 40	2	3	4	24
Resistencia a compresión de probetas UNE-EN 12390-3:2020	Prismática	160 x 40 x 40	4	6	4	96
<b>UHPC BLANCO CON ÁRIDOS RECICLADOS</b>						
Prueba	Tipo de probeta	Dimensiones	Nº dosificaciones	Nº probetas x mezcla	Nº días a ensayar	Total de probetas
Resistencia a flexión de probetas UNE-EN 12390-5:2020	Prismática	160 x 40 x 40	8	3	4	96
Resistencia a la tracción por flexión UNE-EN 14651:2007+A1	Prismática	160 x 40 x 40	No	No	No	-
Resistencia a compresión de probetas UNE-EN 12390-3:2020	Prismática	160 x 40 x 40	8	6	4	192

Todas las probetas fueron fabricadas en el Laboratorio de Tecnología de Materiales (LATEM) de la UPC, durante los meses de mayo a diciembre del 2023.

### 3.3. HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA

#### 3.3.1. Materiales

El material utilizado para la fabricación de probetas de hormigón de esta campaña experimental consiste en un mortero con baja relación de a/c con una mezcla de áridos finos y hormigón.

##### 3.3.1.1. *Materiales de la mezcla usando hormigón gris*

- Cemento Portland I 52.5R.
- Árido fino: Arenilla berroqueña 0 – 5 mm.
- Filler: Betoflow – D (Proveedor: Omya).
- Aditivos:
  - Superplastificante: Glenium ACE 425 (Proveedor: Master Builders).
  - Nanosílice: Meyco MS 685 (Proveedor: BASF).
  - Compensador de retracción: MasterLife SRA 2 (Proveedor: Master Builders).
- Agua

##### 3.3.1.2. *Materiales de la mezcla usando hormigón blanco*

- Cemento BL I 52.5R Rigas.
- Árido fino:
  - Arena blanca 0 – 1mm. en polvo.
  - Granito blanco duro Nº1 (1 – 2.7mm.)
- Filler: Betoflow – D (Proveedor: Omya).
- Aditivos:
  - Superplastificante: Glenium ACE 425 (Proveedor: Master Builders).
  - Nanosílice: Meyco MS 685 (Proveedor: BASF).
  - Compensador de retracción: MasterLife SRA 2 (Proveedor: Master Builders).
- Agua

#### 3.3.2. Dosificaciones para UHPC

Las dosificaciones para UHPC se dividen en dos grupos: para hormigón gris y hormigón blanco.

### 3.3.2.1. Dosificaciones usadas para hormigón gris

De acuerdo con la *Figura 15*, se usaron 4 mezclas que van desde la relación a/c 0.20 a 0.23, variando en una mezcla la relación del SP con relación al %cw.

La *Tabla 3* muestra las dosificaciones usadas para el hormigón gris. Son dosificaciones iniciales de las cuales se va a evaluar las propiedades mecánicas una vez curadas correctamente a 1, 7, 14 y 28 días.

*Tabla 3. Dosificaciones para hormigón gris.*

DOSIFICACIONES - HORMIGÓN GRIS							
Componente	Dosificación Base	Ud	M-1	M-2		M-3	M-4
			SP 2.5%	SP 2.5%	SP 3%	SP 2.5%	SP 2.5%
Cemento Portland I 52,5R	800	kg	800	800	800	800	800
Arenilla Berroqueño 0/5 MM.	1160	kg	1160	1160	1160	1160	1160
Betoflow-D	200	kg	200	200	200	200	200
Fibra metálica 13MM. (2.5% cw)	40	kg	0	0	0	0	0
Glenium ACE 425	20	kg	20	20	24	20	20
Meyco MS 685 (5% cw)	40	kg	40	40	40	40	40
Masterlife SRA 2 (1% cw)	8	kg	8	8	8	8	8
Agua	142	lt	160	168	168	176	182
a/c	0.1775		0.20	0.21	0.21	0.22	0.23

### 3.3.2.2. Dosificaciones usadas para hormigón blanco

De acuerdo con la *Figura 15*, se usaron 4 mezclas que van desde la relación a/c 0.19 a 0.22.

La *Tabla 4* muestra las dosificaciones usadas para el hormigón blanco. Son dosificaciones iniciales de las cuales se va a evaluar las propiedades mecánicas una vez curadas correctamente a 1, 7, 14 y 28 días.

*Tabla 4. Dosificaciones para hormigón blanco.*

DOSIFICACIONES - HORMIGÓN BLANCO							
Componente	Dosificación Base	Ud	M-1	M-2	M-3	M-4	
Cemento BL I 52,5R RIGAS	800	kg	800	800	800	800	
Arena Blanca 0-1mm Polvo	720	kg	720	720	720	720	
Granito Blanco Duro Nº 1 (1 a 2.7 mm)	440	kg	440	440	440	440	
Betoflow-D	200	kg	200	200	200	200	
Fibra metálica 13mm (2.5% cw)	20	kg	0	0	0	0	
Glenium ACE 425 (2.5% cw)	20	kg	20	20	20	20	

Meyco MS 685 (5% cw)	40	kg	40	40	40	40
Masterlife SRA 2 (1% cw)	8	kg	8	8	8	8
Agua	142	lt	152	160	168	176
a/c	0.1775		0.19	0.20	0.21	0.22

### 3.3.3. Fabricación y curado de probetas

#### 3.3.3.1. Fabricación de probetas

La fabricación y curado de las probetas se realizó bajo la normativa española UNE-EN 12390-2:2020 (Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia).

Se realizaron tal y como se muestra en la *Figura 16*, vertiendo el hormigón mediante moldes rectangulares metálicos de dimensiones de 160 x 40 x 40mm. El esquema de los moldes se muestra en la *Figura 17*.



Figura 16. Fabricación de probetas de UHPC gris.

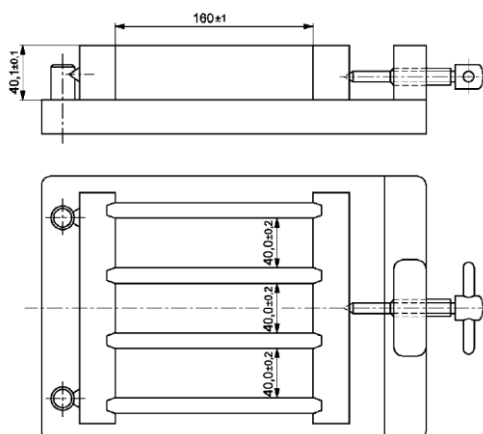


Figura 17. Molde típico prismático [73].

Se realizaron 12 muestras por cada dosificación, ya que se ensayaron al día 1, 7, 14 y 28 (3 probetas por día). Las muestras deben amasarse utilizando el recipiente o



bandeja de reamasado y la pala con la boca cuadrada, antes del llenado de los moldes, tal como se muestra en la *Figura 18*.



*Figura 18. Máquina de reamasado.*

De acuerdo con los materiales descritos en la sección 3.3.1.1 y 3.3.1.2 se hizo la fabricación para el UHPC. Antes del llenado se cubrió la parte interior del molde con una película de desencofrante no reactivo para evitar que el hormigón se adhiera al molde, tal como se muestra en la *Figura 19*. Asimismo, el hormigón debe compactarse después del vertido en el molde, de tal forma que se obtenga una compactación óptima sin excesiva segregación o aparición de flujo de lechada. Posteriormente, se debe nivelar cuidadosamente la superficie en caso de haber hormigón residual depositado sobre el borde superior del molde [74].



*Figura 19. Aplicación de desencofrante al molde.*

### **3.3.3.2. Curado de probetas**

Una vez que las probetas hayan endurecido y haya pasado 16 horas, desde el vertido del molde, pero no más de 3 días, a una temperatura ambiente de 25°C protegidas de impactos, vibraciones y deshidratación, se retiran de los moldes y se curan hasta ensayarse en una cámara a 20°C y a una humedad relativa mayor a 95% [74]. En la *Figura 20* se pueden apreciar las probetas en la cámara de humedad.



Figura 20. Probetas en cámara de humedad.

### 3.3.4. Descripción del equipo de ensayo

Con respecto al UHPC, se realizaron los ensayos de flexión y compresión en las máquinas de ensayo de resistencia Series AUTOTEST y CIB de la marca IBERTEST.

#### 3.3.4.1. Serie AUTOTEST: Ensayos de compresión y flexión

Las máquinas de ensayo de resistencia fueron especialmente diseñadas para la realización de ensayos en serie en fábricas de cemento y laboratorios de control de calidad. La capacidad en compresión es de 200 kN y la capacidad en flexión es de 10 kN [75].

El sistema informático de dichas máquinas trabaja con el software de ensayos WinTest32. Además, las máquinas AUTOTEST cumplen todos los requisitos y exigencias impuestas por las normas internacionales estandarizadas: EN 196-1, EN 1015-11, ISO 679, ASTM C 109, ASTM C 349, etc. En la *Figura 21* se muestra la máquina IBERTEST utilizada para los ensayos [75].



Figura 21. Máquina IBERTEST serie AUTOTEST [75].

### 3.3.4.2. **Ventajas técnicas**

- **Comodidad:** Debido al amplio espacio de trabajo fabricado en acero inoxidable, de elevada rigidez y muy confortable para la colocación de probetas e instrumentos de trabajo. Además, facilita el mantenimiento (cambio de aceite, configuración, etc.) [75].
- **Robustez y precisión:** Marco de ensayos de acero, de 200 kN de capacidad, de muy alta rigidez, formado por una placa base y dos columnas (rectificadas y cromadas) y un travesaño superior de cierre. Además, la estructura de soporte está hecha de aluminio, es compacta y ligera [75].
- **Versatilidad:** Dispositivos intercambiables, sin herramientas, para ensayos de flexión y de compresión según normativa EN y ASTM, según corresponda [75].
- **Limpieza:** Bandeja integrada de recogida de restos de probetas ensayadas [75].
- **Seguridad:** Pantalla de protección contra proyecciones y atrapamientos, con cierre magnético e interruptos automático de seguridad que impide el funcionamiento si la protección está abierta. Además, dispone de un botón de parada de emergencia tipo seta en el marco frontal de la máquina [75].

### 3.3.5. **Caracterización mecánica en estado endurecido**

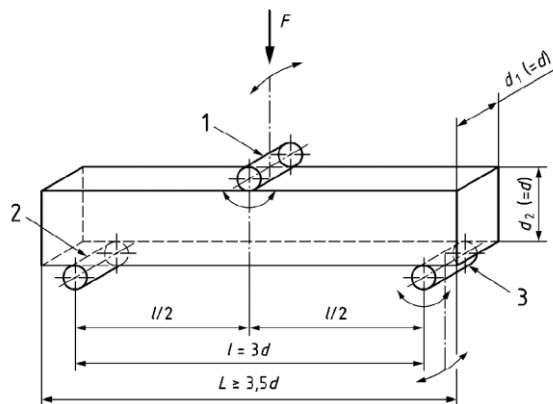
Para obtener unos valores representativos para la caracterización mecánica en estado endurecido del UHPC se realizaron 2 tipos de ensayo: Ensayo de flexión y ensayo de compresión simple. Por lo que se describirán cada tipo de ensayo.

#### 3.3.5.1. **Ensayo de flexión**

La resistencia a la flexión se realizó bajo la normativa española UNE-EN 12390-5:2020 (Parte 5: Resistencia a flexión de probetas).

En primer lugar, el dispositivo para la aplicación de cargas consistió en dos rodillos soportes y un rodillo superior soportado por una placa articulada. Estos rodillos son de acero y tienen una sección circular con un diámetro de 20 mm. Además, son 10 mm. más largos que el ancho de la probeta. Los rodillos soportes estuvieron distanciados a 120 mm. entre sí (de eje a eje de los rodillos), y 20 mm. en el extremo la probeta. El rodillo superior debe estar completamente centrado con el centro del largo de la probeta y debe ser capaz de girar libremente [76]. En la *Figura 22* se muestra el esquema de disposición de cargas

en la probeta de ensayo, mientras que en la *Figura 23* se muestra una probeta ensayada con los puntos de carga del equipo de ensayo utilizado.



*Figura 22. Disposición de cargas en las proyectas de ensayo (punto central de carga) [76].*



*Figura 23. Probeta ensayada a flexión con equipo de ensayo utilizado (punto central de carga).*

En segundo lugar, después del curado, las probetas se ensayaron a resistencia lo más pronto posible, no debiendo superar las 10 horas siguientes. Además, el laboratorio de ensayos estuvo a una temperatura de 20 a 25°C, lo cual es aceptable. Cabe resaltar que, se debe limpiar la superficie de las probetas antes de su colocación en la máquina de ensayo y se debe comprobar que la dirección de la carga es perpendicular al plano medio de la probeta [76].

Por último, la carga no se comienza a aplicar hasta que los rodillos de carga y los de apoyo descansan firmemente sobre la probeta. El incremento de tensión constante fue de 0.05 MPa/s. Cabe resaltar que, tras aplicarse la carga inicial, no debe exceder aproximadamente el 20% de la carga de rotura y la carga continua debe incrementarse constantemente el 10% hasta que la probeta no soporte una carga mayor [76].

### 3.3.5.2. Ensayo de compresión

La resistencia a la compresión se realizó bajo la normativa española UNE-EN 12390-4:2020 (Parte 4: Resistencia a compresión. Características de la máquina de ensayo).

En primer lugar, la máquina de ensayos de compresión está provista de un visor digital que permita la lectura de la fuerza con exactitud y un sistema de lectura (monitor) que pueda ser leído desde la posición de trabajo, tal como se muestra en la *Figura 24*. Cabe resaltar que, dicho sistema indicador de fuerza de la máquina no debe verse afectado por las roturas explosivas de probetas. La máquina de ensayos a compresión está provista de un sistema de control. El sistema de control permite que la máquina pueda verificarse y que se aplique la fuerza de modo uniforme y sin fluctuaciones. Además, se tiene instalado un indicador de velocidad de fuerza el cual estuvo dentro del 5% de la velocidad especificada [77].

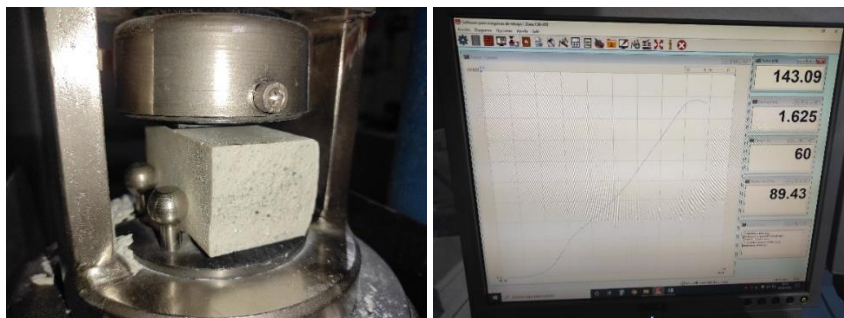


Figura 24. Máquina de ensayo a compresión y sistema de lectura.

En segundo lugar, se aseguró un correcto posicionamiento de las probetas con relación al eje de la fuerza, y se aseguró que el plato inferior de la máquina estuviera provisto con marcas que sirvan para centrar las probetas. Cabe resaltar que, la máquina fue verificada y calibrada anteriormente de los ensayos a compresión [77]. En la *Figura 25* se puede apreciar el ensayo a compresión de una probeta.



Figura 25. Probeta ensayada a compresión con equipo de ensayo utilizado.

### 3.3.6. Optimización en impresión 3D y ensayo de probetas

La optimización en impresión 3D, se realizó en 3 fases con el uso de adiciones. La primera fase consta del uso de la cal, la segunda fase consta del uso del éter, y la tercera fase consta del uso del modulador de viscosidad.

#### 3.3.6.1. Impresión 3D con cal

Se realizaron 6 mezclas para obtener una óptima impresión 3D. La Tabla 5 muestra todas las dosificaciones realizadas con hormigón blanco y cal (Proveedor: Cales de Pachs).

Tabla 5. Dosificaciones para hormigón blanco con cal.

DOSIFICACIONES - HORMIGÓN BLANCO + CAL							
Componente	Ud	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6
		SP 3%	SP 2.5%	SP 3.5%	SP 3.25%	SP 2.5%	SP 3.25%
Cemento BL I 52,5R RIGAS	kg	800	800	800	800	800	800
Arena Blanca 0-1mm Polvo	kg	720	720	720	720	720	720
Granito Blanco Duro Nº 1 (1 a 2.7 mm)	kg	440	440	440	440	440	440
Betoflow-D	kg	160	160	160	160	160	160
Glenium ACE 425	kg	24	20	28	26	20	26
Meyco MS 685 (5% cw)	kg	40	40	40	40	40	40
Masterlife SRA 2 (1% cw)	kg	8	8	8	8	8	8
Agua	lt	208	208	208	208	216	216
Cal (5% cw)	kg	40	40	40	40	40	40
a/c		0.26	0.26	0.26	0.26	0.27	0.27

De la Tabla 5 se puede observar que la preparación de la mezcla se realizó variando el % de SP y manteniendo la misma cantidad de cal en cada una, que es del 5% cw. De las 6 mezclas, 4 de ellas fueron con una relación a/c de 0.26 y las últimas 2 fueron con una relación a/c de 0.27. La relación de a/c es significativamente más alta que la dosificación base debido a que la cal tiene una reacción exotérmica, lo cual absorbe el agua al entrar en contacto.

#### 3.3.6.2. Impresión 3D con Éter

Se realizaron 8 mezclas para obtener una óptima impresión 3D. La Tabla 6 muestra todas las dosificaciones realizadas con hormigón blanco y éter.

Tabla 6. Dosificaciones para hormigón blanco con éter.

DOSIFICACIONES - HORMIGÓN BLANCO + ÉTER									
Componente	Ud	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8
		SP8%+ 1% + Éter 1%	SP9%+ 1% + Éter 1%	SP10%+ 1% + Éter 1%	SP8%+ 2% + Éter 1%	SP9%+ 2% + Éter 1%	SP10%+ 2% + Éter 1%	SP9%+ 2% + Éter 0.5%	SP8%+ 1% + Éter 0.5%

Cemento BL I 52,5R RIGAS	kg	800	800	800	800	800	800	800	800
Arena Blanca 0-1mm Polvo	kg	720	720	720	720	720	720	720	720
Granito Blanco Duro Nº 1 (1 a 2.7 mm)	kg	440	440	440	440	440	440	440	440
Betoflow-D	kg	192	192	192	192	192	192	192	192
Glenium ACE 425 - 1ra fase	kg	64	72	80	64	72	80	72	64
Glenium ACE 425 - 2da fase	kg	8	8	8	16	16	16	16	4
Meyco MS 685 (5% cw)	kg	40	40	40	40	40	40	40	40
Masterlife SRA 2 (1% cw)	kg	8	8	8	8	8	8	8	8
Agua	lt	176	176	176	176	176	176	176	176
Éter	kg	8	8	8	8	8	8	8	8
a/c		0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22

De la Tabla 6 se puede observar que la preparación de la mezcla se realizó en 2 fases con respecto al SP. La primera fase oscila entre 8 a 10% cw. mientras que, para la segunda fase fue de 1 y 2% cw. Respecto al éter, la relación fue del 0.5% y 1% cw.

### 3.3.6.3. Impresión 3D con Modulador de viscosidad (MasterMatrix 175)

Se realizaron 8 mezclas para obtener una óptima impresión 3D. La Tabla 7 muestra todas las dosificaciones realizadas con hormigón blanco y modulador de viscosidad (Proveedor: Master Builders). Con el modulador de viscosidad se baja la proporción de SP.

Tabla 7. Dosificaciones para hormigón blanco con modulador de viscosidad.  
Fuente: elaboración propia.

DOSIFICACIONES - HORMIGÓN BLANCO + MODULADOR DE VISCOSIDAD										
Componente	Dosif. Base	Ud	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8
	SP 2.5% + MV 0%		SP 2.5% + MV 1%	SP 1.5%+0.5% + MV 1%	SP 2% + MV 1%	SP 1.75% + MV 0.5%	SP 1.5%+0.25% + MV 0.5%	SP 1.5%+0.1% + MV 0.75%	SP 1.75% + MV 0.75%	SP 1.25% + MV 0.5%
Cemento BL I 52,5R RIGAS	800	kg	800	800	800	800	800	800	800	800
Arena Blanca 0-1mm Polvo	720	kg	720	720	720	720	720	720	720	720
Granito Blanco Duro Nº 1 (1 a 2.7 mm)	440	kg	440	440	440	440	440	440	440	440
Betoflow-D	200	kg	192	192	192	192	192	192	192	192
Glenium ACE 425 - 1ra fase	20	kg	64	72	80	64	72	80	72	64
Glenium ACE 425 - 2da fase		kg	8	8	8	16	16	16	16	4
Meyco MS 685 (5% cw)	40	kg	40	40	40	40	40	40	40	40
Masterlife SRA 2 (1% cw)	8	kg	8	8	8	8	8	8	8	8
Agua	142	lt	168	168	168	168	168	168	168	168
Modulador de viscosidad		kg	8	8	8	8	8	8	8	8
a/c	0.1775		0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21

De la Tabla 7 se puede observar que la preparación de 5 mezclas se realizó en 1 fase y 3 mezclas se realizaron en 2 fases con respecto al SP. La primera fase oscila entre

1.25 a 2.5% cw. mientras que, para la segunda fase oscila entre 0.1 a 0.5% cw. Respecto al éter, la relación fue del 0.5% y 1% cw.

#### 3.3.6.4. Ensayo de flexión

##### Ensayo de flexión para hormigón gris

Como se observa en la Tabla 2, el número total de probetas elaboradas y ensayadas fue de 60 probetas en total. Fueron 5 dosificaciones que se desarrollaron para el hormigón gris, obteniendo 12 probetas para cada dosificación. Por tanto, fueron 60 ensayos en total, 12 para cada dosificación (3 por cada intervalo de tiempo: a 1 día, 7 días, 14 días y 28 días). El procedimiento se explicó en el ítem 3.3.5.1. En la *Figura 26* se observa algunos ensayos a flexión que se realizaron para cada dosificación correspondiente.



Mezcla 1: a/c 0.20 con NA + SP



Mezcla 2: a/c 0.21 con NA + SP



Mezcla 3: a/c 0.21 con NA + SP



Mezcla 4: a/c 0.22 con NA + SP



Mezcla 5: a/c 0.23 con NA + SP

*Figura 26. Ensayos a flexión por cada dosificación para hormigón gris.*



### **Ensayo de flexión para hormigón blanco**

Como se observa en la Tabla 2, el número total de probetas elaboradas y ensayadas fue de 48 probetas en total. Fueron 4 dosificaciones que se desarrollaron para el hormigón blanco, obteniendo 12 probetas para cada dosificación. Por tanto, fueron 48 ensayos en total, 12 para cada dosificación (3 por cada intervalo de tiempo: a 1 día, 7 días, 14 días y 28 días).

El procedimiento se explicó en el ítem 3.3.5.1. En la *Figura 27* se observa algunos ensayos a flexión que se realizaron para cada dosificación correspondiente.



Mezcla 1: a/c 0.19 con NA + SP 2.5%cw



Mezcla 2: a/c 0.20 con NA + SP 2.5%cw



Mezcla 3: a/c 0.21 con NA + SP 2.5%cw



Mezcla 4: a/c 0.22 con NA + SP 2.5%cw

*Figura 27. Ensayos a flexión por cada dosificación para hormigón blanco.*

### **3.3.6.5. Ensayo de compresión**

#### **Ensayo de compresión para hormigón gris**

Como se observa en la Tabla 2, el número total de probetas elaboradas y ensayadas fue de 60 probetas en total. Fueron 5 dosificaciones que se desarrollaron para el hormigón gris, obteniendo 12 probetas para cada dosificación. Por tanto, fueron 120 ensayos en total, 24 para cada dosificación (6 por cada intervalo de tiempo: a 1 día, 7 días, 14 días y 28 días). De cada probeta elaborada, se obtienen 2 ensayos a compresión.

El procedimiento se explicó en el ítem 3.5.5.2. En la *Figura 28* se observa algunos ensayos a compresión que se realizaron para cada dosificación correspondiente.



Mezcla 1: a/c 0.20 con NA + SP 2.5%cw



Mezcla 2: a/c 0.21 con NA + SP 2.5%cw



Mezcla 3: a/c 0.21 con NA + SP 3%cw



Mezcla 4: a/c 0.22 con NA + SP 2.5%cw



Mezcla 5: a/c 0.23 con NA + SP 2.5%cw

*Figura 28. Ensayos a compresión por cada dosificación para hormigón gris.*

### **Ensayo de compresión para hormigón blanco**

Como se observa en la Tabla 2, el número total de probetas elaboradas y ensayadas fue de 96 probetas en total. Fueron 4 dosificaciones que se desarrollaron para el hormigón blanco, obteniendo 12 probetas para cada dosificación. Por tanto, fueron 96 ensayos en total, 24 para cada dosificación (6 por cada intervalo de tiempo: a 1 día, 7 días, 14 días y 28 días). De cada probeta elaborada, se obtienen 2 ensayos a compresión.

El procedimiento se explicó en el ítem 3.5.5.2. En la *Figura 29* se observa algunos ensayos a compresión que se realizaron para cada dosificación correspondiente.



Mezcla 1: a/c 0.19 con NA + SP 2.5%cw



Mezcla 2: a/c 0.20 con NA + SP 2.5%cw



Mezcla 3: a/c 0.21 con NA + SP 2.5%cw



Mezcla 4: a/c 0.22 con NA + SP 2.5%cw

*Figura 29. Ensayos a compresión por cada dosificación para hormigón blanco.*

### 3.4. HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA CON FIBRAS METÁLICAS

#### 3.4.1. Materiales

El material utilizado para la fabricación de probetas de hormigón de esta campaña experimental consiste en un mortero con baja relación de a/c con una mezcla de áridos finos y hormigón, con la diferencia, en este caso, añadiéndole fibras metálicas Dramix OL 13.

Las fibras Dramix OL, tal como se muestra en la *Figura 30* se caracterizan por ofrecer un alto rendimiento y una elevada resistencia a la fisuración, lo que las convierte en ideales para obtener una ductilidad óptima. Estas fibras suelen emplearse en aplicaciones estructurales in situ, con hormigón prefabricado o proyectado. Las fibras están hechas de alambre de acero de alta resistencia a la tracción, trefilado en frío. Tienen una

longitud de 13 mm. y un diámetro de 0.20 mm. lo que significa un rendimiento de 314000 fibras por kilogramo. Además, tienen una resistencia a la tracción  $R_{m\min}$  de 2600 N/mm<sup>2</sup>, por lo que suelen utilizarse en altas dosificaciones para hormigones de alta resistencia [78].



Figura 30. Fibras metálicas Dramix OL.

Los materiales usados para la realización de las mezclas fueron:

- Cemento BL II 52.5R Rigas.
- Árido fino:
  - Arena blanca 0 – 1mm. en polvo.
  - Granito blanco duro N°1 (1 – 2.7mm.)
- Filler: Betoflow – D (Proveedor: Omya).
- Aditivos:
  - Superplastificante: Glenium ACE 425 (Proveedor: Master Builders).
  - Nanosílice: Meyco MS 685 (Proveedor: BASF).
  - Compensador de retracción: MasterLife SRA 2 (Proveedor: Master Builders).
- Fibras: Dramix OL 13/0.2mm.
- Éter hidroxipropilmetilcelulosa (Proveedor: Vadequímica).
- Agua

#### 3.4.2. Dosificaciones para UHPC blanco con fibras

Las dosificaciones para UHPC solo se realizaron para hormigón blanco. De acuerdo con la *Figura 15*, se usaron 4 dosificaciones con la relación a/c 0.22. Las dosificaciones varían en función del % del SP y del éter hidroxipropilmetilcelulosa.

La *Tabla 8* muestra las dosificaciones usadas para el hormigón blanco con fibras metálicas. Son dosificaciones iniciales de las cuales se va a evaluar las propiedades mecánicas una vez curadas correctamente a 1, 7, 21 y 28 días.

Tabla 8. Dosificaciones para hormigón blanco con fibras metálicas.

DOSIFICACIONES - HORMIGÓN BLANCO CON FIBRAS METÁLICAS						
Componente	Dosificación base	Ud	M-1	M-2	M-3	M-4
			SP 2.5%cw + Sin éter + Sin fibras	SP 2.5%cw + Sin éter + Con fibras	SP 6%cw + Éter + 0.5%cw + Sin fibras	SP 6%cw + Éter + 0.5%cw + Con fibras
Cemento BL I 52,5R RIGAS	800	kg	800	800	800	800
Arena Blanca 0-1mm Polvo	720	kg	720	720	720	720
Granito Blanco Duro Nº 1 (1 a 2.7 mm)	440	kg	440	440	440	440
Betoflow-D	200	kg	200	200	196	196
Fibra de vidrio 13MM. (2.5% cw)	20	kg	0	20	0	20
Glenium ACE 425	20	kg	20	20	48	48
Meyco MS 685 (5% cw)	40	kg	40	40	40	40
Masterlife SRA 2 (1% cw)	8	kg	8	8	8	8
Agua (FORMULAS)	142	lt	176	176	176	176
Éter		kg	0	0	4	4
a/c	0.1775		0.22	0.22	0.22	0.22

### 3.4.3. Fabricación y curado de probetas

#### 3.4.3.1. Fabricación de probetas

La fabricación y curado de las probetas se realizó bajo la normativa española UNE-EN 12390-2:2020 (Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia).

Se realizaron tal y como se muestra en la *Figura 31*, vertiendo el hormigón mediante moldes rectangulares metálicos de dimensiones de 160 x 40 x 40mm., dicho esquema de los moldes se mostró en la *Figura 17*.



Figura 31. Fabricación de probetas de UHPC blanco con fibras.

De igual manera, se realizaron 12 muestras por cada dosificación, ya que se ensayaron al día 1, 7, 21 y 28 (3 probetas por día). Dichas muestras deben amasarse

utilizando el recipiente o bandeja de reamasado y la pala con la boca cuadrada, antes del llenado de los moldes, tal como se mostró en la *Figura 18*.

De acuerdo con los materiales descritos en la sección 3.4.1 se hizo la fabricación para el UHPC. Antes del llenado se cubrió la parte interior del molde con una película de desencofrante no reactivo para evitar que el hormigón se adhiriera al molde. Asimismo, el hormigón debe compactarse después del vertido en el molde, de tal forma que se obtenga una compactación óptima sin excesiva segregación o aparición de flujo de lechada. Posteriormente, se debe nivelar cuidadosamente la superficie en caso de haber hormigón residual depositado sobre el borde superior del molde [74].

#### **3.4.3.2. Curado de probetas**

Una vez que las probetas hayan endurecido y haya pasado 16 horas, desde el vertido del molde, pero no más de 3 días, a una temperatura ambiente de 25°C protegidas de impactos, vibraciones y deshidratación, se retiran de los moldes y se curan hasta ensayarse en una cámara a 20°C y a una humedad relativa mayor a 95% [74].

#### **3.4.4. Descripción del equipo de ensayo**

Con respecto al UHPC con fibras, se realizaron los ensayos de resistencia a la tracción por flexión en la máquina de ensayo de resistencia INSTRON, y resistencia a la compresión en la máquina de ensayo de resistencia Series AUTOTEST y CIB de la marca IBERTEST.

##### **3.4.4.1. INSTRON: Ensayos a la tracción por flexión**

La máquina de ensayos de resistencia a la tracción por flexión es una dinámica axial INSTRON 8505 con bastidor de 4 columnas y un pistón actuador de  $\pm 1.000$  kN, integrando una cédula que trabaja hasta 100 kN para ensayos de flexo – tracción.

##### **3.4.4.2. Serie AUTOTEST: Ensayos de compresión**

La máquina de ensayo de resistencia a compresión fue especialmente diseñada para la realización de ensayos en serie en fábricas de cemento y laboratorios de control de calidad. La capacidad en compresión es de 200 kN [75].

Como se especificó en el ítem 3.3.4.1, se describe la máquina de ensayo de resistencia. En el ítem 3.3.4.2 se describieron las ventajas técnicas de la máquina de ensayo a compresión.

### **3.4.5. Caracterización mecánica en estado endurecido**

Para obtener unos valores representativos para la caracterización mecánica en estado endurecido del UHPC blanco con fibras se realizaron 2 tipos de ensayo: Ensayo de resistencia a la tracción por flexión y ensayo de resistencia a la compresión. Por lo que se describirán cada tipo de ensayo.

#### **3.4.5.1. Ensayo de resistencia a la tracción por flexión**

La resistencia a la tracción por flexión se realizó bajo la normativa española UNE-EN 14651:2007+A1, denominado Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP, resistencia residual). Para el caso de hormigones reforzados con fibras, los ensayos a flexo – tracción son los más utilizados para caracterizarlos.

En cuanto a la preparación y colocación de las probetas, la probeta debe situarse centradamente entre la distancia de los apoyos y equidistantes en ambos extremos del rodillo de apoyo al borde de la probeta. Para medir el borde de la fisura se debe instalar un transductor de desplazamiento a lo largo del eje longitudinal, en la mitad de la anchura de la probeta [79].

Antes del ensayo debe determinarse la longitud media de vano de la probeta a partir de dos mediciones efectuadas con la ayuda de una regla, de la distancia entre los ejes de dos rodillos de apoyo a ambos lados de la probeta [79].

Cuando se está realizando el ensayo, la máquina de ensayo debe controlar la velocidad de crecimiento del CMOD a una velocidad constante de 0.05 mm/min, y cuando el CMOD = 0.1 mm., la máquina debe funcionar de modo que el CMOD aumente a una velocidad constante de 0.2 mm/min. Además, se debe verificar que la frecuencia no exceda a 5 Hz. El ensayo debe finalizar para un valor de CMOD superior o igual a 4 mm [79].

### **3.4.5.2. Ensayo de compresión**

La resistencia a la compresión se realizó bajo la normativa española UNE-EN 12390-4:2020 (Parte 4: Resistencia a compresión. Características de la máquina de ensayo).

En primer lugar, la máquina de ensayos de compresión está provista de un visor digital que permita la lectura de la fuerza con exactitud y un sistema de lectura (monitor) que pueda ser leído desde la posición de trabajo, tal como se mostró en la *Figura 24*. Cabe resaltar que, dicho sistema indicador de fuerza de la máquina no debe verse afectado por las roturas explosivas de probetas. La máquina de ensayos a compresión está provista de un sistema de control. El sistema de control permite que la máquina pueda verificarse y que se aplique la fuerza de modo uniforme y sin fluctuaciones. Además, se tiene instalado un indicador de velocidad de fuerza el cual estuvo dentro del 5% de la velocidad especificada [77].

En segundo lugar, en cuanto al mismo ensayo, se aseguró un correcto posicionamiento de las probetas con relación al eje de la fuerza, y se aseguró que el plato inferior de la máquina estuviera provisto con marcas que sirvan para centrar las probetas. Cabe resaltar que, la máquina fue verificada y calibrada anteriormente de los ensayos a compresión [77].

### **3.4.6. Ensayo de probetas**

#### **3.4.6.1. Ensayos de flexión y flexo – tracción**

Como se observa en la Tabla 2, el número total de probetas elaboradas y ensayadas fue de 48 probetas en total: 24 probetas ensayadas a flexión (probetas con y sin éter y, sin fibras) y 24 probetas ensayadas a flexo – tracción (probetas con y sin éter y, con fibras). Fueron 2 dosificaciones que se desarrollaron para el hormigón blanco y 2 dosificaciones que se desarrollaron para el hormigón blanco con fibras, obteniendo 12 probetas para cada dosificación. Por tanto, fueron 48 ensayos en total, 12 para cada dosificación (3 por cada intervalo de tiempo: a 1 día, 7 días, 21 días y 28 días).

El procedimiento para el ensayo a flexión se explicó en el ítem 3.3.5.1 y el procedimiento para el ensayo a flexo – tracción se explicó en el ítem 3.4.5.1. En la *Figura*



32 se observa algunos ensayos de flexión y flexo – tracción que se realizaron para cada dosificación correspondiente.



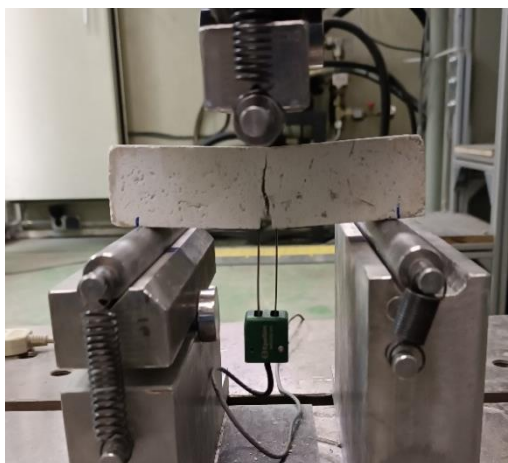
Mezcla 1: sin éter y sin fibras



Mezcla 3: con éter y sin fibras



Mezcla 2: sin éter y con fibras



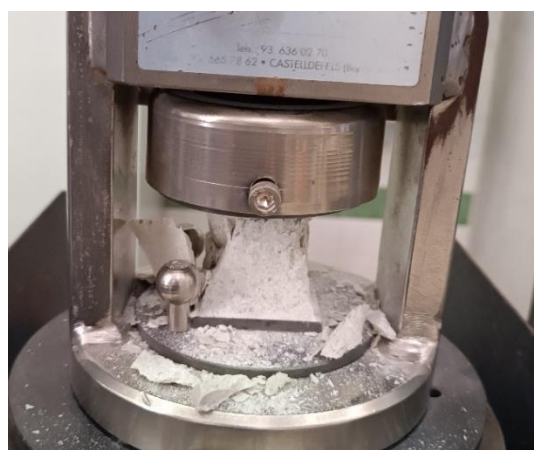
Mezcla 4: con éter y con fibras

Figura 32. Ensayos a flexión y flexo – tracción por cada dosificación para hormigón blanco con fibras.

### 3.4.6.2. Ensayo de compresión

Como se observa en la Tabla 2, el número total de probetas elaboradas y ensayadas fue de 96 probetas en total. Fueron 2 dosificaciones que se desarrollaron para el hormigón blanco y 2 dosificaciones que se desarrollaron para el hormigón blanco con fibras, obteniendo 12 probetas para cada dosificación. Por tanto, fueron 96 ensayos en total, 24 para cada dosificación (6 por cada intervalo de tiempo: a 1 día, 7 días, 21 días y 28 días). De cada probeta elaborada, se obtienen 2 ensayos a compresión.

El procedimiento se explicó en el ítem 3.3.5.1. En la Figura 33 se observa algunos ensayos a compresión que se realizaron para cada dosificación correspondiente.



Mezcla 1: sin éter y sin fibras



Mezcla 3: con éter y sin fibras



Mezcla 2: sin éter y con fibras



Mezcla 4: con éter y con fibras

Figura 33. Ensayos a compresión por cada dosificación para hormigón blanco con fibras.

### 3.5. HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA CON ÁRIDO RECICLADO

#### 3.5.1. Materiales

El material utilizado para la fabricación de probetas de hormigón de esta campaña experimental consiste en un mortero con baja relación de a/c de 0.22 con una mezcla de áridos finos naturales, áridos finos reciclados y hormigón blanco.

##### 3.5.1.1. Materiales de la mezcla usando hormigón blanco

- Cemento BL I 52.5R Rigas.
- Árido fino natural:
  - Arena blanca 0 – 1mm. en polvo.
  - Granito blanco duro Nº1 (1 – 2.7mm.)
- Árido fino reciclado:

- Árido fino reciclado 0 – 0.63mm.
- Árido fino reciclado 0.63 – 2mm.
- Filler: Betoflow – D (Proveedor: Omya).
- Aditivos:
  - Superplastificante: Glenium ACE 425 (Proveedor: Master Builders).
  - Nanosílice: Meyco MS 685 (Proveedor: BASF).
  - Compensador de retracción: MasterLife SRA 2 (Proveedor: Master Builders).
- Éter hidroxipropilmetilcelulosa (Proveedor: Vadequímica).
- Agua

### 3.5.1.2. Granulometría del árido reciclado

El RA viene del hormigón fabricado en el LATEM con una resistencia de 30 MPa y luego pasando por un proceso de trituración a los 28 días, de la cual se clasificó en dos tamaños:

- RAC 0-0.63 mm
- RAC 0.63-2 mm

La *Figura 34* muestra la tamizadora que se usó para obtener el RAC con tamaños de partículas 0 – 0.63 mm. y 0.63 – 2 mm.



*Figura 34. Tamizadora electromagnética BA 400 N.*

Después de realizar el tamizado de las partículas, se obtuvo el RAC 0 – 0.63 mm. y 0.63 – 2 mm, tal como se muestra en la *Figura 35*.



Figura 35. RAC 0 – 0.63 mm. y RAC 0.63 – 2 mm., respectivamente.

La distribución del tamaño de la partícula se determinó mediante análisis granulométrico. La granulometría permite estudiar y conocer el tamaño de las partículas y sedimentos presentes en una muestra. A continuación, se muestra la granulometría del RAC tamizado.

Para obtener la curva granulométrica se volvió a tamizar con aberturas más pequeñas, por lo que se usó una tamizadora AS 300 Control, tal como se muestra en la Figura 36.



Figura 36. Tamizadora AS 300 Control.

### **RAC 0 – 0.63 mm**

Se muestra la Tabla 9 referente al análisis granulométrico que se determinó para el RAC 0 – 0.63 mm. Se observa que las partículas de 0.5 – 0.63 mm. y 0.25 – 0.16 mm. son las que más % de masa retenida presenta.

Tabla 9. Granulometría de RAC 0 – 0.63 mm.

GRANULOMETRÍA 0 - 0.63 mm.				
Abertura (mm)	Masa retenida (gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
0.63	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
0.5	191.10	25.09%	25.09%	74.91%
0.4	97.80	12.84%	37.93%	62.07%
0.315	118.40	15.54%	53.47%	46.53%
0.25	43.80	5.75%	59.22%	40.78%
0.16	211.30	27.74%	86.96%	13.04%
0.125	74.20	9.74%	96.70%	3.30%
0.063	24.70	3.24%	99.95%	0.05%
0	0.40	0.05%	100.00%	0.00%
<b>Total</b>	<b>761.7</b>	<b>100%</b>		

### RAC 0.63 – 2 mm

Se muestra la Tabla 10 referente al análisis granulométrico que se determinó para el RAC 0.63 – 2 mm. Se observa que las partículas de 1 – 0.63 mm. son las que más % de masa retenida presenta, representando la cuarta parte de toda la muestra.

Tabla 10. Granulometría de RAC 0.63 – 2 mm.

GRANULOMETRÍA 0.63 - 2 mm.				
Abertura (mm)	Masa retenida (gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
2	9.80	1.19%	1.19%	98.81%
1.6	169.70	20.57%	21.76%	78.24%
1.25	191.50	23.22%	44.98%	55.02%
1	127.70	15.48%	60.46%	39.54%
0.63	206.10	24.99%	85.45%	14.55%
0	120.00	14.55%	100.00%	0.00%
<b>Total</b>	<b>824.8</b>	<b>100%</b>		

De la Tabla 9 y la Tabla 10 se obtuvieron las curvas granulométricas, tal como se muestra en la Figura 37.

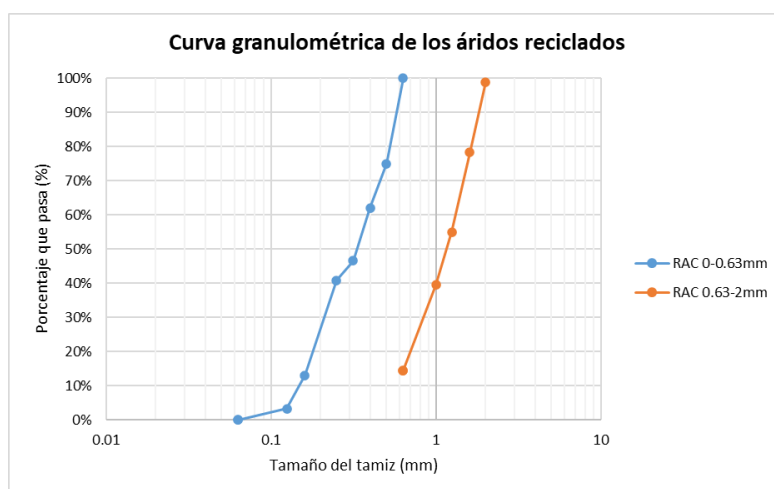


Figura 37. Curva granulométrica de RAC 0 – 0.63 mm. y RAC 0.63 – 2 mm.

### 3.5.1.3. Densidades del árido reciclado

Una vez obtenido el RAC 0 – 0.63 mm. y el RAC 0.63 – 2 mm., se procede a hallar las densidades de dichas muestras.

#### **RAC 0 – 0.63 mm**

Para este caso, se halló la densidad con el método del frasco volumétrico de LeChatelier. El procedimiento es el siguiente:

1. La muestra debe estar completamente seca, para esto se ha debido de secar la muestra en el horno 24 horas antes y haber limpiado de impurezas.
2. El frasco debe encontrarse completamente seco en su interior.
3. Se llena el frasco con agua hasta un cierto punto en la parte baja del cuello, alrededor de las marcas  $0 \text{ cm}^3$  y  $1 \text{ cm}^3$ .
4. Se registra la lectura del peso del frasco de LeChatelier más la de la muestra, tal como se muestra en la *Figura 38*.
5. La muestra que se pesó anteriormente se debe introducir en el frasco en cantidades pequeñas para evitar que se pierdan las partículas de la muestra.
6. Se coloca el tapón y se inclina el frasco para eliminar burbujas de aire en el fluido.
7. Por último, se registra la lectura final después de que se encuentra sumergida la muestra en el frasco.



*Figura 38. Registro del frasco LeChatelier y la muestra.*

La densidad resultante para el RAC 0 – 0.63 mm. fue de  $2450 \text{ kg/m}^3$ .

#### **RAC 0.63 – 2 mm**

La determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua con áridos finos se realizó de acuerdo con la UNE EN 1097-6. Del método se obtuvo una absorción del 11.61% y una densidad de  $2077 \text{ kg/m}^3$ .

### 3.5.2. Dosificaciones para UHPC blanco con áridos reciclados

Las dosificaciones para UHPC con áridos reciclados solo se realizaron para hormigón blanco. De acuerdo con la *Figura 15*, se usaron 8 dosificaciones con la relación a/c 0.22. Las dosificaciones varían en función del % de árido reciclado, del SP y del éter hidroxipropilmetilcelulosa.

La Tabla 11 muestra las dosificaciones usadas para el hormigón blanco con áridos reciclados. Son dosificaciones iniciales de las cuales se va a evaluar las propiedades mecánicas una vez curadas correctamente a 1, 7, 21 y 28 días.

Tabla 11. Dosificaciones para hormigón blanco con áridos reciclados.

DOSIFICACIONES - HORMIGÓN BLANCO CON ÁRIDOS RECICLADOS									
Componente	Ud	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8
		100% NAC- 0% RAC (Sin éter)	100% NAC- 0% RAC (Con éter)	75% NAC- 25% RAC (Sin éter)	75% NAC- 25% RAC (Con éter)	50% NAC- 50% RAC (Sin éter)	50% NAC- 50% RAC (Con éter)	0% NAC- 100% RAC (Sin éter)	0% NAC- 100% RAC (Con éter)
Cemento BL I 52,5R RIGAS	kg	800	800	800	800	800	800	800	800
Arena Blanca 0-1mm Polvo	kg	720	720	540	540	360	360	0	0
Granito Blanco Duro N° 1 (1 a 2.7 mm)	kg	440	440	330	330	220	220	0	0
Betoflow-D	kg	200	200	200	196	200	196	200	196
RAC 0-0.63 mm	kg	0	0	169.0	169.0	337.9	337.9	675.9	675.9
RAC 0.63-2 mm	kg	0	0	89.6	89.6	179.2	179.2	358.4	358.4
Glenium ACE 425	kg	20	48	20	48	20	48	20	48
Meyco MS 685 (5% cw)	kg	40	40	40	40	40	40	40	40
Masterlife SRA 2 (1% cw)	kg	8	8	8	8	8	8	8	8
Éter	kg	0	4	0	4	0	4	0	4
Agua	lt	176	176	181.2	181.2	186.4	186.4	196.8	196.8

### 3.5.3. Fabricación y curado de probetas

#### 3.5.3.1. Fabricación de probetas

La fabricación y curado de las probetas se realizó bajo la normativa española UNE-EN 12390-2:2020 (Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia).

Se realizaron tal y como se muestra en la *Figura 39* *Figura 16*, vertiendo el hormigón mediante moldes rectangulares metálicos de dimensiones de 160 x 40 x 40mm. El esquema de los moldes se mostró en la *Figura 17*.

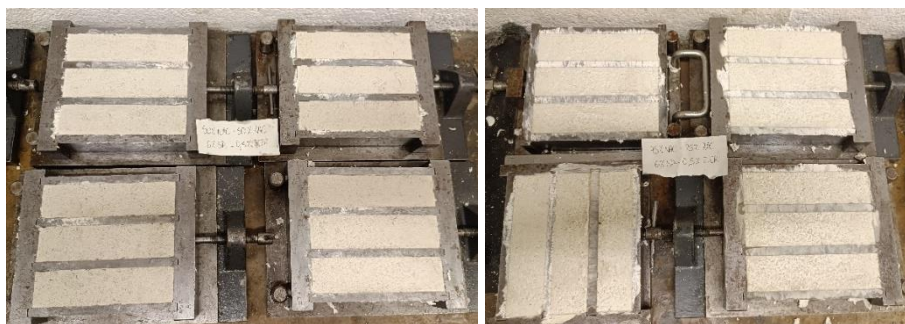


Figura 39. Fabricación de probetas de UHPC blanco con 50% RA, con y sin éter.

Se realizaron 12 muestras por cada dosificación, ya que se ensayaron al día 1, 7, 21 y 28 (3 probetas por día). Las muestras deben amasarse utilizando el recipiente o bandeja de reamasado y la pala con la boca cuadrada, antes del llenado de los moldes, tal como se muestra en la Figura 40.



Figura 40. Máquina de reamasado con mezcla de hormigón blanco con áridos reciclados.

De acuerdo con los materiales descritos en la sección 3.5.1.1 se hizo la fabricación para el UHPC blanco con áridos reciclados. Antes del llenado se cubrió la parte interior del molde con una película de desencofrante no reactivo para evitar que el hormigón se adhiera al molde. Asimismo, el hormigón debe compactarse después del vertido en el molde, de tal forma que se obtenga una compactación óptima sin excesiva segregación o aparición de flujo de lechada. Posteriormente, se debe nivelar cuidadosamente la superficie en caso de haber hormigón residual depositado sobre el borde superior del molde [74].

### 3.5.3.2. Curado de probetas

Una vez que las probetas hayan endurecido y haya pasado 16 horas, desde el vertido del molde, pero no más de 3 días, a una temperatura ambiente de 25°C protegidas



de impactos, vibraciones y deshidratación, se retiran de los moldes y se curan hasta ensayarse en una cámara a 20°C y a una humedad relativa mayor a 95% [74].

En la *Figura 41* se muestran 3 probetas listas para ser ensayadas una vez curadas y retiradas de la cámara de humedad por cada dosificación para hormigón blanco con áridos reciclados.

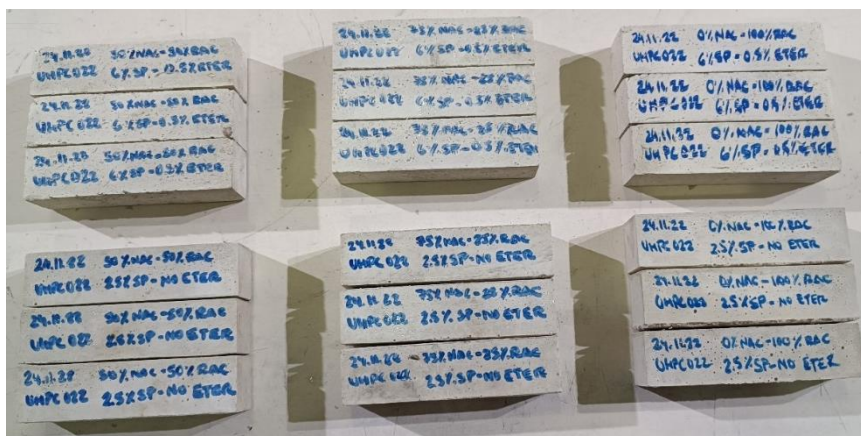


Figura 41. Probetas curadas por cada dosificación para hormigón blanco con áridos reciclados.

### 3.5.4. Descripción del equipo de ensayo

Con respecto al UHPC con áridos reciclados, se realizaron los ensayos de flexión y compresión en las máquinas de ensayo de resistencia Series AUTOTEST y CIB de la marca IBERTEST.

#### 3.5.4.1. Serie AUTOTEST: Ensayos de compresión y flexión

Las máquinas de ensayo Serie AUTOTEST para los ensayos de flexión y compresión fue descrita en el ítem 3.3.4.1., la cual tiene una capacidad en compresión de 200 kN y una capacidad en flexión de 10 kN [75]. Las ventajas técnicas fueron descritas en el ítem 3.3.4.2.

### 3.5.5. Caracterización mecánica en estado endurecido

Para obtener unos valores representativos para la caracterización mecánica en estado endurecido del UHPC con árido reciclado se realizaron 2 tipos de ensayo: Ensayo de flexión y ensayo de compresión simple.

#### 3.5.5.1. Ensayo de flexión

La resistencia a la flexión se realizó bajo la normativa española UNE-EN 12390-5:2020 (Parte 5: Resistencia a flexión de probetas). El ensayo de flexión es el mismo

ensayo explicado en el ítem 3.3.5.1 realizado en la parte de HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA.

### 3.5.5.2. Ensayo de compresión

La resistencia a la compresión se realizó bajo la normativa española UNE-EN 12390-4:2020 (Parte 4: Resistencia a compresión. Características de la máquina de ensayo). El ensayo de compresión es el mismo ensayo explicado en el ítem 3.3.5.2 realizado en la parte de HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA.

### 3.5.6. Ensayos de probetas

#### 3.5.6.1. Ensayo de flexión

Como se observa en la Tabla 2, el número total de probetas elaboradas y ensayadas fue de 96 probetas en total. Fueron 8 dosificaciones que se desarrollaron para el hormigón blanco con áridos reciclados, obteniendo 12 probetas para cada dosificación. Por tanto, fueron 96 ensayos en total, 12 para cada dosificación (3 por cada intervalo de tiempo: a 1 día, 7 días, 21 días y 28 días).

El procedimiento se explicó en el ítem 3.3.5.1. En la *Figura 42* se observa algunos ensayos a flexión que se realizaron para cada dosificación correspondiente.



Mezcla 1: 100% NA – 0% RA, sin éter



Mezcla 1: 100% NA – 0% RA, con éter



Mezcla 2: 75% NA – 25% RA, sin éter



Mezcla 2: 75% NA – 25% RA, con éter

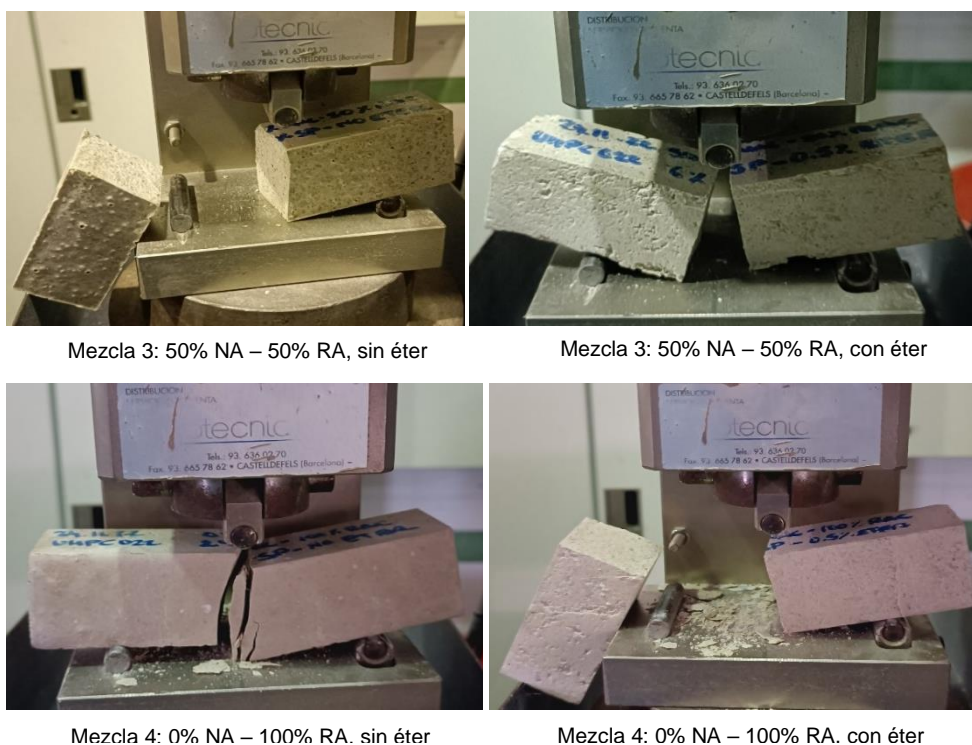


Figura 42. Ensayos a flexión por cada dosificación para hormigón blanco con áridos reciclados.

En la Figura 43 se observa las probetas ensayadas a flexión por las dosificaciones para hormigón blanco con áridos reciclados al 25%, 50% y 100%, con y sin éter.

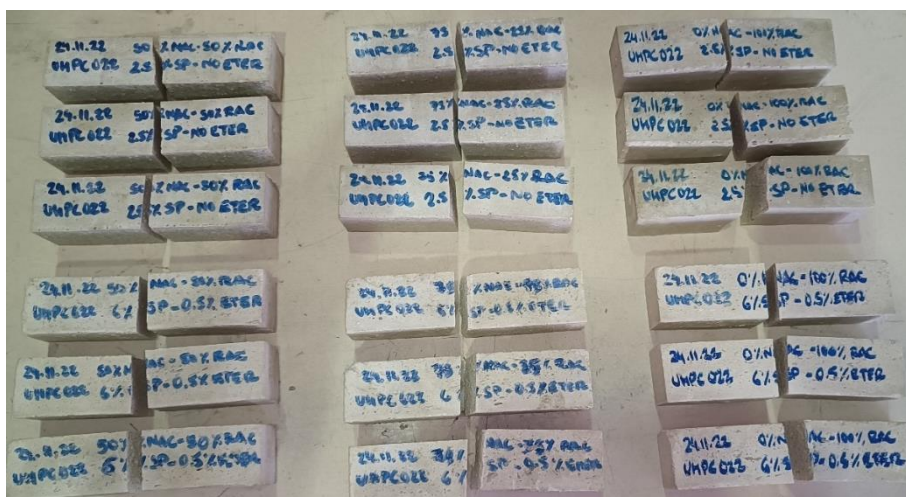


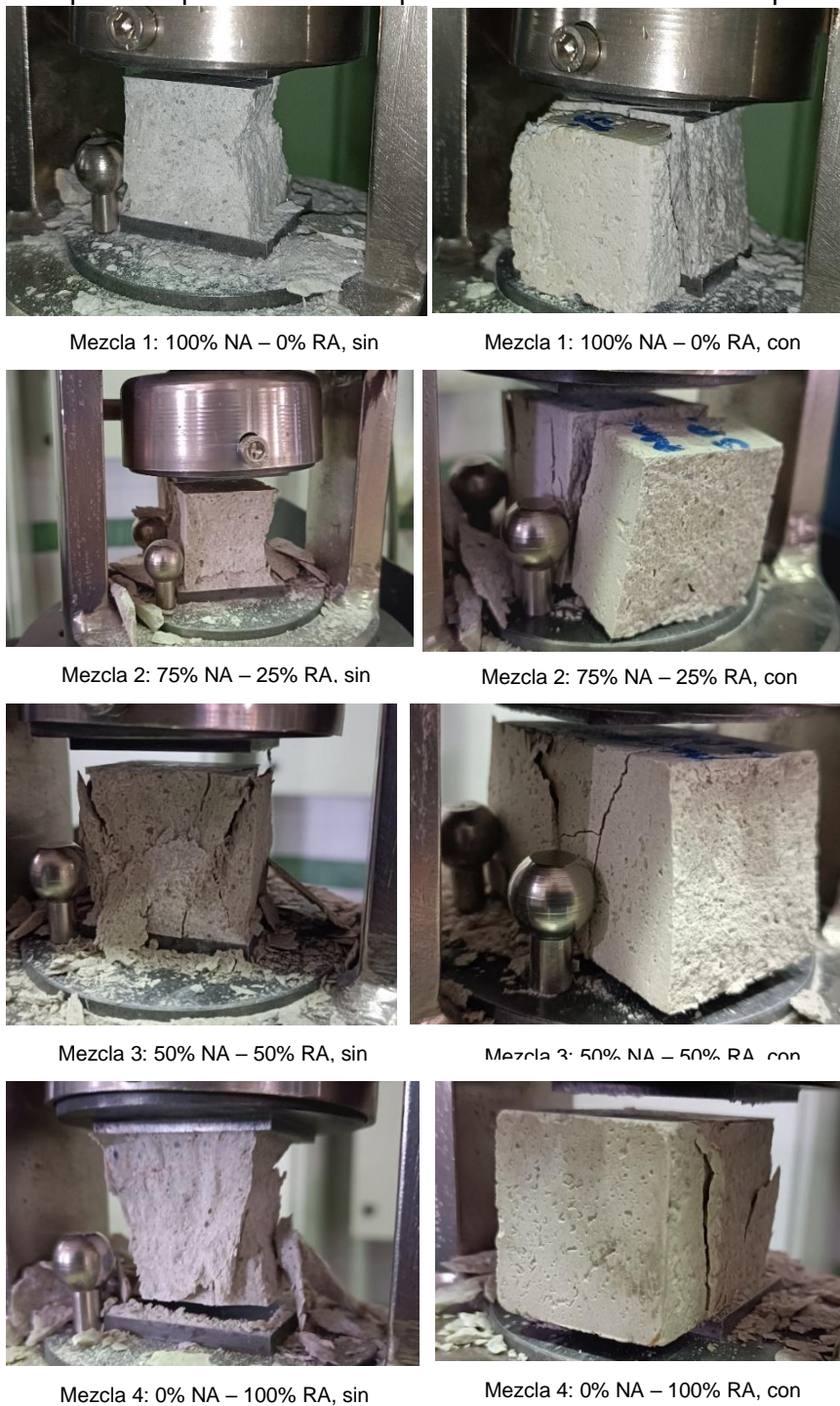
Figura 43. Probetas ensayadas a flexión por cada dosificación para hormigón blanco con áridos reciclados.

### 3.5.6.2. Ensayo de compresión

Como se observó en la Tabla 2, el número total de probetas elaboradas y ensayadas fue de 192 probetas en total. Fueron 8 dosificaciones que se desarrollaron para el hormigón blanco con áridos reciclados, obteniendo 12 probetas para cada dosificación. Por tanto, fueron 192 ensayos en total, 24 para cada dosificación (6 por cada intervalo de

tiempo: a 1 día, 7 días, 14 días y 28 días). De cada probeta elaborada, se obtienen 2 ensayos a compresión, como se muestra en la Figura 43.

El procedimiento se explicó en el ítem 3.5.5.2. En la *Figura 44* se observa algunos ensayos a compresión que se realizaron para cada dosificación correspondiente.



*Figura 44. Ensayos a compresión por cada dosificación para hormigón blanco con áridos reciclados.*

# CAPÍTULO IV. RESULTADOS

## 4.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo IV se abordan los resultados y análisis de los resultados de los ensayos realizados para cada etapa. Para la etapa de hormigón gris se mostraron, describieron los resultados y se realizó el análisis de resultados de los ensayos a flexión y compresión. Para la etapa de hormigón blanco se mostraron, describieron los resultados y se realizó el análisis de los ensayos a flexión y compresión, además, se realizaron comentarios respecto a la optimización en impresión de cada aditivo usado. Para la etapa de hormigón blanco con fibras metálicas se mostraron, describieron los resultados y se realizó el análisis de los ensayos a flexión, flexo – tracción y compresión. Para la etapa de hormigón blanco con árido reciclado se mostraron, describieron los resultados y se realizó el análisis de resultados de los ensayos a flexión y compresión. Por último, en las etapas correspondientes, se observa la influencia del éter, de las fibras metálicas y del árido reciclado a una tasa de reemplazo creciente en las resistencias a flexión y compresión.

## 4.2. HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA

### 4.2.1. Ensayos de probetas de hormigón gris

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos a los 1, 7, 14 y 28 días.

#### 4.2.1.1. Ensayo a flexión

Los resultados a 1, 7, 14 y 28 días mediante ensayo a flexión para las 5 dosificaciones fabricadas con hormigón gris se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Resultados de ensayo a flexión de probetas de hormigón gris a 1, 7, 14 y 28 días.

UHPC Gris - Resultados a Flexión (en MPa)				
Dosificación	1 día	7 días	14 días	28 días
a/c = 0.20 (SP 2.5%)	1.8	3.0	3.5	3.6
a/c = 0.21 (SP 2.5%)	1.8	2.7	2.9	3.7
a/c = 0.21 (SP 3%)	1.8	3.1	3.3	3.1
a/c = 0.22 (SP 2.5%)	1.9	3.2	3.3	3.2
a/c = 0.23 (SP 2.5%)	2.1	3.6	3.5	3.1

La Tabla 12 muestra:

- Al día 1, resistencias desde 1.8 a 2.1 MPa, siendo 1.8 MPa para la dosificación con a/c = 0.20 y 2.1 MPa para la dosificación con a/c = 0.23 siendo un 15.6% mayor con respecto a la resistencia más baja.
- Al día 7, resistencias desde 2.7 a 3.6 MPa, siendo 2.7 MPa para la dosificación con a/c = 0.21 (SP 2.5%) y 3.6 MPa para la dosificación con a/c = 0.23 siendo un 33.8% mayor con respecto a la resistencia más baja.
- Al día 14, resistencias desde 2.9 a 3.5 MPa, siendo 2.9 MPa para la dosificación con a/c = 0.21 (SP 2.5%) y 3.5 MPa para la dosificación con a/c = 0.20 siendo un 19.1% mayor con respecto a la resistencia más baja.
- Al día 28, resistencias desde 3.1 a 3.7 MPa, siendo 3.1 MPa para la dosificación con a/c = 0.23 y 3.7 MPa para la dosificación con a/c = 0.21 (SP 2.5%) siendo un 18.8% mayor con respecto a la resistencia más baja.

#### 4.2.1.2. Ensayo a compresión

Los resultados a 1, 7, 14 y 28 días mediante ensayo a compresión para las 5 dosificaciones fabricadas con hormigón gris se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados de ensayo a compresión de probetas de hormigón gris a 1, 7, 14 y 28 días.

UHPC Gris - Resultados a Compresión (en MPa)				
Dosificación	1 día	7 días	14 días	28 días
a/c = 0.20 (SP 2.5%)	30.1	48.1	56.2	56.3
a/c = 0.21 (SP 2.5%)	23.4	39.6	45.1	46.9
a/c = 0.21 (SP 3%)	31.7	46.7	49.3	47.3
a/c = 0.22 (SP 2.5%)	31.6	46.2	50.5	48.6
a/c = 0.23 (SP 2.5%)	39.5	63.4	67.1	69.1

La Tabla 13 muestra:

- Al día 1, resistencias desde 23.4 a 39.5 MPa, siendo 23.4 MPa para la dosificación con a/c = 0.21 (SP 2.5%) y 39.5 MPa para la dosificación con a/c = 0.23 siendo un 68.7% mayor con respecto a la resistencia más baja.
- Al día 7, resistencias desde 39.6 a 63.4 MPa, siendo 39.6 MPa para la dosificación con a/c = 0.21 (SP 2.5%) y 63.4 MPa para la dosificación con a/c = 0.23 siendo un 60.3% mayor con respecto a la resistencia más baja.
- Al día 14, resistencias desde 45.1 a 67.1 MPa, siendo 45.1 MPa para la dosificación con a/c = 0.21 (SP 2.5%) y 67.1 MPa para la dosificación con a/c = 0.23 siendo un 48.6% mayor con respecto a la resistencia más baja.
- Al día 28, resistencias desde 46.9 a 69.1 MPa, siendo 46.9 MPa para la dosificación con a/c = 0.21 (SP 2.5%) y 69.1 MPa para la dosificación con a/c = 0.23 siendo un 47.3% mayor con respecto a la resistencia más baja.

#### 4.2.1.3. Análisis de resultados

Una vez obtenidos los resultados de flexión y compresión a edades tempranas, se procede a analizar dichos resultados.

#### Ensayos a flexión

La Tabla 14 muestra los resultados de la resistencia promedio de flexión para cada dosificación y el coeficiente de variación a 1, 7, 14 y 28 días de las probetas de hormigón gris ensayadas.

Tabla 14. Resultados de resistencias a flexión y COV de probetas de hormigón gris.

UHPC Gris - Resistencias a Flexión y COV										
Días	a/c = 0.20 (SP 2.5%)		a/c = 0.21 (SP 2.5%)		a/c = 0.21 (SP 3%)		a/c = 0.22 (SP 2.5%)		a/c = 0.23 (SP 2.5%)	
	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)
1	1.8	8.9%	1.8	2.0%	1.8	8.4%	1.9	7.8%	2.1	8.8%
7	3.0	7.0%	2.7	5.9%	3.1	4.4%	3.2	3.4%	3.6	11.0%
14	3.5	3.3%	2.9	6.4%	3.3	7.1%	3.3	2.4%	3.5	5.5%
28	3.6	3.9%	3.7	8.3%	3.1	3.9%	3.2	7.3%	3.1	10.3%

De la Tabla 14 se observa que:

- La resistencia promedio a los 28 días de la dosificación  $a/c = 0.20$  (SP 2.5%) fue de 3.6 MPa, de la dosificación  $a/c = 0.21$  (SP 2.5%) fue de 3.7 MPa, de la dosificación  $a/c = 0.21$  (SP 3%) fue de 3.1 MPa, de la dosificación  $a/c = 0.22$  (SP 2.5%) fue de 3.2 MP y de la dosificación  $a/c = 0.23$  (SP 2.5%) fue de 3.1 MPa.
- La mayor resistencia a flexión a 1 día fue de la dosificación  $a/c = 0.23$  (SP 2.5%) con 2.1 MPa, a 7 días fue de la dosificación  $a/c = 0.23$  (SP 2.5%) con 3.6 MPa, a 14 días fue de la dosificación  $a/c = 0.23$  (SP 2.5%) con 3.5 MPa; sin embargo, a 28 días fue de la dosificación  $a/c = 0.21$  (SP 2.5%) con 3.7 MPa.
- Las resistencias a flexión de las dosificaciones  $a/c = 0.20$  (SP 2.5%) y  $a/c = 0.21$  (SP 2.5%) aumentan su resistencia gradualmente con el paso de los días a edades tempranas.
- Para las dosificaciones  $a/c = 0.22$  (SP 2.5%) y  $a/c = 0.23$  (SP 2.5%), los resultados a 28 días tuvieron un efecto reductor de resistencia debido al efecto de la propia fluidez de la mezcla produciendo una exudación excesiva y disgregando parcialmente el material, aunque no se haya visto visualmente, lo que afectó la resistencia a flexión.
- De igual manera para la dosificación  $a/c = 0.21$  (SP 3%), el resultado a 28 días tuvo un efecto reductor de resistencia debido al exceso de SP generando una mezcla demasiado fluida y disgregando el material parcialmente, afectando la resistencia a flexión.
- Se obtuvieron COV menores al 25% lo que significa que se tuvo dispersiones muy bajas en los resultados de los ensayos de cada dosificación. Se debe tener en cuenta que, los resultados de ensayos en probetas pequeñas tienen variabilidades más altas que ensayarlas en probetas grandes.

Finalmente, de los resultados de resistencia a flexión por cada dosificación y por cada día de ensayo se obtiene la *Figura 45*.



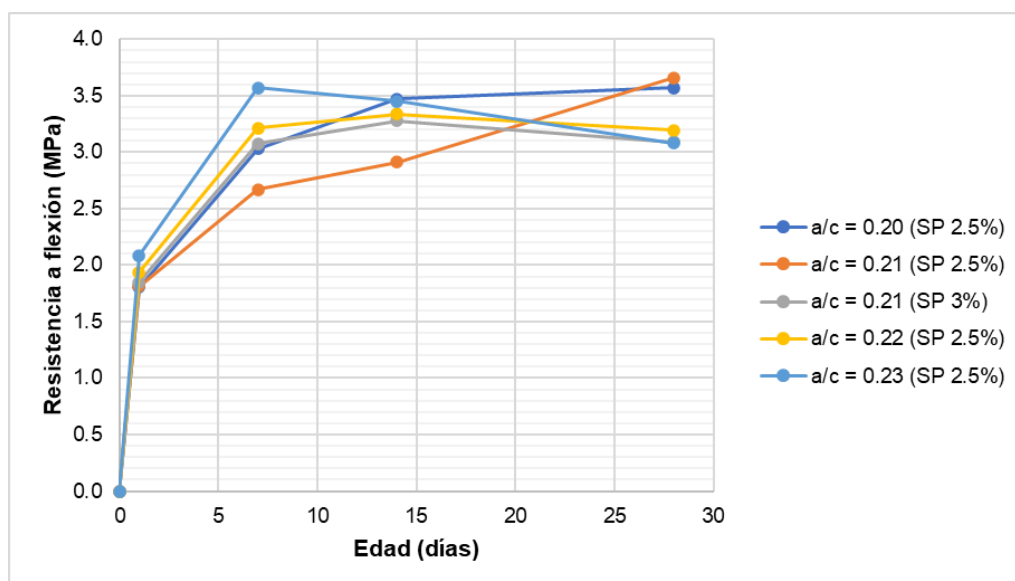


Figura 45. Resultados de ensayo a flexión de probetas de hormigón gris.

De la Figura 45 se puede observar que la menor resistencia a flexión a los 28 días fue de la dosificación  $a/c = 0.23$  (SP 2.5%) con 3.1 MPa, mientras que la mayor resistencia a flexión fue de la dosificación  $a/c = 0.21$  (SP 2.5%) con 3.6 MPa siendo un 18.8% mayor que la resistencia más baja.

### Ensayos a compresión

La Tabla 15 muestra los resultados de la resistencia promedio de compresión para cada dosificación y el coeficiente de variación a 1, 7, 14 y 28 días de las probetas de hormigón gris ensayadas.

Tabla 15. Resultados de resistencias a compresión y COV de probetas de hormigón gris.

UHPC Gris - Resistencias a Compresión y COV										
Días	a/c = 0.20 (SP 2.5%)		a/c = 0.21 (SP 2.5%)		a/c = 0.21 (SP 3%)		a/c = 0.22 (SP 2.5%)		a/c = 0.23 (SP 2.5%)	
	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)
1	30.1	1.2%	23.4	11.4%	31.7	3.8%	31.6	1.4%	39.5	6.2%
7	48.1	3.6%	39.6	6.2%	46.7	3.4%	46.2	7.3%	63.4	1.7%
14	56.2	5.8%	45.1	10.1%	49.3	2.2%	50.5	2.4%	67.1	6.8%
28	56.3	14.7%	46.9	12.4%	47.3	11.8%	48.6	9.1%	69.1	3.3%

De la Tabla 15 se observa que:

- La resistencia promedio a los 28 días de la dosificación  $a/c = 0.20$  (SP 2.5%) fue de 56.3 MPa, de la dosificación  $a/c = 0.21$  (SP 2.5%) fue de 46.9 MPa, de la dosificación  $a/c = 0.21$  (SP 3%) fue de 47.3 MPa, de la dosificación  $a/c = 0.22$  (SP 2.5%) fue de 48.6 MP y de la dosificación  $a/c = 0.23$  (SP 2.5%) fue de 69.1 MPa.

- Comparando la resistencia de la dosificación  $a/c = 0.21$  (SP 3%) es mayor que la dosificación  $a/c = 0.21$  (SP 2.5%) dado que el superplastificante añadido fue un 0.5% más, ocasionando que se hidrate más el cemento, la cohesión de las partículas aumente y que el % de aire sea menor en la matriz cementosa con lo cual alcanzaría mayor resistencia a compresión a edades tempranas.
- La mayor resistencia a compresión a 1, 7, 14 y 28 días fue de la dosificación  $a/c = 0.23$  (SP 2.5%) con 39.5 MPa, 63.4 MPa, 67.1 MPa y 69.1 MPa respectivamente.
- Se obtuvieron COV menores al 25% lo que significa que se tuvo dispersiones muy bajas en los resultados de los ensayos de cada dosificación. Se debe tener en cuenta que, los resultados de ensayos en probetas pequeñas tienen variabilidades más altas que ensayarlas en probetas grandes.
- Las resistencias a flexión de las dosificaciones  $a/c = 0.20$  (SP 2.5%),  $a/c = 0.21$  (SP 2.5%) y  $a/c = 0.23$  (SP 2.5%) aumentan su resistencia gradualmente con el paso de los días a edades tempranas.
- Para las dosificaciones  $a/c = 0.21$  (SP 3%) y  $a/c = 0.22$  (SP 2.5%), los resultados a 28 días tuvieron un efecto reductor de resistencia debido al efecto de la propia fluidez de la mezcla produciendo una exudación excesiva y disgregando parcialmente el material, aunque no se haya visto visualmente, lo que afectó la resistencia a compresión.
- Los % de COV van disminuyendo a medida que la relación  $a/c$  aumenta, esto se debe a que hay más agua en la mezcla, y por tanto se llenan esas partículas de aire con el agua aumentada, lo que genera que la matriz cementosa sea menos porosa y el cemento se hidrate mejor durante el amasado, alcanzando el hormigón su máxima resistencia a los 28 días.

Finalmente, de los resultados de resistencia a compresión por cada dosificación y por cada día de ensayo se obtiene la *Figura 46*.

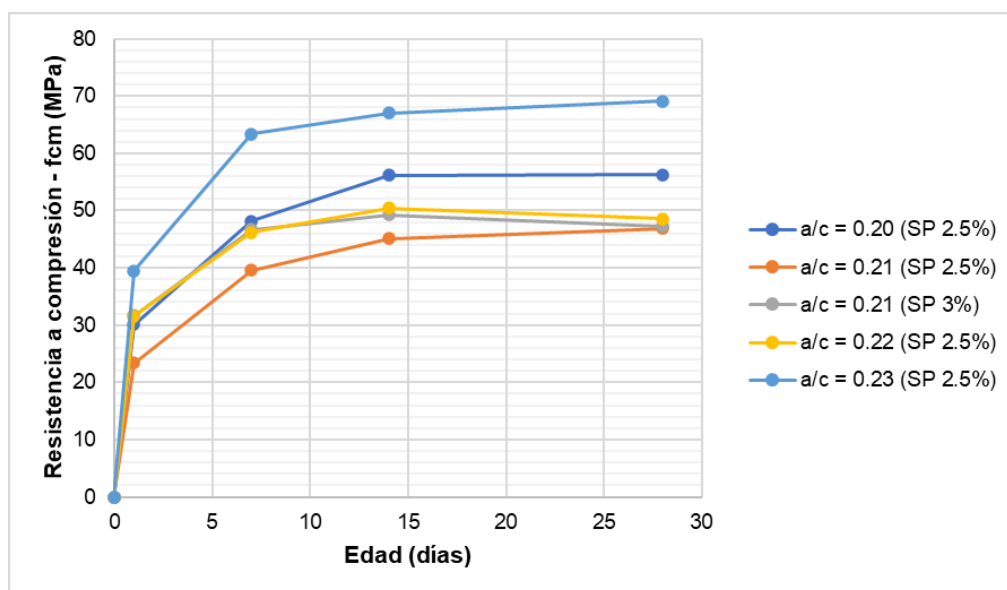


Figura 46. Resultados de ensayo a compresión de probetas de hormigón gris.

De la Figura 46 se puede observar que la menor resistencia a compresión a los 28 días fue de la dosificación  $a/c = 0.21$  (SP 2.5%) con 46.9 MPa, mientras que la mayor resistencia a compresión fue de la dosificación  $a/c = 0.23$  (SP 2.5%) con 69.1 MPa siendo un 47.3% mayor que la resistencia más baja. La dosificación con mayor relación  $a/c$  alcanzó la mayor resistencia debido al agua aumentada, llenando el % de aire de la matriz cementosa por agua e hidratando más el cemento, generando mayor resistencia del hormigón.

#### 4.2.2. Ensayos de probetas de hormigón blanco

A continuación, se muestran los resultados de las probetas de hormigón blanco a los 1, 7, 14 y 28 días.

##### 4.2.2.1. Ensayo a flexión

Los resultados a 1, 7, 14 y 28 días mediante ensayo a flexión para las 4 dosificaciones fabricadas con hormigón blanco se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Resultados de ensayo a flexión de probetas de hormigón gris a 1, 7, 14 y 28 días.

UHPC Blanco - Resultados a Flexión (en MPa)				
Dosificación	1 día	7 días	14 días	28 días
$a/c = 0.19$		3.5	3.1	4.2
$a/c = 0.20$	2.7	3.3	4.5	4.6
$a/c = 0.21$	3.4	4.8	4.4	4.8
$a/c = 0.22$	3.0	4.0	4.0	5.0

La Tabla 16 muestra:

- Al día 1, resistencias desde 2.7 a 3.4 MPa, siendo 2.7 MPa para la dosificación con  $a/c = 0.20$  y 3.4 MPa para la dosificación con  $a/c = 0.21$  siendo un 23.9% mayor con respecto a la resistencia más baja. No se hicieron probetas para la dosificación  $a/c = 0.19$ .
- Al día 7, resistencias desde 3.3 a 4.8 MPa, siendo 3.3 MPa para la dosificación con  $a/c = 0.20$  y 4.8 MPa para la dosificación con  $a/c = 0.21$  siendo un 46.5% mayor con respecto a la resistencia más baja.
- Al día 14, resistencias desde 3.1 a 4.5 MPa, siendo 3.1 MPa para la dosificación con  $a/c = 0.19$  y 4.5 MPa para la dosificación con  $a/c = 0.20$  siendo un 42.2% mayor con respecto a la resistencia más baja.
- Al día 28, resistencias desde 4.2 a 5.0 MPa, siendo 4.2 MPa para la dosificación con  $a/c = 0.19$  y 5.0 MPa para la dosificación con  $a/c = 0.22$  siendo un 18.4% mayor con respecto a la resistencia más baja.

#### 4.2.2.2. Ensayo a compresión

Los resultados a 1, 7, 14 y 28 días mediante ensayo a compresión para las 4 dosificaciones fabricadas con hormigón blanco se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Resultados de ensayo a compresión de probetas de hormigón gris a 1, 7, 14 y 28 días.

UHPC Blanco - Resultados a Compresión (en MPa)				
Dosificación	1 día	7 días	14 días	28 días
$a/c = 0.19$		62.6	69.2	74.7
$a/c = 0.20$	48.3	76.7	82.1	88.6
$a/c = 0.21$	54.7	72.1	81.1	87.1
$a/c = 0.22$	56.9	81.9	85.5	95.2

La Tabla 17 muestra:

- Al día 1, resistencias desde 48.3 a 56.9 MPa, siendo 48.3 MPa para la dosificación con  $a/c = 0.20$  y 56.9 MPa para la dosificación con  $a/c = 0.22$  siendo un 17.7% mayor con respecto a la resistencia más baja. No se obtuvieron resultados para la dosificación  $a/c = 0.19$ .
- Al día 7, resistencias desde 62.6 a 81.9 MPa, siendo 62.6 MPa para la dosificación con  $a/c = 0.19$  y 81.9 MPa para la dosificación con  $a/c = 0.22$  siendo un 30.9% mayor con respecto a la resistencia más baja.

- Al día 14, resistencias desde 69.2 a 85.5 MPa, siendo 69.2 MPa para la dosificación con  $a/c = 0.19$  y 85.5 MPa para la dosificación con  $a/c = 0.22$  siendo un 23.6% mayor con respecto a la resistencia más baja.
- Al día 28, resistencias desde 74.7 a 95.2 MPa, siendo 74.7 MPa para la dosificación con  $a/c = 0.19$  y 95.2 MPa para la dosificación con  $a/c = 0.22$  siendo un 27.5% mayor con respecto a la resistencia más baja.

#### 4.2.2.3. Análisis de resultados

Una vez obtenidos los resultados de flexión y compresión a edades tempranas, se procede a analizar dichos resultados.

#### Ensayos a flexión

La Tabla 18 muestra los resultados de la resistencia promedio de flexión para cada dosificación y el coeficiente de variación a 1, 7, 14 y 28 días de las probetas de hormigón blanco ensayadas.

Tabla 18. Resultados de resistencias a flexión y COV de probetas de hormigón blanco.

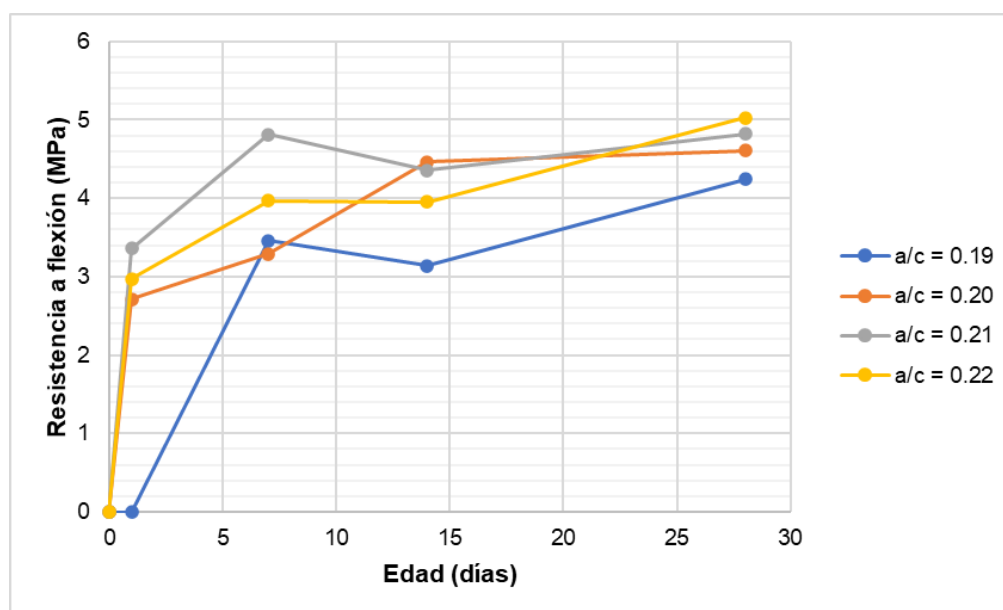
UHPC Blanco - Resistencias a Flexión y COV								
Días	a/c = 0.19		a/c = 0.20		a/c = 0.21		a/c = 0.22	
	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)
1			2.7	2.3%	3.4	8.2%	3.0	1.7%
7	3.5	2.7%	3.3	11.8%	4.8	6.6%	4.0	7.1%
14	3.1	7.1%	4.5	10.9%	4.4	2.2%	4.0	5.3%
28	4.2	8.3%	4.6	2.4%	4.8	9.2%	5.0	2.2%

De la Tabla 18 se observa que:

- La resistencia promedio a los 28 días de la dosificación  $a/c = 0.19$  fue de 4.2 MPa, de la dosificación  $a/c = 0.20$  fue de 4.6 MPa, de la dosificación  $a/c = 0.21$  fue de 4.8 MPa y de la dosificación  $a/c = 0.22$  fue de 5.0 MPa. Esto quiere decir que a mayor relación de  $a/c$ , mayor resistencia a flexión, esto se debe a que hay más agua en la mezcla, y por tanto se llenan esas partículas de aire con el agua adicional a la relación  $a/c$ , lo que genera que la matriz cementosa sea menos porosa y el cemento se hidrate mejor durante el amasado, alcanzando el hormigón su máxima resistencia a los 28 días.
- La mayor resistencia a compresión a 1 día fue de la dosificación  $a/c = 0.21$  con 3.4 MPa, a 7 días fue de la dosificación  $a/c = 0.21$  con 4.8 MPa, a 14 días fue de la dosificación  $a/c = 0.20$  con 4.5 MPa y, a 28 días fue de la dosificación  $a/c = 0.22$  con 5.0 MPa.

- Se obtuvieron COV menores al 25% lo que significa que se tuvo dispersiones muy bajas en los resultados de los ensayos de cada dosificación. Se debe tener en cuenta que, los resultados de ensayos en probetas pequeñas tienen variabilidades más altas que ensayarlas en probetas grandes.
- Las resistencias a flexión de las dosificaciones con hormigón blanco fueron mayores que las de hormigón gris debido a que el superplastificante actúa mejor en mezclas que contienen hormigón blanco. El cemento blanco tiene alto contenido de aluminato en su composición, y las moléculas de superplastificante se adsorben preferentemente sobre los aluminatos del cemento.
- El mejor comportamiento, en cuanto a resistencia con el paso de los días curados es la dosificación  $a/c = 0.22$ ; asimismo, fue la que alcanzó la máxima resistencia a flexión con respecto a las demás dosificaciones a los 28 días.

Finalmente, de los resultados de resistencia a flexión por cada dosificación y por cada día de ensayo se obtiene la *Figura 47*.



*Figura 47. Resultados de ensayo a flexión de probetas de hormigón blanco.*

De la Figura 47 se puede observar que la menor resistencia a flexión a los 28 días fue de la dosificación  $a/c = 0.19$  con 4.2 MPa, mientras que la mayor resistencia a flexión fue de la dosificación  $a/c = 0.22$  con 5.0 MPa siendo un 18.4% mayor que la resistencia más baja.

## Ensayos a compresión

La Tabla 19 muestra los resultados de la resistencia promedio de flexión para cada dosificación y el coeficiente de variación a 1, 7, 14 y 28 días de las probetas de hormigón blanco ensayadas.

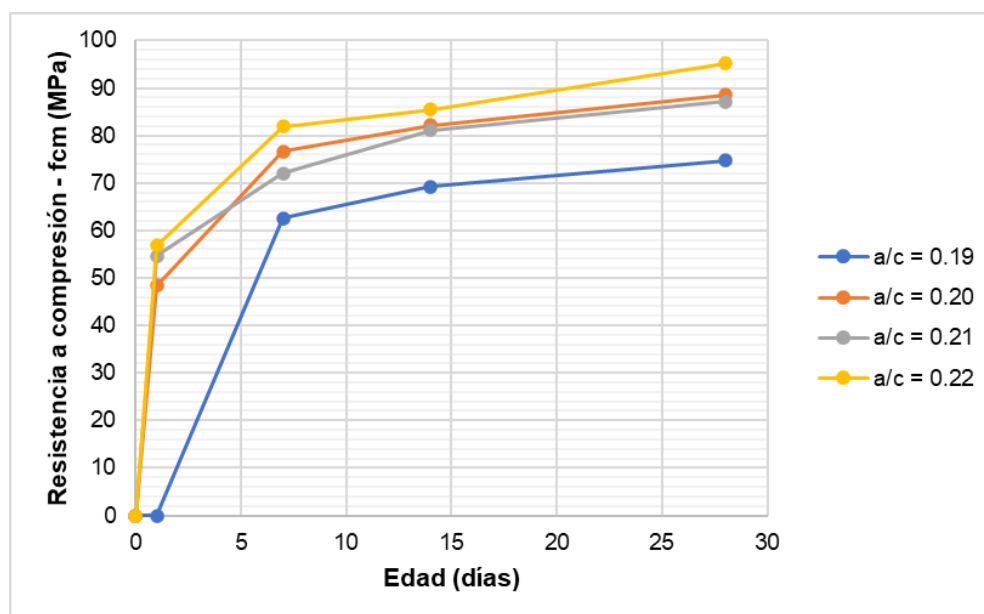
Tabla 19. Resultados de resistencias a compresión y COV de probetas de hormigón blanco.

UHPC Blanco - Resistencias a Compresión y COV								
Días	a/c = 0.19		a/c = 0.20		a/c = 0.21		a/c = 0.22	
	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)
1			48.3	1.1%	54.7	3.6%	56.9	1.1%
7	62.6	2.4%	76.7	2.2%	72.1	3.5%	81.9	2.7%
14	69.2	3.0%	82.1	2.8%	81.1	3.0%	85.5	4.4%
28	74.7	3.3%	88.6	1.9%	87.1	2.9%	95.2	3.8%

De la Tabla 19 se observa que:

- La resistencia promedio a los 28 días de la dosificación  $a/c = 0.19$  fue de 74.7 MPa, de la dosificación  $a/c = 0.20$  fue de 88.6 MPa, de la dosificación  $a/c = 0.21$  fue de 87.1 MPa y de la dosificación  $a/c = 0.22$  fue de 95.2 MP. Esto quiere decir que a mayor relación de  $a/c$ , mayor resistencia a compresión, esto se debe a que hay más agua en la mezcla, y por tanto se llenan esas partículas de aire con el agua adicional a la relación  $a/c$ , lo que genera que la matriz cementosa sea menos porosa y el cemento se hidrate mejor durante el amasado, alcanzando el hormigón su máxima resistencia a los 28 días.
- Se obtuvieron COV menores al 25% lo que significa que se tuvo dispersiones muy bajas en los resultados de los ensayos de cada dosificación. Se debe tener en cuenta que, los resultados de ensayos en probetas pequeñas tienen variabilidades más altas que ensayarlas en probetas grandes.
- Las resistencias a compresión de las dosificaciones con hormigón blanco fueron mayores que las de hormigón gris debido a que el superplastificante actúa mejor en mezclas que contienen hormigón blanco. El cemento blanco tiene alto contenido de aluminato en su composición, y las moléculas de superplastificante se adsorben preferentemente sobre los aluminatos del cemento.
- La mayor resistencia a flexión a 1, 7, 14 y 28 días fue de la dosificación  $a/c = 0.22$  con 56.9 MPa, 81.9 MPa, 85.5 MPa y 95.2 MPa respectivamente, teniendo el mejor comportamiento, en cuanto a resistencia a compresión con el paso de los días curados; asimismo, fue la que alcanzó la máxima resistencia a compresión con respecto a las demás dosificaciones a los 28 días.

Finalmente, de los resultados de resistencia a compresión por cada dosificación y por cada día de ensayo se obtiene la *Figura 48*.



*Figura 48. Resultados de ensayo a compresión de probetas de hormigón blanco.*

De la *Figura 48* se puede observar que la menor resistencia a compresión a los 28 días fue de la dosificación  $a/c = 0.19$  con 74.7 MPa, mientras que la mayor resistencia a compresión fue de la dosificación  $a/c = 0.22$  con 95.2 MPa siendo un 27.5% mayor que la resistencia más baja. Además, se puede observar que la dosificación  $a/c = 0.19$  siempre fue la menor resistencia, mientras que la dosificación  $a/c = 0.22$  siempre fue la mayor resistencia en cada día de ensayo.

Por tanto, se opta por elegir la dosificación  $a/c = 0.22$  para la campaña experimental con adiciones de fibras metálicas y árido reciclado por el buen comportamiento tanto en resistencia a flexión como a compresión, alcanzando las máximas resistencias a edades tempranas.

#### 4.2.3. Optimización en impresión 3D

De acuerdo con la impresión 3D manual con adición de cal, éter y modulador de viscosidad se obtuvieron los siguientes resultados visuales. La *Figura 49* muestra la máquina amasadora con la que se realizaron las impresiones 3D manuales, mientras que en la *Figura 50* se muestra la impresión 3D de forma manual.





Figura 49. Máquina amasadora para impresión 3D manual.



Figura 50. Impresión 3D manual.

#### 4.2.3.1. Impresión 3D con Cal

Se realizaron 6 impresiones 3D con diferente dosificación con cal tal como se mostró en la Tabla 5. La *Figura 51* muestra la impresión 3D de forma manual de hormigón blanco con cal.



Figura 51. Impresión 3D de hormigón blanco con cal.

De las dosificaciones de hormigón blanco con cal (al 5% cw), se obtuvieron muestras con una mucha fluidez, lo que evita la formación de filamentos de impresión que puedan ser impresos uno encima de otro, no pudiendo imprimir capas sucesivas, tal como se muestran en la *Figura 52*, *Figura 53* y *Figura 54*.

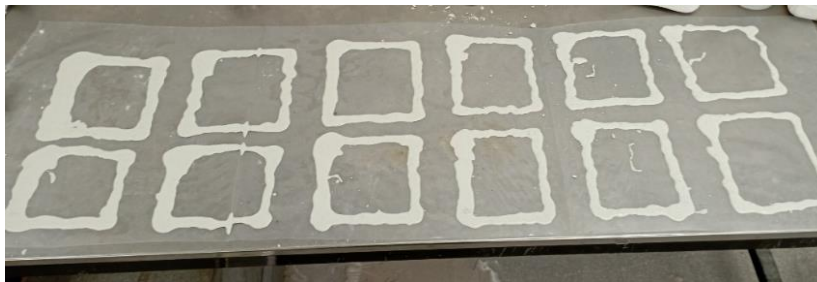


Figura 52. Impresión 3D con cal de las 6 dosificaciones, primera muestra.



Figura 53. Impresión 3D con cal de las 6 dosificaciones, segunda muestra.



Figura 54. Impresión 3D con cal de 5/6 dosificaciones, tercera muestra.

#### 4.2.3.2. Impresión 3D con Éter

De las dosificaciones de hormigón blanco con éter, se obtuvieron muestras menos fluidas y más trabajables que las que contenían cal. A diferencia de las muestras que contenían cal, estas muestras se pudieron imprimir para varios filamentos. Se imprimió hasta 3 capas. De la *Figura 55* a la *Figura 62* se pueden observar las impresiones manuales de las 8 dosificaciones mencionadas en la *Tabla 6*.

- a) M-1: SP 8% + 1% + Éter 1% (2 fases)

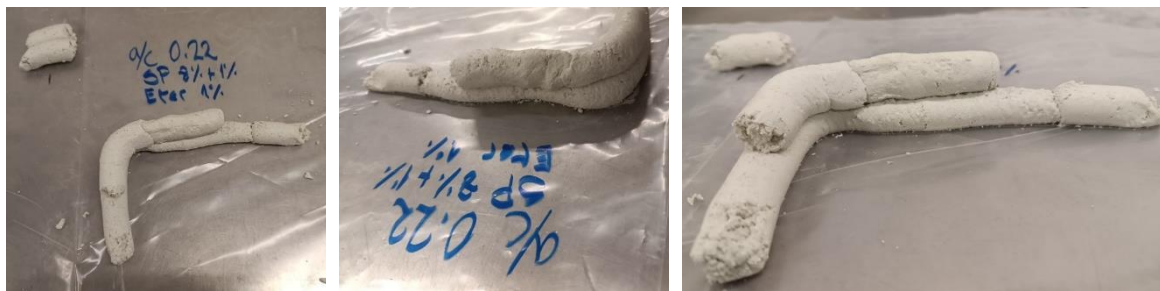


Figura 55. Impresión 3D con éter de la muestra 1.  
i) Vista en planta, ii) Vista lateral, iii) Vista frontal

b) M-2: SP 9% + 1% + Éter 1% (2 fases)



Figura 56. Impresión 3D con éter de la muestra 2.  
i) Vista en planta, ii) Vista lateral, iii) Vista frontal

c) M-3: SP 8% + 1% + Éter 1% (2 fases)



Figura 57. Impresión 3D con éter de la muestra 3.  
i) Vista en planta, ii) Vista lateral, iii) Vista frontal

d) M-4: SP 8% + 2% + Éter 1% (2 fases)



Figura 58. Impresión 3D con éter de la muestra 4.  
i) Vista en planta, ii) Vista lateral, iii) Vista frontal

e) M-5: SP 9% + 2% + Éter 1% (2 fases)



Figura 59. Impresión 3D con éter de la muestra 5.  
i) Vista en planta, ii) Vista lateral, iii) Vista frontal

f) M-6: SP 10% + 2% + Éter 1% (2 fases)



Figura 60. Impresión 3D con éter de la muestra 6.  
i) Vista en planta, ii) Vista lateral, iii) Vista frontal

g) M-7: SP 9% + 2% + Éter 0.5% (2 fases)



Figura 61. Impresión 3D con éter de la muestra 7.

h) M-8: SP 8% + 1% + Éter 0.5% (2 fases)



Figura 62. Impresión 3D con éter de la muestra 8.

Visualmente se puede observar que:

- La muestra 1 presenta una extrusión seca y no tan fluida como se esperaba. Tiene un aspecto plástico y el filamento no tiene continuidad. No hay buena adherencia entre capa y capa. Se imprimió 2 capas.
- La muestra 2 presenta una extrusión seca y no tan fluida como se esperaba. Tiene un aspecto plástico y el filamento tiene continuidad. No hay buena adherencia entre capa y capa. Se imprimió 2 capas.

- La muestra 3 presenta una extrusión seca y no tan fluida como se esperaba. Tiene un aspecto plástico y el filamento de la capa intermedia no tiene continuidad en la curva. No hay buena adherencia entre capa y capa. Se imprimió 3 capas.
- La muestra 4 presenta una extrusión seca y no tan fluida como se esperaba. Tiene un aspecto plástico y el filamento tiene continuidad. No hay buena adherencia entre capa y capa. Se imprimió 3 capas.
- La muestra 5 presenta una extrusión seca y no tan fluida como se esperaba. Tiene un aspecto plástico y el filamento tiene continuidad. No hay buena adherencia entre capa y capa. Se imprimió 3 capas.
- La muestra 6 presenta una extrusión seca y un poco más fluida que las anteriores muestras. Tiene un aspecto plástico y el filamento tiene continuidad. No hay buena adherencia entre capa y capa. Se imprimió 3 capas.
- La muestra 7 presenta una extrusión tan fluida que es imposible de imprimir varias capas.
- La muestra 8 presenta una extrusión trabajable y fluida. Tiene un aspecto plástico y el filamento tiene continuidad. Hay buena adherencia entre capa y capa. Se imprimió 2 capas.

De las 8 muestras impresas, la muestra 8 es la mezcla óptima para una correcta impresión 3D, dado que es fluida, imprimible y tiene buena adherencia entre capa y capa.

Por último, de la muestra 8 se realizó una verificación de la mezcla en estado fresco (luego de haber vaciado y darle forma en el molde de probetas), tal como se muestra en la *Figura 63*. Esto verifica que la mezcla es capaz de mantener la forma y la consistencia, la geometría misma del encofrado y de soportar su propio peso.



*Figura 63. Soporte de propio peso de la muestra 8 en estado fresco.*

### 4.2.3.3. Impresión 3D con Modulador de viscosidad

De las 8 dosificaciones mencionadas en la Tabla 7 de hormigón blanco con modulador de viscosidad, se obtuvieron muestras impresas tal como se muestran de la Figura 64 a la Figura 71.

a) M-1: SP 2.5% + MV 1%

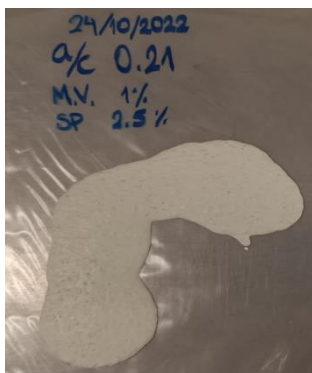


Figura 64. Impresión 3D con modulador de viscosidad de la muestra 1.

b) M-2: SP 1.5% + 0.5% (2 fases) + MV 1%

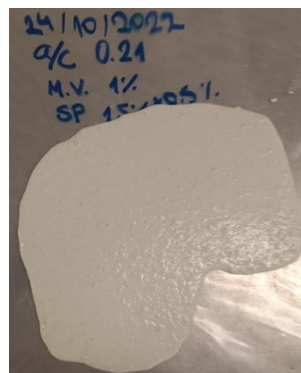


Figura 65. Impresión 3D con modulador de viscosidad de la muestra 2.

c) M-3: SP 2% + MV 1%

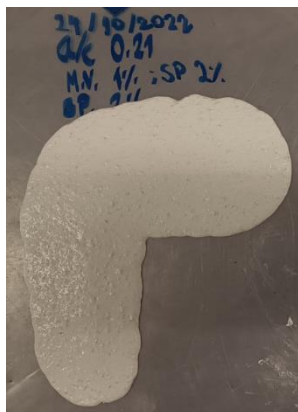


Figura 66. Impresión 3D con modulador de viscosidad de la muestra 3.

d) M-4: SP 1.75% + MV 0.5%



Figura 67. Impresión 3D con modulador de viscosidad de la muestra 4.

e) M-5: SP 1.5% + 0.25% (2 fases) + MV 0.5%

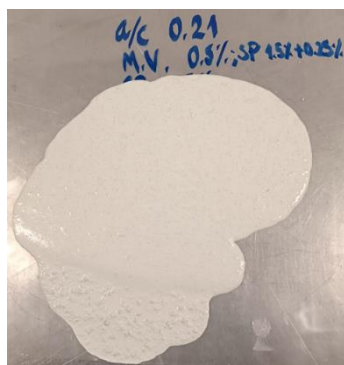


Figura 68. Impresión 3D con modulador de viscosidad de la muestra 5.

f) M-6: SP 1.5% + 0.1% (2 fases) + MV 0.75%

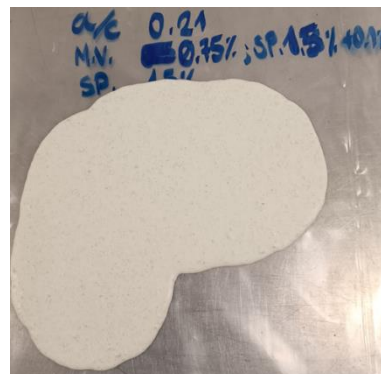


Figura 69. Impresión 3D con modulador de viscosidad de la muestra 6.

g) M-7: SP 1.75% + MV 0.75%

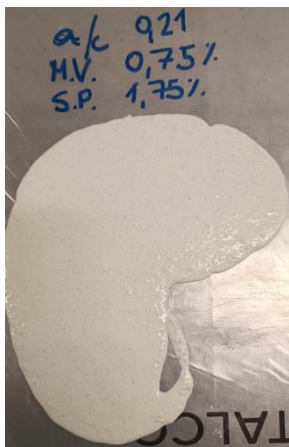


Figura 70. Impresión 3D con modulador de viscosidad de la muestra 7.

h) M-8: SP 1.25% + MV 0.5%

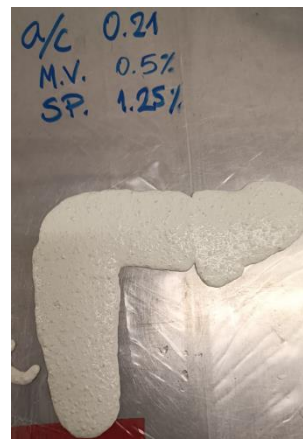


Figura 71. Impresión 3D con modulador de viscosidad de la muestra 8.

Estas dosificaciones de hormigón blanco con modulador de viscosidad (al 1% cw), se obtuvieron muestras con una elevada fluidez, lo que evita la formación de filamentos de impresión que puedan ser impresos uno encima de otro, no pudiendo imprimir capas sucesivas.

### 4.3. HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA CON FIBRAS METÁLICAS

#### 4.3.1. Ensayos de probetas

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos a los 1, 7, 21 y 28 días.

##### 4.3.1.1. Ensayo a flexión

Los resultados a 1, 7, 21 y 28 días mediante ensayo a flexión para las 4 dosificaciones fabricadas de hormigón blanco con fibras metálicas se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20. Resultados de ensayo a flexión y flexo – tracción de probetas de hormigón blanco con fibras metálicas a 1, 7, 21 y 28 días.

UHPC Blanco con fibras metálicas - Resultados a Flexión (en MPa)				
Dosificación	1 día	7 días	14 días	28 días
SP2.5_s/E_s/F	2.4	2.9	3.6	3.8
SP2.5_s/E_F20	2.5	6.6	7.3	7.7
SP6_E0.5_s/F	0.6	2.9	3.2	3.1
SP6_E0.5_F20	0.4	5.4	6.3	6.9

La Tabla 20 muestra:

- Al día 1, resistencias desde 0.4 a 2.5 MPa, siendo 0.4 MPa para la dosificación SP6\_E0.5\_F20 y 2.5 MPa para la dosificación SP2.5\_s/E\_F20, siendo un 576.2% mayor con respecto a la resistencia más baja. Además, se puede observar que la resistencia promedio de las dosificaciones con éter son mucho menores que la resistencia promedio de las dosificaciones sin éter.
- Al día 7, resistencias desde 2.9 a 6.6 MPa, siendo 2.9 MPa para la dosificación SP2.5\_s/E\_s/F y 6.6 MPa para la dosificación SP2.5\_s/E\_F20, siendo un 23.9% mayor con respecto a la resistencia más baja. Además, se puede observar que la resistencia promedio de las dosificaciones sin fibras siguen siendo mayores que las que contienen fibras.
- Al día 21, resistencias desde 3.2 a 7.3 MPa, siendo 3.2 MPa para la dosificación SP6\_E0.5\_s/F y 7.3 MPa para la dosificación SP2.5\_s/E\_F20, siendo un 16.6% mayor con respecto a la resistencia más baja. Además, se puede observar que la resistencia promedio de las dosificaciones sin fibras siguen siendo mayores que las que contienen fibras.
- Al día 28, resistencias desde 3.1 a 7.7 MPa, siendo 3.1 MPa para la dosificación con SP6\_E0.5\_s/F y 7.7 MPa para la dosificación con SP2.5\_s/E\_F20, siendo un 11.1% mayor con respecto a la resistencia más baja. Además, se puede observar que la resistencia promedio de las dosificaciones sin fibras fueron mayores que las que contienen fibras.

#### **4.3.1.2. Ensayo a flexo – tracción**

A continuación, se muestran los resultados del ensayo a flexo – tracción para las dosificaciones de hormigón blanco que contienen fibras. Cabe resaltar que, las resistencias residuales de diseño son  $fr_1$  (0.5mm) y  $fr_3$  (2.5mm).

#### **Dosificación SP2.5\_s/E\_F20**

Los resultados del ensayo a flexo – tracción y el coeficiente de variación a 7, 21 y 28 días de la dosificación SP2.5\_s/E\_F20 se muestran en la Tabla 21.



Tabla 21. Resultados de ensayo a flexo – tracción de probetas de hormigón con fibras metálicas de dosificación SP2.5\_s/E\_F20.

UHPC Blanco con fibras metálicas - Resultados a Flexo - tracción (a/c = 0.22 - SP2.5_s/E_F20)						
Resistencia residual	7 días		21 días		28 días	
	Resistencia (MPa)	COV (%)	Resistencia (MPa)	COV (%)	Resistencia (MPa)	COV (%)
fr1	1.6	23.7%	2.4	33.9%	1.3	36.8%
fr2	1.6	36.5%	2.3	38.2%	1.2	54.6%
fr3	1.4	46.9%	2.0	43.1%	1.0	60.5%
fr4	1.2	55.6%	1.6	56.0%	0.8	61.7%

La Tabla 21 muestra:

- La resistencia residual fr1 fue 1.6 MPa con un COV de 23.7% y la fr3 fue 1.4 MPa con un COV de 46.9% para el día 7.
- La resistencia residual fr1 fue 2.4 MPa con un COV de 33.9% y la fr3 fue 2.0 MPa con un COV de 43.1% para el día 21.
- La resistencia residual fr1 fue 1.3 MPa con un COV de 36.8% y la fr3 fue 0.8 MPa con un COV de 60.5% para el día 28.
- El mayor fr1 fue de 2.4 MPa en el día 21 y el mayor fr3 fue de 2.0 MPa en el día 21.

### Dosificación SP6\_E0.5\_F20

Los resultados del ensayo a flexo – tracción y el coeficiente de variación a 7, 21 y 28 días de la dosificación SP6\_E0.5\_F20 se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22. Resultados de ensayo a flexo – tracción de probetas de hormigón con fibras metálicas de dosificación SP6\_E0.5\_F20.

UHPC Blanco con fibras metálicas - Resultados a Flexo - tracción (a/c = 0.22 - SP6_E0.5_F20)						
Resistencia residual	7 días		21 días		28 días	
	Resistencia (MPa)	COV (%)	Resistencia (MPa)	COV (%)	Resistencia (MPa)	COV (%)
fr1	0.9	21.7%	1.0	34.9%	1.2	52.6%
fr2	1.1	20.0%	1.1	29.4%	1.4	41.3%
fr3	1.1	15.4%	1.1	27.9%	1.3	45.8%
fr4	1.0	14.7%	1.1	29.3%	1.3	45.4%

La Tabla 22 muestra:

- La resistencia residual fr1 fue 0.9 MPa con un COV de 21.7% y la fr3 fue 1.1 MPa con un COV de 15.4% para el día 7.
- La resistencia residual fr1 fue 1.0 MPa con un COV de 34.9% y la fr3 fue 1.1 MPa con un COV de 27.9% para el día 21.

- La resistencia residual fr1 fue 1.2 MPa con un COV de 52.6% y la fr3 fue 1.3 MPa con un COV de 45.8% para el día 28.
- El mayor fr1 fue de 1.2 MPa en el día 28 y el mayor fr3 fue de 1.3 MPa en el día 28.

#### 4.3.1.3. Ensayo a compresión

Los resultados a 1, 7, 21 y 28 días mediante ensayo a compresión para las 4 dosificaciones fabricadas de hormigón blanco con fibras metálicas se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23. Resultados de ensayo a flexión y flexo – tracción de probetas de hormigón blanco con fibras metálicas a 1, 7, 21 y 28 días.

UHPC Blanco con fibras metálicas - Resultados a Compresión (en MPa)				
Dosificación	1 día	7 días	14 días	28 días
SP2.5_s/E_s/F	48.6	80.1	91.3	97.8
SP2.5_s/E_F20	45.7	92.1	101.4	105.0
SP6_E0.5_s/F	4.9	52.3	61.1	64.9
SP6_E0.5_F20	3.0	57.8	64.6	68.0

La Tabla 23 muestra:

- Al día 1, resistencias desde 3.0 a 48.6 MPa, siendo 3.0 MPa para la dosificación con SP6\_E0.5\_F20 y 48.6 MPa para la dosificación con SP2.5\_s/E\_s/F, llegando a ser 1545.4% mayor con respecto a la resistencia más baja. Además, se puede observar que la resistencia promedio de las dosificaciones con éter son mucho menores que la resistencia promedio de las dosificaciones sin éter.
- Al día 7, resistencias desde 52.3 a 92.1 MPa, siendo 52.3 MPa para la dosificación con SP6\_E0.5\_s/F y 92.1 MPa para la dosificación con SP2.5\_s/E\_F20, llegando a ser 59.3% mayor con respecto a la resistencia más baja. Además, se puede observar que la resistencia promedio de las dosificaciones con éter siguen siendo menores que la resistencia promedio de las dosificaciones sin éter.
- Al día 21, resistencias desde 61.1 a 101.4 MPa, siendo 61.1 MPa para la dosificación con SP6\_E0.5\_s/F y 101.4 MPa para la dosificación con SP2.5\_s/E\_F20, llegando a ser 56.9% mayor con respecto a la resistencia más baja. Además, se puede observar que la resistencia promedio de las dosificaciones con éter siguen siendo menores que la resistencia promedio de las dosificaciones sin éter.
- Al día 28, resistencias desde 64.9 a 105.0 MPa, siendo 64.9 MPa para la dosificación con SP6\_E0.5\_s/F y 105.0 MPa para la dosificación con

SP2.5\_s/E\_F20, llegando a ser 54.5% mayor con respecto a la resistencia más baja. Además, se puede observar que la resistencia promedio de las dosificaciones con éter fueron menores que la resistencia promedio de las dosificaciones sin éter.

#### 4.3.1.4. Análisis de resultados

Una vez obtenidos los resultados de flexión, flexo – tracción y compresión a edades tempranas, se procede a analizar dichos resultados.

#### Ensayos a flexión

La Tabla 24 muestran los resultados de la resistencia promedio de flexión para cada dosificación y el coeficiente de variación a 1, 7, 21 y 28 días de las probetas de hormigón blanco con fibras metálicas ensayadas.

Tabla 24. Resumen de resultados de ensayo a flexión de probetas de hormigón blanco con fibras metálicas.

UHPC Blanco con fibras metálicas - Resultados estadísticos a Flexión (a/c = 0.22)								
Días	SP2.5_s/E_s/F		SP2.5_s/E_F20		SP6_E0.5_s/F		SP6_E0.5_F20	
	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)
1	2.4	2.9%	2.5	7.9%	0.6	15.7%	0.4	4.3%
7	2.9	6.0%	6.6	3.2%	2.9	9.2%	5.4	2.4%
21	3.6	11.4%	7.3	9.2%	3.2	9.6%	6.3	3.1%
28	3.8	5.9%	7.7	0.9%	3.1	10.6%	6.9	7.4%

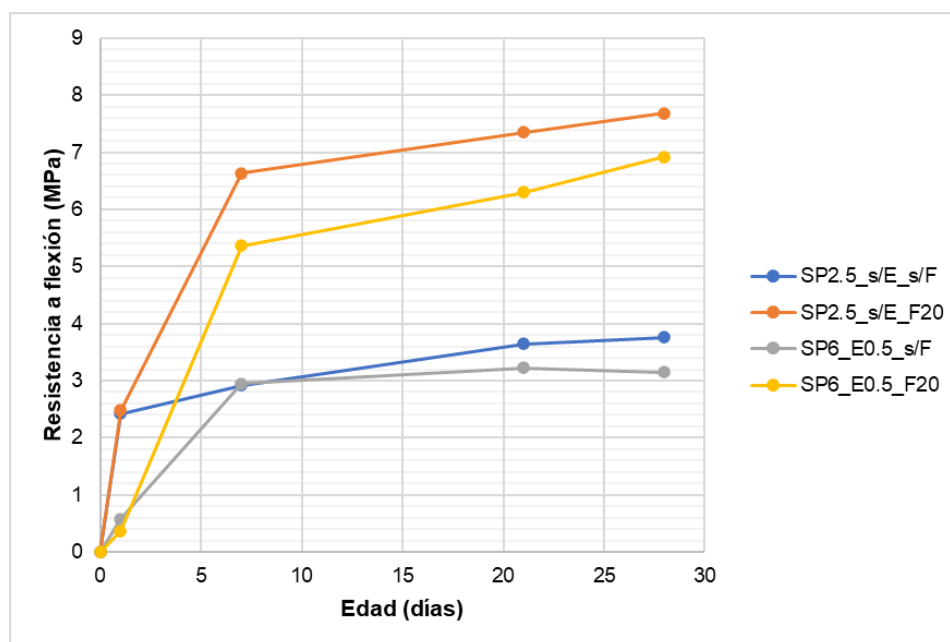
De la Tabla 24 se observa que:

- La resistencia promedio a los 28 días de la dosificación SP2.5\_s/E\_s/F fue de 3.8 MPa, de la dosificación SP2.5\_s/E\_F20 fue de 7.7 MPa, de la dosificación SP6\_E0.5\_s/F fue de 3.1 MPa, de la dosificación SP6\_E0.5\_F20 fue de 6.9 MPa.
- La mayor resistencia a flexión a 1, 7, 21 y 28 días fue de la dosificación SP2.5\_s/E\_F20 con 2.5 MPa, 6.6 MPa, 7.3 MPa y 7.7 MPa respectivamente.
- Al día 1, las dosificaciones sin éter obtuvieron mayor resistencia a flexión que las dosificaciones con éter debido a que, el éter tiene un efecto absorbente del agua de hidratación reduciendo la cantidad de agua disponible en el fraguado, y luego libera el agua propiciando la hidratación de las partículas haciendo que alcance mayor resistencia en los días posteriores al mezclado y vaciado.
- Las resistencias a flexión de las 4 dosificaciones aumentan su resistencia gradualmente con el paso de los días a edades tempranas.
- Al día 7, 21 y 28, las dosificaciones con fibras metálicas obtuvieron mayor resistencia a flexión que las dosificaciones sin fibras metálicas debido a que el hormigón al estar en estado endurecido posee mejor adherencia con las fibras;

además, las fibras hacen que disminuya la microfisuración y aumente la tenacidad mediante la transmisión de esfuerzos a través de la sección fisurada.

- Al día 28, la mayor resistencia fue de la dosificación SP2.5\_s/E\_F20, esto es debido a que, la dosificación no presenta éter y tiene fibras en su composición. El éter hace que disminuya la resistencia de la dosificación, tal como la dosificación SP6\_E0.5\_s/F que presenta éter y no tiene fibras en su composición, y fue la que alcanzó la menor resistencia a la flexión.
- Se obtuvieron COV menores al 25% lo que significa que se tuvo dispersiones muy bajas en los resultados de los ensayos de cada dosificación. Se debe tener en cuenta que, los resultados de ensayos en probetas pequeñas tienen variabilidades más altas que ensayarlas en probetas grandes.

Finalmente, de los resultados de resistencia a flexión por cada dosificación y por cada día de ensayo se obtiene la *Figura 72*.



*Figura 72. Resultados de ensayo a flexión y flexo – tracción de probetas de hormigón blanco con fibras metálicas.*

De la *Figura 72* se puede observar que los resultados de las resistencias a flexión para el día 1 de las dosificaciones sin éter fueron mucho mayores que las dosificaciones con éter. La menor resistencia a flexión a los 28 días fue de la dosificación SP6\_E0.5\_s/F con 3.1 MPa, mientras que la mayor resistencia a flexión fue de la dosificación SP2.5\_s/E\_F20 con 7.7 MPa siendo un 11.1% mayor que la resistencia más baja, con lo cual se concluye que las fibras metálicas ayudan al hormigón a mejorar su resistencia a la

flexión debido a la adherencia que presentan las fibras con el hormigón en estado endurecido, además, estas fibras al ser metálicas poseen ductilidad y hacen que la matriz cementosa sea levemente dúctil.

### Ensayo a flexo – tracción

#### Dosificación SP2.5\_s/E\_F20

Se muestra el diagrama resistencia – CMOD, obtenidas mediante el ensayo a flexo – tracción a 7, 21 y 28 días en la *Figura 73*.

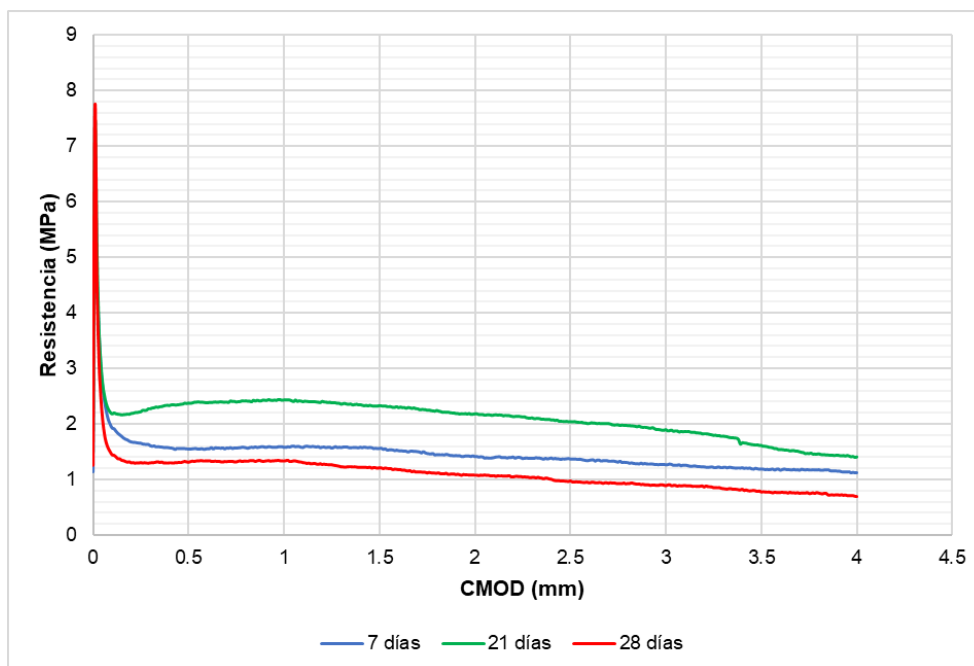


Figura 73. Diagrama de resistencia – CMOD a 7, 21 y 28 días de la dosificación SP2.5\_s/E\_F20.

La *Figura 73* muestran los valores de resistencia pico por cada día ensayado. Comparando las 3 gráficas, el valor pico máximo fue alcanzado en el día 28 con 7.7 MPa. Sin embargo, las resistencias residuales  $fr1$  y  $fr3$  del día 28 son visiblemente menores que las del día 7 y 21. Las resistencias residuales  $fr1$  y  $fr3$  mayores fueron del día 21.

#### Dosificación SP6\_E0.5\_F20

Se muestra el diagrama resistencia – CMOD, obtenidas mediante el ensayo a flexo – tracción a 7, 21 y 28 días en la *Figura 74*.

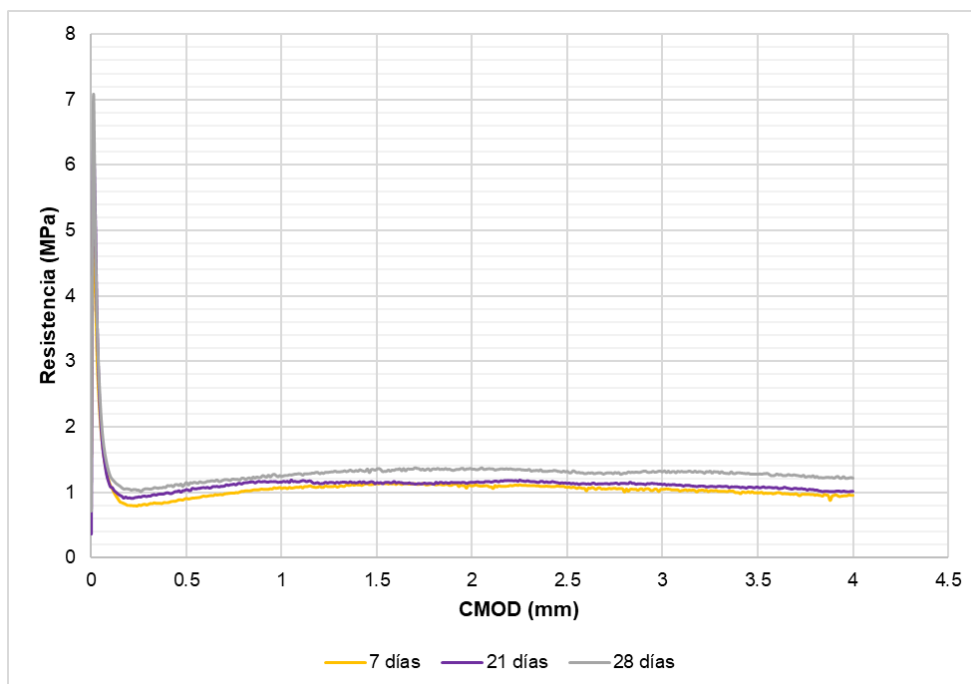


Figura 74. Diagrama de resistencia – CMOD a 7, 21 y 28 días de la dosificación SP6\_E0.5\_F20.

La Figura 74 muestran los valores de resistencia pico por cada día ensayado. Comparando las 3 gráficas, el valor pico máximo fue alcanzado en el día 28 con 6.9 MPa. En este caso, las resistencias residuales  $fr_1$  y  $fr_3$  del día 28 son visiblemente mayores que las del día 7 y 21.

### Comparación de dosificaciones SP2.5\_s/E\_F20 y SP6\_E0.5\_F20

Se muestran las comparaciones de los diagramas resistencia – CMOD por día ensayado, obtenidas mediante el ensayo a flexo – tracción a 7, 21 y 28 días en la Figura 75, Figura 76 y Figura 77 respectivamente.

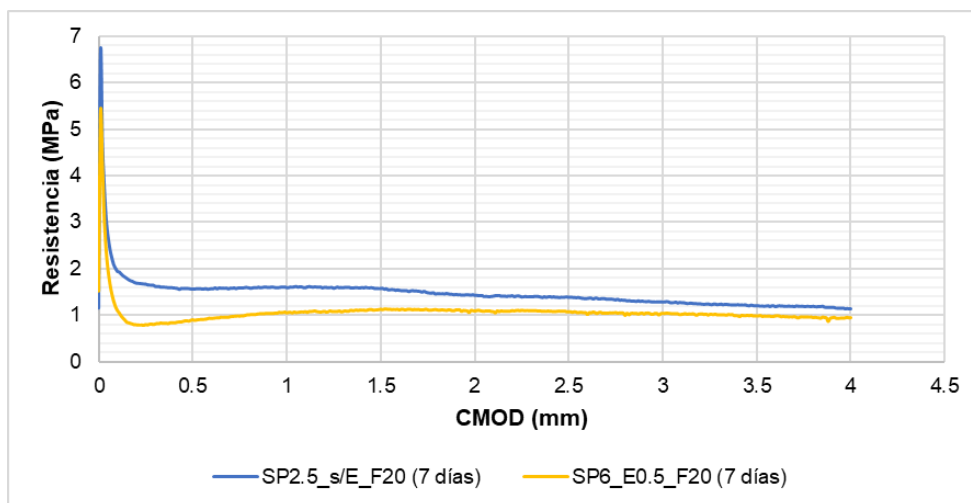
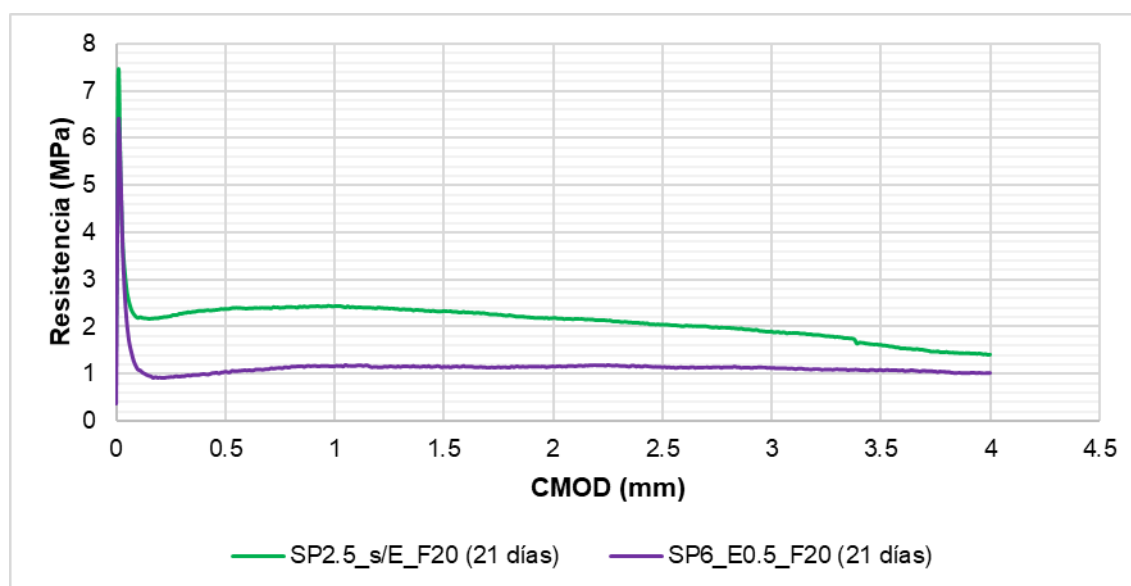


Figura 75. Comparación flexo – tracción de dosificación SP2.5\_s/E\_F20 y SP6\_E0.5\_F20 a 7 días.

De la *Figura 75* se observa que:

- El valor pico máximo en el día 7 fue de la dosificación SP2.5\_s/E\_F20 con 6.6 MPa siendo un 22% mayor que la dosificación SP2.5\_E0.5\_F20. La resistencia a flexo – tracción disminuye en aquella dosificación que presenta éter.
- Los mayores valores residuales  $fr_1$  y  $fr_3$  fueron de la dosificación SP2.5\_s/E\_F20. El éter hace que la adherencia entre fibra y hormigón sea menor, por lo que la resistencia a flexo – tracción es menor.



*Figura 76. Comparación flexo – tracción de dosificación SP2.5\_s/E\_F20 y SP6\_E0.5\_F20 a 21 días.*

De la *Figura 76* se observa que:

- El valor pico máximo en el día 21 fue de la dosificación SP2.5\_s/E\_F20 con 7.3 MPa siendo un 16% mayor que la dosificación SP2.5\_E0.5\_F20. La resistencia a flexo – tracción disminuye en aquella dosificación que presenta éter.
- Los mayores valores residuales  $fr_1$  y  $fr_3$  fueron de la dosificación SP2.5\_s/E\_F20. El éter hace que la adherencia entre fibra y hormigón sea menor, por lo que la resistencia a flexo – tracción es menor.

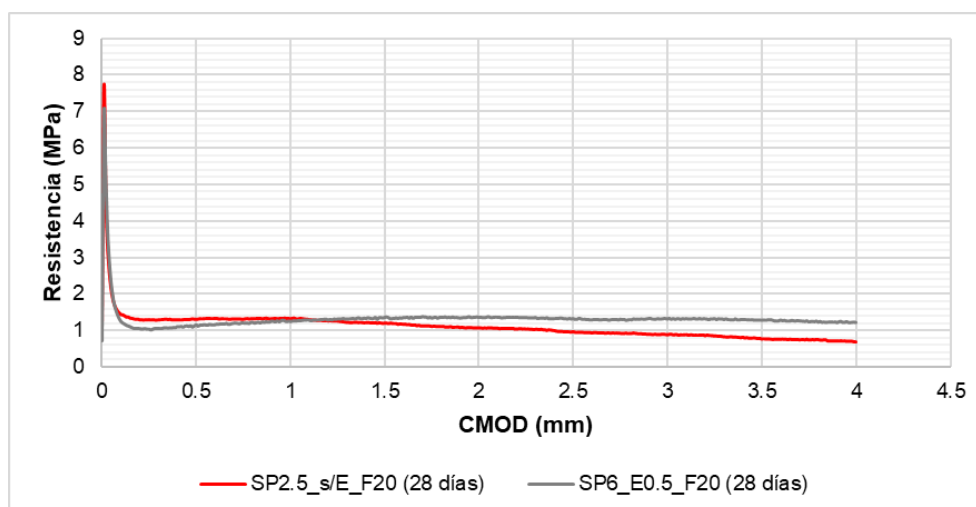


Figura 77. Comparación flexo – tracción de dosificación SP2.5\_s/E\_F20 y SP6\_E0.5\_F20 a 28 días.

De la Figura 77 se observa que:

- El valor pico máximo en el día 21 fue de la dosificación SP2.5\_s/E\_F20 con 7.7 MPa siendo un 12% mayor que la dosificación SP2.5\_E0.5\_F20. La resistencia a flexo – tracción disminuye en aquella dosificación que presenta éter.
- El mayor valor residual  $fr_1$  fue de la dosificación SP2.5\_s/E\_F20 y del  $fr_3$  fue de la dosificación SP6\_E0.5\_F20. El éter hace que la adherencia entre fibra y hormigón sea menor, por lo que la resistencia a flexo – tracción es menor.

Se observó que las resistencias a flexo – tracción de las dosificaciones con éter fueron favorables; no obstante, las resistencias de las dosificaciones sin éter fueron disminuyendo la diferencia porcentual con las dosificaciones con éter a lo largo de los días, llegando hasta 12%, por lo que también fueron resultados favorables en la campaña experimental.

### **Ensayos a compresión**

La Tabla 25 muestran los resultados de la resistencia promedio de compresión para cada dosificación y el coeficiente de variación a 1, 7, 21 y 28 días de las probetas de hormigón blanco con fibras metálicas ensayadas.



Tabla 25. Resumen de resultados de ensayo a compresión de probetas de hormigón blanco con fibras metálicas.

UHPC Blanco con fibras metálicas - Resultados estadísticos a Compresión (a/c = 0.22)								
Días	SP2.5_s/E_s/F		SP2.5_s/E_F20		SP6_E0.5_s/F		SP6_E0.5_F20	
	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)
1	48.6	1.4%	45.7	15.0%	4.9	32.8%	3.0	8.7%
7	80.1	1.3%	92.1	5.8%	52.3	3.3%	57.8	2.2%
21	91.3	6.1%	101.4	3.6%	61.1	7.2%	64.6	6.9%
28	97.8	2.4%	105.0	3.1%	64.9	4.1%	68.0	5.4%

De la Tabla 25 se observa que:

- La resistencia promedio a los 28 días de la dosificación SP2.5\_s/E\_s/F fue de 97.8 MPa, de la dosificación SP2.5\_s/E\_F20 fue de 105.0 MPa, de la dosificación SP6\_E0.5\_s/F fue de 64.9 MPa, de la dosificación SP6\_E0.5\_F20 fue de 68.0 MPa.
- La mayor resistencia a compresión a 1 día fue de la dosificación SP2.5\_s/E\_s/F con 48.6 MPa, mientras que a 7, 21 y 28 días fue de la dosificación SP2.5\_s/E\_F20 con 92.1 MPa, 101.4 MPa y 105.0 MPa respectivamente.
- Al día 1, 7, 21 y 28, las dosificaciones sin éter obtuvieron una resistencia a compresión mucho mayor que las dosificaciones con éter debido a que, el éter tiene un efecto absorbente del agua de hidratación reduciendo la cantidad de agua disponible en el fraguado, y luego libera el agua propiciando la hidratación de las partículas haciendo que alcance mayor resistencia en los días posteriores al mezclado y vaciado.
- Comparando las resistencias de las dosificaciones sin éter, la dosificación SP2.5\_s/E\_F20 obtuvo una resistencia mayor al 7.3% con respecto a la dosificación SP2.5\_s/E\_s/F debido a que, las fibras también mejoran la resistencia a compresión. En el momento del vaciado en las probetas, las fibras se sitúan anisotrópicamente en el molde de la probeta junto con la mezcla, lo que mejorará su resistencia levemente en las direcciones en las que se aplique la fuerza.
- Las resistencias a compresión de las 4 dosificaciones aumentan su resistencia gradualmente con el paso de los días a edades tempranas.
- Al día 28, la mayor resistencia fue de la dosificación SP2.5\_s/E\_F20, esto es debido a que, la dosificación no presenta éter y tiene fibras en su composición. El éter hace que disminuya la resistencia de la dosificación, tal como la dosificación SP6\_E0.5\_s/F que presenta éter y no tiene fibras en su composición, y fue la que alcanzó la menor resistencia a la compresión.

- Se obtuvieron COV menores al 25% lo que significa que se tuvo dispersiones muy bajas en los resultados de los ensayos de cada dosificación, a excepción de la dosificación SP6\_E0.5\_s/F al día 1, sin embargo, dichos resultados se regulan en los días 7, 21 y 28 con una baja dispersión. Se debe tener en cuenta que, los resultados de ensayos en probetas pequeñas tienen variabilidades más altas que ensayarlas en probetas grandes.

Finalmente, de los resultados de resistencia a flexión por cada dosificación y por cada día de ensayo se obtiene la *Figura 78*.

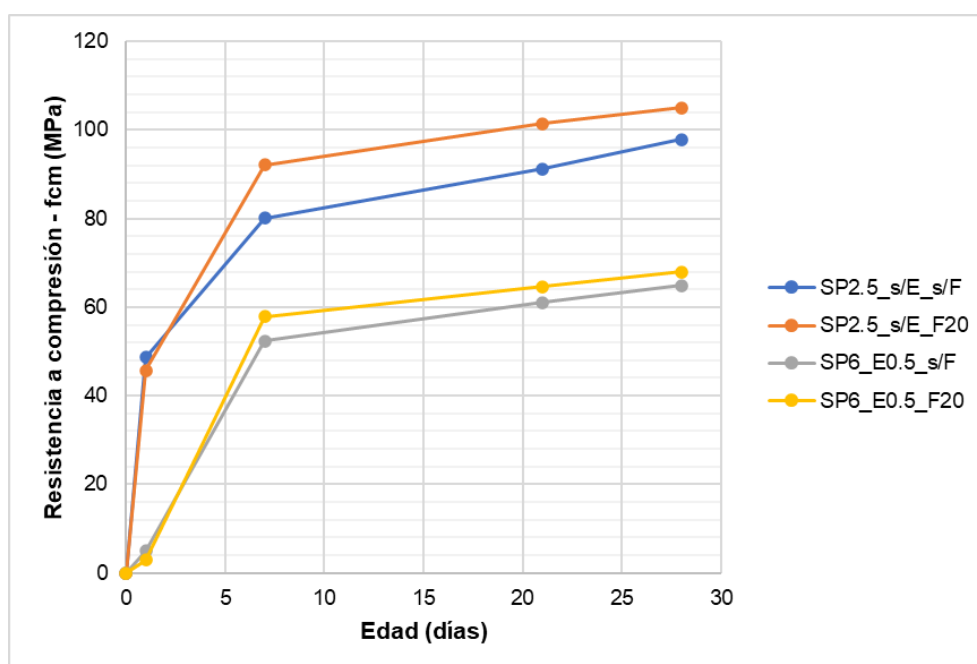


Figura 78. Resultados de ensayo a compresión de probetas de hormigón blanco con fibras metálicas.

De la *Figura 78* se puede observar que los resultados de las resistencias a compresión para el día 1 de las dosificaciones sin éter fueron mucho mayores que las dosificaciones con éter. La menor resistencia a compresión a los 28 días fue de la dosificación SP6\_E0.5\_s/F con 64.9 MPa, mientras que la mayor resistencia a compresión fue de la dosificación SP2.5\_s/E\_F20 con 105.0 MPa siendo un 54.5% mayor que la resistencia más baja, con lo cual se concluye que las fibras metálicas al situarse de manera aleatoria en la mezcla ayudan al hormigón a mejorar no solo la resistencia a flexión sino también a compresión debido a la adherencia que presentan las fibras con el hormigón en estado endurecido. Las resistencias mayores a 28 días fueron de las 2 dosificaciones sin éter.

## 4.4. HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA CON ÁRIDO RECICLADO

### 4.4.1. Ensayos de probetas

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos a los 1, 7, 21 y 28 días.

#### 4.4.1.1. Ensayo a flexión

Los resultados a 1, 7, 21 y 28 días mediante ensayo a flexión para las 8 dosificaciones fabricadas de hormigón blanco con árido reciclado se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26. Resultados de ensayo a flexión de probetas de hormigón blanco con árido reciclado a 1, 7, 21 y 28 días.

UHPC Blanco con áridos reciclados - Resultados a Flexión (en MPa)				
Dosificación	1 día	7 días	21 días	28 días
100N-0R_SP2.5_s/E	2.4	2.9	3.6	3.8
100N-0R_SP6_E0.5	0.6	2.9	3.2	3.1
50N-50R_SP2.5_s/E	2.4	2.1	4.0	3.8
50N-50R_SP6_E0.5	0.8	2.3	3.1	3.1
75N-25R_SP2.5_s/E	2.5	2.9	3.9	4.0
75N-25R_SP6_E0.5	0.4	2.5	3.0	3.1
0N-100R_SP2.5_s/E	2.1	2.2	3.1	3.6
0N-100R_SP6_E0.5	0.9	2.1	2.5	2.3

La Tabla 26 muestra:

- Al día 1, resistencias desde 0.4 a 2.5 MPa, siendo 0.4 MPa para la dosificación con 75N-25R\_SP6\_E0.5 y 2.5 MPa para la dosificación con 75N-25R\_SP2.5\_s/E, siendo un 606.2% mayor con respecto a la resistencia más baja. Además, se puede observar que la resistencia promedio de las dosificaciones con éter son mucho menores que la resistencia promedio de las dosificaciones sin éter.
- Al día 7, resistencias desde 2.1 a 3.2 MPa, siendo 2.1 MPa para la dosificación con 0N-100R\_SP6\_E0.5 y 3.2 MPa para la dosificación con 50N-50R\_SP2.5\_s/E, siendo un 54.9% mayor con respecto a la resistencia más baja. Además, se puede observar que la resistencia promedio de las dosificaciones con éter siguen siendo menores que la resistencia promedio de las dosificaciones sin éter.
- Al día 21, muestra resistencias desde 2.5 a 4.0 MPa, siendo 2.5 MPa para la dosificación con 0N-100R\_SP6\_E0.5 y 4.0 MPa para la dosificación con 50N-50R\_SP2.5\_s/E, siendo un 59.2% mayor con respecto a la resistencia más baja. Además, se puede observar que la resistencia promedio de las dosificaciones con

éter siguen siendo menores que la resistencia promedio de las dosificaciones sin éter.

- Al día 28, muestra resistencias desde 2.3 a 4.0 MPa, siendo 2.3 MPa para la dosificación con 0N-100R\_SP6\_E0.5 y 4.0 MPa para la dosificación con 75N-25R\_SP2.5\_s/E, siendo un 70.7% mayor con respecto a la resistencia más baja. Además, se puede observar que la resistencia promedio de las dosificaciones con éter fueron menores que la resistencia promedio de las dosificaciones sin éter.

#### 4.4.1.2. Ensayo a compresión

Los resultados a 1, 7, 21 y 28 días mediante ensayo a compresión para las 8 dosificaciones fabricadas de hormigón blanco con fibras metálicas se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27. Resultados de ensayo a flexión de probetas de hormigón blanco con árido reciclado a 1, 7, 21 y 28 días.

UHPC Blanco con áridos reciclados - Resultados a Flexión (en MPa)				
Dosificación	1 día	7 días	21 días	28 días
100N-0R_SP2.5_s/E	48.6	80.1	91.3	97.8
100N-0R_SP6_E0.5	4.9	52.3	61.1	64.9
50N-50R_SP2.5_s/E	50.7	77.4	91.8	86.9
50N-50R_SP6_E0.5	11.4	56.3	55.9	52.5
75N-25R_SP2.5_s/E	48.6	85.0	89.6	92.3
75N-25R_SP6_E0.5	12.2	51.4	59.1	54.3
0N-100R_SP2.5_s/E	44.5	68.7	74.9	78.0
0N-100R_SP6_E0.5	13.1	38.5	46.3	45.5

La Tabla 27 muestra:

- Al día 1, resistencias desde 4.9 a 50.7 MPa, siendo 4.9 MPa para la dosificación con 100N-0R\_SP6\_E0.5 y 50.7 MPa para la dosificación con 50N-50R\_SP2.5\_s/E, siendo un 927.5% mayor con respecto a la resistencia más baja. Además, se puede observar que la resistencia promedio de las dosificaciones con éter son mucho menores que la resistencia promedio de las dosificaciones sin éter.
- Al día 7, resistencias desde 38.5 a 85.0 MPa, siendo 38.5 MPa para la dosificación con 0N-100R\_SP6\_E0.5 y 85.0 MPa para la dosificación con 75N-25R\_SP2.5\_s/E, siendo un 120.6% mayor con respecto a la resistencia más baja. Además, se puede observar que la resistencia promedio de las dosificaciones con éter siguen siendo menores que la resistencia promedio de las dosificaciones sin éter.

- Al día 21, resistencias desde 46.3 a 91.8 MPa, siendo 46.3 MPa para la dosificación con 0N-100R\_SP6\_E0.5 y 91.8 MPa para la dosificación con 50N-50R\_SP2.5\_s/E, siendo un 98.4% mayor con respecto a la resistencia más baja. Además, se puede observar que la resistencia promedio de las dosificaciones con éter siguen siendo menores que la resistencia promedio de las dosificaciones sin éter.
- Al día 28, resistencias desde 45.5 a 97.8 MPa, siendo 45.5 MPa para la dosificación con 0N-100R\_SP6\_E0.5 y 97.8 MPa para la dosificación con 100N-0R\_SP2.5\_s/E, siendo un 98.4% mayor con respecto a la resistencia más baja. Además, se puede observar que la resistencia promedio de las dosificaciones con éter fueron menores que la resistencia promedio de las dosificaciones sin éter.

#### 4.4.1.3. Análisis de resultados

Una vez obtenidos los resultados de flexión y compresión a edades tempranas, se procede a analizar dichos resultados.

#### Ensayos a flexión

La Tabla 28 los resultados de la resistencia promedio de flexión para cada dosificación y el coeficiente de variación a 1, 7, 21 y 28 días de las probetas de hormigón blanco con árido reciclado ensayadas.

Tabla 28. Resultados de resistencias a flexión y COV de probetas de hormigón blanco con árido reciclado.

UHPC Blanco con árido reciclado - Resistencias a Flexión y COV																
Días	100N-0R_SP2.5_s/E		100N-0R_SP6_E0.5		75N-25R_SP2.5_s/E		75N-25R_SP6_E0.5		50N-50R_SP2.5_s/E		50N-50R_SP6_E0.5		0N-100R_SP2.5_s/E		0N-100R_SP6_E0.5	
	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)
1	2.4	2.9%	0.6	15.7%	2.5	2.9%	0.4	6.0%	2.4	2.5%	0.8	2.0%	2.1	15.3%	0.9	4.6%
7	2.9	6.0%	2.9	9.2%	2.9	0.5%	2.5	11.4%	3.2	0.3%	2.3	7.1%	2.2	24.4%	2.1	2.1%
21	3.6	11.4%	3.2	9.6%	3.9	3.3%	3.0	0.6%	4.0	3.2%	3.1	1.5%	3.1	1.7%	2.5	1.4%
28	3.8	5.9%	3.1	10.6%	4.0	1.9%	3.1	10.8%	3.8	7.5%	3.1	5.6%	3.6	16.2%	2.3	9.7%

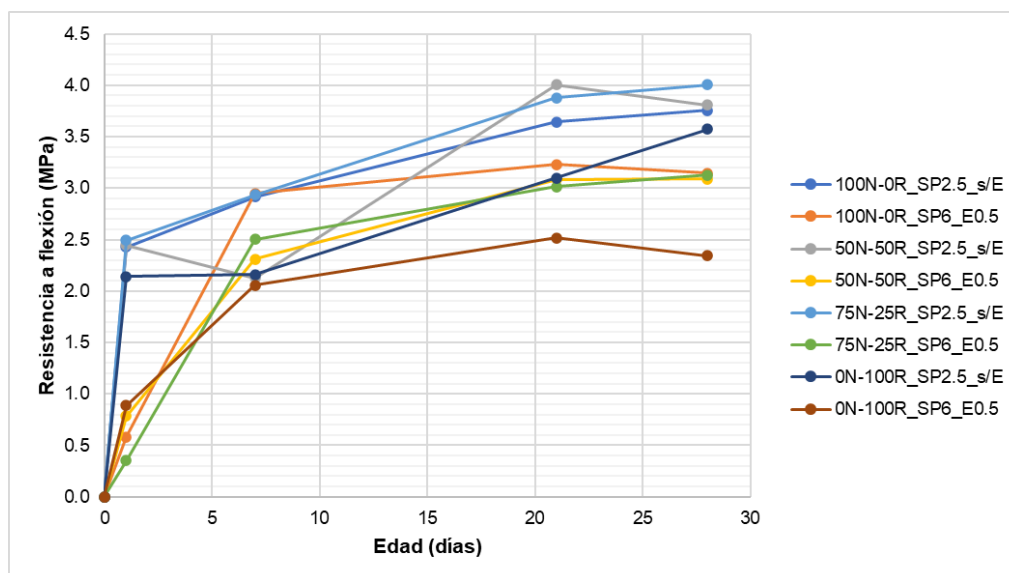
De la Tabla 28 se observa que:

- La resistencia promedio a los 28 días de la dosificación 100N-0R\_SP2.5\_s/E fue de 3.8 MPa, de la dosificación 100N-0R\_SP6\_E0.5 fue de 3.1 MPa, de la dosificación 75N-25R\_SP2.5\_s/E fue de 4.0 MPa, de la dosificación 75N-25R\_SP6\_E0.5 fue de 3.1 MPa, de la dosificación 50N-50R\_SP2.5\_s/E fue de 3.8 MPa, de la dosificación 50N-50R\_SP6\_E0.5 fue de 3.1 MPa, de la dosificación 0N-100R\_SP2.5\_s/E fue de 3.6 MPa, de la dosificación 0N-100R\_SP6\_E0.5 fue de 2.3 MPa.

- La mayor resistencia a flexión a 1 día fue de la dosificación 75N-25R\_SP2.5\_s/E con 2.5 MPa, a 7 días fue de la dosificación 50N-50R\_SP2.5\_s/E con 3.2 MPa, a 21 días fue de la dosificación 50N-50R\_SP2.5\_s/E con 4.0 MPa; sin embargo, a 28 días fue de la dosificación 75N-25R\_SP2.5\_s/E con 4.0 MPa.
- Al día 1, las dosificaciones sin éter obtuvieron mayor resistencia a flexión que las dosificaciones con éter debido a que, el éter tiene un efecto absorbente del agua de hidratación reduciendo la cantidad de agua disponible en el fraguado, y luego libera el agua propiciando la hidratación de las partículas haciendo que alcance mayor resistencia en los días posteriores al mezclado y vaciado.
- Al día 7, las dosificaciones con y sin éter son similares en resistencia a flexión. Para el día 7, el éter ya ha liberado el agua y a hidratado las partículas de hormigón alcanzando en resistencia a las dosificaciones con éter.
- Sin embargo, al día 21, las dosificaciones sin éter fueron mayores a las dosificaciones con éter en un rango del 12 – 30% respecto a las dosificaciones con éter, esto se debe a que, si bien el éter libera el agua e hidrata las partículas, no libera el 100% del agua retenida, por lo que no alcanzaría una resistencia adecuada como pasa con las resistencias de las dosificaciones sin éter.
- De la misma manera sucede para el día 28, las dosificaciones sin éter fueron mayores a las dosificaciones con éter, pero en un rango 23 – 56% respecto a las dosificaciones con éter. Aquí el rango es más elevado puesto que la matriz cementosa no ha sido hidratada correctamente debido a la presencia del éter; además, las resistencias de las dosificaciones con éter no se elevaron significativamente con respecto al día 21.
- La mayor resistencia a la flexión fue de la dosificación 75N\_25R\_SP2.5\_s/E con 4 MPa, aun así, no se identifica una tendencia clara con respecto a las otras dosificaciones sin éter, puesto que la diferencia máxima es de solo 0.4 MPa.
- Los resultados al día 28 de las dosificaciones sin éter de las resistencias a flexión indican que no hay una influencia significativa en la sustitución del árido reciclado; mientras que, para las dosificaciones con éter, la dosificación 0\_100R\_SP6\_E0.5 muestra una reducción significativa respecto a las otras dosificaciones en cuanto a la resistencia a flexión.
- Se obtuvieron COV menores al 25% lo que significa que se tuvo dispersiones muy bajas en los resultados de los ensayos de cada dosificación. Se debe tener en

cuenta que, los resultados de ensayos en probetas pequeñas tienen variabilidades más altas que ensayarlas en probetas grandes.

Finalmente, de los resultados de resistencia a flexión por cada dosificación y por cada día de ensayo se obtiene la *Figura 79*.



*Figura 79. Resultados de ensayo a flexión de probetas de hormigón con árido reciclado.*

De la *Figura 79* se puede observar que los resultados de las resistencias a flexión para el día 1 de las dosificaciones sin éter fueron mucho mayores que las dosificaciones con éter. La menor resistencia a flexión a los 28 días fue de la dosificación 0N-100R\_SP6\_E0.5 con 2.3 MPa, mientras que la mayor resistencia a flexión fue de la dosificación 75N-25R\_SP2.5\_s/E con 4.0 MPa siendo un 70.7% mayor que la resistencia más baja. De hecho, las resistencias mayores a 28 días fueron de las 4 dosificaciones sin éter.

Se concluye que, la resistencia a flexión no disminuye significativamente de 0 a 100% de árido reciclado para las dosificaciones sin éter; mientras que, la resistencia a flexión no disminuye significativamente hasta un 50% de árido reciclado para las dosificaciones con éter. De igual forma, el éter provoca un efecto reductor en la resistencia a flexión independientemente si se tiene un 0% a 100% de árido reciclado.

## Ensayos a compresión

La Tabla 29 muestran los resultados de la resistencia promedio de compresión para cada dosificación y el coeficiente de variación a 1, 7, 21 y 28 días de las probetas de hormigón blanco con árido reciclado ensayadas.

Tabla 29. Resultados de resistencias a compresión y COV de probetas de hormigón blanco con árido reciclado.

UHPC Blanco con árido reciclado - Resistencias a Compresión y COV																
Días	100N-0R_SP2.5_s/E		100N-0R_SP6_E0.5		75N-25R_SP2.5_s/E		75N-25R_SP6_E0.5		50N-50R_SP2.5_s/E		50N-50R_SP6_E0.5		0N-100R_SP2.5_s/E		0N-100R_SP6_E0.5	
	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)	R (MPa)	COV (%)
1	48.6	1.4%	4.9	32.8%	48.6	5.3%	12.2	3.6%	50.7	8.1%	11.4	7.8%	44.5	5.6%	13.1	2.9%
7	80.1	1.3%	52.3	3.3%	85.0	2.9%	51.4	4.9%	77.4	3.4%	56.3	3.9%	68.7	3.3%	38.5	6.2%
21	91.3	6.1%	61.1	7.2%	89.6	0.6%	59.1	4.5%	91.8	4.0%	55.9	3.1%	74.9	3.0%	46.3	3.7%
28	97.8	2.4%	64.9	4.1%	92.3	2.1%	54.3	6.6%	86.9	4.7%	52.5	4.8%	78.0	3.4%	45.5	3.2%

De la Tabla 29 se observa que:

- La resistencia promedio a los 28 días de la dosificación 100N-0R\_SP2.5\_s/E fue de 97.8 MPa, de la dosificación 100N-0R\_SP6\_E0.5 fue de 64.9 MPa, de la dosificación 75N-25R\_SP2.5\_s/E fue de 92.3 MPa, de la dosificación 75N-25R\_SP6\_E0.5 fue de 54.3 MPa, de la dosificación 50N-50R\_SP2.5\_s/E fue de 86.9 MPa, de la dosificación 50N-50R\_SP6\_E0.5 fue de 52.5 MPa, de la dosificación 0N-100R\_SP2.5\_s/E fue de 78.0 MPa y de la dosificación 0N-100R\_SP6\_E0.5 fue de 45.5 MPa.
- La mayor resistencia a flexión a 1 día fue de la dosificación 50N-50R\_SP2.5\_s/E con 50.7 MPa, a 7 días fue de la dosificación 75N-25R\_SP2.5\_s/E con 85.0 MPa, a 21 días fue de la dosificación 50N-50R\_SP2.5\_s/E con 91.8 MPa; sin embargo, a 28 días fue de la dosificación 100N-0R\_SP2.5\_s/E con 97.8 MPa.
- Al día 1, las dosificaciones sin éter obtuvieron mayor resistencia a compresión que las dosificaciones con éter, resultados que fueron demasiados bajos, esto es debido a que, el éter tiene un efecto absorbente del agua de hidratación reduciendo la cantidad de agua disponible en el fraguado, y luego libera el agua propiciando la hidratación de las partículas haciendo que alcance mayor resistencia en los días posteriores al mezclado y vaciado.
- Al día 7 y 21, las dosificaciones sin éter fueron mayores a las dosificaciones con éter en un rango del 37 – 78% respecto a las dosificaciones con éter, esto se debe a que, si bien el éter libera el agua e hidrata las partículas, no libera el 100% del agua retenida, por lo que no alcanzaría una resistencia adecuada como pasa con las resistencias de las dosificaciones sin éter.



- De la misma manera sucede para el día 28, las dosificaciones sin éter fueron mayores a las dosificaciones con éter, pero en un rango 51 – 71% respecto a las dosificaciones con éter. Aquí el rango es más elevado puesto que la matriz cementosa no ha sido hidratada correctamente debido a la presencia del éter; además, las resistencias de las dosificaciones con éter no se elevaron significativamente con respecto al día 21.
- La mayor resistencia a la compresión de las dosificaciones sin éter fue de la dosificación 100N\_0R\_SP2.5\_s/E con 97.8 MPa; mientras que, para las dosificaciones con éter fue de la dosificación 100N\_0R\_SP2.5\_E0.5 con 64.9 MPa.
- Por consiguiente, la mayor resistencia a la compresión de las dosificaciones sin éter con % de árido reciclado fue de la dosificación 75N\_25R\_SP2.5\_s/E con 92.3 MPa; mientras que, para las dosificaciones con éter con % de árido reciclado fue de la dosificación 75N\_25R\_SP2.5\_E0.5 con 54.3 MPa. Esto se debe a que, el árido reciclado posee diversos factores que hace que disminuya la resistencia tales como la absorción del agua haciendo que no se hidrate de manera correcta la matriz del hormigón, la permeabilidad de las partículas, el módulo de elasticidad, la retracción, la fluencia, etc.
- Se obtuvieron COV menores al 25% lo que significa que se tuvo dispersiones muy bajas en los resultados de los ensayos de cada dosificación. Se debe tener en cuenta que, los resultados de ensayos en probetas pequeñas tienen variabilidades más altas que ensayarlas en probetas grandes.

Finalmente, de los resultados de resistencia a compresión por cada dosificación y por cada día de ensayo se obtiene la *Figura 80*.

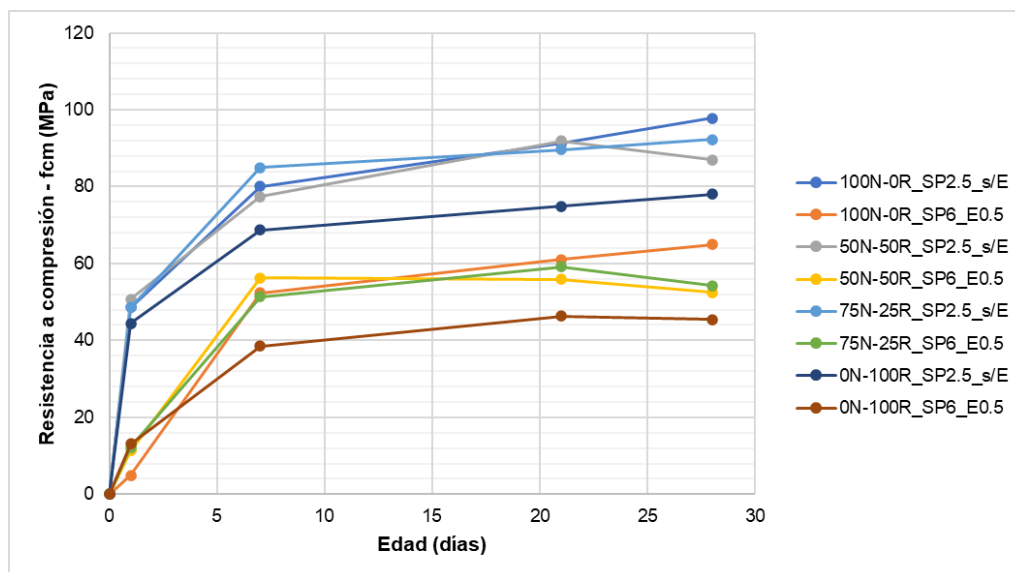


Figura 80. Resultados de ensayo a compresión de probetas de hormigón con árido reciclado.

De la Figura 80 se puede observar que los resultados de las resistencias a compresión para el día 1 de las dosificaciones sin éter fueron mucho mayores que las dosificaciones con éter. La menor resistencia a compresión a los 28 días fue de la dosificación 0N-100R\_SP6\_E0.5 con 45.5 MPa, mientras que la mayor resistencia a compresión fue de la dosificación 100N-0R\_SP2.5\_s/E con 97.8 MPa siendo un 115.2% mayor que la resistencia más baja. De hecho, las resistencias mayores a 28 días fueron de las 4 dosificaciones sin éter.

Se concluye que, la resistencia a compresión va disminuyendo significativamente a medida que el % de árido reciclado va aumentando para las dosificaciones sin éter; de igual forma, la resistencia a compresión disminuye gradualmente a medida que el % de árido reciclado va aumentando para las dosificaciones con éter. Además, el éter provoca un efecto de disminución en la resistencia a compresión independientemente si se tiene un 0% a 100% de árido reciclado.

# CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

## 5.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo V se presentan las conclusiones obtenidas de la realización de la campaña experimental y de los ensayos realizados. Las conclusiones constan de dos partes: conclusiones generales y conclusiones específicas relacionadas con los objetivos planteados en el capítulo I.

Las conclusiones generales muestran una revisión general de la caracterización mecánica que presentaron las muestras en la campaña experimental. Las conclusiones específicas están dirigidas a un análisis entre los resultados obtenidos de los ensayos realizados y de la influencia del éter, las fibras metálicas y el árido reciclado en las muestras ensayadas. Por último, se proponen futuras líneas de investigación relacionadas a la campaña experimental y a los parámetros de diseño a mejorar.

## 5.2. CONCLUSIONES GENERALES

De acuerdo con el hormigón gris, se obtuvieron mezclas muy fluidas con lo genera un efecto reductor de resistencia debido al efecto propio de la fluidez produciendo una exudación excesiva y disgregando parcialmente el material, aunque no se haya visto visualmente, lo que afectó la resistencia a flexión y compresión.

De acuerdo con el hormigón blanco, se obtuvieron mezclas muy fluidas, sin embargo, debido a que el SP actúa mejor en mezclas que contienen hormigón blanco y por tener alto contenido de aluminato en su composición, se tuvieron resistencias a flexión y compresión que aumentaban gradualmente con el paso de los días a edades tempranas, por lo que generó un mejor comportamiento mecánico a comparación del hormigón gris, por lo que se optó usar el hormigón blanco para las siguientes etapas de la campaña experimental.

De acuerdo con el hormigón blanco con fibras, se concluyó que las fibras aumentan en gran potencial la resistencia a flexión y compresión independientemente de cómo se ubiquen las fibras en la mezcla generando una resistencia residual con fisuras hasta de 4mm. También se concluyó que las dosificaciones sin éter fueron mayores que las dosificaciones con éter en resistencia a flexión y compresión, sin embargo, las resistencias de las dosificaciones con éter fueron superiores a los 3 MPa a flexión y 64 MPa a compresión, resistencias consideradas altas.

De acuerdo con el hormigón blanco con árido reciclado, se concluyó que el árido reciclado no repercute significativamente en la resistencia a flexión en las dosificaciones con éter, así como tampoco repercute significativamente en las dosificaciones sin éter. Sin embargo, si hay diferencias significativas en las resistencias a compresión, tanto para las dosificaciones sin éter como para las dosificaciones con éter. La resistencia a compresión va disminuyendo significativamente a medida que el % de árido reciclado va aumentando. Asimismo, las dosificaciones sin éter fueron mayores que las dosificaciones con éter en resistencia a flexión y compresión debido a que el éter provoca un efecto reductor en la resistencia a flexión y compresión. Las dosificaciones sin éter fueron mayores que las dosificaciones con éter en resistencia a flexión y compresión.

## 5.3. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

### 5.3.1. Incorporación de fibras metálicas

La incorporación de fibras metálicas en la composición de las dosificaciones hace que aumente significativamente la resistencia a flexión en un rango de 103 – 123% con respecto a la resistencia más baja del grupo de dosificación sin fibras. De igual forma, también hace que aumente significativamente la resistencia a compresión en un rango de 4 – 8% con respecto a la resistencia más baja del grupo de dosificación sin fibras. Todo esto debido a que, las fibras se situaron de manera anisotrópica al momento del vaciado de las probetas, mejorando la resistencia en las direcciones en las que se aplique la fuerza.

La mayor resistencia a flexión fue de la dosificación SP2.5\_s/E\_F20 con 7.7 MPa; mientras que, la menor resistencia a flexión fue de la dosificación SP6\_E0.5\_s/F con 3.1 MPa siendo un 60% menor con respecto a la resistencia más alta.

### 5.3.2. Sustitución de árido reciclado

Con una tasa de reemplazo creciente de árido reciclado no se tiene una incidencia significativa en la resistencia a flexión salvo en la dosificación 0N-100R\_SP6\_E0.5; mientras que, en la resistencia a compresión hay un efecto reductor significativo para las dosificaciones ensayadas. Esto se puede atribuir a que el árido reciclado posee diversos factores que hace que disminuya la resistencia tales como la absorción del agua haciendo que no se hidrate de manera correcta la matriz, la permeabilidad de las partículas, el módulo de elasticidad, la retracción, la fluencia, entre otras.

La mayor resistencia a flexión fue de la dosificación 75N-25R\_SP2.5\_s/E con 4 MPa, siendo 0.2 MPa la diferencia con la dosificación 100N-0R\_SP2.5\_s/E y la menor resistencia a flexión fue de la dosificación 0N-100R\_SP6\_E0.5 con 2.3 MPa, siendo un 43% menor con relación a la resistencia más alta. La mayor resistencia a compresión fue de la dosificación 100N-0R\_SP2.5\_s/E con 97.8 MPa y la menor resistencia a compresión fue de la dosificación 0N-100R\_SP6\_E0.5 con 45.5 MPa, siendo un 53% menor con relación a la resistencia más alta.

### 5.3.3. Incorporación de éter

#### **Con fibras metálicas**

Con la incorporación de fibras metálicas se determinó el conjunto de valores de la resistencia residual a la tracción por flexión, lo cual la dosificación sin éter alcanzó valores más altos a los 21 días, mientras que a los 28 días alcanzó valores más bajos; sin embargo, para la dosificación con éter fue todo lo contrario, donde alcanzó valores más altos a los 28 días, mientras que a los 7 días alcanzó valores más bajos. Esto se debe a que, el éter tiene un efecto absorbente del agua de hidratación reduciendo la cantidad de agua disponible en el fraguado, y luego libera el agua propiciando la hidratación de las partículas haciendo que alcance mayor resistencia en los días posteriores al mezclado y vaciado.

Asimismo, con la incorporación de fibras metálicas se permitió obtener resistencias residuales una vez que el hormigón ha fisurado dando así resistencias menores a la resistencia pico (resistencia a flexión) a medida que la fisura va aumentando. A los 28 días, para la dosificación SP2.5\_s/E\_F20 se obtuvieron resistencias residuales fr1 de 1.3 MPa, fr2 de 1.2 MPa, fr3 de 1 MPa y fr4 de 0.8 MPa, lo que se observa que fueron disminuyendo a medida que la fisura va aumentando. Para la dosificación SP6\_E0.5\_F20 fue diferente, se obtuvieron resistencias residuales fr1 de 1.2 MPa, fr2 de 1.4 MPa, fr3 de 1.3 MPa y fr4 de 1.3 MPa, manteniéndose constante a medida que la fisura va aumentando. Esto puede atribuirse al efecto que genera el éter con el paso del tiempo, de tener una menor adherencia a tener una mejor adherencia y agarre entre fibra y hormigón con lo cual evita que las resistencias residuales disminuyan cuando la fisura va aumentando cuando hay una carga externa.

#### **Con árido reciclado**

En cuanto a la resistencia a flexión, las dosificaciones sin éter fueron mayores a las dosificaciones con éter en un rango 23 – 56% respecto a las dosificaciones con éter; mientras que, en cuanto a la resistencia a compresión, las dosificaciones sin éter fueron mayores a las dosificaciones con éter en un rango 51 – 71% respecto a las dosificaciones con éter.

La resistencia a flexión no repercute significativamente tanto para las dosificaciones sin éter ni para las dosificaciones con éter. La resistencia a compresión va disminuyendo significativamente a medida que el % de árido reciclado va aumentando para las

dosificaciones sin éter; de igual forma, la resistencia a compresión disminuye gradualmente a medida que el % de árido reciclado va aumentando para las dosificaciones con éter. Esto se debe a que, el éter provoca un efecto reductor en la resistencia.

#### 5.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Resulta importante seguir desarrollando materiales y sistemas estructurales de acuerdo con las necesidades constructivas, por ello, es necesario plantear nuevas líneas de investigación que permitan resolver los desafíos que presentan la caracterización mecánica y la utilización de impresión 3D.

A continuación, se detallan futuras líneas de investigación con el fin de orientarse en distintos aspectos que integren soluciones alternativas:

- Utilizar distintos tipos de hormigones para las fases de hormigón con fibras metálicas y hormigón con árido reciclado. Se podría utilizar el hormigón gris que se usó en la primera etapa para las etapas mencionadas.
- Sustituir las fibras metálicas por otros materiales de fibras con el fin de obtener el efecto en la resistencia a flexión y compresión, tales como fibras plásticas, fibras de caucho, fibras textiles, entre otras).
- Sustituir el éter hidroxipropilmetilcelulosa por otro tipo de éter más comercial como el éter carboximetilcelulosa con el fin de obtener el efecto en la resistencia a flexión y compresión.
- Incluir una nueva etapa: hormigón blanco con fibras metálicas y áridos reciclados, con la finalidad de obtener la caracterización mecánica mediante los ensayos de flexión, flexo – tracción y compresión.
- Añadir ensayos de durabilidad tales como el ensayo de penetración de cloruros en el caso de haber fibras metálicas en la composición, ensayo de carbonatación, ensayo de resistencia al hielo-deshielo de hormigones endurecidos, ensayo de la resistencia al choque térmico, entre otros.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Alhumayani, M. Gomaa, V. Soebarto, and W. Jabi, “Environmental assessment of large-scale 3D printing in construction: A comparative study between cob and concrete,” *J Clean Prod*, vol. 270, p. 122463, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.122463.
- [2] T. Wangler, N. Roussel, F. P. Bos, T. A. M. Salet, and R. J. Flatt, “Digital Concrete: A Review,” *Cem Concr Res*, vol. 123, p. 105780, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2019.105780.
- [3] B. Khoshnevis, “Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies,” *Autom Constr*, vol. 13, no. 1, pp. 5–19, Jan. 2004, doi: 10.1016/J.AUTCON.2003.08.012.
- [4] R. A. Buswell, W. R. Leal de Silva, S. Z. Jones, and J. Dirrenberger, “3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research,” *Cem Concr Res*, vol. 112, pp. 37–49, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2018.05.006.
- [5] A. R. Arunothayan, B. Nematollahi, R. Ranade, S. H. Bong, J. G. Sanjayan, and K. H. Khayat, “Fiber orientation effects on ultra-high performance concrete formed by 3D printing,” *Cem Concr Res*, vol. 143, May 2021, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2021.106384.
- [6] F. Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed, and T. Salet, “Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing,”



- <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>, vol. 11, no. 3, pp. 209–225, Jul. 2016, doi: 10.1080/17452759.2016.1209867.
- [7] G. Ma, Z. Li, and L. Wang, “Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing,” *Constr Build Mater*, vol. 162, pp. 613–627, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.12.051.
- [8] J. F. Caron, L. Demont, N. Ducoulombier, and R. Mesnil, “3D printing of mortar with continuous fibres: Principle, properties and potential for application,” *Autom Constr*, vol. 129, p. 103806, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.AUTCON.2021.103806.
- [9] M. T. Souza, I. M. Ferreira, E. Guzi de Moraes, L. Senff, and A. P. Novaes de Oliveira, “3D printed concrete for large-scale buildings: An overview of rheology, printing parameters, chemical admixtures, reinforcements, and economic and environmental prospects,” *Journal of Building Engineering*, vol. 32, p. 101833, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.JOBE.2020.101833.
- [10] “Functional fibres for concretes & mortar - baumhüter extrusion GmbH.” [https://www.baumhueter-extrusion.com/products/pb-eurofiber/functional-fibres-for-concretes/?gclid=CjwKCAjwzY2bBhB6EiwAPpUpZnUZnQoPnFtuH-O9NtgWxdDQf-9zUQRTYmHmK3OCCj-qjQcjNjcAGhoC76oQAvD\\_BwE](https://www.baumhueter-extrusion.com/products/pb-eurofiber/functional-fibres-for-concretes/?gclid=CjwKCAjwzY2bBhB6EiwAPpUpZnUZnQoPnFtuH-O9NtgWxdDQf-9zUQRTYmHmK3OCCj-qjQcjNjcAGhoC76oQAvD_BwE) (accessed Nov. 03, 2022).
- [11] M. Hambach and D. Volkmer, “Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste,” *Cem Concr Compos*, vol. 79, pp. 62–70, May 2017, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2017.02.001.
- [12] B. Panda, S. Chandra Paul, and M. Jen Tan, “Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material,” *Mater Lett*, vol. 209, pp. 146–149, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.MATLET.2017.07.123.
- [13] Y. Zhang and F. Aslani, “Development of fibre reinforced engineered cementitious composite using polyvinyl alcohol fibre and activated carbon powder for 3D concrete printing,” *Constr Build Mater*, vol. 303, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124453.
- [14] J. Sun, F. Aslani, J. Lu, L. Wang, Y. Huang, and G. Ma, “Fibre-reinforced lightweight engineered cementitious composites for 3D concrete printing,” *Ceram Int*, vol. 47, no. 19, pp. 27107–27121, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.CERAMINT.2021.06.124.
- [15] Y. Zhang, Y. Zhang, R. Qian, G. Liu, and H. Du, “Influence of steel fiber on the water absorption of 3D printed concrete,” *Mater Lett*, vol. 330, p. 133252, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATLET.2022.133252.
- [16] L. Ma *et al.*, “Pore structure, internal relative humidity, and fiber orientation of 3D printed concrete with polypropylene fiber and their relation with shrinkage,” *Journal of Building Engineering*, vol. 61, p. 105250, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.JOBE.2022.105250.
- [17] A. R. Arunothayan, B. Nematollahi, R. Ranade, S. H. Bong, and J. Sanjayan, “Development of 3D-printable ultra-high performance fiber-reinforced concrete for digital construction,” *Constr Build Mater*, vol. 257, p. 119546, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119546.
- [18] A. R. Arunothayan, B. Nematollahi, R. Ranade, and S. H. Bong, “Hardened Properties of 3D Printable Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete for Digital Construction Applications | Request PDF,” *Book: Rheology and Processing of Construction Materials*, 2020. [https://www.researchgate.net/publication/335392738\\_Hardened\\_Properties\\_of\\_3D\\_Printable\\_Ultra-High\\_Performance\\_Fiber-Reinforced\\_Concrete\\_for\\_Digital\\_Construction\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/335392738_Hardened_Properties_of_3D_Printable_Ultra-High_Performance_Fiber-Reinforced_Concrete_for_Digital_Construction_Applications) (accessed Nov. 03, 2022).

- [19] D. Y. Yoo, N. Banthia, and Y. S. Yoon, "Predicting the flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete," *Cem Concr Compos*, vol. 74, pp. 71–87, Nov. 2016, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2016.09.005.
- [20] A. Abrishambaf, M. Pimentel, and S. Nunes, "Influence of fibre orientation on the tensile behaviour of ultra-high performance fibre reinforced cementitious composites," *Cem Concr Res*, vol. 97, pp. 28–40, Jul. 2017, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2017.03.007.
- [21] S. T. Kang, B. Y. Lee, J. K. Kim, and Y. Y. Kim, "The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete," *Constr Build Mater*, vol. 25, no. 5, pp. 2450–2457, May 2011, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.11.057.
- [22] W. Meng and K. H. Khayat, "Improving flexural performance of ultra-high-performance concrete by rheology control of suspending mortar," *Compos B Eng*, vol. 117, pp. 26–34, May 2017, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2017.02.019.
- [23] B. Zhou and Y. Uchida, "Influence of flowability, casting time and formwork geometry on fiber orientation and mechanical properties of UHPFRC," *Cem Concr Res*, vol. 95, pp. 164–177, May 2017, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2017.02.017.
- [24] D. Y. Yoo, G. Zi, S. T. Kang, and Y. S. Yoon, "Biaxial flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete with different fiber lengths and placement methods," *Cem Concr Compos*, vol. 63, pp. 51–66, Oct. 2015, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2015.07.011.
- [25] V. P. Villar and N. F. Medina, "Alignment of hooked-end fibres in matrices with similar rheological behaviour to cementitious composites through homogeneous magnetic fields," *Constr Build Mater*, vol. 163, pp. 256–266, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.12.084.
- [26] M. J. H. Wijffels, R. J. M. Wolfs, A. S. J. Suiker, and T. A. M. Salet, "Magnetic orientation of steel fibres in self-compacting concrete beams: Effect on failure behaviour," *Cem Concr Compos*, vol. 80, pp. 342–355, Jul. 2017, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2017.04.005.
- [27] S. Bhattacharjee *et al.*, "Sustainable materials for 3D concrete printing," *Cem Concr Compos*, vol. 122, p. 104156, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104156.
- [28] W. Chen *et al.*, "Adopting recycled aggregates as sustainable construction materials: A review of the scientific literature," *Constr Build Mater*, vol. 218, pp. 483–496, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.05.130.
- [29] Y. Wu *et al.*, "Study on the rheology and buildability of 3D printed concrete with recycled coarse aggregates," *Journal of Building Engineering*, vol. 42, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.JOBE.2021.103030.
- [30] A. v. Rahul, M. K. Mohan, G. de Schutter, and K. van Tittelboom, "3D printable concrete with natural and recycled coarse aggregates: Rheological, mechanical and shrinkage behaviour," *Cem Concr Compos*, vol. 125, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104311.
- [31] H. Liu *et al.*, "3D printing concrete with recycled coarse aggregates: The influence of pore structure on interlayer adhesion," *Cem Concr Compos*, vol. 134, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2022.104742.
- [32] G. Bai, L. Wang, G. Ma, J. Sanjayan, and M. Bai, "3D printing eco-friendly concrete containing under-utilised and waste solids as aggregates," *Cem Concr Compos*, vol. 120, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104037.
- [33] H. Liu *et al.*, "Hardened properties of 3D printed concrete with recycled coarse aggregate," *Cem Concr Res*, vol. 159, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2022.106868.

- [34] S. Zou, J. Xiao, T. Ding, Z. Duan, and Q. Zhang, "Printability and advantages of 3D printing mortar with 100% recycled sand," *Constr Build Mater*, vol. 273, p. 121699, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121699.
- [35] M. K. Mohan, A. v. Rahul, B. van Dam, T. Zeidan, G. de Schutter, and K. van Tittelboom, "Performance criteria, environmental impact and cost assessment for 3D printable concrete mixtures," *Resour Conserv Recycl*, vol. 181, p. 106255, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2022.106255.
- [36] A. U. Rehman and J. H. Kim, "3D Concrete Printing: A Systematic Review of Rheology, Mix Designs, Mechanical, Microstructural, and Durability Characteristics," *Materials 2021, Vol. 14, Page 3800*, vol. 14, no. 14, p. 3800, Jul. 2021, doi: 10.3390/MA14143800.
- [37] A. Kazemian, X. Yuan, E. Cochran, and B. Khoshnevis, "Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture," *Constr Build Mater*, vol. 145, pp. 639–647, Aug. 2017, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.04.015.
- [38] A. v. Rahul, M. Santhanam, H. Meena, and Z. Ghani, "3D printable concrete: Mixture design and test methods," *Cem Concr Compos*, vol. 97, pp. 13–23, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2018.12.014.
- [39] V. N. Nerella, M. Näther, A. Iqbal, M. Butler, and V. Mechtcherine, "Inline quantification of extrudability of cementitious materials for digital construction," *Cem Concr Compos*, vol. 95, pp. 260–270, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2018.09.015.
- [40] Y. Qian and G. de Schutter, "Enhancing thixotropy of fresh cement pastes with nanoclay in presence of polycarboxylate ether superplasticizer (PCE)," *Cem Concr Res*, vol. 111, pp. 15–22, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2018.06.013.
- [41] D. Marchon, S. Kawashima, H. Bessaies-Bey, S. Mantellato, and S. Ng, "Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry," *Cem Concr Res*, vol. 112, pp. 96–110, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2018.05.014.
- [42] P. C. Taylor, G. F. Voigt, and U. States. F. H. Administration. O. of P. Technology, "Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State-of-the-Practice Manual," pp. 1–355, Oct. 2007, doi: 10.21949/1503647.
- [43] Y. W. D. Tay, Y. Qian, and M. J. Tan, "Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test," *Compos B Eng*, vol. 174, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2019.106968.
- [44] O. A. Mendoza Reales, P. Duda, E. C. C. M. Silva, M. D. M. Paiva, and R. D. T. Filho, "Nanosilica particles as structural buildup agents for 3D printing with Portland cement pastes," *Constr Build Mater*, vol. 219, pp. 91–100, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.05.174.
- [45] Y. Qian and S. Kawashima, "Use of creep recovery protocol to measure static yield stress and structural rebuilding of fresh cement pastes," *Cem Concr Res*, vol. 90, pp. 73–79, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2016.09.005.
- [46] L. Senff, D. Hotza, and J. A. Labrincha, "Effect of lightweight aggregates addition on the rheological properties and the hardened state of mortars," *Applied Rheology*, vol. 21, no. 1, 2011, doi: 10.3933/APPLRHEOL-21-13668.
- [47] Q. Yuan, D. Zhou, K. H. Khayat, D. Feys, and C. Shi, "On the measurement of evolution of structural build-up of cement paste with time by static yield stress test vs. small amplitude oscillatory shear test," *Cem Concr Res*, vol. 99, pp. 183–189, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2017.05.014.
- [48] T. Wangler *et al.*, "Digital Concrete: Opportunities and Challenges," *RILEM Technical Letters*, vol. 1, pp. 67–75, Oct. 2016, doi: 10.21809/RILEMTECHLETT.2016.16.

- [49] M. Asif, A. H. A. Dehwah, F. Ashraf, H. S. Khan, M. M. Shaukat, and M. T. Hassan, "Life Cycle Assessment of a Three-Bedroom House in Saudi Arabia," *Environments* 2017, Vol. 4, Page 52, vol. 4, no. 3, p. 52, Jul. 2017, doi: 10.3390/ENVIRONMENTS4030052.
- [50] K. L. Scrivener, V. M. John, and E. M. Gartner, "Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry," *Cem Concr Res*, vol. 114, pp. 2–26, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2018.03.015.
- [51] A. V. Reyes, M. Gomaa, A. Chatzivasileiadi, W. Jabi, and N. M. Wardhana, "Computing Craft Early stage development of a robotically-supported 3D printing system for cob structures," *Proceedings of the International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe*, vol. 1, pp. 791–800, 2018, doi: 10.52842/CONF.ECAADE.2018.1.791.
- [52] M. K. Dixit, "3-D Printing in Building Construction: A Literature Review of Opportunities and Challenges of Reducing Life Cycle Energy and Carbon of Buildings," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 290, no. 1, Jun. 2019, doi: 10.1088/1755-1315/290/1/012012.
- [53] I. Zabalza Bribián, A. Valero Capilla, and A. Aranda Usón, "Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential," *Build Environ*, vol. 46, no. 5, pp. 1133–1140, May 2011, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2010.12.002.
- [54] M. Kreiger and J. M. Pearce, "Environmental life cycle analysis of distributed three-dimensional printing and conventional manufacturing of polymer products," *ACS Sustain Chem Eng*, vol. 1, no. 12, pp. 1511–1519, Dec. 2013, doi: 10.1021/SC400093K/ASSET/IMAGES/MEDIUM/SC-2013-00093K\_0011.GIF.
- [55] J. Faludi, C. Bayley, S. Bhogal, and M. Iribarne, "Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment," *Rapid Prototyp J*, vol. 21, no. 1, pp. 14–33, Jan. 2015, doi: 10.1108/RPJ-07-2013-0067.
- [56] Y. Yao, M. Hu, F. di Maio, and S. Cucurachi, "Life cycle assessment of 3D printing geo-polymer concrete: An ex-ante study," *J Ind Ecol*, vol. 24, no. 1, pp. 116–127, Feb. 2020, doi: 10.1111/JIEC.12930.
- [57] I. Agustí-Juan and G. Habert, "Environmental design guidelines for digital fabrication," *J Clean Prod*, vol. 142, pp. 2780–2791, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2016.10.190.
- [58] G. Ji, T. Ding, J. Xiao, S. Du, J. Li, and Z. Duan, "A 3D Printed Ready-Mixed Concrete Power Distribution Substation: Materials and Construction Technology," *Materials* 2019, Vol. 12, Page 1540, vol. 12, no. 9, May 2019, doi: 10.3390/MA12091540.
- [59] W. J. Long, C. Lin, J. L. Tao, T. H. Ye, and Y. Fang, "Printability and particle packing of 3D-printable limestone calcined clay cement composites," *Constr Build Mater*, vol. 282, p. 122647, May 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.122647.
- [60] P. Sikora *et al.*, "The effects of nanosilica on the fresh and hardened properties of 3D printable mortars," *Constr Build Mater*, vol. 281, p. 122574, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.122574.
- [61] Y. Zhang, W. Luo, J. Wang, Y. Wang, Y. Xu, and J. Xiao, "A review of life cycle assessment of recycled aggregate concrete," *Constr Build Mater*, vol. 209, pp. 115–125, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.03.078.
- [62] D. R. Vieira, J. L. Calmon, and F. Z. Coelho, "Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review," *Constr Build Mater*, vol. 124, pp. 656–666, Oct. 2016, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.07.125.
- [63] R. Robayo-Salazar, J. Mejía-Arcila, R. Mejía de Gutiérrez, and E. Martínez, "Life cycle assessment (LCA) of an alkali-activated binary concrete based on natural

- volcanic pozzolan: A comparative analysis to OPC concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 176, pp. 103–111, Jul. 2018, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.05.017.
- [64] S. A. Khan, M. Koç, and S. G. Al-Ghamdi, “Sustainability assessment, potentials and challenges of 3D printed concrete structures: A systematic review for built environmental applications,” *J Clean Prod*, vol. 303, p. 127027, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.127027.
- [65] M. P. Tinoco, É. M. de Mendonça, L. I. C. Fernandez, L. R. Caldas, O. A. M. Reales, and R. D. Toledo Filho, “Life cycle assessment (LCA) and environmental sustainability of cementitious materials for 3D concrete printing: A systematic literature review,” *Journal of Building Engineering*, vol. 52, p. 104456, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.JOBE.2022.104456.
- [66] G. de Schutter, K. Lesage, V. Mechtcherine, V. N. Nerella, G. Habert, and I. Agusti-Juan, “Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials,” *Cem Concr Res*, vol. 112, pp. 25–36, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2018.06.001.
- [67] H. Yang, J. K. H. Chung, Y. Chen, and Y. Li, “The cost calculation method of construction 3D printing aligned with internet of things,” *EURASIP J Wirel Commun Netw*, vol. 2018, no. 1, pp. 1–9, Dec. 2018, doi: 10.1186/S13638-018-1163-9/TABLES/5.
- [68] V. Mechtcherine, V. N. Nerella, F. Will, M. Näther, J. Otto, and M. Krause, “Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing,” *Autom Constr*, vol. 107, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.AUTCON.2019.102933.
- [69] S. C. Paul, Y. W. D. Tay, B. Panda, and M. J. Tan, “Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction,” *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 311–319, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.ACME.2017.02.008.
- [70] “25% of Dubai buildings should be 3D printed by 2030, says ruler - Arabian Business,” Apr. 27, 2016. <https://www.arabianbusiness.com/gcc/25-of-dubai-buildings-should-be-3d-printed-by-2030-says-ruler-629875> (accessed Oct. 27, 2022).
- [71] “Product Center-Yingchuang Building Technique (Shanghai) Co.Ltd. (WinSun).” [http://www.winsun3d.com/En/Product/pro\\_inner\\_5/id/102](http://www.winsun3d.com/En/Product/pro_inner_5/id/102) (accessed Jan. 05, 2023).
- [72] M. Adaloudis and J. Bonnin Roca, “Sustainability tradeoffs in the adoption of 3D Concrete Printing in the construction industry,” *J Clean Prod*, vol. 307, p. 127201, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.127201.
- [73] UNE Normalización Española, “UNE-EN 196-1:2018 Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Dete...,” 2018.
- [74] UNE Normalización Española, “UNE-EN 12390-2:2020 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: F...,” Jul. 01, 2020.
- [75] Ibertest, “Máquina de ensayos de resistencia cementos AUTOTEST CIB | Ibertest,” <https://www.ibertest.es/>.
- [76] UNE Normalización Española, “UNE-EN 12390-5:2020 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: R...,” Feb. 12, 2020.
- [77] UNE Normalización Española, “UNE-EN 12390-4:2020 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 4: R...,” Apr. 22, 2020.
- [78] I. A. Cortez Flores, “Caracterización de un hormigón autocompactante de altas prestaciones reforzado con fibras de última generación,” 2017, Accessed: Nov. 15, 2022. [Online]. Available: <https://oa.upm.es/48718/>
- [79] UNE Normalización Española, “UNE-EN 14651:2007+A1:2008 Método de ensayo para hormigón con f...,” Jun. 04, 2008.