



**Universidad de Oviedo**  
**E.I. de Minas, Energía y Materiales**

Programa de Master en Ciencia y Tecnología de Materiales

**PRESTACIONES DEL HORMIGÓN DE MUY ALTO  
RENDIMIENTO FABRICADO CON LODOS MARINOS**

TRABAJO DE FIN DE MASTER

Autora: Lina Marcela Trujillo López

Directores:

Fernando López Gayarre.

Julia María Ayala Espina.

Junio 2022

## Contenido

Listado de abreviaturas .....	1
<b>1. Antecedentes.</b> .....	<b>2</b>
<b>2. Introducción.</b> .....	<b>5</b>
<b>3. Objetivos</b> .....	<b>7</b>
<b>3.1 Objetivo general</b> .....	<b>7</b>
<b>3.2 Objetivos específicos</b> .....	<b>7</b>
<b>4. Metodología</b> .....	<b>8</b>
<b>4.1 Caracterización de los Materiales</b> .....	<b>9</b>
Aditivo .....	10
Agua .....	11
Áridos .....	12
Cemento .....	15
Harina de Sílice .....	19
Humo de sílice .....	20
<b>4.1.1 Ensayo de densidad y absorción</b> .....	<b>21</b>
<b>4.1.2 Ensayo de densidad mediante picnómetro de helio</b> .....	<b>26</b>
<b>4.1.3 Ensayo de Equivalente de Arena</b> .....	<b>28</b>
<b>4.1.4 Ensayo granulométrico.</b> .....	<b>32</b>
<b>4.2 Amasadas de control.</b> .....	<b>35</b>
<b>4.3 Fabricación de HMAR.</b> .....	<b>37</b>
<b>4.3.1 Ensayo de escurrimiento o consistencia del HMAR.</b> .....	<b>39</b>
<b>4.3.2 Fabricación y curado de las probetas</b> .....	<b>41</b>
<b>4.4 Ensayos del HMAR endurecido</b> .....	<b>42</b>
<b>4.4.1 Ensayo de densidad</b> .....	<b>43</b>
<b>4.4.2 Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico</b> .....	<b>43</b>
<b>4.4.3 Ensayo de resistencia a flexión en 3 puntos.</b> .....	<b>45</b>
<b>4.4.4 Ensayo de resistencia a compresión</b> .....	<b>47</b>
<b>4.4.5 Ensayo de retracción del HMAR</b> .....	<b>48</b>
<b>5. Análisis de resultados.</b> .....	<b>51</b>
<b>5.1 Análisis del escurrimiento en fresco.</b> .....	<b>51</b>
<b>5.2 Análisis de la densidad del HMAR endurecido.</b> .....	<b>53</b>

5.3	Análisis de la velocidad de pulso ultrasónico.....	54
5.4	Análisis de la resistencia a flexión.....	56
5.5	Análisis de la resistencia a compresión.....	59
5.6	Análisis de la retracción del HMAR endurecido.....	61
6.	Conclusiones .....	65
7.	Referencias bibliográficas.....	68
8.	Anexos .....	72
8.1	Caracterización de los materiales.....	72
-	Resultados ensayo densidad y absorción.....	72
-	Resultados ensayo equivalente de Arena.....	72
-	Resultados ensayo granulometría.....	72
8.2	HMAR en fresco y endurecido.....	81
-	Resultados escurrimiento.....	81
-	Resultados ensayo densidad HMAR endurecido.....	82
-	Resultados ensayo de velocidad de pulso ultrasónico.....	83
-	Resultados ensayo de flexión en 3 puntos.....	84
-	Resultados ensayo de compresión.....	84
-	Resultados ensayo de retracción.....	85

### Lista de figuras

Figura 1:	Metodología de trabajo.....	8
Figura 2:	Materiales HMAR.....	10
Figura 3:	Aditivo viscocrete 225 Powder.....	11
Figura 4:	Agua para la fabricación de los HMAR.....	12
Figura 5:	Arenas silíceas 0/0,5mm y 0,5/1,6mm.....	13
Figura 6:	Arena de Llanes.....	14
Figura 7:	Tipos de cementos y composiciones: proporciones en masa.....	16
Figura 8:	Prescripciones mecánicas y físicas de los cementos.....	17
Figura 9:	Cemento III/A 42,5 N/SRC.....	17
Figura 10:	Características del cemento Tudela Veguín.....	18
Figura 11:	Harina de Sílice G-40.....	19
Figura 12:	Humo de sílice de Basf y Elkem.....	21
Figura 13:	Muestras de arena gruesa y fina sumergidas en agua por 24 horas.....	23
Figura 14:	Arenas saturadas y superficialmente secas.....	24
Figura 15:	Muestras al baño maría durante 24 horas.....	24
Figura 16:	Picnómetro aforado con la muestra + agua.....	25

<b>Figura 17: Picnómetro aforado solo con agua.</b> .....	25
<b>Figura 18: Secado muestras hasta masa constante.</b> .....	26
<b>Figura 19: Tarado del porta-muestras e ingreso de la muestra a analizar.</b> .....	27
<b>Figura 20: Ingreso de la muestra en el equipo y en funcionamiento.</b> .....	27
<b>Figura 21: Peso de la muestra a ensayar antes de verter la solución.</b> .....	29
<b>Figura 22: Proceso de agitado de la muestra durante 30 segundos.</b> .....	30
<b>Figura 23: Probetas en reposo al agregar la solución y las muestras previamente.</b> .....	30
<b>Figura 24: Lecturas de las medidas h1 y h2.</b> .....	31
<b>Figura 25: Lavado de las paredes de la probeta y reposo de 20 minutos.</b> .....	31
<b>Figura 26: Columna de tamices.</b> .....	33
<b>Figura 27: Curvas granulométricas arenas silíceas.</b> .....	33
<b>Figura 28: Equipo de difracción laser.</b> .....	34
<b>Figura 29: Granulometrías por difracción Laser.</b> .....	35
<b>Figura 30: Amasadora utilizada para fabricar HMAR.</b> .....	37
<b>Figura 31: Amasadas de control con exceso de agua.</b> .....	37
<b>Figura 32: Molde troncocónico.</b> .....	40
<b>Figura 33: Procedimiento ensayo.</b> .....	40
<b>Figura 34: Moldes para la fabricación del HMAR.</b> .....	41
<b>Figura 35: Cámara de curado.</b> .....	42
<b>Figura 36: Toma de medidas y peso de las probetas.</b> .....	43
<b>Figura 37: Procedimiento ensayo de velocidad de pulso ultrasónico.</b> .....	45
<b>Figura 38: Equipo multiensayos.</b> .....	46
<b>Figura 39: Probeta antes y después del ensayo a flexión.</b> .....	46
<b>Figura 40: Diagrama de fuerzas para determinar la resistencia a flexión.</b> .....	47
<b>Figura 41: Probeta antes y después del ensayo a compresión.</b> .....	48
<b>Figura 42: Equipo de retracción con varilla de control.</b> .....	49
<b>Figura 43: Probetas empleadas antes y durante la medición de la retracción.</b> .....	50
<b>Figura 44: Escurrimiento del HMAR al minuto 1.</b> .....	52
<b>Figura 45: Escurrimiento del HMAR al minuto 3.</b> .....	53
<b>Figura 46: Densidad media HMAR amasadas AN, AE y AS.</b> .....	54
<b>Figura 47: Velocidad de pulso ultrasónico media amasada AN.</b> .....	55
<b>Figura 48: Velocidad de pulso ultrasónico media amasada AE.</b> .....	55
<b>Figura 49: Velocidad de pulso ultrasónico medio amasada AS.</b> .....	56
<b>Figura 50: Resistencia a flexión media amasada AN.</b> .....	57
<b>Figura 51: Resistencia a flexión media amasada AE.</b> .....	58
<b>Figura 52: Resistencia a flexión media amasada AS.</b> .....	58
<b>Figura 53: Resistencia a compresión media amasada AN.</b> .....	59
<b>Figura 54: Resistencia a compresión media amasada AE.</b> .....	60
<b>Figura 55: Resistencia a compresión medio amasada AS.</b> .....	61
<b>Figura 56: Análisis de la retracción media en la amasada AN.</b> .....	62
<b>Figura 57: Análisis de la retracción media en la amasada AE.</b> .....	63
<b>Figura 58: Análisis de la retracción media en la amasada AS.</b> .....	64

### Lista de tablas

<b>Tabla 1: Composición química arena de Llanes.....</b>	<b>14</b>
<b>Tabla 2: Características físicas y químicas harina de sílice G-40.....</b>	<b>20</b>
<b>Tabla 3: Características físicas y químicas humo de Basf y Elkem.....</b>	<b>21</b>
<b>Tabla 4: Fórmulas para densidad y absorción.....</b>	<b>23</b>
<b>Tabla 5: Resultados ensayo de densidad y absorción.....</b>	<b>23</b>
<b>Tabla 6: Resultados Densidad picnómetro Helio.....</b>	<b>27</b>
<b>Tabla 7: Fórmula para equivalente de arena.....</b>	<b>28</b>
<b>Tabla 8: Resultados equivalente de arena.....</b>	<b>29</b>
<b>Tabla 9: Dosificación HMAR de control.....</b>	<b>36</b>
<b>Tabla 10: Porcentajes de sustitución para amasadas de HMAR.....</b>	<b>36</b>
<b>Tabla 11: Resumen de las amasadas de la investigación.....</b>	<b>39</b>
<b>Tabla 12: Clasificación de la calidad del concreto según la velocidad de pulso.....</b>	<b>44</b>
<b>Tabla 13: Formulas para determinar la resistencia a flexión.....</b>	<b>47</b>
<b>Tabla 14: Resultados densidad y absorción áridos.....</b>	<b>72</b>
<b>Tabla 15: Resultados de equivalente de arena.....</b>	<b>72</b>
<b>Tabla 16: Resultados promedio granulometría arena 0/0,5mm.....</b>	<b>73</b>
<b>Tabla 17: Resultados promedio granulometría arena 0,5/1,6mm.....</b>	<b>73</b>
<b>Tabla 18: Resultados granulometría Arena Llanes.....</b>	<b>75</b>
<b>Tabla 19: Resultados granulometría Cemento III 42,5N SRC.....</b>	<b>77</b>
<b>Tabla 20: Resultados granulometría Harina Sílice G-40.....</b>	<b>79</b>
<b>Tabla 21: Resultados granulometría Humo de sílice de Elkem.....</b>	<b>81</b>
<b>Tabla 22: Resultados de los escurrimientos a 1 y 3 minutos.....</b>	<b>82</b>
<b>Tabla 23: Tabla 23: Resultados medidas de las probetas.....</b>	<b>82</b>
<b>Tabla 24: Resultados de pesos y densidad de las probetas.....</b>	<b>83</b>
<b>Tabla 25: Resultados de la velocidad de pulso ultrasónico.....</b>	<b>83</b>
<b>Tabla 26: Resultados para la flexión en 3 puntos.....</b>	<b>84</b>
<b>Tabla 27: Resultados promedios de ensayo a compresión.....</b>	<b>85</b>
<b>Tabla 28: Resultados Retracción amasadas AN.....</b>	<b>86</b>
<b>Tabla 29: Resultados Retracción amasadas AE.....</b>	<b>87</b>
<b>Tabla 30: Resultados Retracción amasadas AS.....</b>	<b>88</b>

# Listado de abreviaturas

<b>ACI</b>	American Concrete Institute.
<b>AE</b>	Amasadas con 25% de aditivo Extra.
<b>AN</b>	Amasadas sin aditivo extra.
<b>ARM</b>	Arena Residual de Mina.
<b>AS</b>	Amasadas con Arena de Llanes Saturada.
<b>EHE</b>	Instrucción Española del Hormigón Estructural.
<b>HAR</b>	Hormigón de Alto Rendimiento.
<b>HMAR</b>	Hormigón de Muy Alto Rendimiento.
<b>HMARF</b>	Hormigón de Muy Alto Rendimiento con Fibra.
<b>HMARR</b>	Hormigón de Muy Alto Rendimiento Reciclado.
<b>K</b>	Clinker.
<b>L</b>	Caliza con Carbón orgánico menor igual a 0,5% masa.
<b>LL</b>	Caliza con Carbón orgánico menor igual a 0,2% masa.
<b>P</b>	Puzolana Natural.
<b>Q</b>	Puzolana Natural Calcinada.
<b>RCD</b>	Residuos de Construcción y Demolición.
<b>S</b>	Escoria de Alto Horno.
<b>SF</b>	Humo de Sílice
<b>SP</b>	Aditivo Superplastificante.
<b>V</b>	Cenizas Volantes.

# 1. Antecedentes.

A lo largo de la historia de la humanidad, las obras civiles han evolucionado en torno a las necesidades cada vez más exigentes de la sociedad, y el uso del cemento para la fabricación de hormigones con diferentes fines es extenso [1]. Se sabe que las primeras mezclas fabricadas, hace más de 2000 años, utilizaban distintos materiales naturales como la cal calcinada y la ceniza puzolánica, y algunas veces se hizo uso de materiales o sustancias tan extrañas como la sangre de animales. Una obra icónica a nivel mundial es el panteón de Roma que en la actualidad es una de las estructuras mejor conservada; fabricada por grandes arquitectos e ingenieros de la época del imperio romano, los cuales demostraron su increíble destreza en la fabricación de hormigones de excelentes prestaciones sin usar aceros de refuerzos como en esta estructura y una excepcional durabilidad.

En 1824 se patenta el cemento “portland” (lleva este nombre por la similitud del cemento endurecido con el material de roca caliza que se encuentra en Portland, Inglaterra) por el inglés Joseph Aspdin y mejorado años más tarde por su hijo William Aspdin. Sin embargo, este hallazgo no habría sido posible sin previas investigaciones de grandes científicos como las del inglés John Smeaton y el francés Louis Joseph Vicat. En la actualidad existen una gran gama de cementos para fabricar morteros y hormigones, los cuales varían según el tipo de uso que se requiera, tipo de infraestructura, las condiciones a las que estará expuesta y su vida útil.

La imposición constante de la humanidad en la creación y desarrollo de nuevos materiales, la adecuación y mejoras de los ya existentes, nos ha permitido avanzar en la búsqueda interminable de construir sistemas de infraestructura civil con mejores prestaciones mecánicas [2], mejor calidad y funcionamiento, menores costos de fabricación y mantenimiento, durabilidad [3][4] y estabilidad.

En las últimas décadas se ha optimizado los procesos de diseño de nuevos cementos y hormigones utilizando residuos de demolición, permitiendo reciclar gran parte de los hormigones que ya han cumplido su ciclo de servicio en la infraestructura demolida pero que aun así puede ser utilizada nuevamente creando nuevas mezclas con mayor durabilidad e incluso más resistentes que los hormigones de los que proceden. Los diseños de mezcla con materiales

recicladados aportan a la reutilización de los residuos llevados a vertederos y la reducción del consumo de recursos naturales.

Sin embargo, los intentos por modificar el comportamiento frágil de los hormigones e incrementar la resistencia a compresión, pero sobre todo su comportamiento a tracción y fisuración han llevado a utilizar diferentes tipos de materiales para mejorar estos desempeños, tales como las fibras metálicas o poliméricas, entre otros; estos se incluyen en el amasado del hormigón [5]. También el uso de nanomateriales y superplastificantes han logrado que se reduzca la porosidad de los hormigones y presenten altas (HAR) y muy altas prestaciones (HMAR). Los rangos de resistencia de estos hormigones varían según las normativas o los autores, entre al menos los 50MPa y los 140 MPa.

Los nanomateriales (nano-tubos, nano-fibras, nano-hilos, nano-partículas) como los nano-sílice (nano-SiO<sub>2</sub>), el nano-carbonato de calcio (nano-CaCO<sub>3</sub>), el nano-titanio (nano-TiO<sub>2</sub>), entre otros, logran excelentes prestaciones mecánicas, también son ideales para el autocurado [6][7], así como para capturar y destruir el CO<sub>2</sub> producido por las reacciones químicas de la carbonatación [8].

Los superplastificantes por su parte logran una relación de agua/cemento menor y por tanto se permite obtener una estructura más compacta, una mejor trabajabilidad en fresco y un mejor desarrollo de la resistencia en sus primeros días de curado. Sin embargo, el uso de este material debe ser analizado según la relación costo/beneficio en su implementación.

En muchos países se está llevando a cabo la fabricación de HMAR siguiendo las recomendaciones, normativas o guías existentes de diferentes países para tratar de obtener la fabricación de estos hormigones de una forma más controlada, confiable y eficiente económicamente. Existen muchos ejemplos a nivel mundial del uso de hormigones de altas prestaciones como el edificio de las Torres Petronas en Malasia, el museo de arte de Sao Pablo en Brasil, el Burj Khalifa en Emirato Árabes Unidos, entre otros.

Otra de las innovaciones son el uso de la microsílica o humo de sílice que actúa como superligante ya que al hidratar el cemento reacciona con el hidróxido de calcio para formar silicato de calcio mejorando la resistencia mecánica y reduciendo la permeabilidad.

Otro de los avances en pro del desarrollo de los HMARR con las excelentes prestaciones antes mencionadas van orientadas en la disminución de los efectos contaminantes optimizando las técnicas y procesos de producción de los materiales alternativos que permiten que el

consumo de energía sea menor. También se está implementando el uso de materiales como los áridos procedentes de residuos de minas (ARM) y de dragado de los puertos marítimos (LM) como sustitutos parciales o totales de áridos naturales exclusivos para el sector de la construcción. Esto se realiza como medida urgente para encontrar materiales que suplan la gran demanda de los áridos naturales que están acabando rápidamente con los ecosistemas existentes.

El uso eficiente de los materiales de construcción ya sean nuevos, reciclados, residuales, modificados o provenientes de los residuos de otras industrias, son la única forma con la que podemos garantizar la gran demanda de la sociedad por mejores infraestructuras de una manera más sostenible y menos contaminante.

## 2. Introducción

En este trabajo se pretende estudiar y analizar el impacto generado al reutilizar materiales de diferentes industrias en el sector de la construcción, especialmente aquellos materiales que se extraen de los puertos marítimos para controlar el calado y evitar accidentes o problemas. Cada año la industria de la construcción emplea miles millones de toneladas de materias primas con el objetivo de diseñar o crear diferentes productos que incrementen la durabilidad de las construcciones, necesiten menos controles a corto y mediano plazo y su coste sea reducido con el único fin de mejorar las prestaciones de sus usuarios.

En las últimas décadas con el consumo excesivo de estas materias primas, se ha visto en la necesidad de implementar medidas para reducir la sobreexplotación de los recursos naturales y el vertido de residuos y materiales en lugares de disposición final. El impacto ambiental que conlleva el desarrollo de los diferentes tipos de obras de infraestructura existentes están causando que cada año aumente los gases de efecto invernadero, que se destruyan con mayor rapidez diferentes tipos de hábitats vitales para el desarrollo de la naturaleza y la vida y por tanto que cada vez tengamos escasez de estos productos, cabe aclarar que el sector de la construcción no es el único que genera una polución elevada ni el consumo excesivo de materias primas.

A pesar de que en la industria de la construcción alrededor del mundo existen normativas y literatura extensa donde se alienta el uso de materiales de demolición (RCD) para la fabricación de nuevas obras [9] como se contempla en la normativa española EHE-08 [10], aún existen pocas normas que regulen el uso indiscriminado de materias primas, el reúso de materiales de diferentes industrias o los que ya están dispuestos en los vertederos. En Europa existen planes para mitigar, proteger y conservar los recursos naturales, con el fin de lograr que la unión europea tenga una economía con bajas emisiones. Uno de los planes más grandes es el pacto verde europeo [11] el cual contempla distintos apartados para garantizar que se trabaje en pro de una economía eficiente ambientalmente.

Es necesario que se desarrollen investigaciones para establecer las ventajas y desventajas de utilizar diferentes productos o subproductos del sector de la construcción o de otras con el fin de garantizar su adecuado uso y las posibles recomendaciones en los diferentes tipos de obras

que puedan ser implementados. Por ejemplo, el uso de distintos tipos de arenas de desechos de minas [12][13] como materiales para fabricar HMARR, para reemplazar el uso de agregados naturales y demostrar la influencia positiva de estos materiales en diferentes porcentajes de sustitución.

En esta investigación se pretende trabajar con un material de dragado de la ría de Llanes de la comunidad autónoma de Asturias – España como material de sustitución con el objetivo de analizar la variación de las propiedades físico-mecánicas bajo diferentes porcentajes de sustitución y preparación.

## 3. Objetivos

### 3.1 Objetivo general

Evaluar y comparar el comportamiento físico-mecánico del HMAR fabricado utilizando diferentes porcentajes de sustitución de arena de dragado de la ría de Llanes.

### 3.2 Objetivos específicos

1. Estudiar los avances de la industria de la construcción con diferentes tipos de residuos por medio de investigaciones recientes.
2. Analizar las características de los áridos y los demás materiales para la fabricación de los hormigones de muy alto rendimiento.
3. Realizar amasadas de prueba para observar los cambios de estas en su fabricación y así obtener una dosificación estándar para lograr eficiencia energética, reducción de consumo de materiales y mejora de las propiedades.
4. Reutilizar las arenas de dragado o lodos marinos extraídos con el fin de reducir la cantidad de materiales en los vertederos.
5. Evaluar la calidad de las probetas mediante ensayos no destructivos que permitan conocer o predecir el comportamiento mecánico.
6. Fabricar HMAR con diferentes porcentajes de sustitución de material de dragado siguiendo los parámetros establecidos en las amasadas de prueba para analizar su comportamiento mecánico mediante ensayos destructivos.

## 4. Metodología

La metodología aplicada para este trabajo se presenta en la siguiente figura. (Figura 1)

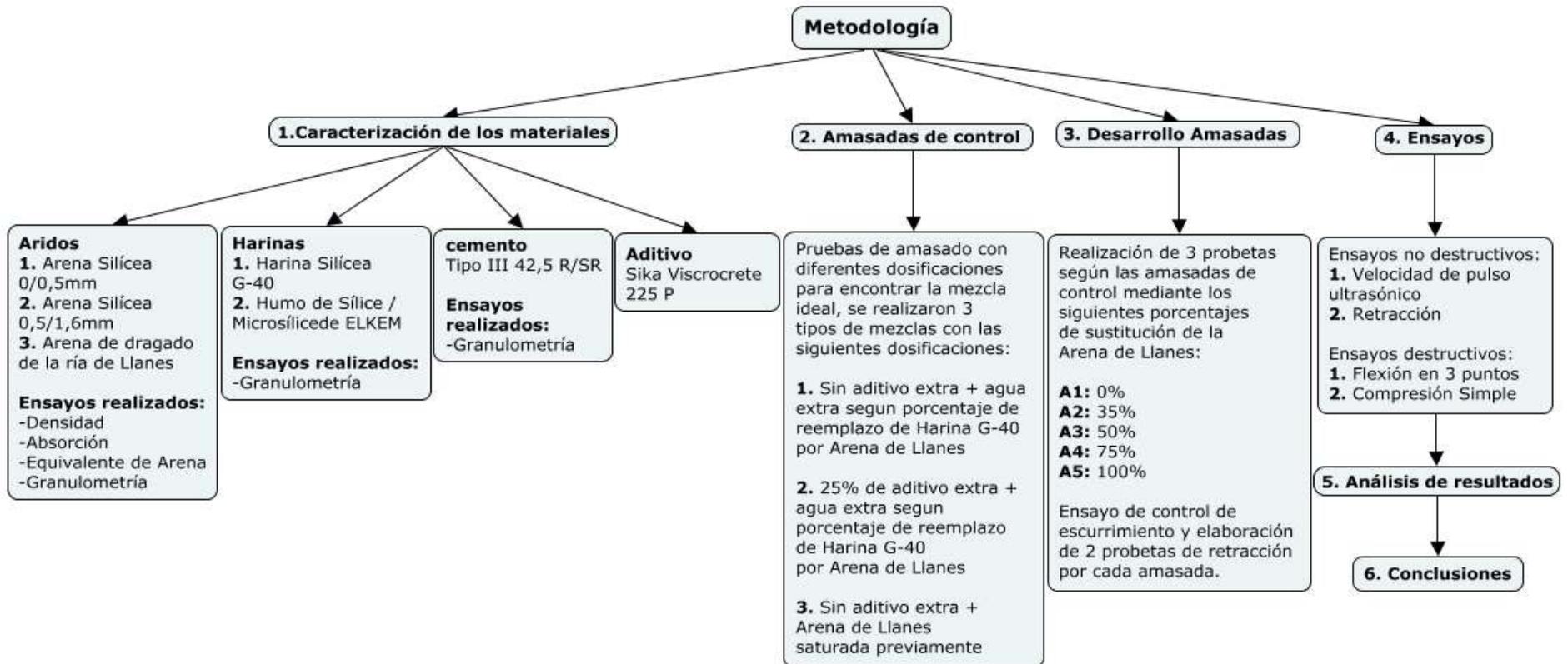


Figura 1: Metodología de trabajo.

## 4.1 Caracterización de los Materiales

Para la realización de HMAR es necesario caracterizar los materiales que se emplean en su fabricación tales como, el cemento, los áridos, el agua, los finos y los aditivos. Al final las propiedades obtenidas dependerán las mejores o peores prestaciones del HMAR

Una de las características principales de los HMAR es que suelen tener una relación agua/cemento menores o iguales a 0,2. De esta manera se logra una menor cantidad de huecos en su interior y por tanto se obtienen mejores propiedades físicas y mecánicas. En la presente investigación este valor de la relación de agua/cemento varía según el uso de la arena de dragado de la ría de Llanes como sustituyente de la harina de sílice G-40 utilizada.

Es importante destacar que el uso de aditivos para lograr una buena trabajabilidad en estos hormigones es costosa, se debe analizar el costo/beneficio de los mismos y analizar posibles reemplazos de materiales residuales provenientes de otras industrias que ayuden a disminuir los costos, por ende reducción de materiales que son llevados a vertederos que generan un impacto ambiental y visual negativo.

En esta investigación se han utilizado diferentes tipos de materiales que constituyen el HMAR (**Figura 2**), dos (2) tipos de arenas silíceas, un (1) tipo de árido proveniente del dragado de la ría de Llanes utilizado como material sustituyente, un (1) tipo de harina de sílice, dos (2) tipos de humo de sílice o microsíllice, un (1) tipo de cemento, un (1) tipo de aditivo y agua.

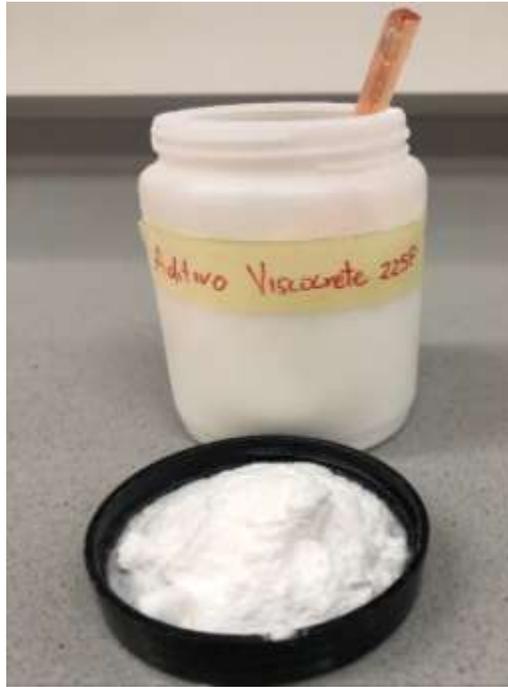
A continuación, se presentan los materiales utilizados para la fabricación de HMAR con sus respectivas características, así como los ensayos realizados para su caracterización antes de realizar amasadas de control. (**Figura 2**).



**Figura 2: Materiales HMAR.**

### **Aditivo**

Los aditivos utilizados en la fabricación de HMAR son los super plastificantes (SP) de última generación. Son ideales ya que logran una reducción substancial de agua, ayudan a que la estructura sea más densa y como consecuencia se logren mejores prestaciones mecánicas. Estos HMAR, al poseer un bajo contenido de agua, necesitan el uso de superplastificantes, ayudando a que las mezclas obtengan una trabajabilidad adecuada, que las partículas de cemento logren una mejor hidratación y se desarrolle mejor la resistencia mecánica, además de que no necesitar una compactación o vibrado en la puesta en obra de los hormigones como en el caso de esta investigación. Si bien es cierto que el uso de los aditivos puede ser costoso, el beneficio logrado, muchas veces compensa dichos costos. Para el desarrollo de esta investigación se utilizó el aditivo de la empresa Sika denominado Sika Viscocrete 225P (powder) (**Figura 3**). Este material se almacenó en un cubo plástico marcado para asegurar su conservación.



**Figura 3: Aditivo visocrete 225 Powder.**

## **Agua**

El agua usada para esta investigación fue tomada de los grifos dispuestos en el laboratorio, siempre procurando observar si sufrían cambios en el color o si se presentaban pequeños sedimentos para garantizar que fuera adecuada y potable para la fabricación de las amasadas. El agua tomada cumple con las especificaciones correspondientes al Código Estructural [10] contempladas en el artículo 27. **(Figura 4).**



Figura 4: Agua para la fabricación de los HMAR.

## Áridos

Los agregados o áridos utilizados para la fabricación de los HMAR son arenas de tipo silíceo. Poseen bajos índices de absorción de agua y aportan a la mezcla un alto rendimiento mecánico.

### 1. Arenas silíceas

Las arenas naturales de origen silíceo utilizadas para la fabricación del HMAR (**Figura 5**) son de fracciones de tamaño de 0/0,5mm (arena fina) y 0,5/1,6mm (arena gruesa), suministradas por la compañía **Sílices La Cuesta**, procedente de la cantera ubicada en Cornellana, Asturias. Este tipo de arenas fueron utilizadas como esqueleto para aportar resistencia a los hormigones. Además, poseen una baja capacidad de absorción de agua ideal para los HMAR. Los big bags se cubren con un plástico para evitar contaminantes, humedad o se mojen de agua o alguna sustancia.



Figura 5: Arenas silíceas 0/0,5mm y 0,5/1,6mm.

## 2. Arena de dragado o lodos Marinos

La arena de la ría de Llanes (**Figura 6**) usada como material de sustitución, es un material residual de dragado extraída para el desarrollo de varias investigaciones como esta. Este material ha sido secado previamente en horno para su implementación en el hormigón, es un material natural que contiene partículas biológicas ya que no fue sometido a ningún tratamiento para separar partículas no deseadas o minerales. Por su procedencia posee una alta capacidad de absorción de agua y contenido de minerales los cuales han sido analizados (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).



Figura 6: Arena de Llanes.

Compuesto	Contenido (%)
<b>SiO<sub>2</sub></b>	34,352
<b>CaO</b>	32,387
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	18,298
<b>K<sub>2</sub>O</b>	10,933
<b>TiO<sub>2</sub></b>	2,218
<b>ZnO</b>	0,730
<b>SO<sub>3</sub></b>	0,319
<b>Br</b>	0,232
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,19
<b>SrO</b>	0,186
<b>CuO</b>	0,11
<b>As<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,045

Tabla 1: Composición química arena de Llanes.

## Cemento

“En el sentido más amplio, la palabra cemento indica un material aglomerante que tiene propiedades de adherencia y cohesión, las cuales le permiten unir fragmentos minerales entre sí, para formar un todo compacto con resistencia y durabilidad adecuadas”. [14]

Los cementos son producto de la fusión parcial de materiales como la arcilla y la piedra caliza. Según el tipo de cemento la cantidad de clinker (K) varía e incorporan adiciones en mayor o menor proporción como las escorias de horno alto (S), el humo de sílice (SF), las puzolanas naturales (P), la puzolana natural calcinada (Q), las cenizas volantes (V), la caliza (L y LL) y/o aditivos en menores proporciones.

La instrucción para la recepción de cementos RC-16 [15] de España contempla todos los tipos de cementos y sus características, tales como los cementos comunes, los cementos resistentes a sulfatos y/o agua de mar, los cementos blancos, de bajo calor de hidratación, para usos especiales y los cementos de aluminato de calcio. (Figura 7).

A su vez la norma estipula las características mecánicas y físicas que los cementos deben de cumplir como mínimo. (Figura 8).

Tipos	Denominación	Designación	Composición (proporción en masa <sup>1)5)</sup>										Componente minoritarios	
			Componentes principales											
			Clinker K	Escoria de homo alto S	Humo de Sílice D <sup>2)</sup>	Puzolana		Cenizas volantes		Esquistos calcinados T	Caliza <sup>4)</sup>			
Natural P	Natural calcinada Q	Silíceas V				Calcáreas W	L	LL						
CEM I	Cemento pórtland	CEM I	95-100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
CEM II	Cemento pórtland con escoria	CEM II/A-S	80-94	6-20	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
	Cemento pórtland con humo de sílice	CEM II/A-D	90-94	–	6-10	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/A-P	80-94	–	–	6-20	–	–	–	–	–	–	–	0-5
	Cemento pórtland con puzolana	CEM II/B-P	65-79	–	–	21-35	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	–	–	–	6-20	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	–	–	–	21-35	–	–	–	–	–	–	0-5
	Cemento pórtland con ceniza volante	CEM II/A-V	80-94	–	–	–	–	–	6-20	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-V	65-79	–	–	–	–	–	21-35	–	–	–	–	0-5
		CEM II/A-W	80-94	–	–	–	–	–	–	6-20	–	–	–	0-5
		CEM II/B-W	65-79	–	–	–	–	–	–	21-35	–	–	–	0-5
	Cemento pórtland con esquistos calcinados	CEM II/A-T	80-94	–	–	–	–	–	–	–	6-20	–	–	0-5
		CEM II/B-T	65-79	–	–	–	–	–	–	–	21-35	–	–	0-5
	Cemento pórtland con caliza	CEM II/A-L	80-94	–	–	–	–	–	–	–	–	6-20	–	0-5
		CEM II/B-L	65-79	–	–	–	–	–	–	–	–	21-35	–	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	–	–	–	–	–	–	–	–	–	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	–	–	–	–	–	–	–	–	–	21-35	0-5
	Cemento pórtland compuesto <sup>3)</sup>	CEM II/A-M	80-88	12-20										0-5
CEM II/B-M		65-79	←----- 21-35 -----→										0-5	
CEM III	Cemento de homo alto	CEM III/A	35-64	36-65	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
CEM IV	Cemento puzolánico <sup>3)</sup>	CEM IV/A	65-89	–	←----- 11-35 -----→						–	–	–	0-5
		CEM IV/B	45-64	–	←----- 36-55 -----→						–	–	–	0-5
CEM V	Cemento compuesto <sup>3)</sup>	CEM V/A	40-64	18-30	–	←--- 18-30 ---→			–	–	–	–	–	0-5
		CEM V/B	20-38	31-49	–	←--- 31-49 ---→			–	–	–	–	–	0-5

Figura 7: Tipos de cementos y composiciones: proporciones en masa.

Clase de resistencia	Resistencia a compresión <sup>(2)</sup> UNE-EN 196-1 (N/mm <sup>2</sup> )			Tiempo de principio de fraguado UNE-EN196-3 (min)	Estabilidad de volumen UNE-EN196-3 (Expansión, mm)	Calor de Hidratación <sup>(3)</sup> (J/g)	
	Resistencia inicial		Resistencia nominal 28 días			UNE-EN 196-9	UNE-EN 196-8
	2 días	7 días				41 horas	7 días
32,5 L <sup>(1)</sup>	–	≥12,0	≥32,5	≤ 52,5	≥75	≤ 10	≤ 270
32,5 N	–	≥16,0					
32,5 R	≥10,0	–	≥42,5	≤ 62,5	≥60	≤ 10	≤ 270
42,5 L <sup>(1)</sup>	–	≥16,0					
42,5 N	≥10,0	–					
42,5 R	≥20,0	–	≥52,5	–	≥45	≤ 10	≤ 270
52,5 L <sup>(1)</sup>	≥10,0	–					
52,5 N	≥20,0	–					
52,5 R	≥30,0	–					

**Figura 8: Prescripciones mecánicas y físicas de los cementos.**

El cemento para el desarrollo de esta investigación fue el CEM III/A 42,5 N/SRC (**Figura 9**) de la empresa Cementos Tudela Veguín [16] procedente del centro de producción de Aboño – Asturias y suministrado en sacos de 35 Kg. Es un cemento de horno alto, resistente a sulfatos. Para garantizar que el material no sufriera deterioro por efectos de la humedad del laboratorio o por el tiempo, se distribuyó el material en bolsas más pequeñas, se cerraron con cinta y se almacenaron en bidones grandes de plástico con cierre hermético los cuales han sido previamente marcados.



**Figura 9: Cemento III/A 42,5 N/SRC.**

Las características físicas y mecánicas están la siguiente figura. (Figura 10)

DENOMINACIÓN		Valor típico	Límites
III/A 42,5 N/SR			

PRESCRIPCIONES	QUÍMICAS	PÉRDIDA POR CALCINACIÓN (%)	UNE-EN 197-1	1,5	$\leq 5$
		RESIDUO INSOLUBLE (%)	UNE-EN 197-1	0,3	$\leq 5$
		TRIOXIDO DE AZUFRE SO <sub>3</sub> (%)	UNE-EN 197-1	1,5	$\leq 4$
		C3A (%)	UNE-EN 197-1	6	$\leq 8$
		C3A + C4AF (%)	UNE-EN 197-1	19	$\leq 25$
		CLORUROS (%)	UNE-EN 197-1	0,01	$\leq 0,1$
		ESCORIA (RESPECTO AL NÚCLEO) (%)	UNE-EN 197-1	42,4	$\geq 36$ y $\leq 65$
		CaO <sub>3</sub> (RESPECTO AL NÚCLEO) (%)	UNE-EN 197-1	4	$\leq 5$
	FÍSICAS	EXPANSIÓN LE CHATELIER (mm)	UNE-EN 197-1	0,1	$\leq 5$
		FRAGUADO (min) UNE-EN 197-1	PRINCIPIO	210	$\geq 60$
	FINAL		260		
	MECÁNICAS	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (Mpa) UNE-EN 196-1	2 DIAS	20,1	$\geq 13,5$
			28 DIAS	56,6	$\geq 42,5$ y $\leq 62,5$

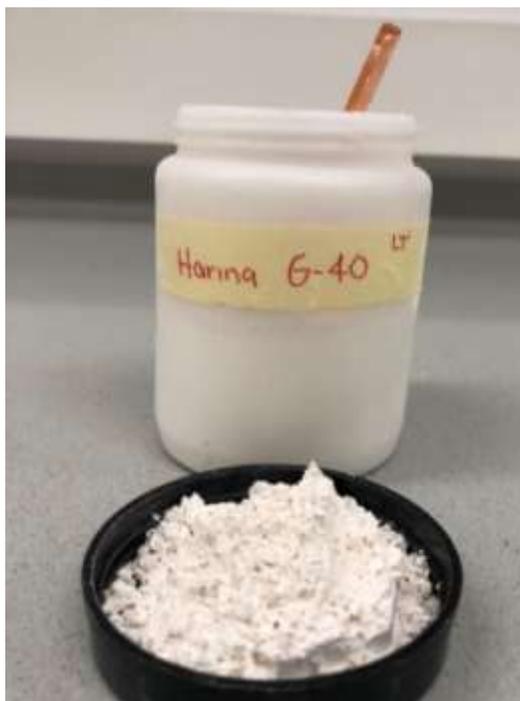
  

COMPOSICION NOMINAL %			
	CLINKER	ADICIÓN	COMP. MINORITARIOS
DECLARADA	54	41	5
NORMATIVA	35 - 64	36 - 65	0 - 5

Figura 10: Características del cemento Tudela Veguín.

## Harina de Sílice

El material utilizado fue suministrado por Sílices Gilarranz S.A en sacos de 20 Kg, provenientes de la provincia de Segovia. Este material cuenta con un tamaño de partícula máximo de 40  $\mu\text{m}$  y por su aspecto es denominada “harina” de sílice G-40 (**Figura 11**). La composición física y química a continuación mostradas fueron suministrados por la empresa. (**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).



**Figura 11: Harina de Sílice G-40.**

Características físicas	
Densidad real	2,57 g/cm <sup>3</sup>
Densidad aparente arena seca	0,8 g/cm <sup>3</sup>
Dureza (Mohs)	7
pH	7
Humedad en %	inf 0,2
Compuestos Químicos	Contenido (%)
SiO <sub>2</sub>	> 99,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,26
TiO <sub>2</sub>	0,05
K <sub>2</sub> O	0,04
CaO	0,02
Pérdida al fuego (1100°C)	0,17%

Tabla 2: Características físicas y químicas harina de sílice G-40.

### Humo de sílice

Los humos de sílice (SF) utilizados para la fabricación de los HMAR de esta investigación fueron suministrados por las compañías Elkem [17] en sacos de 25 kg y por Basf [18] en sacos de 20 kg (**Figura 12**). Estos materiales son usados tanto para actuar como materiales puzolánicos como en la fabricación de algunos cementos, ayudando a mejorar y obtener una estructura más compacta y, por tanto, mejorar la resistencia mecánica y su durabilidad a los medios expuestos. Estos materiales se almacenaron en bolsas más pequeñas y a su vez se almacenaron en cubos plásticos marcados con el fin de conservarlos ante cualquier daño expuesto. Los componentes presentes en estos materiales se pueden observar en la siguiente tabla (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).



Figura 12: Humo de sílice de Basf y Elkem.

Elkem microsíllica 940 sin densificar		Humo sílice Basf MasterRoc MS 610	
Propiedades	Contenido	Propiedades	Contenido
SiO <sub>2</sub>	> 90%	SiO <sub>2</sub>	≥ 85%
Retenido tamiz 45 μm	< 1,5%	Tamaño partícula media	0,15 μm
Densidad Bulk (U)	200-350 Kg/m <sup>3</sup>	Densidad aparente aproximada	550-700 Kg/m <sup>3</sup>
H <sub>2</sub> O (cuando se empaca)	< 1%	Contenido de Cloruro	< 0,1%

Tabla 3: Características físicas y químicas humo de Basf y Elkem.

#### 4.1.1 Ensayo de densidad y absorción

Este ensayo se determina por medio del humedecimiento de la muestra, la gravedad específica y el porcentaje de absorción de agua, con el objetivo de conocer el tipo de agregado y obtener un diseño de mezcla ideal.

Mediante la norma **UNE EN 1097-6 [19]** se analizaron los áridos más gruesos tales como la arenas silíceas 0,5/1,6mm y 0/0,5mm. El procedimiento realizado en primer lugar consistió en elegir material (aproximadamente 1 kg) mediante las técnicas de cuarteo manual y mecánico. La muestra fue llevada a una bandeja para luego ser sumergida en agua durante 24 horas. Pasado este tiempo la muestra se llevó a la condición de saturada y superficie seca por medio de una

corriente de aire caliente. Se verificó esta condición mediante el ensayo de molde cónico metálico el cual consiste en llenar el molde con material, apisonándolo 25 veces y al retirar el molde el material debe desmoronarse. En caso de que esto no ocurra se debe seguir secando el material y repetir este ensayo hasta que ocurra el desmoronamiento.

Una vez se obtuvo la condición de saturada y superficialmente seca se pesó una muestra de 600gr; en picnómetros de 1l se ingresó el material y se llenó de agua hasta la marca aforada. Seguidamente se le eliminaron las burbujas balanceando el picnómetro de forma inclinada; y se dejó reposar en baño maría a una temperatura aproximada de 22°C por 24 horas. Pasadas las 24 horas se sacó el picnómetro del baño maría para secarlo y luego poder pesarlo. Acto seguido se vació el material del picnómetro sobre una bandeja y una vez estuvo limpio el picnómetro se llenó con agua hasta la marca y se procedió a pesarlo. La muestra fue llevada a el horno hasta obtener una masa constante, (**Figura 13**, ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.). Se realizó el ensayo 1 vez por muestra ya que luego se corroboraron los resultados mediante el ensayo de densidad con picnómetro de helio. Siguiendo la normativa para este ensayo se realizó el siguiente paso a paso y se obtuvieron los siguientes resultados. (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

<b>Absorción (% abs)</b>
$\%Abs = \frac{100 * (M_1 - M_4)}{M_4}$
<b>Densidad seca al horno (SH)</b>
$\rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \times 1000$
<b>Densidad en condición saturada y superficialmente seca (ssd)</b>
$\rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \times 1000$
<b>Densidad Aparente (a)</b>

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \times 1000$$

Donde:

M1: Masa de la muestra saturada y superficialmente seca (g)

M2: Masa total del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua (g)

M3: Masa del picnómetro aforado lleno de agua (g)

M4: Masa al aire de la muestra seca al horno (g)

$\rho_w$ : Densidad agua (0,9982 Mg/m<sup>3</sup>)

Material	Absorción (%)	Densidad SH (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad SSD (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad A (kg/m <sup>3</sup> )
Arena Silíceo 0/0,5mm	0,284	2585	2593	2605
Arena Silíceo 0,5/1,6 mm	0,402	2628	2638	2656

Tabla 5: Resultados ensayo de densidad y absorción.

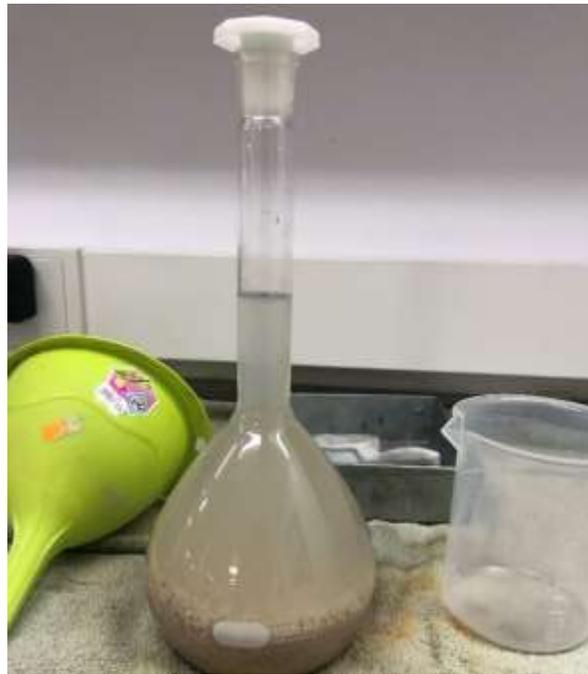
Tabla 4: Fórmulas para densidad y absorción.



Figura 13: Muestras de arena gruesa y fina sumergidas en agua por 24 horas.



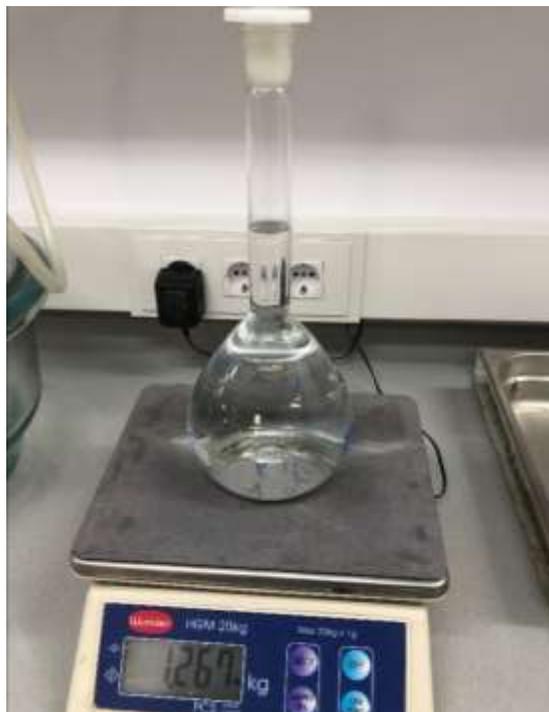
**Figura 14: Arenas saturadas y superficialmente secas.**



**Figura 15: Muestras al baño maría durante 24 horas.**



**Figura 16: Pícnómetro aforado con la muestra + agua.**



**Figura 17: Pícnómetro aforado solo con agua.**



Figura 18: Secado muestras hasta masa constante.

#### 4.1.2 Ensayo de densidad mediante picnómetro de helio

El uso de este ensayo permite hallar la densidad real de los materiales y a su vez corroborar los datos obtenidos mediante el ensayo de densidad por picnómetro de agua, con el fin de minimizar los posibles errores cometidos.

El procedimiento a realizar para este ensayo consistió en ingresar la muestra a ensayar en el porta muestras hasta un 80-90% de su capacidad, la cual ha sido previamente tarada para luego poder registrar su peso. Se le ingresaron los datos básicos al equipo, como nombre y peso de la muestra, seguidamente se le colocó la tapa y se puso en marcha hasta que terminó de analizar la muestra, (Figura 19, Figura 20).

Este ensayo se llevó a cabo para comprobar esencialmente los resultados de las arenas silíceas 0/0,5mm, 0,5/1,6mm. La arena de dragado procedente de la ría de Llanes solo pudo ser analizada bajo este método, ya que al intentar realizar el ensayo de densidad con el picnómetro de agua la muestra absorbía toda el agua haciendo imposible el proceso. También se caracterizaron cada uno de los materiales utilizados en esta investigación para tenerlos como referencia. Las densidades obtenidas en este ensayo son las que se han tenido en cuenta para hacer las sustituciones entre la harina de sílice G-40 y la arena de dragado. Los resultados obtenidos y el procedimiento a seguir fueron los siguientes. (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).



Figura 19: Tarado del porta-muestras e ingreso de la muestra a analizar.



Figura 20: Ingreso de la muestra en el equipo y en funcionamiento.

Material	Arena 0/0,5mm	Arena 0,5/1,6mm	Arena Llanes	Cemento III	Humo sílice BASF	Humo Sílice ELKEM	Harina sílice G-40	Aditivo 225P
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2649	2656	2332	3041	2553	2291	2669	1245

Tabla 6: Resultados Densidad picnómetro Helio.

### 4.1.3 Ensayo de Equivalente de Arena

La realización de este ensayo permite evaluar la cantidad de finos presentes en una muestra. Según la norma **UNE-EN 933-8 2012 [20]**.

Se vertió una solución de cloruro de calcio sobre una probeta cilíndrica hasta la primera altura marcada en ella, se vertió seguidamente el material de ensayo con un peso de 120 gr con ayuda de un embudo para evitar perder muestra, se golpeó varias veces el cilindro para que salieran las burbujas atrapadas y garantizar el contacto de la solución con la muestra a ensayar. Seguidamente se dejó reposar durante 10 minutos medidos con cronometro y una vez pasado este tiempo se le colocó un tapón al cilindro y se agitó levemente para aflojar el material del fondo, se llevó la probeta sobre el equipo de agitación durante 30 segundos, después de esto se colocó el cilindro sobre la mesa, se removió el tapón para agregarle más solución al cilindro y lavar el material de las paredes hasta alcanzar la segunda marca grabada.

Se dejó reposar el cilindro durante 20 minutos evitando cualquier movimiento sobre la mesa. Al finalizar este tiempo se leyó la primera altura con una regla desde la base de la probeta hasta donde se divisó material en suspensión. Después se tomó la siguiente lectura que consistió en introducir la varilla con pisón en el cilindro cuidadosamente hasta que tocó la parte superior donde se encontraba el material y la distancia medida se tomó entre la cara inferior del pistón y la cabeza superior del disco, (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

Los resultados obtenidos según la siguiente formula (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. y¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.), fueron:

Equivalente de Arena (SE)
$SE(10) = \left(\frac{h_2}{h_1}\right) \times 100$

Tabla 7: Fórmula para equivalente de arena.

$h_1$ : Altura de la base de la probeta al nivel de suspensión del material.

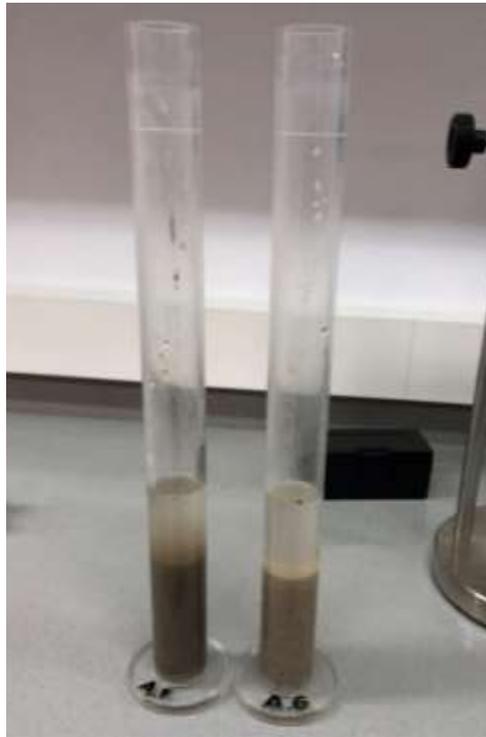
$h_2$ : Altura entre las cabezas de la cara del pistón inferior y la del superior del disco.

Material	SE <sub>1</sub>	SE <sub>2</sub>	SE(10)
Arena Silíceo 0/0,5mm	96	97	97
Arena Silíceo 0,5/1,6 mm	97	97	97

Tabla 8: Resultados equivalente de arena.



Figura 21: Peso de la muestra a ensayar antes de verter la solución.



**Figura 23:** Probetas en reposo al agregar la solución y las muestras previamente.



**Figura 22:** Proceso de agitado de la muestra durante 30 segundos.

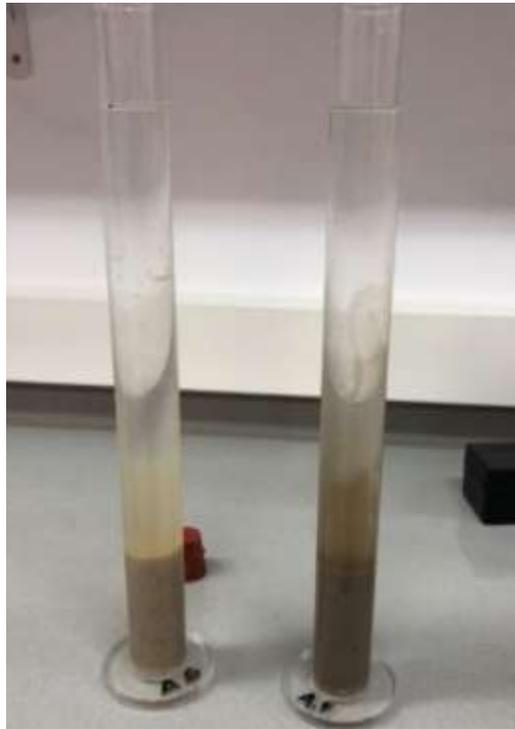


Figura 25: Lavado de las paredes de la probeta y reposo de 20 minutos.

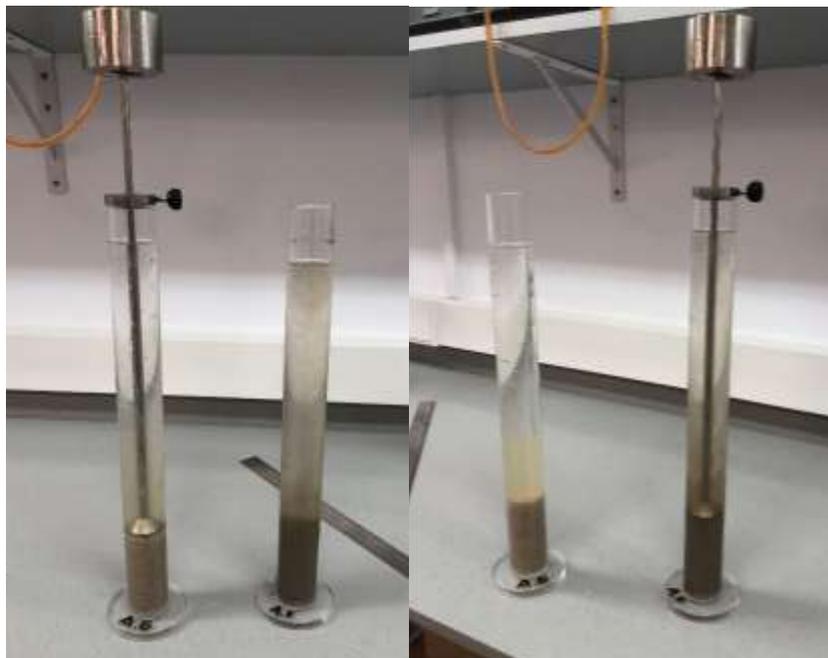


Figura 24: Lecturas de las medidas  $h_1$  y  $h_2$ .

#### 4.1.4 Ensayo granulométrico.

Este ensayo determina las fracciones divididas de una muestra según la distribución geométrica de las partículas por medio de tamices con diferentes tamaños de abertura de manera decreciente.

Para las arenas silíceas de 0,5/1,6mm y 0/0,5mm se usó las normativas **UNE EN 933-1 [2110]** y **UNE EN 933-2 [22]**, La cantidad de muestra a analizar por ensayo según la **tabla 1** de la norma mencionada, indica “que para tamaños de áridos  $D \leq 4\text{mm}$  debe ser como mínimo 0,200kg”).

Para llevar a cabo este ensayo se seleccionó el material y se realizó el cuarteado manual, se procedió a armar la columna de tamices (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.), se vertió el material y se llevó a la agitadora entre 3 y 4 minutos para asegurar que las partículas quedasen en el tamiz correcto. Finalmente se pesaron las muestras retenidas de cada tamiz y se realizó el ensayo tres veces para minimizar errores en las mediciones. Las siguientes curvas granulométricas obtenidas pueden observarse en la (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).



Figura 26: Columna de tamices.

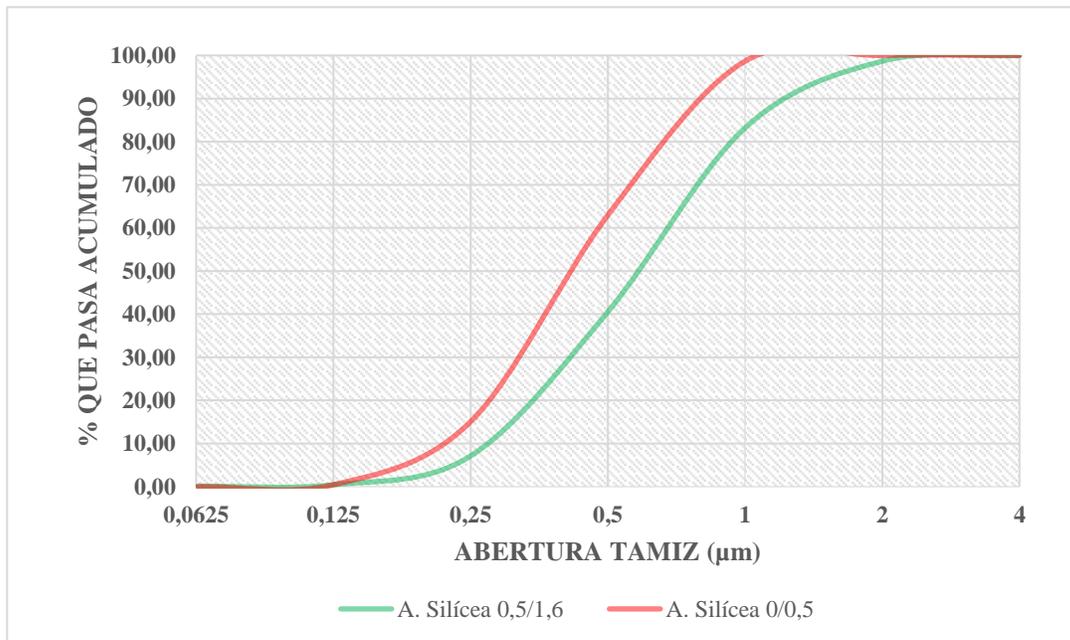


Figura 27: Curvas granulométricas arenas síliceas.

Para los materiales como la harina sílice G-40, el cemento, el humo de sílice de BASF y de ELKEM, así como para la arena de dragado procedente de la ría de Llanes, se llevó a cabo la técnica de tamizado por difracción láser utilizando el analizador de partículas LS 13 320 de

Belkman Coulter ya que al ser materiales con distribución de partículas con un tamaño muy reducido es imposible caracterizarlas con la tamizadora habitual.

El funcionamiento del ensayo consiste en ingresar la muestra en el porta muestras y arrancar el programa de la computadora para que el equipo empiece a succionar y analizar la muestra (**Figura 28**). Para este ensayo se obtuvieron las siguientes curvas granulométricas. (**Figura 29**).



**Figura 28: Equipo de difracción laser.**

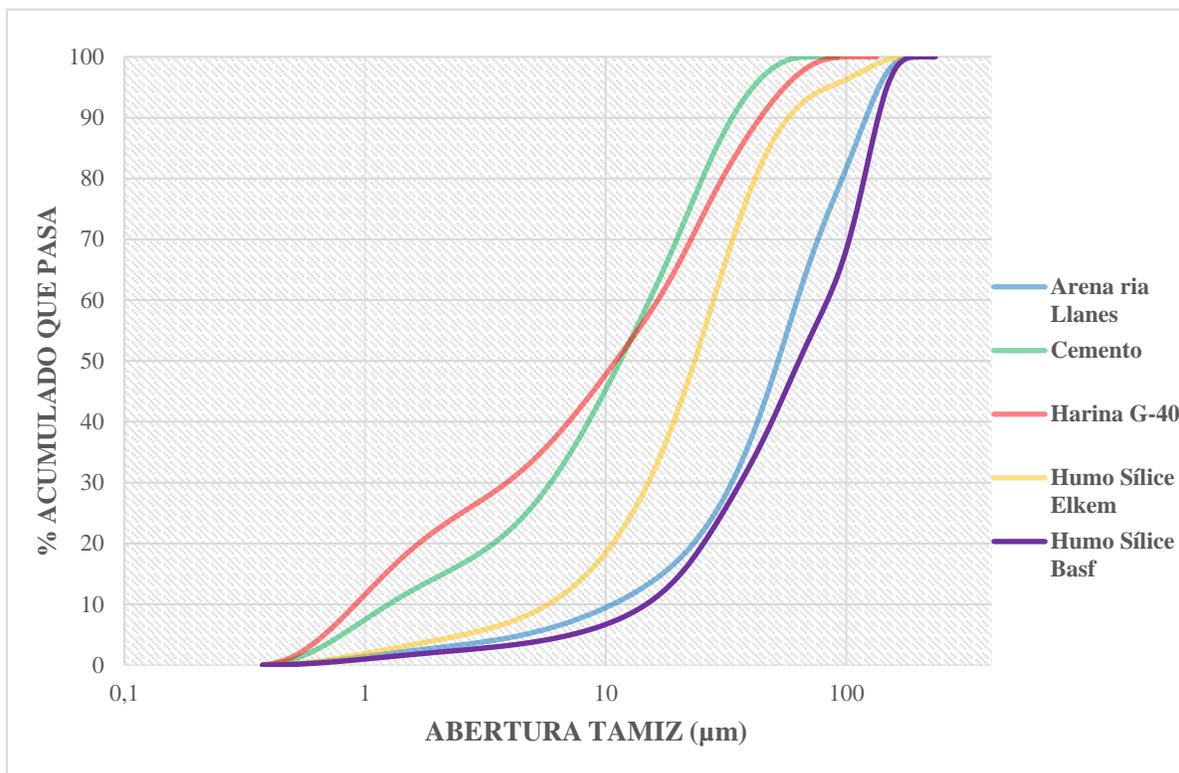


Figura 29: Granulometrías por difracción Láser.

## 4.2 Amasadas de control.

Una vez caracterizados los materiales que serán usados para fabricar HMAR, se debe encontrar la dosificación ideal, optimizando materiales, tiempo y energía. Para realizar las amasadas de control se partió de una dosificación estándar realizada por el **Dr Iñigo López [23]**. La presente investigación utilizó una relación agua/cemento mínima de 0,21 para las amasadas de control, buscando optimizar el empaquetamiento de los materiales al implementar bajas relaciones entre el agua y el cemento con la ayuda de superplastificantes los cuales ayudan a alcanzar una buena trabajabilidad y conseguir elevadas resistencias a compresión.

Fue necesario realizar 21 amasadas de control, cada una de 1,5l ya que algunas de estas, al poseer una baja relación de agua/cemento y pasar entre 45 minutos y 1 hora en la amasadora no lograban alcanzar una humedad o trabajabilidad adecuada. Esto es debido a la gran capacidad de absorción del humo de sílice de BASF. Por el contrario, al trabajar con el humo de sílice de ELKEM, se pudo constatar que las amasadas realizadas tomaban entre 6 a 15 minutos en lograr la trabajabilidad necesaria para poder llevarlas a molde. Por tanto, se decidió recortar la

investigación y trabajar solo con el humo de sílice anteriormente nombrado y descartar el de BASF para reducir los tiempos de cada amasada, de energía, de desperdicio de materiales y el incremento en el uso de agua y/o aditivo.

Una vez obtenidas las cantidades finales para realizar la amasada de control, se procedió a revisar los porcentajes de material sustituyente. En este caso se sustituyó la harina G-40 por arena de dragado de la ría de Llanes. Sin embargo, se encontró que al aumentar el contenido de la arena de Llanes en las amasadas estas se iban haciendo más difíciles de trabajar y, por lo tanto, se decidió realizar amasadas de prueba en función del ensayo de escurrimiento o consistencia (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. y¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.), donde cada amasada debía obtener un valor mínimo de 27cm mencionado para considerar la dosificación como válida. En las (Tabla 9 y Tabla 10) se presenta la dosificación tipo utilizada y los porcentajes de sustitución.

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad (g)</b>	<b>% en peso</b>
Cemento	1002,54	35,52
Arena Fina	378,46	13,41
Arena Gruesa	708,04	25,09
Harina sílice G-40	281,96	9,99
Humo sílice	219,31	7,77
Agua	219,31	7,77
Aditivo	12,53	0,44

**Tabla 9: Dosificación HMAR de control.**

<b>Tipos de Amasadas</b>	<b>% de Arena Ria Llanes</b>	<b>Agua Extra</b>	<b>Aditivo Extra</b>
<b>AN</b>	35, 50, 75, 100	Según contenido de A. Llanes	-
<b>AE</b>	35, 50, 75, 100		25%
<b>AS</b>	35, 50, 75, 100 (Arena saturada)	-	-

**Tabla 10: Porcentajes de sustitución para amasadas de HMAR.**



**Figura 30: Amasadora utilizada para fabricar HMAR.**



**Figura 31: Amasadas de control con exceso de agua.**

### **4.3 Fabricación de HMAR.**

Una vez fueron asegurados los parámetros establecidos en las amasadas de control se procedió a realizar las amasadas experimentales. Tanto para las amasadas de control como para las amasadas definitivas se realizó el siguiente procedimiento de vertido de material por material

como control riguroso de amasado, siempre a velocidad baja para evitar pérdidas de por la fuerza ejercida al mezclarse.

1. Leve humedecimiento del recipiente de la amasadora.
2. Arena de sílice 0,5/1,6mm.
3. Arena de sílice de 0/0,5mm.
4. Harina de sílice G-40 o la arena de la ría de Llanes.
5. Humo de sílice de ELKEM.
6. Cemento tipo III.
7. Se mezclan los materiales secos por 30 segundos sin detener la amasadora y se agrega el agua cuando han pasado los 30 segundos.
8. Cuando han transcurrido en total 1 minuto y 30 segundos se vierte el aditivo.
9. Se finaliza el proceso a los 10 min de amasado.

Se clasificaron las muestras en 3 tipos:

1. Sin aditivo extra + agua extra según porcentaje de reemplazo de harina G-40 por arena de Llanes, nombradas con las iniciales “AN”.
2. 25% de aditivo extra + agua extra según porcentaje de reemplazo de harina G-40 por arena de Llanes, nombradas con las iniciales “AE”.
3. Sin aditivo extra + arena de Llanes saturada previamente, nombradas con las iniciales “AS”.

Las características de cada una de las amasadas realizadas fueron las siguientes: (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Amasada	Harina G-40	Arena ría Llanes	Agua extra	Aditivo extra
AN1	100%	0%	-	-
AN2	65%	35%	15%	-
AN3	50%	50%	20%	-
AN4	25%	75%	25%	-
AN5	0%	100%	50%	-
AE1	100%	0%	-	25%
AE2	65%	35%	15%	25%
AE3	50%	50%	20%	25%
AE4	25%	75%	25%	25%
AE5	0%	100%	50%	25%
AS2	65%	35%	A. Saturada	-
AS3	50%	50%	A. Saturada	-
AS4	25%	75%	A. Saturada	-
AS5	0%	100%	A. Saturada	-

Tabla 11: Resumen de las amasadas de la investigación.

#### 4.3.1 Ensayo de escurrimiento o consistencia del HMAR.

El ensayo de escurrimiento o consistencia (**Figura 32 y Figura 33**) se determinó bajo las normas de **ASTM C230/C230M [24]** y la variación de la norma **NF P 18-470 [25]**. Este ensayo sirve para determinar la fluidez de la mezcla en fresco. El procedimiento consistió en humedecer el molde troncocónico, colocándolo invertido sobre una tabla humedecida en la que se ha verificado su nivelación previamente, se vertió en el molde el HMAR fresco, evitando rebosarlo y compactarlo. Seguidamente con la ayuda de un cronómetro se levanta el molde y se sostiene durante 1 minuto para garantizar que la totalidad del material ha caído. Se toman dos medidas de forma perpendicular entre sí para conocer el diámetro de la torta. Las medidas se tomaron para cada amasada al primer y tercer minuto de comenzar el ensayo.

Como se ha mencionado anteriormente, al realizar cada amasada se controló que los resultados del escurrimiento en el tercer minuto fuesen de 27cm como mínimo para garantizar una buena trabajabilidad de la mezcla, cumpliendo así en cada una de ellas.



**Figura 32: Molde troncocónico.**



**Figura 33: Procedimiento ensayo.**

### 4.3.2 Fabricación y curado de las probetas

La norma utilizada para fabricar las probetas fue la **UNE-EN 12390-1 [26]**. Se realizaron para cada porcentaje de sustitución (**Figura 34**) el siguiente número:

1. Tres probetas de (40×40×160 mm) con un total de 42 probetas para realizar ensayos destructivos y no destructivos. Al realizar cada amasada se esperó un mínimo de 24 horas para poder desmoldarlas y así poder llevarlas a la cámara de curado bajo una temperatura constante de 20°C y una humedad del 95% durante 28 días. (**Figura 35**).
2. Dos probetas de (25×25×285 mm) con un total de 28 probetas para realizar el ensayo de retracción. Debido a su esbeltez y fragilidad, las probetas fueron desencofradas con cuidado después de las 24 horas para evitar fracturas y fracturas en las mismas.



**Figura 34: Moldes para la fabricación del HMAR.**



Figura 35: Cámara de curado.

#### 4.4 Ensayos del HMAR endurecido

Para conocer las características y propiedades de los hormigones una vez ha finalizado su periodo de curado es importante determinarlas según su naturaleza mediante ensayos no destructivos que determinan la calidad de los mismos sin dañar o destruir su estructura y ensayos destructivos que determinan su resistencia mecánica.

Para el desarrollo de esta investigación se realizaron los siguientes ensayos en cada una de las probetas de (40×40×160 mm) en el siguiente orden:

1. Toma de medidas y peso para determinar la densidad.
2. Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico.
3. Ensayo de flexión en tres puntos.
4. Ensayo de compresión simple.

En cuanto a las probetas de (25×25×285 mm) se les realizó solo el ensayo de retracción.

A continuación se especifica detalladamente cada uno de los ensayos realizados.

#### 4.4.1 Ensayo de densidad

Según la norma **UNE-EN 12390-7** [27] se calculó la densidad de cada probeta realizada de (40×40×160 mm) una vez cumplieron 28 días de curado. Se midió varias veces en diferentes puntos de las probetas para hallar su volumen, paso seguido se pesaron para obtener la masa para finalmente determinar su densidad. (**Figura 36**).



Figura 36: Toma de medidas y peso de las probetas.

#### 4.4.2 Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico

La velocidad de pulso ultrasónico es la relación que existe entre la distancia de viaje a través del hormigón de una onda ultrasónica y el tiempo que tarda en recorrerla [28].

Este ensayo se llevó a cabo bajo la norma **UNE-EN 12504-4** [29] y se realizó antes de llevar a cabo los ensayos destructivos cuando las muestras alcanzaron los 28 días de curado.

Primero se calibró el equipo con patrón la cual tiene apuntado el valor que debe obtener dicha medición, después se le ingresó el valor de la longitud de las probetas (160mm) y se ubicaron horizontalmente sobre una superficie plana para poder realizar el ensayo más fácilmente. Se untaron las caras de sección de (40×40mm) con gel al igual que los electrodos y se ubicaron lo más centrado posible de las probetas tratando de hacerle un poco de presión para garantizar un buen contacto y moviéndolas lo menos posible.

Una vez el ensayo inicia le toma aproximadamente 5 segundos arrojar un resultado. Para evitar errores se realizó al menos tres veces el ensayo eligiendo el valor repetido. No fue necesario realizar ningún cálculo ya que los rangos de este ensayo determinan la calidad de las muestras analizadas directamente (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), (Figura 37).

Este ensayo, aunque no permite evaluar directamente la resistencia mecánica de los hormigones, puede ofrecer una estimación cercana de dicha resistencia de la muestra ensayada según las propiedades elásticas de los materiales, esto es debido al fenómeno de la propagación de ondas en un medio material. Es un ensayo confiable y versátil que ayuda a determinar la uniformidad del hormigón.

Velocidad de impulsos (m/s)	Calidad del hormigón
> 4570	Excelente
3650 – 4570	Bueno
3050 – 3650	Regular o dudoso
2130 - 3050	Pobre

Tabla 12: Clasificación de la calidad del concreto según la velocidad de pulso.



Figura 37: Procedimiento ensayo de velocidad de pulso ultrasónico.

#### 4.4.3 Ensayo de resistencia a flexión en 3 puntos.

El objetivo de este ensayo es determinar las propiedades mecánicas del HMAR, encontrando los esfuerzos máximos de rotura a flexotracción. El ensayo consistió en colocar los accesorios de la máquina multiensayos cuando las probetas cumplieron los 28 días de curado siguiendo las pautas que dicta la norma **UNE-EN 1015-11** [30]. La probeta se colocó en la máquina de ensayo centrada entre el ancho de los rodillos o apoyos, tanto superior como inferior, y a su vez perpendicularmente a ellos según su eje longitudinal teniendo en cuenta no cargarla por la cara rugosa y lograr así un apoyo homogéneo. Una vez colocadas las muestras se cargó el programa con los parámetros del ensayo a una velocidad constante de 30 N/s hasta que se produjo el fallo de la probeta. El ensayo se considera satisfactorio cuando la fractura de la probeta queda entre los apoyos. (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

Debido a que al realizar este ensayo se obtuvo la fuerza o carga necesaria para romper la probeta, el valor de la resistencia a flexión se obtuvo teniendo en cuenta los diagramas de la figura (**Figura 40**), que conducen a las fórmulas recogidas en la (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).



Figura 38: Equipo multiensayos.



Figura 39: Probeta antes y después del ensayo a flexión.

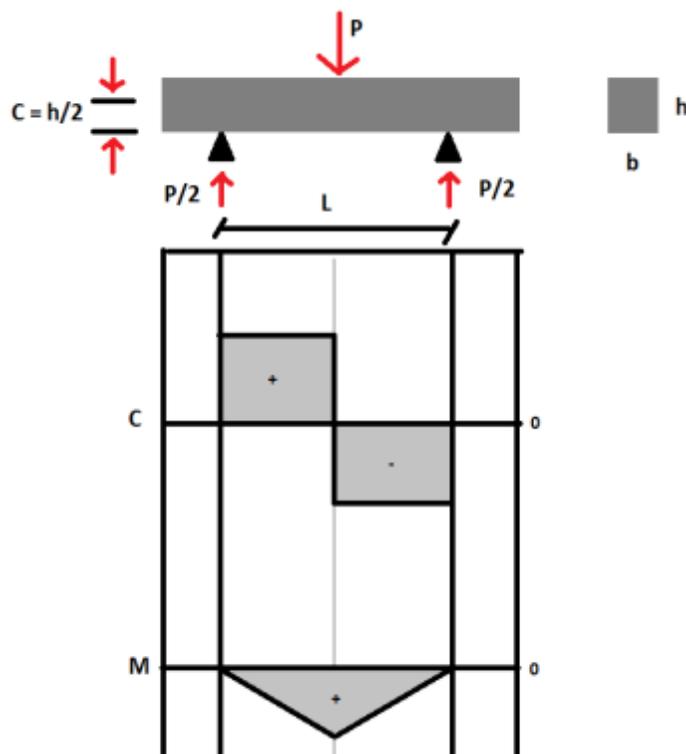


Figura 40: Diagrama de fuerzas para determinar la resistencia a flexión.

Inercia	Momento	Tensión a Flexión
$I = \frac{b \times h^3}{12}$	$M = \frac{P \times L}{4}$	$\sigma_f = \frac{MC}{I} \rightarrow \sigma_f = \frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times h^2}$

Tabla 13: Formulas para determinar la resistencia a flexión.

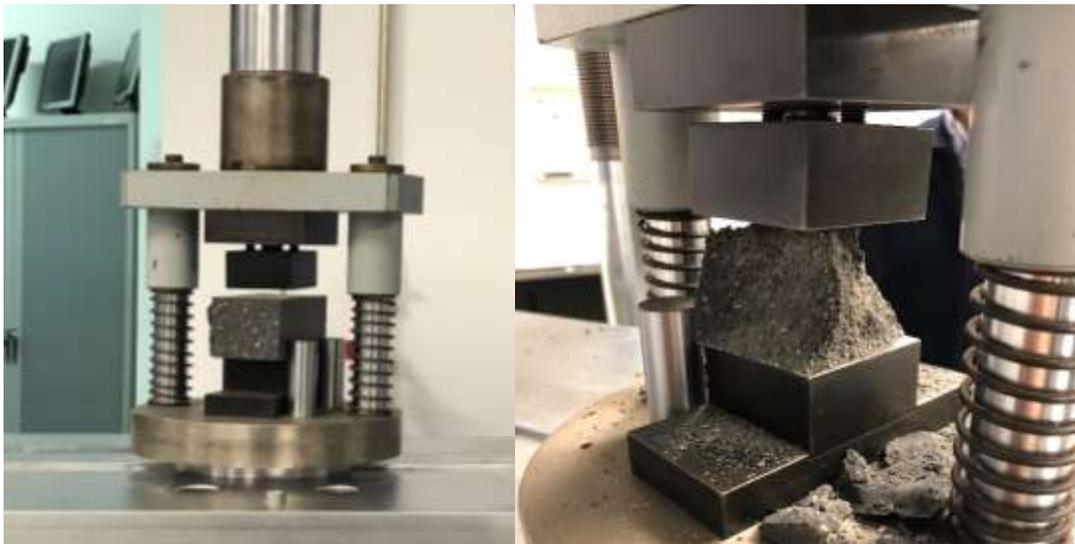
#### 4.4.4 Ensayo de resistencia a compresión

Este ensayo consiste en aplicar una carga axial a las probetas para determinar la característica más importante de los hormigones, que es el comportamiento bajo esfuerzos compresores. Para este ensayo se utilizó la norma **UNE-EN 12390-3** [31].

Para el desarrollo de este ensayo fue necesario realizar primero el ensayo de flexión en tres puntos donde se obtuvieron dos probetas (¡Error! No se encuentra el origen de la

referencia.), luego se cambiaron los accesorios para el montaje de este ensayo en la máquina multiensayos y se ubicó la mitad de la probeta a ensayar colocando su cara rugosa hacia la parte exterior con el objetivo de garantizar un contacto homogéneo en la cara superior, inferior y apoyos laterales traseros. La norma anteriormente mencionada indica que la velocidad de carga debe ser de 2400 N/s. El ensayo termina cuando ocurre la falla de la probeta y se toma por válido cuando se observa que las fracturas poseen las formas de rotura recogidas en la norma. (**Figura 41**).

A diferencia del ensayo a flexión en este ensayo se puede obtener directamente el valor de la resistencia a compresión, aunque también puede ser calculada tomando la carga máxima de rotura. En este caso se tomó directamente el resultado de la resistencia arrojada por el equipo.



**Figura 41: Probeta antes y después del ensayo a compresión.**

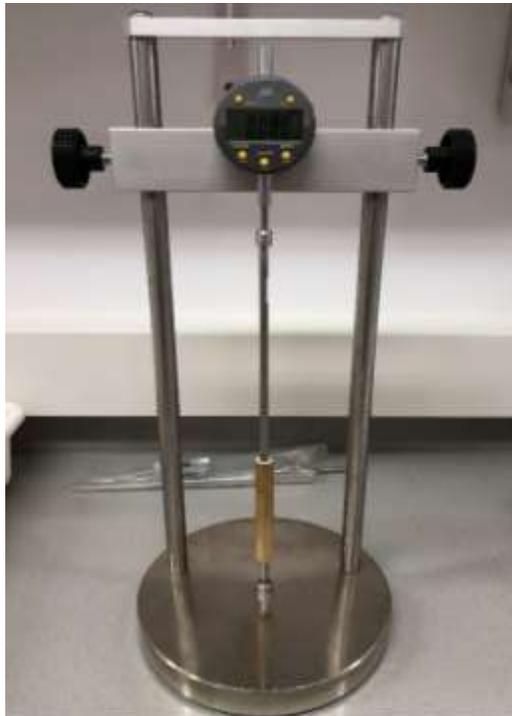
#### **4.4.5 Ensayo de retracción del HMAR**

El hormigón es un material compuesto, se utilizan varios materiales para su fabricación para lograr que la matriz del cemento mantenga aglutinados y juntos los demás materiales y así transferirse entre sí las cargas mecánicas, además las protege del medio ambiente expuesto. Este fenómeno se debe a deformaciones no instantáneas ya que dependen del tiempo y se debe a la humedad de los materiales una vez mezclados con el medio ambiente expuesto. La retracción

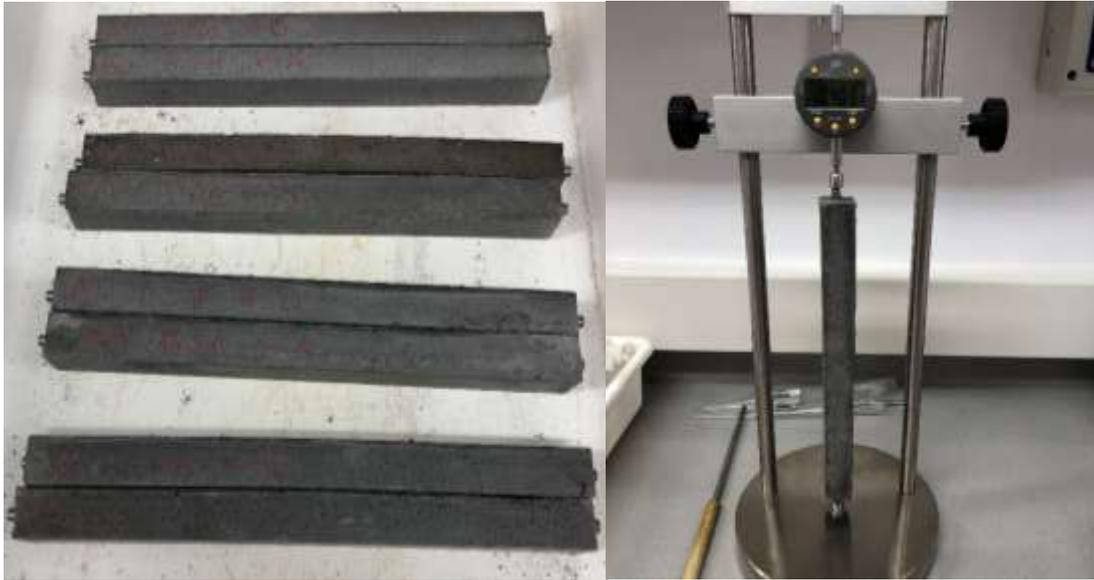
disminuye cuando la relación de árido/cemento es alta ya que los áridos restringen las deformaciones. Cuando la relación de agua/cemento es alta se pueden apreciar mayores valores en la retracción.

Para determinar el cambio de la longitud de las probetas se siguieron los parámetros de la norma **UNE-80-112** [32]. Como se mencionó anteriormente, se realizaron dos probetas para cada tipo de amasada las cuales poseían tornillos metálicos en sus extremos para luego poder medir con el equipo. El procedimiento del ensayo consistió en calibrar el equipo con la varilla de control metálica de 300 mm de longitud (**Figura 42**). A continuación, se posicionó cada probeta y se apuntó el valor medido. Cabe resaltar que se empezaron a tomar las medidas como “**día 1**” a partir del día del desencofrado de las probetas, las cuales no fueron llevadas a la cámara de curado, si no que se dejaron en bandejas separadas entre sí teniendo en cuenta la temperatura y humedad de cada día del laboratorio.

Este proceso se realizó cada día hasta que se obtuvieron 28 datos simulando los días de curado (**Figura 43**).



**Figura 42: Equipo de retracción con varilla de control.**



**Figura 43: Probetas empleadas antes y durante la medición de la retracción.**

## 5. Análisis de resultados.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los ensayos realizados en el HMAR. Con ellos se pretende analizar, principalmente, la influencia de la arena procedente de la ría de Llanes en las características del HMAR. Los resultados de los ensayos realizados para esta investigación se presentan en el siguiente orden:

1. Análisis del escurrimiento en fresco.
2. Análisis de la densidad del HMAR endurecido.
3. Análisis de la velocidad de pulso ultrasónico.
4. Análisis de la resistencia a flexión en 3 puntos.
5. Análisis de la resistencia a compresión.
6. Análisis de la retracción del HMAR endurecido.

### 5.1 Análisis del escurrimiento en fresco.

Las siguientes figuras muestran los valores obtenidos al realizar el ensayo de escurrimiento del HMAR en fresco al primer minuto y tercer minuto desde el inicio del mismo.

En la **Figura 44**; Error! No se encuentra el origen de la referencia. se evidencia que al medir el escurrimiento al minuto uno las amasadas AN y AE poseen valores cercanos, donde solo la sustitución del 50% cumple desde el inicio con los 27cm que debe poseer las mezclas para ser válidas. En contraste se evidencia que las probetas de las amasadas AS poseen valores superiores a las anteriores a pesar de que las muestras se saturaron y se dejaron secar un par de horas a temperatura ambiente para tratar de eliminar posibles excesos antes de fabricar las probetas. Las muestras que poseen unas mayores cantidades de agua son las sustituciones del 35% y 100%, ya que al no conocer el estado de saturado y superficialmente seco de la arena de Llanes fue imposible saber dicho exceso de cada una.

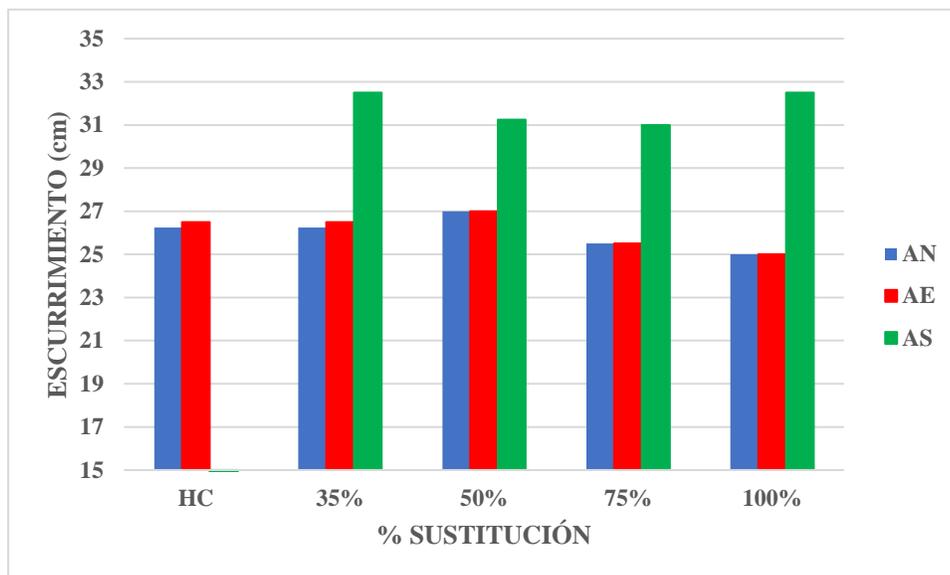


Figura 44: Ecurrimiento del HMAR al minuto 1.

En la **Figura 45** se puede observar que al pasar los tres minutos del inicio de este ensayo todos los tipos de mezclas alcanzaron el valor mínimo de 27 cm propuesto. Sin embargo, tanto para los tipos de amasadas de AN y AE en las sustituciones del 75% y 100% logran por poco el mínimo a diferencia de las demás sustituciones que lograron valores muy cercanos entre sí de 29cm. Por otro lado, las amasadas AS lograron valores muy por encima de los demás tipos de mezcla, especialmente las sustituciones del 35% y 50%. Las sustituciones del 75% y 100% obtienen valores cercanos entre sí. Al realizar este ensayo se puede decir que se espera que las resistencias de las amasadas AS sean menores por su alto contenido en agua.

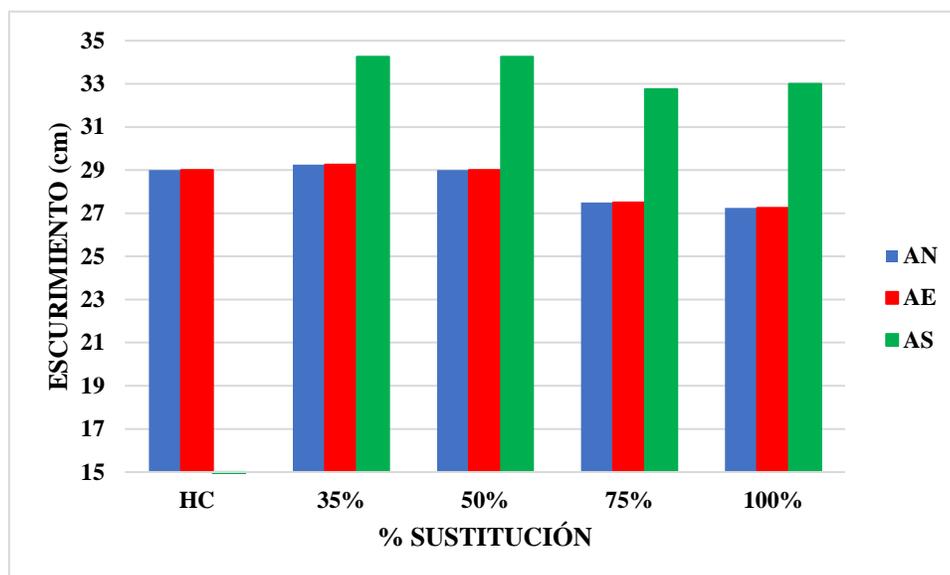


Figura 45: Esgurrimiento del HMAR al minuto 3.

## 5.2 Análisis de la densidad del HMAR endurecido.

Los resultados presentados a continuación son los valores medios del ensayo de densidad del HMAR de cada una de las amasadas realizadas una vez estuvieron endurecidas y cumplieron los 28 días de curado.

Se puede observar que los datos obtenidos en la **Figura 46**, las amasadas AN y AE tuvieron un comportamiento similar en las probetas de control, 35% y 75% donde a medida que aumenta el porcentaje de arena sustituyente decae la densidad, se observa una caída con mayor pendiente en el valor obtenido de las probetas de sustitución del 100% obteniendo incluso un valor cercano a las probetas AS. Igualmente se puede observar que los datos para las amasadas de AS alcanzaron valores inferiores que las amasadas anteriores, con resultados menores de  $2\text{gr}/\text{cm}^3$ .

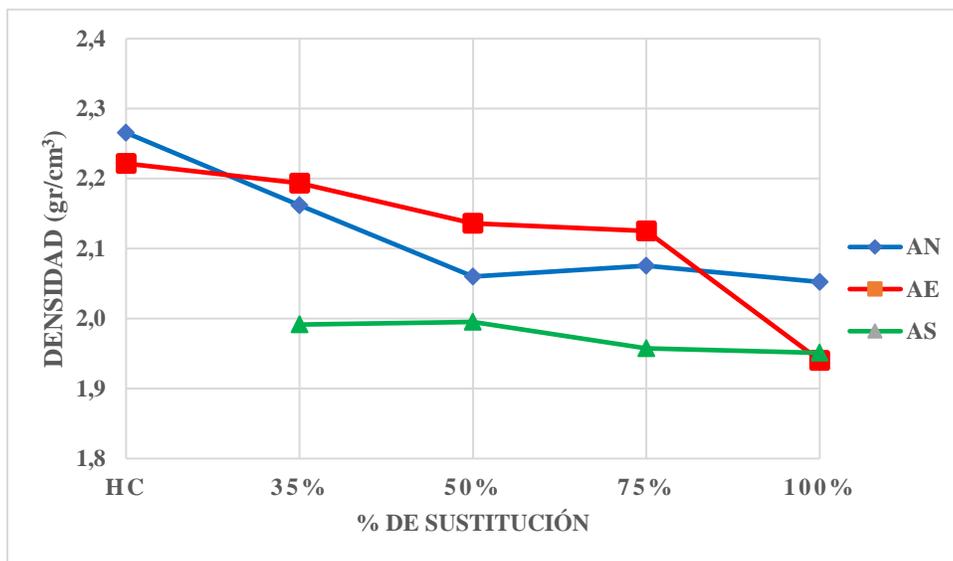


Figura 46: Densidad media HMAR amasadas AN, AE y AS.

### 5.3 Análisis de la velocidad de pulso ultrasónico

Las figuras que se presentan a continuación son los valores medios de cada probeta ensayada, se realiza un análisis por cada tipo de amasada realizada.

Se observa en la **Figura 47** que para estas amasadas los valores para las sustituciones de control, 50 y 75% son similares. Para las probetas correspondientes a la amasada del 35% se obtiene un valor mayor que las demás, aunque la diferencia no supera el 4%. Para el porcentaje de sustitución del 100% se observa una caída mucho más pronunciada con una diferencia del 11,4% con respecto al valor más alto. Con respecto a la calidad de las probetas, las del 35% son de excelente calidad y las correspondientes a las demás sustituciones son de buena calidad.

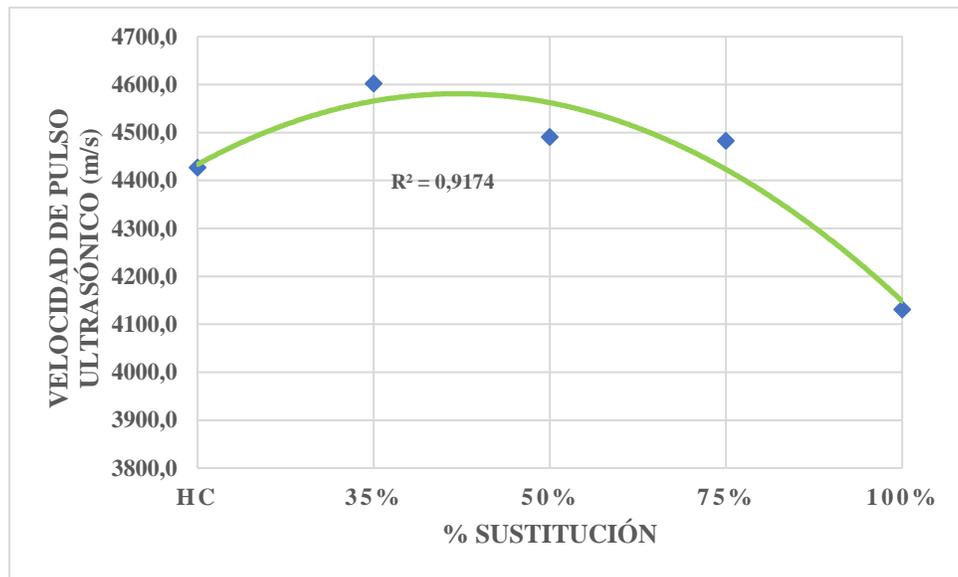


Figura 47: Velocidad de pulso ultrasónico media amasada AN.

Los valores obtenidos en la **Figura 48** para las amasadas AE son similares a los anteriores aunque con valores ligeramente superiores. En términos de calidad, las muestras con 100% de arena de sustitución son las únicas que no alcanzan el rango de excelentes.

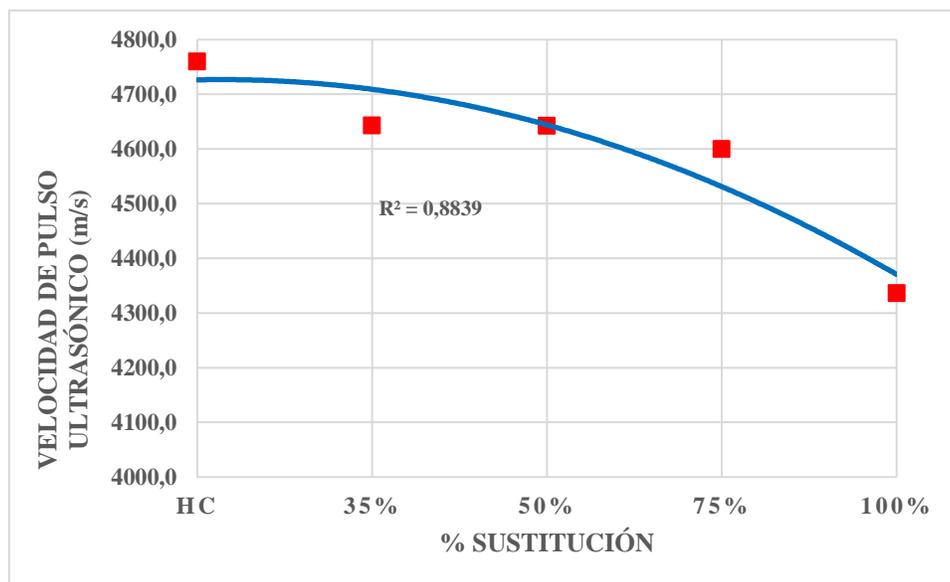
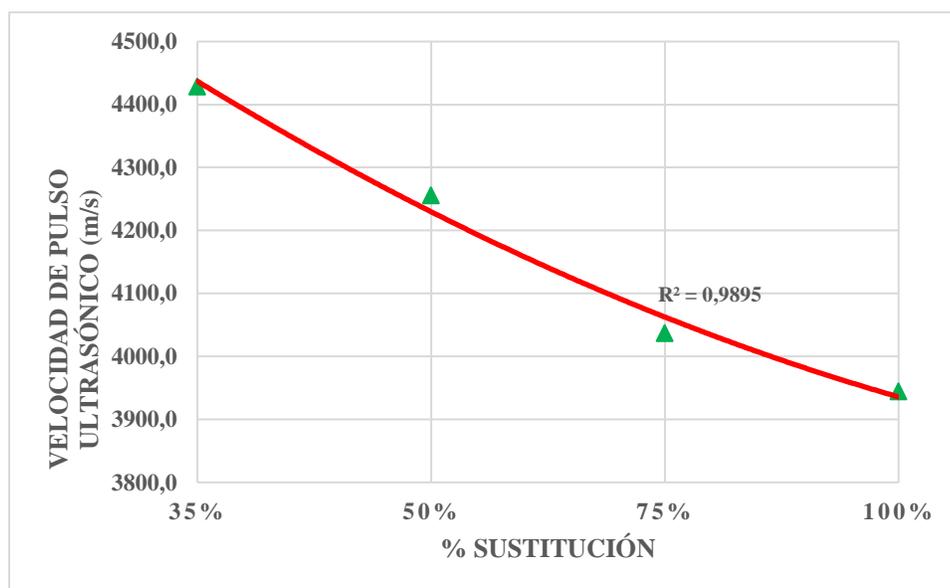


Figura 48: Velocidad de pulso ultrasónico media amasada AE.

Los resultados obtenidos para la serie de probetas correspondientes a las amasadas AS **Figura 49** están en la línea de las dos series anteriores, aunque los valores son más bajos. Se ha obtenido una buena correlación entre los resultados analizados. La calidad de todos los hormigones es buena.



**Figura 49:** Velocidad de pulso ultrasónico medio amasada AS.

#### 5.4 Análisis de la resistencia a flexión.

Para el análisis de la resistencia a flexión se ha realizado una media de los resultados obtenidos en este ensayo en cada una de las amasadas realizadas. Se presentan los resultados por separado.

En la **Figura 50** un decrecimiento conforme aumenta el porcentaje de sustitución de la arena de Llanes. Las caídas más acusadas son entre las probetas de control y la sustitución del 35%, así como entre las sustituciones del 75% y 100%. También se puede observar que los valores de resistencia a flexión alcanzadas para las probetas de control y las que poseen un 100% de sustitución disminuyen la mitad de su valor. La variación decreciente en los resultados puede deberse al incremento de agua en las amasadas para lograr una buena trabajabilidad. El ajuste conseguido es bueno.

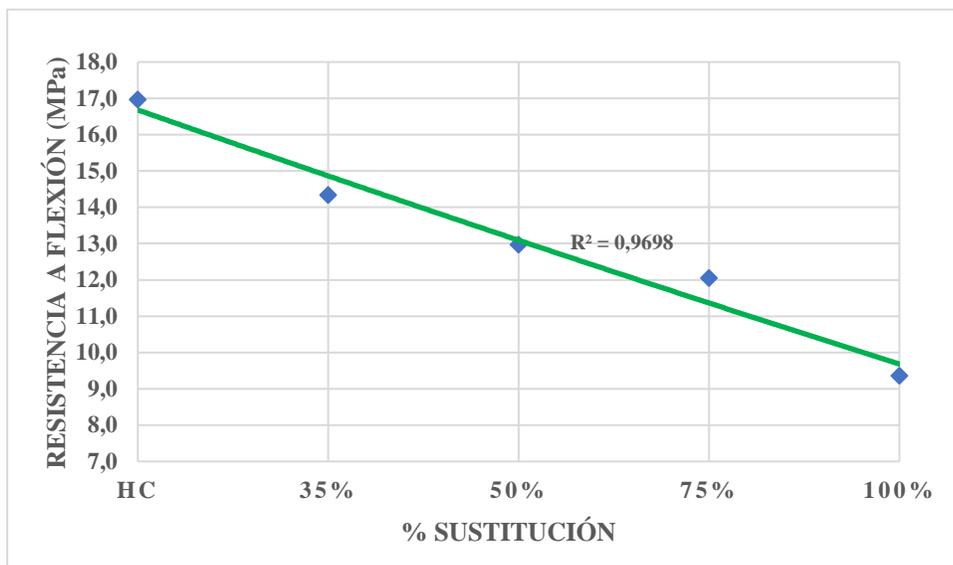


Figura 50: Resistencia a flexión media amasada AN.

Se aprecia en la **Figura 51** que, según aumenta el porcentaje de sustitución decrece el valor de la resistencia a flexión, además, los resultados obtenidos en las probetas del 35% y el 50% están muy cercanos entre sí. La menor variación en la resistencia a flexión se presenta entre las sustituciones del 35% y 50% con un 5%. La resistencia a flexión disminuye entre las probetas de control y la sustitución del 100% se reduce en un 60%. Se ha obtenido una buena correlación entre los resultados.

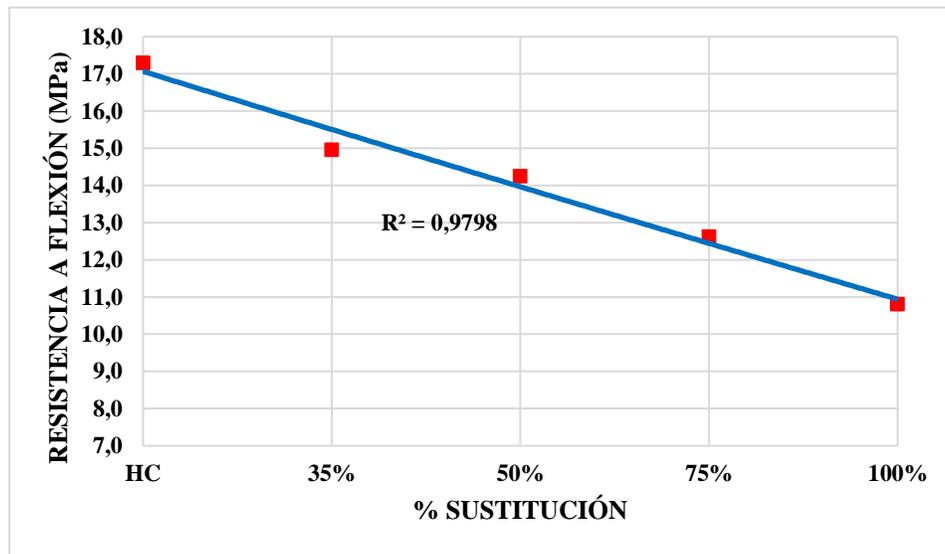


Figura 51: Resistencia a flexión media amasada AE.

En la **Figura 52** se puede observar que el comportamiento posee una gran variación entre los datos obtenidos de las probetas con sustitución del 35% con las demás sustituciones ya que se aprecia que los datos comprendidos entre el 50% y 75% de sustitución su variación tan solo es del 7% y con respecto a las probetas con una sustitución del 100% hay una diferencia del 22%. El ajuste obtenido es bueno.

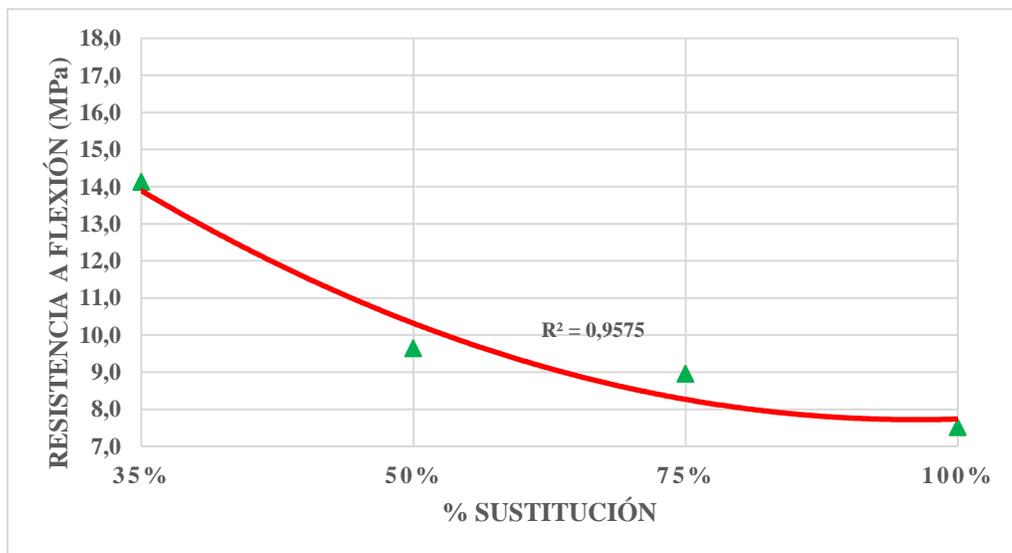
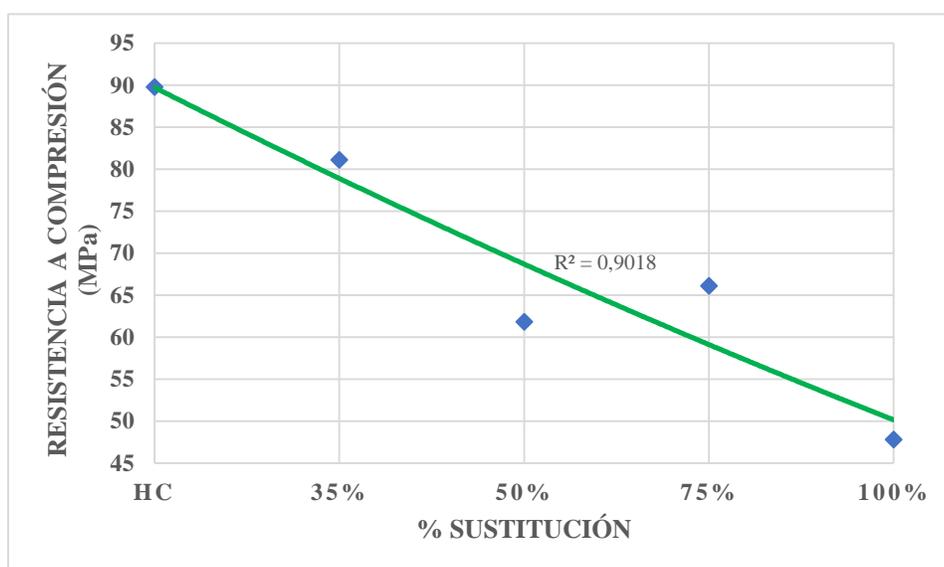


Figura 52: Resistencia a flexión media amasada AS.

## 5.5 Análisis de la resistencia a compresión

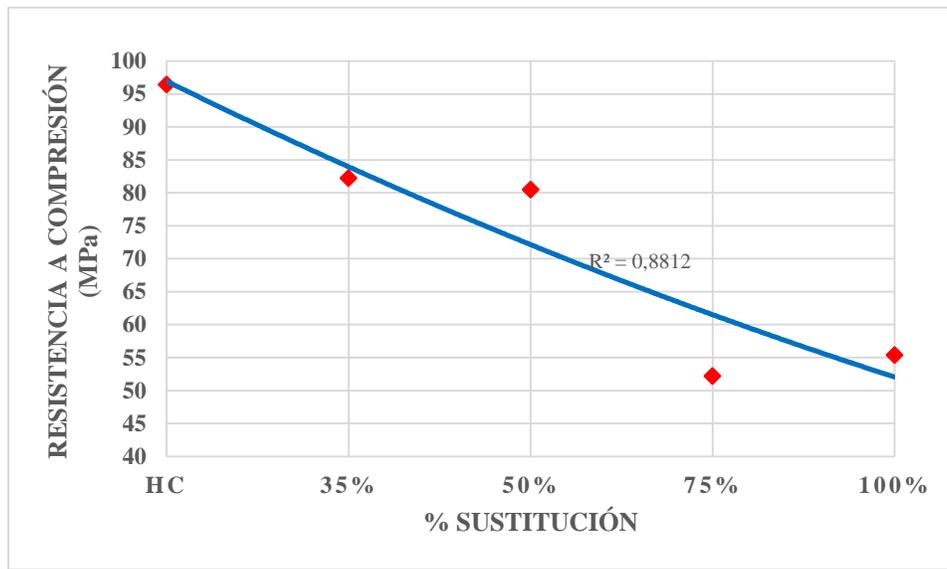
El análisis se ha realizado con el promedio de los resultados obtenidos del ensayo de las probetas de cada una de las amasadas. Se presenta un análisis individual para cada tipo de amasada.

Se observa en la **Figura 53** una caída en la resistencia media a compresión para estas probetas según aumenta el contenido de arena sustituyente. Esto puede deberse a que para estas sustituciones se tuvo que añadir diferentes porcentajes de agua influenciando negativamente en la resistencia mecánica. En comparación con las probetas de control las sustituciones del 50%, 75% y 100% la resistencia a compresión decrece entre el 35% al 87%. También se observa que los las muestras de la amasada del 75% son ligeramente superiores los valores de la amasada del 50%.



**Figura 53: Resistencia a compresión media amasada AN.**

La resistencia media que se muestra en la **Figura 54** para las probetas de las amasadas AE decrece según el porcentaje de sustitución aumenta. Sin embargo, se observa que la resistencia media para sustituciones del 35% y 50% son muy similares. Seguidamente decrece bruscamente en las probetas del 75% y, finalmente, se observa un leve incremento para la amasada con mayor contenido de arena sustituyente.



**Figura 54: Resistencia a compresión media amasada AE.**

Al igual que en las figuras anteriores en la **Figura 55** se evidencia que el comportamiento de la resistencia media de las amasadas decrece a medida que hay un aumento de la arena sustituyente, sin embargo se puede observar que los datos obtenidos para las probetas con un porcentaje de sustitución del 35% y 50% el descenso es ligero, se observa también un comportamiento brusco del 21% entre los resultados obtenidos de las probetas del 50% y 75%. Finalmente se puede observar que la resistencia media obtenida en las probetas del 75% y 100% son muy parecidas.

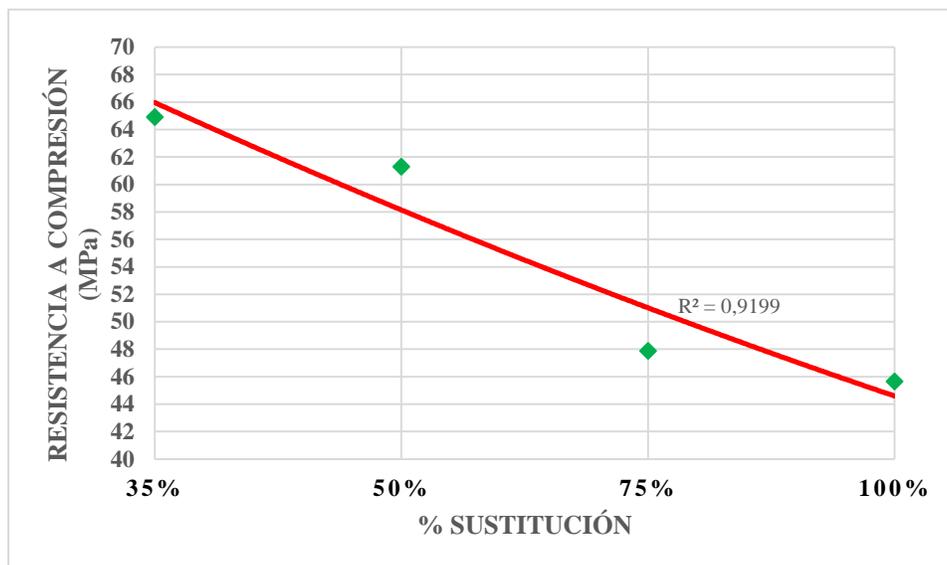
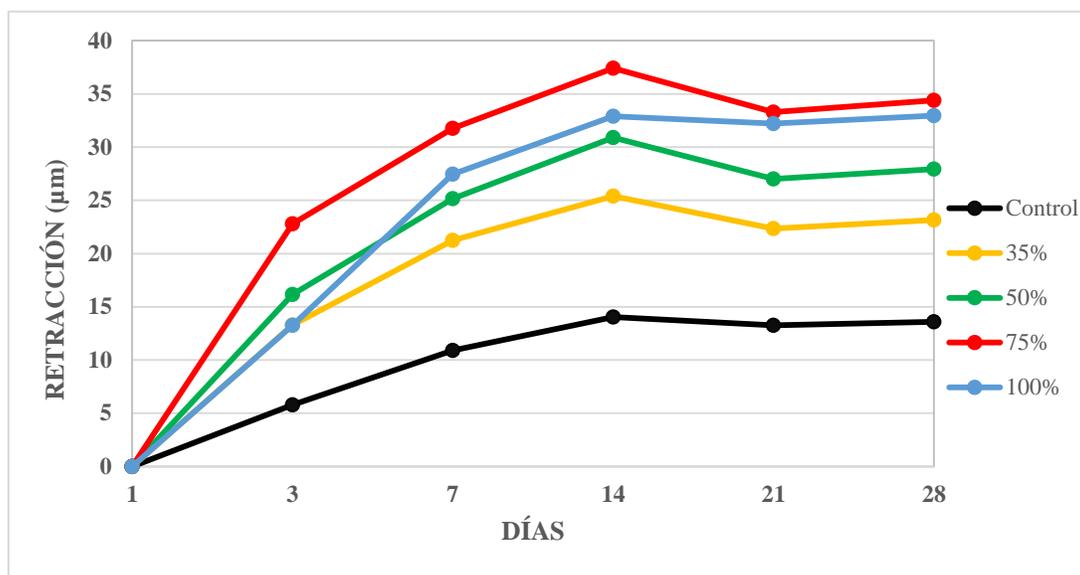


Figura 55: Resistencia a compresión medio amasada AS.

## 5.6 Análisis de la retracción del HMAR endurecido.

El análisis se ha realizado a partir de los datos obtenidos al medir la variación de la longitud de las probetas de 285mm durante 28 días. Se realiza para cada una de las amasadas de HMAR fabricadas con el fin de determinar la retracción que experimenta el HMAR durante el periodo de tiempo considerado.

Se puede observar que los resultados obtenidos en la **Figura 56** la retracción para la amasada de control poseen valores inferiores con respecto a las demás amasadas con arena de dragado, donde a medida que aumenta el porcentaje de sustitución aumenta la retracción. Esto puede deberse a que al contener un exceso de agua esta fue eliminada después de migrar desde el interior hacia la superficie logrando una mayor retracción. Se observa que la amasada con 75% de arena de dragado obtuvo los valores más altos. La variación de los valores en todas las amasadas es muy pequeña.



**Figura 56: Análisis de la retracción media en la amasada AN.**

Para las amasadas AE se puede observar de la **Figura 57** que para las sustituciones del 35% y 50% se obtuvieron valores similares a las de control. Para el 75% los valores aumentan levemente, pero para las amasadas con sustitución del 100% de la arena de dragado se aprecia un incremento considerable con las demás amasadas. Se observan valores entre 3 a 5 veces superiores para los días 3 y 7 con respecto a las demás amasadas y para los demás días obtiene valores 2 y 3 veces superiores.

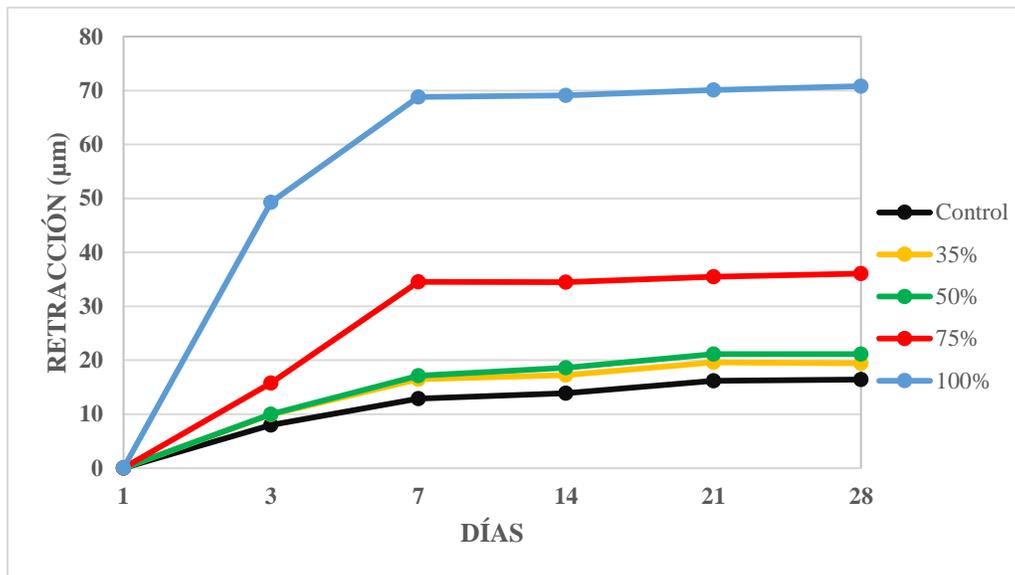


Figura 57: Análisis de la retracción media en la amasada AE.

En la **Figura 58** se muestra la variación de la retracción de las amasadas realizadas con arena de dragado saturada. Los valores obtenidos en la amasada del 50% son inferiores con respecto a las demás amasadas. Esto pudo deberse a que, al no conocer el punto de saturación y superficie seca este porcentaje de sustitución contenía menor cantidad de agua a las demás amasadas, ya que estas obtuvieron valores similares durante la toma de medidas de su respectivo tiempo de curado. Esto además significa que para las sustituciones del 35%, 75% y 100% el exceso de agua fue mayor y por tanto se obtienen mayores valores en la retracción.

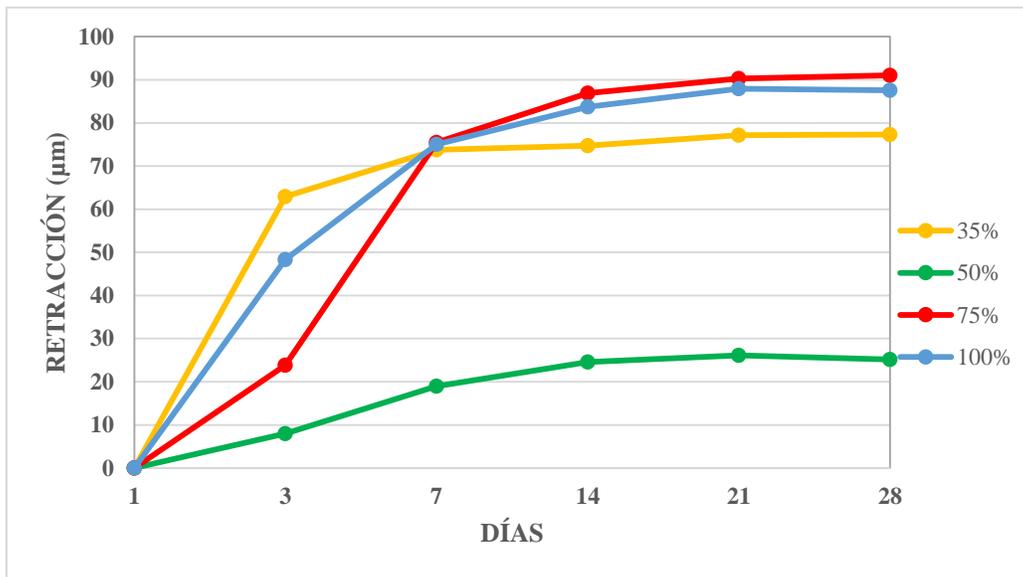


Figura 58: Análisis de la retracción media en la amasada AS.

## 6. Conclusiones

Como se ha mencionado anteriormente, para el desarrollo de esta investigación se utilizó una arena de dragado con porcentajes de sustitución del 35%, 50%, 75% y 100% como reemplazo parcial y total de uno de los componentes para la fabricación del HMAR. Este reemplazo fue la harina de sílice G-40. A continuación se resumen las conclusiones obtenidas fruto del desarrollo de las actividades desarrolladas según la metodología planteada.

1. La caracterización de los materiales nos permite conocer la calidad y propiedades de los materiales a utilizar. Es importante llevar a cabo un exhaustivo estudio para analizar la mejor forma de usarlos. Igualmente, es importante reincorporar materiales provenientes de diferentes sectores de la construcción y otras industrias con el objetivo de minimizar el impacto ambiental que se genera al llevarlos a vertederos y en algunos casos reducir la extracción de materias primas vírgenes.

2. Las amasadas de control se realizan para garantizar que la etapa experimental se lleve a cabo satisfactoriamente. Por tanto, estas amasadas nos dan idea de los parámetros de análisis y control que podemos tomar según la orientación de la investigación. Además, en esta etapa se establecen procedimientos con un paso a paso controlado para evitar desperdicios de materiales en grandes cantidades, mejora de las diferentes propiedades, reemplazo de materiales que no se ajusten a los valores deseados o incurran en gastos energéticos elevados.

3. Al fabricar el HMAR al igual que con las amasadas de control, se sigue rigurosamente los parámetros establecidos para lograr un procedimiento estandarizado en la fabricación de cada uno de los tipos de amasado. Sin embargo, a veces se ve posible realizar ajustes en las dosificaciones del agua empleada según los diferentes porcentajes de sustitución para garantizar la calidad de las muestras.

4. Al analizar el escurrimiento en fresco obtenido en cada tipo de amasada, se aprecia que a pesar de que alcanzaron el mínimo establecido, en las amasadas AN y AE la trabajabilidad es menor que las amasadas AS las cuales alcanzaron mayores valores. Esto es debido a los diferentes contenidos de agua presente en cada tipo de mezcla y como consiguiente se puede esperar una pérdida en las propiedades mecánicas.

5. En cuanto a la densidad del HMAR endurecido se puede concluir que el uso de la arena de dragado procedente de la ría de Llanes influye a que se obtengan valores más bajos a las amasadas de control, según se aumenta la cantidad de este material de sustitución la densidad decae ligeramente en las amasadas AN y AE. Para las amasadas AS se puede decir que la influencia de la arena de dragado es mayor que las anteriores, ya que al estar saturadas sin un control adecuado la densidad decae considerablemente posiblemente a la pérdida de agua en el periodo de curado.

6. Para la velocidad de pulso ultrasónico se puede concluir que la calidad de gran parte de las probetas con menores porcentajes de arena de sustitución es excelente. Sin embargo, la calidad de las probetas con mayores contenidos de esta arena se reduce alcanzando una calidad de buena. Se espera que al realizar los ensayos destructivos se vean mejores resultados en las probetas de las amasadas que poseen una calidad excelente.

7. En términos de resistencia a la flexotracción los valores disminuyen a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de arena de dragado. Las probetas de las amasadas AN y AE poseen un comportamiento similar. Las amasadas AE logran mejores resultados por encima de las amasadas AN. Muy por el contrario, las probetas de las amasadas AS solo logran alcanzar valores similares a las otras amasadas en el 35% de sustitución ya que en las demás sustituciones alcanzan valores notablemente inferiores.

8. En cuanto al análisis de la resistencia a compresión la variación es mucho más irregular ya que en cuanto a las amasadas AN y AE se esperaba que alcanzaran valores similares debido a su similitud en las dosificaciones y solo obtienen dichos valores similares

en las probetas del 35% de sustitución. Sin embargo, las amasadas AS consiguen valores suficientemente bajos.

**9.** Todos los porcentajes de sustitución planteados logran la resistencia a compresión mínima exigida en el diseño del cemento de 42,5MPa a los 28 días de curado. Sin embargo, se esperaba que al utilizar la arena de dragado de la ría de Llanes se alcanzaran resistencias cercanas a las logradas en las probetas de control.

**10.** La retracción obtenida en todas de las probetas de HMAR no suponen gran influencia ya que las variaciones son muy pequeñas. Sin embargo, las probetas con mayores valores en la retracción son las de las amasadas AS y esto puede deberse al exceso de agua en su fabricación.

## 7. Referencias bibliográficas

1. SCHNEIDER, M.; ROMER, M.; TSCHUDIN, M. y BOLIO, H. Sustainable cement production—present and future. *Cement and Concrete Research*. 2011. vol. 41, 642-650. doi:10.1016/j.cemconres.2011.03.019
2. SOHAIL, M. G.; WANG, B.; JAIN, A.; KAHRAMAN, R.; OZERKAN, N. G.; GENCTURK, B.; DAWOOD, M.; y BELARBI, A. (2018). Advancements in Concrete Mix Designs: High-Performance and Ultrahigh-Performance Concretes from 1970 to 2016. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002144](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002144)
3. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Guía para la Durabilidad del Hormigón. Informe técnico ACI 201.2R-01. Farmington Hills, MI: ACI, 2000. 59 p.
4. TANG, S. W.; YAO, Y.; ANDRADE, C. y LI, Z. J. Recent durability studies on concrete structure. *Cement and Concrete Research*. 2015. vol. 78, 143-154. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.021>
5. BAJABER, M.; y HAKEEM, I. (2021). UHPC evolution, development, and utilization in construction: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 10, 1058–1074. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.051>
6. SHI, C.; WU, Z.; XIAO, J.; WANG, D.; HUANG, Z.; y FANG, Z. (2015). A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Construction and Building Materials*, 101, 741–751. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088>
7. WANG, D.; SHI, C.; WU, Z.; XIAO, J.; HUANG, Z.; y FANG, Z. (2015). A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties. *Construction and Building Materials*, 96, 368–377. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.095>

8. TIEFENTHALER, J.; BRAUNE, L.; BAUER, C.; SACCHI, R.; y MAZZOTTI, M. (2021). Technological Demonstration and Life Cycle Assessment of a Negative Emission Value Chain in the Swiss Concrete Sector. *Frontiers in Climate*, 3. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.729259>
9. PACHECO-TORGAL, F.; DING, Y.; COLANGELO, F.; TULADHAR, R.; y KOUTAMANIS, A. (2020). *Advances in Construction and Demolition Waste Recycling: Management, Processing and Environmental Assessment* (1.a ed.). Woodhead Publishing.
10. Código Estructural EHE 08, Instrucción del hormigón estructural, España 2008.
11. Un Pacto Verde Europeo. (2019, 12 octubre). Comisión Europea - European Commission. Recuperado 13 de junio de 2022, de [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_es](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es)
12. SUÁREZ GONZÁLEZ, J.; LOPEZ BOADELLA, I.; LÓPEZ GAYARRE, F.; LÓPEZ-COLINA PÉREZ, C.; SERRANO LÓPEZ, M.; y STOCHINO, F. (2020). Use of Mining Waste to Produce Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete. *Materials*, 13(11), 2457. <https://doi.org/10.3390/ma13112457>
13. LÓPEZ BOADELLA, I.; LÓPEZ GAYARRE, F.; SUÁREZ GONZÁLEZ, J.; GÓMEZ-SOBERÓN, J.; LÓPEZ-COLINA PÉREZ, C.; SERRANO LÓPEZ, M.; y DE BRITO, J. (2019). The Influence of Granite Cutting Waste on The Properties of Ultra-High Performance Concrete. *Materials*, 12(4), 634. <https://doi.org/10.3390/ma12040634>
14. Sánchez, de G. D. (2001). *Tecnología del concreto y del Mortero* (Quinta). Bogotá.
15. Instrucción para la recepción de cementos (RC-16). España, 2016.
16. Cementos Tudela Veguín. Características del Producto cemento 42,5 N/SR. [http://www.cementostudelaaveguin.com/documentos/ABONO\\_III\\_A\\_42.5\\_N\\_SR.pdf](http://www.cementostudelaaveguin.com/documentos/ABONO_III_A_42.5_N_SR.pdf)

17. ELKEM A BLUESTAR COMPANY. (2014). Elkem Microsílica grade 940 for fibre cement. Copyright 2016, Elkem AS.
18. BASF, THE CHEMICAL COMPANY. (2014). MasterRoc MS 610, Microsílice densificada para hormigón y hormigón proyectado. Master Builders Solutions.
19. UNE-EN 1097-6. “Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua”.
20. UNE-EN 933-8. “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena”.
21. UNE-EN 933-1. “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas”.
22. UNE-EN 933-2. “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas”.
23. LÓPEZ BOADELLA, I. (2019). Influencia de la utilización de residuos mineros sobre las propiedades físicas y mecánicas del hormigón de muy alto rendimiento [Tesis de doctorado, Universidad de Oviedo]
24. ASTM C230/C230M. “Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement”. Pensilvania - Estados Unidos, 2014.
25. NF P 18-470. – Bétons fibrés á ultra performances – Spécification, performance, production et conformité”. Francia, 2016.
26. UNE-EN 12390-1. “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, medidas y otras características de las probetas y moldes”. 2013.
27. UNE-EN 12390-7. “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido”. 2014

- 28.** ULLER, L.; TROCONIS DE RINCON, O.; ALANIS, I.; HELENE, P.; MEJIA DE GUTIERREZ, R.; O'REILLY, V.; SAGUES, A. (1998). Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. Río de Janeiro.
- 29.** UNE-EN 12504-4. "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos"-
- 30.** UNE-EN 1015-11. "Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido".
- 31.** UNE-EN 12390-3. "Ensayo de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas". 2003.
- 32.** UNE 80-112. "Métodos de ensayo de cementos: Ensayos físicos: Determinación de la retracción de secado y del hinchamiento en agua".

## 8. Anexos

A continuación se presentan los resultados obtenidos de cada ensayo realizado para llevar a cabo esta investigación.

### 8.1 Caracterización de los materiales.

#### - Resultados ensayo densidad y absorción.

Se presentan los resultados de cada ensayo de densidad y absorción realizado.

Material	M1(g)	M2 (g)	M3 (g)	M4 (g)	$\rho_w$ (Mg/m <sup>3</sup> )
Arena Silíceo 0/0,5mm	600	1627	1258	598,3	0,9982
Arena Silíceo 0,5/1,6 mm	600	1640	1267	597,6	0,9982

Tabla 14: Resultados densidad y absorción áridos.

#### - Resultados ensayo equivalente de Arena.

Se realizó el ensayo 2 veces por cada material obteniendo los siguientes resultados.

Material	Probeta 1		Probeta 2		SE1	SE2	SE (10)
	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>			
Arena Silíceo 0/0,5mm	100	96	97	94	96,0	96,9	97,0
Arena Silíceo 0,5/1,6 mm	100	96,9	100	96,9	96,9	96,9	97,0

Tabla 15: Resultados de equivalente de arena.

#### - Resultados ensayo granulometría.

Se presentan los resultados promedio de las 3 veces que se realizó el ensayo de granulometría de cada arena y los resultados de las granulometrías por difracción de láser.

<b>TAMIZ</b>	<b>Masa retenida (gr)</b>	<b>% Muestra retenida - parcial</b>	<b>%R ACUMULADO</b>	<b>% acumulado Pasa</b>
<b>mm</b>				
4	0,00	0,00	0,00	100,00
2	0,00	0,00	0,00	100,00
1	4,00	1,34	1,34	98,66
0,5	106,67	35,71	37,05	62,95
0,25	143,00	47,88	84,93	15,07
0,125	43,67	14,62	99,55	0,45
0,063	1,33	0,45	100,00	0,00
Fondo (P)	0,00	0,00	100,00	0,00
<b>Total (g)</b>	298,66	<b>Modulo granulométrico (M.G)</b>		3,77

Tabla 16: Resultados promedio granulometría arena 0/0,5mm.

<b>TAMIZ</b>	<b>Masa retenida (gr)</b>	<b>% Muestra retenida - parcial</b>	<b>%R ACUMULADO</b>	<b>% acumulado Pasa</b>
<b>mm</b>				
4	0,00	0,00	0,00	100,00
2	4,00	1,34	1,34	98,66
1	46,33	15,48	16,82	83,18
0,5	127,67	42,65	59,47	40,54
0,25	100,00	33,41	92,87	7,13
0,125	20,00	6,68	99,55	0,44
0,063	1,00	0,33	99,89	0,11
Fondo	0,33	0,11	100,00	0,00
<b>Total (g)</b>	299,33	<b>Modulo granulométrico (M.G)</b>		3,30

Tabla 17: Resultados promedio granulometría arena 0,5/1,6mm.

<b>Diámetro tamiz (µm)</b>	<b>% Retenido</b>	<b>Área retenido %</b>	<b>% Retenido acumulado</b>
0,375	0,028	1,100	0
0,412	0,051	1,786	0,028
0,452	0,075	2,393	0,079
0,496	0,106	3,089	0,154
0,545	0,130	3,470	0,259
0,598	0,151	3,662	0,390
0,657	0,169	3,726	0,541
0,721	0,185	3,718	0,709
0,791	0,196	3,598	0,894
0,869	0,203	3,392	1,090
0,954	0,206	3,134	1,293
1,047	0,206	2,857	1,499
1,149	0,204	2,581	1,705
1,261	0,200	2,305	1,910
1,385	0,195	2,046	2,110
1,520	0,190	1,816	2,305
1,669	0,187	1,627	2,495
1,832	0,186	1,473	2,682
2,011	0,187	1,350	2,868
2,208	0,191	1,258	3,055
2,423	0,200	1,196	3,247
2,660	0,213	1,159	3,447
2,920	0,230	1,142	3,659
3,206	0,251	1,138	3,889
3,519	0,277	1,142	4,140
3,863	0,307	1,153	4,417
4,241	0,341	1,166	4,724
4,656	0,378	1,177	5,065
5,111	0,417	1,185	5,443
5,611	0,459	1,186	5,860
6,159	0,502	1,183	6,319
6,761	0,548	1,176	6,821
7,422	0,595	1,163	7,369
8,148	0,644	1,147	7,964
8,944	0,695	1,128	8,608
9,819	0,751	1,110	9,303
10,779	0,813	1,095	10,054
11,832	0,884	1,085	10,867
12,989	0,968	1,081	11,752

14,259	1,067	1,086	12,719
15,653	1,191	1,104	13,787
17,183	1,346	1,137	14,978
18,863	1,535	1,181	16,324
20,707	1,760	1,233	17,859
22,732	2,017	1,287	19,619
24,954	2,305	1,340	21,635
27,393	2,626	1,391	23,940
30,071	2,985	1,441	26,566
33,011	3,384	1,487	29,552
36,239	3,813	1,527	32,935
39,781	4,251	1,551	36,749
43,670	4,654	1,546	41,000
47,940	4,962	1,502	45,654
52,626	5,112	1,410	50,615
57,771	5,069	1,273	55,728
63,419	4,840	1,107	60,797
69,619	4,488	0,936	65,637
76,425	4,152	0,788	70,126
83,897	3,949	0,683	74,278
92,099	3,954	0,623	78,227
101,103	4,096	0,588	82,181
110,987	4,142	0,542	86,278
121,837	3,835	0,457	90,419
133,748	3,034	0,329	94,254
146,824	1,814	0,179	97,288
161,177	0,738	0,066	99,102
176,935	0,148	0,012	99,840
194,232	0,012	0,001	99,988
213,221	0	0	100
234,066	0	0	100

**Tabla 18: Resultados granulometría Arena Llanes.**

<b>Diámetro tamiz (µm)</b>	<b>% Retenido</b>	<b>Área retenido %</b>	<b>% Retenido acumulado</b>
0,375	0,157	1,577	0
0,412	0,279	2,551	0,157
0,452	0,409	3,402	0,437
0,496	0,577	4,375	0,845
0,545	0,710	4,902	1,423
0,598	0,818	5,143	2,133
0,657	0,906	5,191	2,950
0,721	0,983	5,130	3,856
0,791	1,035	4,921	4,839
0,869	1,058	4,584	5,874
0,954	1,058	4,175	6,932
1,047	1,041	3,740	7,991
1,149	1,014	3,318	9,031
1,261	0,975	2,907	10,045
1,385	0,931	2,530	11,019
1,520	0,889	2,200	11,951
1,669	0,859	1,936	12,840
1,832	0,842	1,729	13,699
2,011	0,841	1,574	14,540
2,208	0,860	1,466	15,382
2,423	0,903	1,402	16,242
2,660	0,972	1,375	17,145
2,920	1,067	1,375	18,117
3,206	1,187	1,393	19,184
3,519	1,329	1,421	20,371
3,863	1,492	1,453	21,700
4,241	1,670	1,481	23,192
4,656	1,857	1,500	24,861
5,111	2,046	1,506	26,718
5,611	2,235	1,499	28,764
6,159	2,419	1,478	30,999
6,761	2,594	1,443	33,419
7,422	2,754	1,396	36,012
8,148	2,896	1,337	38,766
8,944	3,020	1,271	41,662
9,819	3,126	1,198	44,682
10,779	3,211	1,121	47,808
11,832	3,276	1,042	51,019
12,989	3,332	0,965	54,295

14,259	3,400	0,897	57,626
15,653	3,501	0,841	61,026
17,183	3,634	0,796	64,527
18,863	3,766	0,751	68,161
20,707	3,842	0,698	71,927
22,732	3,804	0,630	75,768
24,954	3,629	0,547	79,572
27,393	3,340	0,459	83,202
30,071	2,985	0,373	86,542
33,011	2,612	0,298	89,527
36,239	2,244	0,233	92,139
39,781	1,874	0,177	94,383
43,670	1,487	0,128	96,257
47,940	1,083	0,085	97,744
52,626	0,690	0,049	98,827
57,771	0,343	0,022	99,517
63,419	0,118	0,007	99,860
69,619	0,021	0,001	99,978
76,425	0,001	0,000	99,999
83,897	0	0	100
92,099	0	0	100

**Tabla 19: Resultados granulometría Cemento III 42,5N SRC.**

<b>Diámetro tamiz (µm)</b>	<b>% Retenido</b>	<b>Área retenido %</b>	<b>% Retenido acumulado</b>
0,375	0,242	1,859	0
0,412	0,428	2,996	0,242
0,452	0,626	3,988	0,670
0,496	0,884	5,136	1,296
0,545	1,093	5,782	2,180
0,598	1,263	6,086	3,273
0,657	1,403	6,160	4,536
0,721	1,526	6,103	5,939
0,791	1,615	5,883	7,466
0,869	1,660	5,509	9,081
0,954	1,666	5,036	10,741
1,047	1,641	4,518	12,407
1,149	1,596	4,003	14,048
1,261	1,529	3,493	15,644
1,385	1,445	3,009	17,172
1,520	1,352	2,564	18,618
1,669	1,263	2,181	19,970
1,832	1,182	1,859	21,233
2,011	1,113	1,595	22,414
2,208	1,060	1,384	23,527
2,423	1,027	1,221	24,587
2,660	1,020	1,105	25,614
2,920	1,041	1,028	26,634
3,206	1,091	0,981	27,675
3,519	1,166	0,955	28,766
3,863	1,261	0,941	29,932
4,241	1,372	0,933	31,194
4,656	1,492	0,924	32,566
5,111	1,613	0,909	34,058
5,611	1,728	0,888	35,670
6,159	1,832	0,857	37,398
6,761	1,922	0,819	39,230
7,422	1,998	0,776	41,152
8,148	2,063	0,730	43,150
8,944	2,118	0,683	45,213
9,819	2,163	0,635	47,331
10,779	2,199	0,588	49,494
11,832	2,235	0,544	51,693
12,989	2,293	0,509	53,928

14,259	2,399	0,485	56,221
15,653	2,567	0,473	58,620
17,183	2,783	0,467	61,187
18,863	3,002	0,459	63,970
20,707	3,164	0,440	66,972
22,732	3,221	0,408	70,136
24,954	3,164	0,365	73,357
27,393	3,022	0,318	76,521
30,071	2,841	0,272	79,543
33,011	2,659	0,232	82,384
36,239	2,493	0,198	85,043
39,781	2,337	0,169	87,536
43,670	2,169	0,143	89,873
47,940	1,971	0,118	92,042
52,626	1,734	0,095	94,012
57,771	1,455	0,073	95,746
63,419	1,146	0,052	97,201
69,619	0,824	0,034	98,348
76,425	0,506	0,019	99,172
83,897	0,238	0,008	99,678
92,099	0,072	0,002	99,916
101,103	0,011	0,000	99,988
110,987	0,001	0,000	100,000
121,837	0	0	100
133,748	0	0	100

**Tabla 20: Resultados granulometría Harina Sílice G-40.**

<b>Diámetro tamiz (µm)</b>	<b>% Retenido</b>	<b>Área retenido %</b>	<b>% Retenido acumulado</b>
0,375	0,020	0,963	0
0,412	0,035	1,558	0,020
0,452	0,051	2,086	0,055
0,496	0,073	2,703	0,106
0,545	0,091	3,060	0,179
0,598	0,106	3,252	0,270
0,657	0,119	3,332	0,376
0,721	0,132	3,352	0,495
0,791	0,141	3,282	0,627
0,869	0,148	3,133	0,768
0,954	0,152	2,932	0,916
1,047	0,154	2,706	1,069
1,149	0,155	2,476	1,223
1,261	0,154	2,237	1,378
1,385	0,151	2,004	1,532
1,520	0,148	1,785	1,683
1,669	0,145	1,595	1,831
1,832	0,143	1,431	1,976
2,011	0,141	1,291	2,119
2,208	0,141	1,174	2,260
2,423	0,143	1,083	2,401
2,660	0,147	1,017	2,544
2,920	0,155	0,973	2,691
3,206	0,165	0,945	2,846
3,519	0,178	0,931	3,011
3,863	0,196	0,929	3,190
4,241	0,216	0,936	3,385
4,656	0,241	0,951	3,602
5,111	0,269	0,967	3,843
5,611	0,301	0,986	4,112
6,159	0,337	1,006	4,413
6,761	0,378	1,027	4,751
7,422	0,425	1,052	5,129
8,148	0,478	1,077	5,554
8,944	0,539	1,107	6,032
9,819	0,612	1,144	6,572
10,779	0,700	1,192	7,183
11,832	0,807	1,252	7,883
12,989	0,935	1,322	8,690

14,259	1,088	1,401	9,625
15,653	1,272	1,491	10,714
17,183	1,490	1,591	11,985
18,863	1,737	1,690	13,475
20,707	1,997	1,771	15,212
22,732	2,241	1,810	17,209
24,954	2,441	1,796	19,450
27,393	2,585	1,732	21,891
30,071	2,685	1,639	24,476
33,011	2,775	1,543	27,161
36,239	2,896	1,467	29,935
39,781	3,069	1,416	32,831
43,670	3,286	1,381	35,900
47,940	3,492	1,337	39,186
52,626	3,609	1,259	42,678
57,771	3,593	1,142	46,288
63,419	3,466	1,003	49,881
69,619	3,348	0,883	53,347
76,425	3,449	0,828	56,695
83,897	3,931	0,860	60,144
92,099	4,890	0,975	64,075
101,103	6,103	1,108	68,965
110,987	7,008	1,159	75,068
121,837	6,976	1,051	82,076
133,748	5,727	0,786	89,052
146,824	3,484	0,436	94,779
161,177	1,428	0,163	98,262
176,935	0,286	0,030	99,690
194,232	0,024	0,002	99,976
213,221	0	0	100
234,066	0	0	100

Tabla 21: Resultados granulometría Humo de sílice de Elkem.

## 8.2 HMAR en fresco y endurecido.

### - Resultados escurrimiento.

A continuación se presentan los resultados de los ensayos de escurrimiento a cada amasada realizada.

Amasada	fecha amasado	Escorrimento (cm)	
		1 Min	3 Min
AN1	21-mar	26,25	29
AN2	23-mar	26,25	29,25
AN3	23-mar	27	29
AN4	23-mar	25,5	27,5
AN5	25-mar	25	27,25
AE1	21-mar	26,5	29
AE2	23-mar	26,5	29,25
AE3	23-mar	27	29
AE4	23-mar	25,5	27,5
AE5	25-mar	25	27,25
AS2	29-mar	32,5	34,25
AS3	25-mar	31,25	34,25
AS4	29-mar	31	32,75
AS5	29-mar	32,5	33

Tabla 22: Resultados de los escurrimientos a 1 y 3 minutos.

- **Resultados ensayo densidad HMAR endurecido.**

Los resultados que se presentan a continuación son las medidas, pesos y densidad de cada una de las probetas realizadas de 40×40×160mm.

Amasada	Fecha ensayo	Medidas (cm) y Volumen (cm <sup>3</sup> )											
		L1	E11	E12	V1	L2	E21	E22	V2	L3	E31	E32	V3
AN1	18-abr	16,075	4,005	4,118	<b>265,118</b>	16,06	4,000	4,093	<b>262,902</b>	16,025	4,175	4,050	<b>270,963</b>
AN2	20-abr	16,055	4,155	4,110	<b>274,172</b>	16,05	4,000	4,103	<b>263,381</b>	16,04	4,093	4,000	<b>262,575</b>
AN3	20-abr	16,095	4,113	4,125	<b>273,037</b>	16,07	4,185	4,128	<b>277,587</b>	16,065	4,120	4,000	<b>264,751</b>
AN4	20-abr	16,15	4,183	4,000	<b>270,190</b>	16,07	4,015	4,265	<b>275,182</b>	16,085	4,175	4,010	<b>269,291</b>
AN5	22-abr	16,105	4,090	4,010	<b>264,136</b>	16,105	4,015	4,000	<b>258,646</b>	16,12	4,090	4,000	<b>263,723</b>
AE1	18-abr	16,065	3,960	4,000	<b>254,470</b>	16,08	4,125	4,050	<b>268,637</b>	16,07	4,075	4,055	<b>265,543</b>
AE2	20-abr	16,05	4,010	4,000	<b>257,442</b>	16,07	4,260	4,000	<b>273,833</b>	16,075	4,250	4,000	<b>273,275</b>
AE3	20-abr	16,065	4,180	4,000	<b>268,607</b>	16,08	4,160	4,020	<b>268,909</b>	16,04	4,030	4,010	<b>259,211</b>
AE4	20-abr	16,095	4,205	3,980	<b>269,364</b>	16,065	4,265	4,005	<b>274,411</b>	16,055	4,230	4,000	<b>271,651</b>
AE5	22-abr	16,055	4,150	4,025	<b>268,179</b>	16,08	4,185	4,020	<b>270,525</b>	16,05	4,085	4,030	<b>264,224</b>
AS2	26-abr	16,09	4,105	4,010	<b>264,858</b>	16,1	4,165	4,010	<b>268,897</b>	16,095	4,075	4,020	<b>263,660</b>
AS3	22-abr	16,135	4,100	4,010	<b>265,276</b>	16,14	4,030	4,010	<b>260,827</b>	16,095	4,190	4,000	<b>269,752</b>
AS4	26-abr	16,115	4,115	4,020	<b>266,579</b>	16,025	4,090	4,010	<b>262,824</b>	15,99	4,035	4,010	<b>258,724</b>
AS5	26-abr	16,105	4,180	4,000	<b>269,276</b>	16,09	4,045	4,015	<b>261,312</b>	16,075	4,060	4,010	<b>261,711</b>

Tabla 23: Resultados medidas de las probetas.

Amasada	Fecha ensayo	Peso por probeta (g)			Densidad (g/cm <sup>3</sup> )			
		1	2	3	1	2	3	Promedio
AN1	18-abr	595	605	610	2,244	2,301	2,251	2,266
AN2	20-abr	570	577	582	2,079	2,191	2,217	2,162
AN3	20-abr	563	555	561	2,062	1,999	2,119	2,060
AN4	20-abr	554	575	562	2,050	2,090	2,087	2,076
AN5	22-abr	536	540	538	2,029	2,088	2,040	2,052
AE1	18-abr	568	599	585	2,232	2,230	2,203	2,222
AE2	20-abr	578	599	587	2,245	2,187	2,148	2,194
AE3	20-abr	574	578	550	2,137	2,149	2,122	2,136
AE4	20-abr	571	588	574	2,120	2,143	2,113	2,125
AE5	22-abr	525	521	512	1,958	1,926	1,938	1,940
AS2	26-abr	533	531	524	2,012	1,975	1,987	1,992
AS3	22-abr	536	514	538	2,021	1,971	1,994	1,995
AS4	26-abr	529	516	498	1,984	1,963	1,925	1,958
AS5	26-abr	533	512	501	1,979	1,959	1,914	1,951

Tabla 24: Resultados de pesos y densidad de las probetas.

- **Resultados ensayo de velocidad de pulso ultrasónico.**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del ensayo de velocidad de pulso ultrasónico para las probetas de 40×40×160mm.

Amasada	Fecha ensayo	Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)			
		1	2	3	Promedio
AN1	18-abr	4336	4678	4267	4427
AN2	20-abr	4598	4624	4585	4602
AN3	20-abr	4494	4533	4444	4490
AN4	20-abr	4482	4545	4420	4482
AN5	22-abr	4134	4124	4134	4131
AE1	18-abr	4954	4372	4954	4760
AE2	20-abr	4665	4665	4598	4643
AE3	20-abr	4651	4611	4665	4642
AE4	20-abr	4558	4631	4611	4600
AE5	22-abr	4301	4372	4336	4336
AS2	26-abr	4457	4408	4420	4428
AS3	22-abr	4301	4222	4244	4256
AS4	26-abr	4040	4030	4040	4037
AS5	26-abr	3970	3922	3941	3944

Tabla 25: Resultados de la velocidad de pulso ultrasónico.

- **Resultados ensayo de flexión en 3 puntos.**

En la tabla que se expone a continuación se muestran las cargas máximas obtenidas del ensayo de flexión para determinar las resistencias a flexión de todas las amasadas realizadas.

Amasada	Fecha ensayo	Ensayo a flexión en 3 puntos						
		1 Carga (N)	1 (MPa)	2 Carga (N)	2 (MPa)	3 Carga (N)	3 (MPa)	Promedio (MPa)
AN1	18-abr	6965	<b>16,324</b>	7215	<b>16,910</b>	7534	<b>17,658</b>	<b>16,964</b>
AN2	20-abr	5465	<b>12,809</b>	6535	<b>15,316</b>	6347	<b>14,876</b>	<b>14,334</b>
AN3	20-abr	5275	<b>12,363</b>	6046	<b>14,170</b>	5283	<b>12,382</b>	<b>12,972</b>
AN4	20-abr	5469	<b>12,818</b>	5133	<b>12,030</b>	4824	<b>11,306</b>	<b>12,052</b>
AN5	22-abr	4248	<b>9,956</b>	3701	<b>8,674</b>	4028	<b>9,441</b>	<b>9,357</b>
AE1	18-abr	7325	<b>17,168</b>	7976	<b>18,694</b>	6836	<b>16,022</b>	<b>17,295</b>
AE2	20-abr	6135	<b>14,379</b>	6758	<b>15,839</b>	6249	<b>14,646</b>	<b>14,955</b>
AE3	20-abr	5915	<b>13,863</b>	6888	<b>16,144</b>	5431	<b>12,729</b>	<b>14,245</b>
AE4	20-abr	6304	<b>14,775</b>	5259	<b>12,326</b>	4590	<b>10,758</b>	<b>12,620</b>
AE5	22-abr	4492	<b>10,528</b>	4584	<b>10,744</b>	4754	<b>11,142</b>	<b>10,805</b>
AS2	26-abr	5957	<b>13,962</b>	6049	<b>14,177</b>	6069	<b>14,224</b>	<b>14,121</b>
AS3	22-abr	4173	<b>9,780</b>	3812	<b>8,934</b>	4348	<b>10,191</b>	<b>9,635</b>
AS4	26-abr	3921	<b>9,190</b>	3917	<b>9,180</b>	3618	<b>8,480</b>	<b>8,950</b>
AS5	26-abr	2419	<b>5,670</b>	3288	<b>7,706</b>	3907	<b>9,157</b>	<b>7,511</b>

Tabla 26: Resultados para la flexión en 3 puntos.

- **Resultados ensayo de compresión.**

Los resultados presentados a continuación son los valores obtenidos para el ensayo de compresión. Al realizar el ensayo de flexión las probetas quedaron divididas en dos, por tanto, para el ensayo de compresión se ensayan 6 probetas. Al obtener los valores de todas las amasadas se realizó un primer promedio donde todos los datos obtenidos debían estar en el rango de margen superior e inferior del 10%. Aquellas amasadas con valores superiores e inferiores a este porcentaje se les realizó un segundo promedio excluyendo dichos datos.

Amasada	fecha ensayo	Ensayo compresión							
		11	12	21	22	31	32	Promedio I	Promedio II
AN1	18-abr	94,34	95,8	103,68	87,69	81,35	79,65	90,418	<b>89,795</b>
AN2	20-abr	90,38	79,04	72,54	81,45	79,19	84,06	<b>81,110</b>	
AN3	20-abr	68,66	51,38	55,08	65,12	62,2	68,4	<b>61,807</b>	
AN4	20-abr	71,23	69,24	68,77	59,91	61,49	66,01	<b>66,108</b>	
AN5	22-abr	50,83	41,94	50,52	51,42	47,04	45,02	<b>47,795</b>	
AE1	18-abr	77,09	103,36	115,16	86,21	99,69	78,26	93,295	<b>96,420</b>
AE2	20-abr	83,76	80,79	96,62	76,61	77,63	77,83	<b>82,207</b>	
AE3	20-abr	76,28	84,11	70,92	86,5	87,33	77,55	<b>80,448</b>	
AE4	20-abr	54,19	48,28	57,5	49,82	57,09	46,11	<b>52,165</b>	
AE5	22-abr	49,27	56,3	59,25	51,71	53,84	61,67	<b>55,340</b>	
AS2	26-abr	59,76	68,26	65,25	66,34	61,61	68,27	<b>64,915</b>	
AS3	22-abr	58,27	62,27	63,31	51,88	70,3	61,77	<b>61,300</b>	
AS4	26-abr	51,42	44,34	46,61	51,28	45,29	48,23	<b>47,862</b>	
AS5	26-abr	42,81	49,93	52,24	43,49	44,51	40,88	<b>45,643</b>	

Tabla 27: Resultados promedios de ensayo a compresión.

- **Resultados ensayo de retracción.**

Los resultados presentados a continuación se determinaron midiendo la diferencia de longitudes de las probetas de 25×25×285mm a partir del día del desmolde.

<b>Control</b>		<b>Variación Long <math>\mu\text{m}</math></b>		<b>Valor medio %</b>	<b>Temperatura <math>^{\circ}\text{C}</math></b>	<b>Humedad %</b>
<b>Fecha</b>	<b>Días</b>	<b>Probeta A</b>	<b>Probeta B</b>			
22-mar	1	0	0	0%	17,7	51
24-mar	3	4,9	6,7	0,0020%	17,5	52
30-mar	7	10,2	11,6	0,0038%	16,4	54
6-abr	14	13,2	14,9	0,0049%	14,8	50
17-abr	21	12,5	14	0,0046%	16	67
26-abr	28	12,8	14,4	0,0048%	16,7	70
<b>35% A Llanes</b>		<b>Variación Long <math>\mu\text{m}</math></b>		<b>Valor medio %</b>	<b>Temperatura <math>^{\circ}\text{C}</math></b>	<b>Humedad %</b>
<b>Fecha</b>	<b>Días</b>	<b>Probeta A</b>	<b>Probeta B</b>			
24-mar	1	0	0	0%	17,5	52
28-mar	3	13,5	13,1	0,0047%	17,1	60
1-abr	7	21,8	20,7	0,0075%	16,2	42
8-abr	14	25,8	25	0,0089%	15,8	52
19-abr	21	22,9	21,8	0,0078%	16	64
28-abr	28	23,6	22,7	0,0081%	16,7	70
<b>50% A Llanes</b>		<b>Variación Long <math>\mu\text{m}</math></b>		<b>Valor medio %</b>	<b>Temperatura <math>^{\circ}\text{C}</math></b>	<b>Humedad %</b>
<b>Fecha</b>	<b>Días</b>	<b>Probeta A</b>	<b>Probeta B</b>			
24-mar	1	0	0	0%	17,5	52
28-mar	3	17	15,3	0,0057%	17,1	60
1-abr	7	26,3	24	0,0088%	16,2	42
8-abr	14	32,3	29,5	0,0108%	15,8	52
19-abr	21	28,5	25,5	0,0095%	16	64
28-abr	28	29,4	26,5	0,0098%	16,7	70
<b>75% A Llanes</b>		<b>Variación Long <math>\mu\text{m}</math></b>		<b>Valor medio %</b>	<b>Temperatura <math>^{\circ}\text{C}</math></b>	<b>Humedad %</b>
<b>Fecha</b>	<b>Días</b>	<b>Probeta A</b>	<b>Probeta B</b>			
24-mar	1	0	0	0%	17,5	52
28-mar	3	15,3	30,3	0,0080%	17,1	60
1-abr	7	24,4	39,1	0,0111%	16,2	42
8-abr	14	29,8	45	0,0131%	15,8	52
19-abr	21	26	40,6	0,0117%	16	64
28-abr	28	27	41,8	0,0121%	16,7	70
<b>100% A Llanes</b>		<b>Variación Long <math>\mu\text{m}</math></b>		<b>Valor medio %</b>	<b>Temperatura <math>^{\circ}\text{C}</math></b>	<b>Humedad %</b>
<b>Fecha</b>	<b>Días</b>	<b>Probeta A</b>	<b>Probeta B</b>			
28-mar	1	0	0	0%	17,1	60
30-mar	3	15,2	11,3	0,0046%	16,4	54
3-abr	7	26,8	28,1	0,0096%	15,5	65
12-abr	14	32,2	33,6	0,0115%	16,6	68
21-abr	21	31,5	32,9	0,0113%	15,6	59
3-may	28	32,3	33,6	0,0116%	16,1	70

Tabla 28: Resultados Retracción amasadas AN.

Control		Variación Long $\mu\text{m}$		Valor medio %	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	Humedad %
Fecha	Días	Probeta A	Probeta B			
30-mar	1	0	0	0%	16,4	54
1-abr	3	8,3	7,7	0,0028%	16,2	42
5-abr	7	13,2	12,5	0,0045%	15	42
16-abr	14	14,2	13,6	0,0049%	16	67
25-abr	21	16,6	15,7	0,0057%	15,6	65
5-may	28	16,8	16	0,0058%	16,2	66
35% A Llanes		Variación Long $\mu\text{m}$		Valor medio %	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	Humedad %
Fecha	Días	Probeta A	Probeta B			
30-mar	1	0	0	0%	16,4	54
1-abr	3	9,7	10,1	0,0035%	16,2	42
5-abr	7	15,7	17,2	0,0058%	15	42
16-abr	14	16,6	17,9	0,0061%	16	67
25-abr	21	19	20,2	0,0069%	15,6	65
5-may	28	18,8	20,1	0,0068%	16,2	66
50% A Llanes		Variación Long $\mu\text{m}$		Valor medio %	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	Humedad %
Fecha	Días	Probeta A	Probeta B			
30-mar	1	0	0	0%	16,4	54
1-abr	3	10,3	9,7	0,0035%	16,2	42
5-abr	7	17,7	16,6	0,0060%	15	42
16-abr	14	19,1	18,1	0,0065%	16	67
25-abr	21	21,6	20,7	0,0074%	15,6	65
5-may	28	21,8	20,5	0,0074%	16,2	66
75% A Llanes		Variación Long $\mu\text{m}$		Valor medio %	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	Humedad %
Fecha	Días	Probeta A	Probeta B			
1-abr	1	0	0	0%	16,2	42
3-abr	3	18,4	13,1	0,0055%	15,5	65
7-abr	7	34,5	34,6	0,0121%	15,1	53
18-abr	14	34,4	34,5	0,0121%	16,1	62
27-abr	21	35,6	35,3	0,0124%	15,9	73
9-may	28	36,1	36	0,0126%	16,3	70
100% A Llanes		Variación Long $\mu\text{m}$		Valor medio %	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	Humedad %
Fecha	Días	Probeta A	Probeta B			
1-abr	1	0	-	0%	16,2	42
3-abr	3	49,3	-	0,0173%	15,5	65
7-abr	7	68,8	-	0,0241%	15,1	53
18-abr	14	69,1	-	0,0242%	16,1	62
27-abr	21	70,1	-	0,0246%	15,9	73
9-may	28	70,8	-	0,0248%	16,3	70

Tabla 29: Resultados Retracción amasadas AE.

<b>35% A Llanes</b>		<b>Variación Long <math>\mu\text{m}</math></b>		<b>Valor medio %</b>	<b>Temperatura <math>^{\circ}\text{C}</math></b>	<b>Humedad %</b>
<b>Fecha</b>	<b>Días</b>	<b>Probeta A</b>	<b>Probeta B</b>			
30-mar	1	0	0	0	16,4	54
1-abr	3	13,5	112,4	0,0221%	16,2	42
5-abr	7	25,1	122,4	0,0259%	15	42
16-abr	14	26,1	123,3	0,0262%	16	67
25-abr	21	28,7	125,6	0,0271%	15,6	65
5-may	28	28,8	125,8	0,0271%	16,2	66
<b>50% A Llanes</b>		<b>Variación Long <math>\mu\text{m}</math></b>		<b>Valor medio %</b>	<b>Temperatura <math>^{\circ}\text{C}</math></b>	<b>Humedad %</b>
<b>Fecha</b>	<b>Días</b>	<b>Probeta A</b>	<b>Probeta B</b>			
28-mar	1	0	0	0	17,1	60
30-mar	3	8,5	7,5	0,0028%	16,4	54
3-abr	7	19,4	18,6	0,0067%	15,5	65
12-abr	14	25,3	23,9	0,0086%	16,6	68
21-abr	21	26,9	25,4	0,0092%	15,6	59
3-may	28	26,1	24,3	0,0088%	16,1	70
<b>75% A Llanes</b>		<b>Variación Long <math>\mu\text{m}</math></b>		<b>Valor medio %</b>	<b>Temperatura <math>^{\circ}\text{C}</math></b>	<b>Humedad %</b>
<b>Fecha</b>	<b>Días</b>	<b>Probeta A</b>	<b>Probeta B</b>			
30-mar	1	0	0	0	16,4	54
1-abr	3	18,4	29,3	0,0084%	16,2	42
5-abr	7	34,8	116,2	0,0265%	15	42
16-abr	14	40,5	133,3	0,0305%	16	67
25-abr	21	43,6	137	0,0317%	15,6	65
5-may	28	44,1	138	0,0319%	16,2	66
<b>100% A Llanes</b>		<b>Variación Long <math>\mu\text{m}</math></b>		<b>Valor medio %</b>	<b>Temperatura <math>^{\circ}\text{C}</math></b>	<b>Humedad %</b>
<b>Fecha</b>	<b>Días</b>	<b>Probeta A</b>	<b>Probeta B</b>			
30-mar	1	0	0	0	16,4	54
1-abr	3	37,1	59,5	0,0169%	16,2	42
5-abr	7	64,6	85,4	0,0263%	15	42
16-abr	14	74,2	93,3	0,0294%	16	67
25-abr	21	78,7	97,1	0,0308%	15,6	65
5-may	28	78,2	96,9	0,0307%	16,2	66

**Tabla 30: Resultados Retracción amasadas AS.**