



**Escuela Universitaria  
Politécnica - La Almunia**  
Centro adscrito  
**Universidad Zaragoza**

**MEMORIA**

**INVESTIGACIÓN DE SUSTITUCIÓN DE  
FILLER EN UN HAC**

Autor: LEYRE EZPELETA OSÉS

Director: RAFAEL ADE BELTRAN

MARTÍN ORNA CARMONA

Fecha: JUNIO 2017



## INDICE DE CONTENIDO

<b>1. RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>2. ABSTRACT</b>	<b>2</b>
<b>3. ANTECEDENTES</b>	<b>3</b>
<b>4. OBJETIVOS</b>	<b>4</b>
4.1. OBJETIVO PRINCIPAL	4
4.2. OBJETIVOS SECUNDARIOS	4
4.3. OBJETIVO ACADÉMICO	4
<b>5. INSTRUCCIÓN EHE-08</b>	<b>5</b>
5.1. HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE	5
5.1.1. <i>Propiedades tecnológicas de los materiales</i>	5
5.1.2. <i>Durabilidad del hormigón</i>	9
5.1.3. <i>Características del hormigón</i>	10
<b>6. ADICIÓN DE ESCORIA Y CAL APAGADA AL HORMIGÓN</b>	<b>14</b>
6.1. ESCORIA DE FONDO COMO ADICIÓN AL HORMIGÓN	14
6.2. CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE AL HORMIGÓN	14
<b>7. ENSAYOS PREVIOS AL ESTUDIO</b>	<b>17</b>
7.1. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA	17
7.2. GRANULOMETRÍAS	18
7.2.1. <i>Arena</i>	18
7.2.2. <i>Gravas</i>	21
7.3. EQUIVALENTE ARENA	23
<b>8. ENSAYO DE DOCILIDAD</b>	<b>26</b>
8.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DOCILIDAD DEL HORMIGÓN	27
8.2. CÓMO SE DETERMINA LA DOCILIDAD DE UN HORMIGÓN	28
8.3. DOCILIDAD DE UN HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE	29
8.4. CÓMO EJECUTAR UN CORRECTO ENSAYO DE DOCILIDAD	29

INDICES

8.5.	DOSIFICACIÓN FINAL HAC _____	31
<b>9.</b>	<b>ESTUDIO DE DOCILIDAD DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE DE CONTROL _____</b>	<b>33</b>
9.1.	HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE DE CONTROL _____	33
9.2.	CONCLUSIÓN _____	34
<b>10.</b>	<b>ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO _____</b>	<b>36</b>
10.1.	ENSAYO DE ESCURRIMIENTO O CONO DE ABRAMS _____	36
10.2.	LLENADO DE PROBETAS _____	38
10.3.	NOMBRAMIENTO DE PROBETAS _____	42
10.4.	REFRENTADO DE PROBETAS _____	43
10.5.	ROTURA DE LAS PROBETAS POR COMPRESIÓN SIMPLE A 28 DÍAS _____	46
10.5.1.	<i>Hormigón autocompactante de control _____</i>	<i>47</i>
10.5.2.	<i>Hormigón autocompactante con sustitución del filler por escoria en un 20% _____</i>	<i>49</i>
10.5.3.	<i>Hormigón autocompactante con sustitución del filler por escoria en un 40% _____</i>	<i>50</i>
10.5.4.	<i>Hormigón autocompactante con sustitución del filler por escoria en un 60% _____</i>	<i>52</i>
10.5.5.	<i>Hormigón autocompactante con sustitución del filler por escoria en un 80% _____</i>	<i>53</i>
10.5.6.	<i>Hormigón autocompactante con sustitución del filler por escoria en un 100% _____</i>	<i>55</i>
10.6.	ROTURA DE LAS PROBETAS POR COMPRESIÓN SIMPLE A 90 DÍAS _____	56
10.6.1.	<i>Hormigón autocompactante de control _____</i>	<i>56</i>
10.6.2.	<i>Hormigón autocompactante con sustitución del filler por escoria en un 20% _____</i>	<i>57</i>
10.6.3.	<i>Hormigón autocompactante con sustitución del filler por escoria en un 40% (FALTAN PROBETAS POR ROMPER) _____</i>	<i>58</i>
10.6.4.	<i>Hormigón autocompactante con sustitución del filler por escoria en un 60% _____</i>	<i>59</i>
10.6.5.	<i>Hormigón autocompactante con sustitución del filler por escoria en un 80% (FALTAN PROBETAS POR ROMPER) _____</i>	<i>60</i>
10.6.6.	<i>Hormigón autocompactante con sustitución del filler por escoria en un 100% _____</i>	<i>61</i>
10.7.	CONCLUSIONES _____	62
<b>11.</b>	<b>ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE _____</b>	<b>65</b>
11.1.	ENSAYO DE ESCURRIMIENTO O CONO DE ABRAMS _____	65
11.2.	LLENADO DE PROBETAS _____	66
11.3.	NOMBRAMIENTO DE PROBETAS _____	68
11.4.	REFRENTADO DE PROBETAS _____	69

INDICES

11.5.	ROTURA DE LAS PROBETAS POR COMPRESIÓN SIMPLE A 28 DÍAS	69
11.5.1.	<i>Hormigón autocompactante con sustitución del filler por cal en un 25% (Con escoria en un 40%)</i>	69
11.5.2.	<i>Hormigón autocompactante con sustitución del filler por cal en un 50% (Con escoria en un 40%)</i>	71
11.5.3.	<i>Hormigón autocompactante con sustitución del filler por cal en un 75% (Con escoria en un 40%)</i>	73
11.5.4.	<i>Hormigón autocompactante con sustitución del filler por cal en un 25% (Con escoria en un 80%)</i>	75
11.5.5.	<i>Hormigón autocompactante con sustitución del filler por cal en un 50% (Con escoria en un 80%)</i>	77
11.5.6.	<i>Hormigón autocompactante con sustitución del filler por cal en un 75% (Con escoria en un 80%)</i>	79
11.6.	ROTURA DE LAS PROBETAS POR COMPRESIÓN SIMPLE A 90 DÍAS	80
11.6.1.	<i>Hormigón autocompactante con sustitución del filler por cal en un 25% (Con escoria en un 40%)</i>	81
11.6.2.	<i>Hormigón autocompactante con sustitución del filler por cal en un 50% (con escoria en un 40%)</i>	82
11.6.3.	<i>Hormigón autocompactante con sustitución del filler por cal en un 75% (con escoria en un 40%)</i>	83
11.6.4.	<i>Hormigón autocompactante con sustitución del filler por cal en un 25% (con escoria en un 80%)</i>	84
11.6.5.	<i>Hormigón autocompactante con sustitución del filler por cal en un 50% (con escoria en un 80%)</i>	85
11.6.6.	<i>Hormigón autocompactante con sustitución del filler por cal en un 75% (con escoria en un 80%)</i>	86
11.7.	CONCLUSIONES	87
11.7.1.	<i>Conclusiones de HAC con escoria 40% y cal apagada</i>	87
<b>12.</b>	<b>POSIBLES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>90</b>
<b>13.</b>	<b>RELACIÓN DE ANEJOS</b>	<b>91</b>
<b>14.</b>	<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>92</b>
<b>15.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>93</b>

## INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Cuarteado de la muestra .....	17
Ilustración 2 Desechado de la muestra de arena.....	19
Ilustración 3 Gráfica de granulometría arena .....	20
Ilustración 4 Desechado de la muestra de grava.....	21
Ilustración 5 Gráfica de granulometría grava .....	22
Ilustración 6 Pistón tarado .....	24
Ilustración 7 Prueba de dosificación del HAC .....	31
Ilustración 8 Dosificación final HAC .....	32
Ilustración 9 Llenado de cono de Abrams .....	37
Ilustración 10 Resultados del cono de Abrams y anillo J.....	37
Ilustración 11 Probetas.....	39
Ilustración 12 Llenado de probetas .....	40
Ilustración 13 Plato y azufre para refrentado.....	43
Ilustración 14 Azufre líquido.....	44
Ilustración 15 Colocación de probetas para refrentado.....	45
Ilustración 16 Probetas refrentadas.....	46
Ilustración 17 Gráfica de ensayo a compresión de HAC de control a 28 días .....	47
Ilustración 18 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria en 20% a 28 días .....	50
Ilustración 19 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria en 40% a 28 días .....	51
Ilustración 20 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria en 60% a 28 días .....	53
Ilustración 21 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria en 80% a 28 días .....	54

INDICES

Ilustración 22 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria en 100% a 28 días .....	56
Ilustración 23 Gráfica de ensayo a compresión de HAC de control a 90 días .....	57
Ilustración 24 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria en 20% a 90 días .....	58
Ilustración 25 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria en 40% a 90 días .....	59
Ilustración 26 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria en 60% a 90 días .....	60
Ilustración 27 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria en 80% a 90 días .....	61
Ilustración 28 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria en 100% a 90 días .....	62
Ilustración 29 Gráfica comparativa de HAC con escoria a 28 días .....	63
Ilustración 30 Gráfica comparativa de HAC con escoria a 90 días .....	63
Ilustración 31 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria 40% y cal apagada 25% a 28 días .....	70
Ilustración 32 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria 40% y cal apagada 50% a 28 días .....	72
Ilustración 33 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria 40% y cal apagada 75% a 28 días .....	74
Ilustración 34 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria 80% y cal apagada 25% a 28 días .....	76
Ilustración 35 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria 80% y cal apagada 50% a 28 días .....	78
Ilustración 36 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria 80% y cal apagada 75% a 28 días .....	80
Ilustración 37 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria 40% y cal apagada 25% a 90 días .....	81

INDICES

Ilustración 38 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria 40% y cal apagada 50% a 90 días .....82

Ilustración 39 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria 40% y cal apagada 75% a 90 días .....83

Ilustración 40 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria 80% y cal apagada 25% a 90 días .....84

Ilustración 41 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria 80% y cal apagada 50% a 90 días .....85

Ilustración 42 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria 80% y cal apagada 75% a 90 días .....86

Ilustración 43 Gráfica comparativa de HAC con 40% escoria y cal apagada a 28 días .....87

Ilustración 44 Gráfica comparativa de HAC con 40% escoria y cal apagada a 90 días .....87

Ilustración 45 Gráfica comparativa de HAC con 80% escoria y cal apagada a 28 días .....88

Ilustración 46 Gráfica comparativa de HAC con 80% escoria y cal apagada a 90 días .....88



## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Granulometría del filler.....	7
Tabla 2 Clases de escurrimiento .....	11
Tabla 3 Clases de viscosidad .....	11
Tabla 4 Clases de resistencia al bloqueo .....	12
Tabla 5 Masa de las muestras de ensayo para áridos de densidad normal de partícula .....	18
Tabla 6 Granulometría arena .....	20
Tabla 7 Granulometría grava .....	22
Tabla 8 Resultados equivalente arena.....	25
Tabla 9 Dosificación hormigón común.....	26
Tabla 10 Dosificación inicial HAC.....	27
Tabla 11 Rangos ensayo escurrimiento.....	29
Tabla 12 Dosificación final HAC.....	32
Tabla 13 Estudio de docilidad .....	34
Tabla 14 Resultados ensayo cono de Abrams .....	38
Tabla 15 Llenado probetas de control .....	40
Tabla 16 Llenado de probetas con sustitución del filler por escoria en un 20% ..	41
Tabla 17 Llenado de probetas con sustitución del filler por escoria en un 40% ..	41
Tabla 18 Llenado de probetas con sustitución del filler por escoria en un 60% ..	41
Tabla 19 Llenado de probetas con sustitución del filler por escoria en un 80% ..	42
Tabla 20 Llenado de probetas con sustitución del filler por escoria en un 100% ..	42
Tabla 21 Dosificación HAC CONTROL .....	47
Tabla 22 Resultados ensayo a compresión a 28 días HAC CONTROL .....	47
Tabla 23 Dosificación HAC con escoria 20% .....	49

INDICES

Tabla 24 Resultados ensayo a compresión a 28 días HAC con escoria 20% .....	49
Tabla 25 Dosificación HAC con escoria 40% .....	51
Tabla 26 Resultados ensayo a compresión a 28 días HAC con escoria 40% .....	51
Tabla 27 Dosificación HAC con escoria 60% .....	52
Tabla 28 Resultados ensayo a compresión a 28 días HAC con escoria 60% .....	52
Tabla 29 Dosificación HAC con escoria 80% .....	54
Tabla 30 Resultados ensayo a compresión a 28 días HAC con escoria 80% .....	54
Tabla 31 Dosificación HAC con escoria 100%.....	55
Tabla 32 Resultados ensayo a compresión a 28 días HAC con escoria 100%.....	55
Tabla 33 Resultados ensayo a compresión a 90 días HAC CONTROL .....	56
Tabla 34 Resultados ensayo a compresión a 90 días HAC con escoria 20% .....	57
Tabla 35 Resultados ensayo a compresión a 90 días HAC con escoria 40% .....	58
Tabla 36 Resultados ensayo a compresión a 90 días HAC con escoria 60% .....	59
Tabla 37 Resultados ensayo a compresión a 90 días HAC con escoria 80% .....	60
Tabla 38 Resultados ensayo a compresión simple a 90 días HAC con escoria 100%.....	61
Tabla 39 Resultados ensayo cono de Abrams .....	66
Tabla 40 Llenado de probetas con sustitución del filler por cal en un 25%.....	66
Tabla 41 Llenado de probetas con sustitución del filler por cal en un 50%.....	67
Tabla 42 Llenado de probetas con sustitución del filler por cal en un 75%.....	67
Tabla 43 Llenado de probetas con sustitución del filler por cal en un 25%.....	67
Tabla 44 Llenado de probetas con sustitución del filler por cal en un 50%.....	68
Tabla 45 Llenado de probetas con sustitución del filler por cal en un 75%.....	68
Tabla 46 Dosificación HAC con cal apagada 25% .....	70
Tabla 47 Resultados ensayo a compresión a 28 días HAC con escoria 40% y cal apagada 25%.....	70
Tabla 48 Dosificación HAC con cal apagada 50% .....	71

INDICES

Tabla 49 Resultados ensayo a compresión a 28 días HAC con escoria 40% y cal apagada 50% .....	71
Tabla 50 Dosificación HAC con cal apagada 75% .....	73
Tabla 51 Resultados ensayo a compresión a 28 días HAC con escoria 40% y cal apagada 75% .....	74
Tabla 52 Dosificación HAC con cal apagada 25% .....	75
Tabla 53 Resultados ensayo a compresión a 28 días HAC con escoria 80% y cal apagada 25% .....	75
Tabla 54 Dosificación HAC con cal apagada 50% .....	77
Tabla 55 Resultados ensayo a compresión a 28 días HAC con escoria 80% y cal apagada 50% .....	78
Tabla 56 Dosificación HAC con cal apagada 75% .....	79
Tabla 57 Resultados ensayo a compresión a 28 días HAC con escoria 80% y cal apagada 75% .....	80
Tabla 58 Resultados ensayo a compresión a 90 días HAC con escoria 40% y cal apagada 25% .....	81
Tabla 59 Resultados ensayo a compresión a 90 días HAC con escoria 40% y cal apagada 50% .....	82
Tabla 60 Resultados ensayo a compresión a 90 días HAC con escoria 40% y cal apagada 75% .....	83
Tabla 61 Resultados ensayo a compresión a 90 días HAC con escoria 80% y cal apagada 25% .....	84
Tabla 62 Resultados ensayo a compresión a 90 días HAC con escoria 80% y cal apagada 50% .....	85
Tabla 63 Resultados ensayo a compresión a 90 días HAC con escoria 80% y cal apagada 75% .....	86



---

INDICES

## 1. RESUMEN

El objetivo del Trabajo Final de Grado de título "Investigación de sustitución del filler en un hormigón autocompactante" comenzaba con la búsqueda de materiales para la ejecución del HAC. Con la colaboración de la empresa Cemex pudimos obtener todo lo necesario para comenzar el trabajo.

El primer paso era encontrar una granulometría que satisfaga lo indicado en las normas UNE como tamaños máximos de árido, aditivos, docilidad... con esto y una dosificación a la que se llegó tras una reunión con nuestros colaboradores se podía empezar a realizar probetas que con resultados mecánicos y visuales se tenían que modificar para corregir exudación.

Con la dosificación ajustada y la granulometría correcta se comenzó con las probetas de control y la sustitución del filler en diferentes porcentajes (20, 40, 60, 80 y 100) realizando roturas a los 28 y 90 días, con las primeras roturas ya podía estimar cuales continuarían reaccionando (40 y 80) con la cal apagada que teníamos que añadir para así sacar las conclusiones.

ABSTRACT

## 2. ABSTRACT

This end-of-degree project entitled "The replacement research of the filler in self-compacting concrete" aims to search different materials for the execution of the HAC. With the collaboration of the Cemex Company we were able to obtain everything needed to begin this research.

The first step was finding a granulometry that met the requirements of the UNE standards such as maximum sizes of aggregate, additives and docility, among others. Taking into account this first step and a dosage we reached after meeting with our collaborators, we could begin making test pieces that with mechanical and visual results had to be modified to get the correct exudation.

Once the dosage was adjusted and with the correct granulometry, we started with the control samples and the replacement of the filler with different percentages (20, 40, 60, 80 and 100), breaking them in 28 and 90 days. With the first breaks we could already estimate which ones would continue reacting (40 and 80) with the slaked lime we had to add to draw the conclusions.

### 3. ANTECEDENTES

Antes de presentar y desarrollar el "Estudio de investigación de sustitución de filler en un hormigón autocompactante", hay que recalcar la inexistencia bibliográfica de un estudio con estas características. En otros casos se han empleado cenizas volantes para sustituirlas en el cemento.

Aun así, se ha comparado este proyecto con otros en los que también se empleaban otros materiales para investigar cómo afectaría a un hormigón del cual se parte.

- Alejandro Celaya Naya en su Trabajo Fin de Carrera en la Universidad Politécnica de La Almunia (2014) estudió la **Docilidad del Hormigón autocompactante con la adición de fibras.**
- Rafael Ade Beltrán estudió el **Reciclado de escorias de fondo de central térmica para su uso como áridos en la elaboración de componentes prefabricados de hormigón** (2010), confirmando que el comportamiento del hormigón en piezas prefabricadas con la dosificación hallada presenta características satisfactorias a esfuerzos de flexión y consiguiendo resistencias similares a los hormigones sin sustitución de áridos con el consiguiente beneficio del reciclado de las escorias del proceso industrial.

## 4. OBJETIVOS

### 4.1. OBJETIVO PRINCIPAL

El objetivo principal de este estudio es investigar qué ocurre en un hormigón autocompactante cuando se le sustituye el filler por escoria de fondo y cal apagada, además de comprobar si el comportamiento varía cuando estos componentes cambian en diferentes porcentajes.

### 4.2. OBJETIVOS SECUNDARIOS

Previo a este estudio, se examinará la sustitución de filler únicamente por escoria de fondo, a partir del cual se obtendrá el hormigón del que se partirá posteriormente.

### 4.3. OBJETIVO ACADÉMICO

Este proyecto se realiza para obtener el Grado en Arquitectura Técnica.



## 5. INSTRUCCIÓN EHE-08

### 5.1. HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE

A efectos del Anejo 17 de la Instrucción EHE-08, se define como hormigón autocompactante aquel hormigón que, como consecuencia de una dosificación estudiada y del empleo de aditivos superplastificantes específicos, se compacta por la acción de su propio peso, sin necesidad de energía de vibración ni de cualquier otro método de compactación, no presentando segregación, bloqueo de árido grueso, sangrado, ni exudación de la lechada.

El hormigón autocompactante añade a las propiedades del hormigón convencional en cualquiera de las clases resistentes, la propiedad de autocompactabilidad, descrita anteriormente.

#### 5.1.1. *Propiedades tecnológicas de los materiales*

Los materiales componentes utilizados en los hormigones autocompactantes son los mismos que los empleados en los hormigones de compactación convencional de acuerdo con la Instrucción EHE-08, incluyendo además otros, especificados más abajo, que deben cumplir con los requisitos normativos de calidad que les corresponda.

Es de especial importancia que los hormigones autocompactantes se fabriquen con la mayor regularidad posible por lo que es muy importante la selección inicial y el control de los materiales así como la previa validación de cualquier dosificación.

El hormigón autocompactante se fabricará preferiblemente con los cementos que resulten adecuados para tal fin en función del tipo y cantidad de las adiciones que contengan, o bien con cemento común tipo CEM I, las adiciones al hormigón reglamentadas en el Artículo 30 de esta Instrucción y utilizando, cuando así se requiera, un filler inerte adecuado como árido de corrección de la granulometría de la arena en los diámetros más finos que pasan por el tamiz 0,063 mm.

De una u otra manera se debe conseguir una cantidad de finos (aquellas partículas que pasan por el tamiz 0,125 mm) suficiente para alcanzar la propiedad de auto-

## INSTRUCCIÓN EHE-08

compactabilidad. La cantidad total de finos menores de 0,125 mm aportada por el cemento, las adiciones al hormigón y los áridos, necesaria para fabricar hormigón autocompactante es del orden del 23% en peso, de la masa del hormigón, pudiendo determinarse, cuando sea necesario, con mayor precisión mediante los ensayos característicos correspondientes.

En el hormigón autocompactante se pueden utilizar, cuando sea necesario, al igual que en el hormigón de compactación convencional, otros componentes tales como el agua reciclada de las propias plantas de hormigón, los pigmentos, los aditivos reductores de retracción basados en glicoles, o las fibras, con las mismas limitaciones y especificaciones que en el hormigón convencional.

- Cementos

Se utilizarán cementos que cumplan la reglamentación específica vigente. Cuando se empleen cementos para usos especiales específicos para hormigón autocompactante que incluyan en su composición una cantidad de adición complementaria destinada exclusivamente a dotar al hormigón autocompactante de la cantidad de partículas finas necesarias, las cantidades mínimas a emplear de dichos cementos serán tales que, después de deducir la cantidad de adición complementaria que contengan, cumplan con las exigidas en el Artículo 37.3.2 de esta Instrucción.

Además, la cantidad de adición complementaria no se computará a los efectos de obtener la relación agua/cemento, ni la cantidad máxima de cemento. Tanto el valor máximo de la relación agua/cemento, como la cantidad máxima de cemento cumplirán con las especificaciones incluidas en el articulado de esta Instrucción.

- Áridos

El tamaño máximo de árido para el hormigón autocompactante se limita a 25 mm, siendo recomendable utilizar tamaños máximos comprendidos entre 12 y 20 mm, en función de la disposición de las armaduras.

Los materiales filler son unos áridos cuya mayor parte pasa por el tamiz 0,063 mm y que se obtiene por tratamiento de los materiales que provienen. Son filler adecuados aquellos que provienen de los mismos materiales que los áridos que cumplen las prescripciones especificadas en el Artículo 28 de esta Instrucción.

De acuerdo con la Norma UNE EN 12620, la granulometría de un filler se define en la siguiente tabla:

Tamaño del tamiz (mm)	Porcentaje que pasa en masa (%)
2	100
0,125	85 a 100
0,063	70 a 100

**Tabla 1 Granulometría del filler**

Los ensayos iniciales de tipo, el control de protección en fábrica y la certificación de dicho control, en cuanto al filler se refieren, se establecen en la Norma UNE EN 12620.

Se recomienda, exclusivamente para el caso de los hormigones autocompactantes, que la cantidad resultante de sumar el contenido de partículas de árido fino que pasan por el tamiz UNE 0,063 y la adición caliza, en su caso, del cemento no sea mayor de 250 kg/m<sup>3</sup> de hormigón autocompactante.

La demanda de agua de los finos inertes que pasan por el tamiz 0,063 se debe compensar mediante el empleo de aditivos superplastificantes adecuados que garanticen el cumplimiento de las relaciones agua/cemento especificadas en el Artículo 37.3.2 de esta Instrucción, garantizando de este modo la durabilidad.

- Aditivos

El uso de un aditivo superplastificante es requisito fundamental en el hormigón autocompactante y puede ser conveniente el uso de un aditivo modulador de la viscosidad que minimiza los efectos de la variación del contenido de humedad, el contenido de finos o la distribución granulométrica, haciendo que el hormigón autocompactante sea menos sensible, en cuando a la propiedad de autocompactabilidad se refiere, a pequeñas variaciones en la calidad de las materias primas.

Su empleo se realizará después de conocer su compatibilidad con el cemento y las adiciones, comprobando un buen mantenimiento de las propiedades reológicas durante el tiempo previsto para la puesta en obra del hormigón autocompactante, así como las características mecánicas correspondientes mediante la realización de ensayos previos. Los aditivos superplastificantes cumplirán la Norma UNE EN 934-2.

## INSTRUCCIÓN EHE-08

- Hormigones

Como se depende de su definición, el hormigón autocompactante tiene tres propiedades intrínsecas básicas: Fluidez o habilidad de fluir sin ayuda externa y llenas el encofrado; resistencia al bloqueo o habilidad de pasar entre las barras de armadura; estabilidad dinámica y estática, o resistencia a la segregación, que le permite alcanzar finalmente una distribución uniforme del árido en toda su masa.

- Composición

Los componentes del hormigón autocompactante son los mismos que los del hormigón estructural convencional, aunque las proporciones de los mismos pueden variar respecto a las habituales para estos últimos, caracterizándose el hormigón autocompactante por un menor contenido de árido grueso, un mayor contenido de finos minerales y, en general, un menor tamaño máximo de árido.

- Características mecánicas

En el hormigón autocompactante el valor de la resistencia a compresión es una referencia imprescindible.

La evolución de la resistencia a compresión con el tiempo puede considerarse equivalente a la de un hormigón de compactación convencional. Sin embargo, como se ha mencionado, se deberá tener en cuenta, en algunos casos, la posibilidad de un retraso en la ganancia de resistencia inicial debido a las dosis mayores de aditivos utilizados.

Para la resistencia a tracción pueden hacerse las mismas consideraciones que para la resistencia a compresión. Por lo tanto, pueden aplicarse las relaciones entre ambas resistencias propuestas por el Artículo 39.1 de esta Instrucción para la resistencia a tracción y flexotracción.

- Docilidad del hormigón

La docilidad del hormigón autocompactante no puede ser caracterizada por los medios descritos en el artículo 31.5 de esta Instrucción para el hormigón convencional. La caracterización de la autocompactabilidad se realiza a través de métodos de ensayo específicos que permiten evaluar las prestaciones del material en términos:

- De fluidez, mediante ensayos de escurrimiento según UNE 83.361 o de ensayos de escurrimiento en V, según UNE 83.364

- De resistencia al bloqueo, mediante ensayos del escurrimiento con anillo J, según UNE 83.362 y mediante ensayos de la caja en L, según UNE 83.363
- Y de resistencia a la segregación

Si bien no existen ensayos normalizados para evaluar la resistencia a la segregación, la misma se puede apreciar a partir del comportamiento del material en los ensayos de escurrimiento y embudo en V.

En el ensayo de escurrimiento debe observarse una distribución uniforme del árido grueso y ningún tipo de segregación o exudación en el perímetro de la torta final del ensayo.

Los hormigones autocompactantes deberán mantener las características de autocompactabilidad durante un período de tiempo, denominado como "tiempo abierto", que sea suficiente para su puesta en obra correcta en función de las exigencias operativas y ambientales del proyecto. Para la determinación del "tiempo abierto" se pueden utilizar los ensayos de caracterización indicados anteriormente, comparando el resultado de diversas repeticiones del mismo ensayo realizadas consecutivamente con la misma muestra.

### ***5.1.2. Durabilidad del hormigón***

Como consecuencia de la ausencia de vibración y al uso habitual de adiciones y filler en el hormigón autocompactante, se suele obtener una inter fase pasta-árido más densa que en los hormigones convencionales. Como consecuencia de ello, junto con la mayor compacidad general de la estructura granular, suele obtenerse una reducción en la velocidad de ingreso de la mayoría de los agentes agresivos.

La ausencia de vibración redundará, a su vez, en una capa exterior del hormigón de recubrimiento de superior densidad y, por tanto, menos permeable.

No obstante, en cualquier caso deberán respetarse los requisitos de máxima relación a/c y mínimo contenido de cemento exigidos en el punto 37.3.2 de esta Instrucción en función de la clase de exposición.

El comportamiento del hormigón autocompactante frente a ciclos de congelamiento y deshielo puede considerarse equivalente al del hormigón de compactación convencional, debiendo considerarse las mismas precauciones y especificaciones incluidas en el punto 37.3.2 de esta Instrucción para dicho hormigón convencional.

## INSTRUCCIÓN EHE-08

Debido a la microestructura más densa del hormigón autocompactante, el riesgo de desconchamiento explosivo podría resultar mayor para este material. Sin embargo, para hormigones autocompactantes en los que la adición de humo de sílice no sea significativa, el planteamiento de la resistencia al fuego puede ser el mismo que el incluido en el Anejo 7 de esta Instrucción para el hormigón convencional de igual clase resistente, o para los hormigones de alta resistencia cuando dicha adición sea relevante.

### 5.1.3. *Características del hormigón*

Mientras que las propiedades en estado fresco del hormigón autocompactante difieren en gran medida de las del hormigón de compactación convencional, su comportamiento en términos de resistencias, durabilidad y demás prestaciones en estado endurecido puede considerarse similares a las de un hormigón convencional de igual relación a/c y elaborado con los mismos materiales componentes.

Las propiedades del hormigón autocompactante en estado endurecido, a los que se refieren los siguientes apartados, se evaluarán con los mismos procedimientos de ensayo utilizados para el hormigón de compactación convencional.

En relación con su comportamiento a edad temprana, podrían producirse algunas variaciones en propiedades como la retracción y/o alteraciones en el tiempo de fraguado, como consecuencia de que incorporan, en general, dosis mayores de finos y aditivos.

En general, las diferencias con el hormigón convencional son suficientemente pequeñas de forma que permiten utilizar para el hormigón autocompactante la formulación incluida en el Articulado de esta Instrucción. En particular, se pueden utilizar las mismas longitudes de anclaje de las armaduras activas y pasivas, iguales criterios para especificar la resistencia mínima del hormigón y el mismo tratamiento de las juntas de construcción.

- Tipificación de los hormigones

La tipificación de los hormigones autocompactantes es análoga a la de los hormigones de compactación convencional según el Artículo 39.2 de esta Instrucción, sin más que utilizar como indicativo C de la consistencia las siglas AC de acuerdo con la expresión siguiente:

T-R/AC/TM/A

Alternativamente, se podrá definir la autocompactabilidad mediante la combinación de las clases correspondientes al escurrimiento (AC-E), viscosidad (AC-V) y resistencia al bloqueo (AC-RB), de acuerdo con la expresión siguiente:

$$T-R/(AC-E + AC-V + AC-RB)/TM/A$$

Donde T, M, TM y A tienen el mismo significado en que en apartado 39.2 de esta Instrucción y AC-E, AC-V y AC-RB representan las clases correspondientes de acuerdo con las siguientes tablas:

Clase	Criterio según UNE 83.361
AC-E1	$550 \leq d_r \leq 650$ mm
AC-E2	$650 < d_r \leq 750$ mm
AC-E3	$750 < d_r \leq 850$ mm

**Tabla 2 Clases de escurrimiento**

Clase	Criterio por el ensayo de escurrimiento, según UNE 83.361	Criterio alternativo por el ensayo del embudo en V, según UNE 83.364
AC-V1	$2'5 < T_{50} \leq 8$ seg	$10 \leq T_v \leq 20$ seg
AC-V2	$2 < T_{50} \leq 8$ seg	$6 \leq T_v \leq 10$ seg
AC-V3	$T_{50} \leq 2$ seg	$4 \leq T_v \leq 6$ seg

**Tabla 3 Clases de viscosidad**

## INSTRUCCIÓN EHE-08

Clase	Exigencia de la característica	Criterio por el ensayo del anillo J, según UNE 83362	Criterio por el ensayo de caja en L, según UNE 83363
AC-RB1	Exigible cuando el tamaño máximo del árido sea superior a 20 mm o el espesor de los huecos por los que pase el hormigón esté comprendido entre 80 y 100 mm	$d_{jf} \geq d_f$ 50 mm, con un anillo de 12 barras	$\geq 0,80$ , con 2 barras
AC-RB2	Exigible cuando el tamaño máximo del árido sea igual o inferior a 20 o el espesor de los huecos por los que pase el hormigón esté comprendido entre 60 y 80 mm	$d_{jf} \geq d_f$ 50 mm, con un anillo de 20 barras	$\geq 0,80$ , con 3 barras

**Tabla 4 Clases de resistencia al bloqueo**

Donde:

$d_f$  → representa el escurrimiento en el ensayo según UNE 83361

$D_{jf}$  → representa el escurrimiento en el ensayo del anillo J según UNE 83362

En general se considera la clase de autocompactabilidad AC-E1 como la más adecuada para la mayor parte de los elementos estructurales que se construyen habitualmente. En particular se recomienda su empleo en los siguientes casos:

- Estructuras no muy fuertemente armadas
- Estructuras en las que el llenado de los encofrados es sencillo, el hormigón puede pasar por los huecos amplios y los puntos de vertido del mismo no exigen que se desplace horizontalmente largas distancias en el interior del encofrado
- Elementos estructurales en que la superficie no encofrada se separe ligeramente de la horizontal



Por otro lado, se recomienda la clase de autocompactabilidad AC-E3 en los siguientes casos:

- Estructuras muy fuertemente armadas
- Estructuras en los que el llenado de los encofrados es muy difícil, el hormigón debe pasar por huecos muy pequeños y los puntos de vertido del mismo exigen que se desplace horizontalmente distancias muy largas en el interior del encofrado
- Elementos estructurales horizontales en los que es muy importante conseguir la autonivelación del propio hormigón
- Elementos estructurales muy altos, de gran esbeltez y muy fuertemente armados

## **6. ADICIÓN DE ESCORIA Y CAL APAGADA AL HORMIGÓN**

### **6.1. ESCORIA DE FONDO COMO ADICIÓN AL HORMIGÓN**

Las escorias con las que se procede a realizar el estudio provienen de la central térmica de Andorra. Está situada en la provincia de Teruel y es propiedad de Endesa.

Las escorias objeto de estudio son de color negruzco y están clasificadas en dos fracciones granulométricas: 0-4 mm (árido fino) y 4-10 mm (árido grueso).

Estas escorias ya se están usando por la empresa Matreco en piezas cerámicas prefabricadas, elaborándose bloques y ladrillos aligerados de diferentes tipos.

Para su estudio, las escorias se homogeneizan y cuartejan hasta obtener la masa de ensayo especificada en cada uno de ellos.

Un problema que presenta la utilización de este tipo de residuos es la falta de homogeneidad en sus características. Esto es debido a las diferencias existentes entre las tecnologías empleadas en la combustión y en el proceso de limpieza de humos en las plantas de tratamiento.

El empleo de estas escorias en el campo de la construcción puede presentar problemas medioambientales, debido al contenido de elementos tóxicos (en función de cada escoria en particular), y problemas técnicos, ya que pueden ser expansivas.

### **6.2. CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE AL HORMIGÓN**

Cuando se habla de cal apagada o hidratada se refiere a un tipo de cal obtenida mediante el tratamiento del óxido de calcio con agua, proceso que forma hidróxido de calcio y desprende mucho calor; utilizada para preparar morteros.

### ADICIÓN DE ESCORIA Y CAL APAGADA AL HORMIGÓN

Como adición al hormigón, se puede decir que la resistencia de hormigones de cemento portland y cenizas pueden mejorar por la adición de ésta. Este compuesto asegura una mejor hidratación de la ceniza.

Cuando se añade cal hidratada a un hormigón que contiene materiales puzolánicos, se puede observar mejoras significativas en la durabilidad. Se crea una estructura más densa, responsable de menor nivel de carbonatación del hormigón, y corrosión de armaduras por ataque de cloruros.

Por el contrario, la cal hidratada generalmente tiene una gran área superficial, lo que significa mayor demanda de agua.

Además de lo citado anteriormente, se recomienda agregar cal hidratada al hormigón porque:

- Lo hace más compacto. Ya que siendo la partícula de cal hidratada más fina que la del cemento, rellena los huecos dejados por este material. De esta forma se eliminan las eflorescencias y el concreto siendo más compacto está protegido contra las variaciones de temperatura, evitándose así los agrietamientos.
- Retarda su fraguado inicial. Debido a que la cal hidratada que se distribuye en el hormigón tiene un gran poder de absorción de agua, lo mantiene húmedo aún en climas cálidos o secos, proporcionando de esta forma el agua que el cemento requiere para su completa hidratación. Como el hormigón obtiene su mayor resistencia cuando puede obtener el agua suficiente para su fraguado, la cal hidratada contribuye al proporcionar de forma indirecta el agua necesaria; por eso se dice que la cal tiene el efecto de curar internamente al hormigón.
- Le da homogeneidad absoluta y resistencia uniforme. Por su gran plasticidad la cal hidratada tiene el efecto de propiciar la mezcla íntima de los materiales, evitando la segregación de los mismos y permitiendo el transporte de dichas revolturas a largas distancias.
- Actúa como un verdadero lubricante, haciendo las mezclas notablemente más fluidas. Este aspecto es de gran relevancia, ya que los colados se hacen con menor esfuerzo y absoluta perfección. Con el empleo de cal hidratada queda casi omitido el apisonamiento y varillaje en los colados, dado que la revoltura en estado tan fluido, llena fácilmente todas las esquinas y ángulos de las formas.

## ADICIÓN DE ESCORIA Y CAL APAGADA AL HORMIGÓN

En el hormigón armado es doblemente recomendado el uso de cal hidratada, pues es probable que el excesivo varillaje o vibración tenga el efecto de desviar la posición exacta del acero estructural.

- Hace a los colados perfectos, con superficies considerablemente más lisas y de colores más claros.
- Protege al acero estructural. Al neutralizar la acción de los ácidos que lo corroen.
- Lo impermeabiliza. Dada la composición mineral de la cal hidratada, se reduce considerablemente la porosidad de la superficie del hormigón, siendo más impermeable de una manera permanente.

Un hormigón impermeable tiene también la propiedad de no producir eflorescencias.

## 7. ENSAYOS PREVIOS AL ESTUDIO

Para el correcto control de las propiedades de los materiales a utilizar para la fabricación del hormigón, se exponen a continuación la caracterización de los áridos empleados con los ensayos de granulometría y equivalente de arena.

### 7.1. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Según la normativa UNE-EN 933, para los ensayos de granulometría y equivalente de arena se necesita una muestra seca representativa. Para ello, primero se deberá homogeneizar el árido que se va a secar mediante un cuarteador.



**Ilustración 1 Cuarteado de la muestra**

La norma establece una tabla que relaciona el tamaño máximo del árido en milímetros con la masa mínima seca de muestra en kilogramos; nuestro tamaño es 12 mm por lo que habrá que interpolar entre las cantidades de 8 mm y 16 mm para obtener nuestro valor. El resultado, 1.60 kg de muestra.

## ENSAYOS PREVIOS AL ESTUDIO

Tamaño máximo del árido D (mm)	Masa mínima de la muestra de ensayo (kg)
63	40
32	10
16	2,60
8	0,60
≤4	0,20

**Tabla 5 Masa de las muestras de ensayo para áridos de densidad normal de partícula**

## 7.2. GRANULOMETRÍAS

### 7.2.1. Arena

Según la normativa UNE-EN 933-1 1998 el ensayo consiste en dividir y separar mediante una serie de tamices, un material en varias fracciones granulométricas de tamaño decreciente. Determinaremos los áridos de hasta 40mm mediante la separación y división con una serie de tamices.

Puede ser aplicado a áridos de origen natural o artificial, excluyendo los fillers; en concreto, el árido que se va a utilizar es de rodadura.

Para llevar a cabo la granulometría se seleccionará la cantidad mínima de muestra de árido seco a ensayar, dado que nuestro tamaño máximo es aproximadamente 12 mm se tomará una muestra seca de al menos 0.2 kg de arena y 1.60 kg de grava, según la tabla de muestras del apartado anterior.



**Ilustración 2 Desecado de la muestra de arena**

Una vez obtenido la cantidad mínima de la muestra a ensayar se procederá al tamizado, vertiendo la muestra seca en el juego de tamices previamente ensamblados y dispuestos de arriba abajo, en orden decreciente de tamaños de abertura, con el fondo y la tapa, incorporando el tamiz de 0.063 mm. Estos tamices serán, de mayor a menor, de 8, 4, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125 y 0.063 mm según la norma UNE arriba expuesta. Se aplicará un movimiento planetario a la columna de tamices y se pesará el material retenido por cada uno de los tamices.

Para una muestra de arena de 1,752 kg, se comprueba la relación del retenido por tamiz, así como el tamaño máximo del árido "D", considerado como la mínima abertura de tamiz UNE EN 933-2:96 por el que pase más del 90% en peso (% desclasificados superiores a "D" menor que el 10%); y el tamaño mínimo del árido "d" como la máxima abertura de tamiz UNE EN 933-2:96 por el que pase menos del 10% en peso (% desclasificados inferiores a "d" menor que el 10%). En nuestro caso,  $D = 4$  mm y  $d = 0.125$  mm.

ENSAYOS PREVIOS AL ESTUDIO

TAMIZ		RETENIDO		RETENIDO ACUMULADO		PASA		FULLER
ASTM	UNE	Peso	%	Peso	%	Peso	%	Peso
5	125							
2,5	63							
1,25	32							
5/8	16	0,00	0,00	0,00	0,00	1952,90	100,00	0,00
5/16	8	0,00	0,00	0,00	0,00	1952,90	100,00	100,00
5	4	390,80	20,01	390,80	20,01	1562,10	79,99	70,71
10	2	339,70	17,39	730,50	37,41	1222,40	62,59	50,00
18	1	485,90	24,88	1216,40	62,29	736,50	37,71	35,36
35	0,5	191,30	9,80	1407,70	72,08	545,20	27,92	25,00
60	0,25	309,20	15,83	1716,90	87,92	236,00	12,08	17,68
120	0,125	142,90	7,32	1859,80	95,23	93,10	4,77	12,50
230	0,063	78,50	4,02	1938,30	99,25	14,60	0,75	0,00
	<b>FONDO</b>	14,60	0,75	1952,90	100,00	0,00	0,00	0,00
	<b>TOTAL</b>	1952,9	100					<b>MGf 2,887563</b>

Tabla 6 Granulometría arena

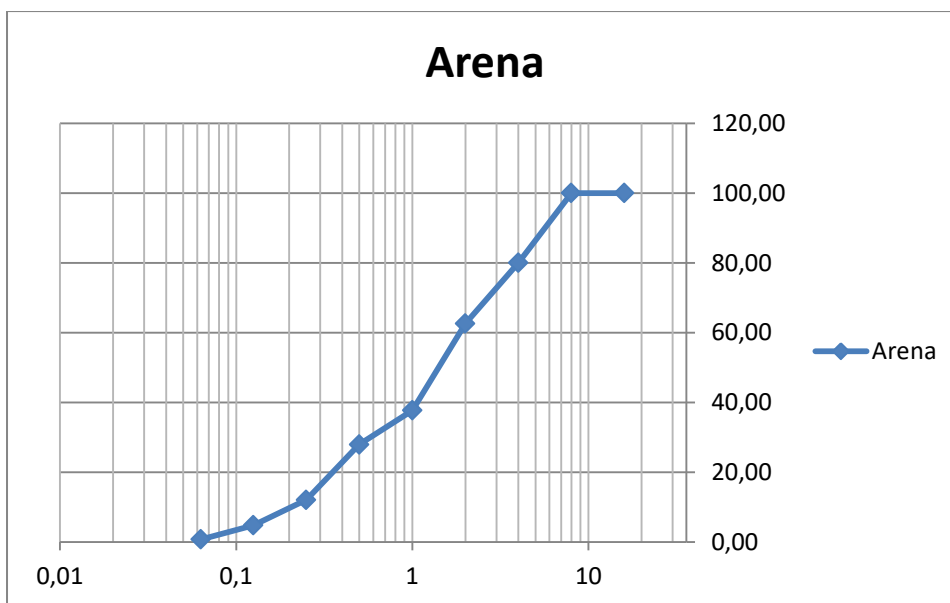


Ilustración 3 Gráfica de granulometría arena

Podemos decir que, además de tener una granulometría continua, el árido fino tiene un módulo granulométrico de 2,88, resultante del cociente entre el sumatorio de retenido acumulado de cada uno de los tamices y el cien por cien de la muestra.

$$MG = \frac{\sum \%Retenidos\ acumulados}{100}$$



El módulo granulométrico nos da una idea del tamaño medio del árido, sin embargo, no es un índice de granulometrías puesto que puede existir infinidad de áridos con el mismo módulo granulométrico.

### 7.2.2. *Gravas*

En cuanto a la grava nuestra muestra será de 1,752 kg, cuyo tamaño máximo será de 12mm y tamaño mínimo de 4mm.



**Ilustración 4** Dsecado de la muestra de grava

ENSAYOS PREVIOS AL ESTUDIO

TAMIZ		RETENIDO		RETENIDO ACUMULADO		PASA		FULEB	
ASTM	UNE	Peso	%	Peso	%	Peso	%	Peso	
5	125								
2,5	63								
1,25	32								
5/8	16	0,00	0,00	0,00	0,00	1752,60	100,00	100,00	100,00
5/16	8	1431,50	81,68	1431,50	81,68	321,10	18,32	100,00	100,00
5	4	302,50	17,26	1734,00	98,94	18,60	1,06	70,71	89,25
10	2	11,60	0,66	1745,60	99,60	7,00	0,40	50,00	64,14
18	1	1,00	0,06	1746,60	99,66	6,00	0,34	35,36	46,61
35	0,5	0,00	0,00	1746,60	99,66	6,00	0,34	25,00	32,66
60	0,25	0,00	0,00	1746,60	99,66	6,00	0,34	17,68	7,60
120	0,125	0,00	0,00	1746,60	99,66	6,00	0,34	12,50	2,15
230	0,063	0,00	0,00	1746,60	99,66	6,00	0,34	8,87	0,25
	0	6,00	0,34	1752,60	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>TOTAL</b>	1752,6	100					<b>MGf</b>	<b>3,80</b>

Tabla 7 Granulometría grava

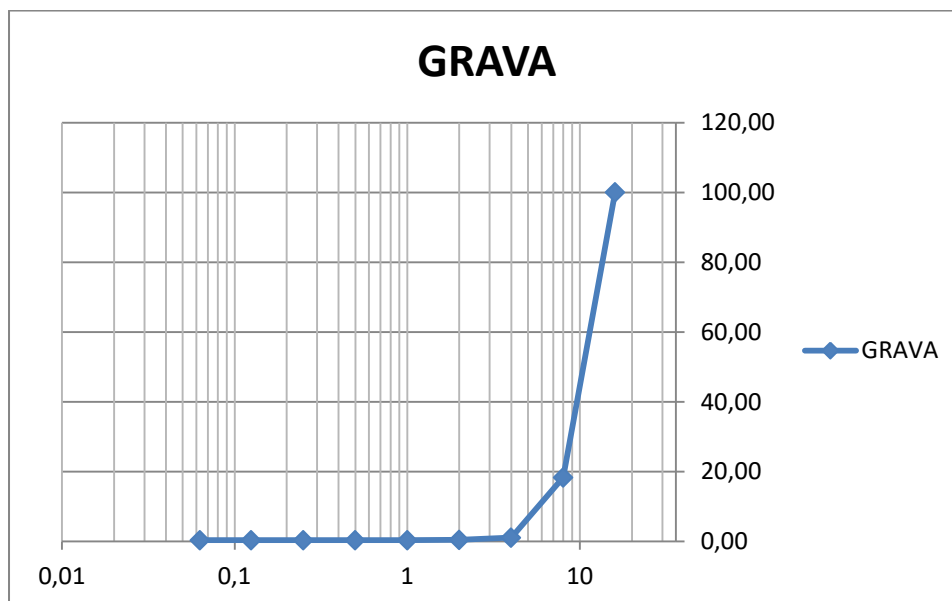


Ilustración 5 Gráfica de granulometría grava

El modulo granulométrico del árido es 6,78.

### 7.3. EQUIVALENTE ARENA

Este ensayo muestra un método para determinar el equivalente de arena de la fracción granulométrica 0/2 mm de los áridos finos y de la mezcla total de los áridos.

Se fundamenta en liberar de la muestra de ensayo los posibles recubrimientos de arcilla adheridos a las partículas de arena mediante la adición de una solución coagulante que favorece la suspensión de las partículas finas sobre la arena, determinando su contenido respecto de las partículas de mayor tamaño.

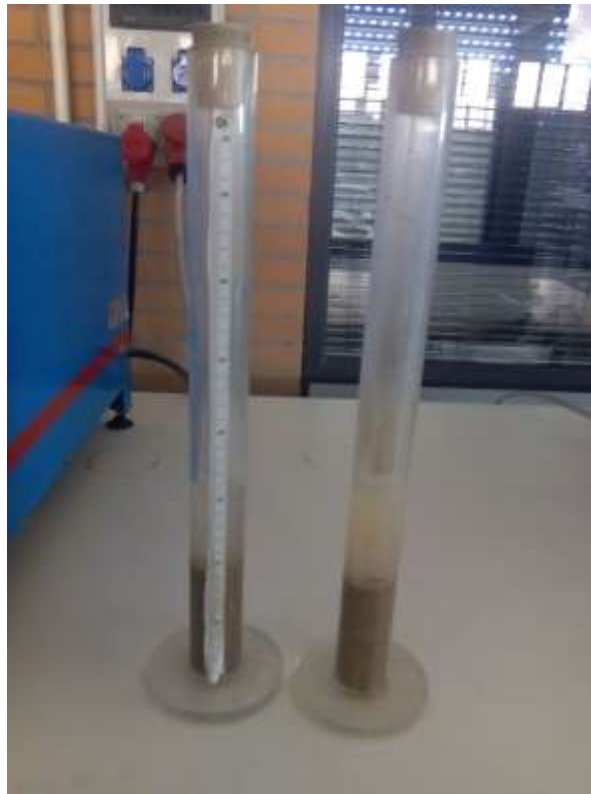
Para la realización de este ensayo es necesaria la utilización de los siguientes instrumentos y equipos:

- Dos probetas cilíndricas graduadas
- Pistón tarado
- Regla graduada de 500 mm
- Tamiz de 2 mm (o 4 mm)
- Dos cronómetros
- Balanza de 0,1 gr de precisión (mínimo)
- Reactivos
- Tubo lavado y embudo
- Máquina de agitación
- Bandejas, cepillos, taponos de caucho

Para comenzar se llena la probeta graduada hasta la marca de 50 ml con la solución coagulante; se vierten áridos hasta la marca de 100 ml; se golpea la base de la probeta con la palma de la mano para desalojar las burbujas de aire y favorecer el contacto total de la disolución con la muestra.

Se pone en marcha el cronómetro y se deja reposar la probeta en posición vertical un tiempo  $10 \pm 1$  min.

## ENSAYOS PREVIOS AL ESTUDIO

**Ilustración 6 Pistón tarado**

Transcurridos los 10 minutos se tapa la probeta con un tapón y se agita durante 30 segundos. Se quita el tapón y se agita durante 30 segundos. Se quita el tapón y se introduce el tubo lavador en la probeta, enjuagando primero las paredes de la misma con la disolución y a continuación se empuja el tubo hacia abajo, a través del sedimento, hasta el fondo de la probeta para favorecer la subida de finos. Se llena la probeta hasta el límite superior con la disolución.

Se deja reposar la probeta durante  $20 \pm 0,25$  min y trascurridos éstos, se toman las siguientes medidas:

- L1: Altura del nivel superior del floculado con relación a la base de la probeta. Se introduce el pistón tarado y se deja reposar el pie sobre el sedimento y se coloca el disco deslizante en contacto con la parte superior de la probeta.
- L2: Altura del disco deslizante a la parte inferior del peso del pistón. Esta medida se correlaciona con la medida del centro de gravedad de la base del pistón hasta la base de la probeta.

ENSAYOS PREVIOS AL ESTUDIO

Se realiza la misma operación con la segunda probeta y se toman las medidas. En nuestro caso la siguiente tabla resume las medidas efectuadas:

	<b>L<sub>1</sub></b>	<b>L<sub>2</sub></b>	<b>L<sub>2</sub>/L<sub>1</sub></b>	<b>L<sub>2</sub>/L<sub>1</sub> (%)</b>
Probeta 1	920 mm	890 mm	0,9673	96,73 %
Probeta 2	920 mm	900 mm	0,9782	97,82 %

**Tabla 8 Resultados equivalente arena**

Una vez recogidos los datos, se calcula mediante la siguiente fórmula el equivalente de arena:

$$SE = \frac{\left(\frac{L_{2,1}}{L_{1,1}}\right) \times 100 + \left(\frac{L_{2,2}}{L_{1,2}}\right) \times 100}{2}$$

El resultado de equivalente de arena para el árido objeto del estudio es 97%.

## 8. ENSAYO DE DOCILIDAD

La docilidad de un hormigón es la facilidad con que una mezcla de áridos, cemento y agua se transforman en hormigón, y la facilidad de ser manejado, transportado, colocado y compactado en los moldes o encofrados con la mínima pérdida de homogeneidad.

La docilidad del hormigón será la necesaria para que, con los métodos previstos de puesta en obra y compactación, el hormigón rodee las armaduras sin solución de continuidad con los recubrimientos exigibles y rellene completamente los encofrados sin producir coqueras.

Con la máxima de realizar un estudio de docilidad de un hormigón autocompactante, primero se va a comparar la dosificación de un hormigón común (Tabla 5) con la dosificación de un hormigón autocompactante (Tabla 6) que luego se ajustará hasta conseguir su optimización.

Las dosificaciones realizadas están conseguidas a partir de un volumen máximo de hormigón de una probeta cilíndrica de 30 cm de alto por 15 cm de diámetro y un cuarto más, que hacen aproximadamente 6,6 litros de hormigón. Teniendo en cuenta una densidad del hormigón de 2400 kg/m<sup>3</sup>, se consigue un peso de hormigón de 15,85 Kg.

<b>Componentes</b>	<b>% Vol. De hormigón</b>	<b>Cantidad (Kg)</b>
Gravilla	33%	5,248
Arena	38%	6,044
Filler	5%	0,795
Cemento	17%	2,704
Superfluidificante	1,20%	0,032
Agua	7%	1,113

**Tabla 9 Dosificación hormigón común**

<b>Componentes</b>	<b>% Vol. De hormigón</b>	<b>Cantidad (Kg)</b>
Gravilla	27,28 %	3,900
Arena	41,54%	5,940
Filler	6,71 %	0,960
Cemento	15,56%	2,250
Superfluidificante y plásti- ficante	0,33%	0,047
Agua	8,39%	1,200

**Tabla 10 Dosificación inicial HAC**

Tal como se puede apreciar, si se fija aproximadamente el volumen de cemento, se observa que el volumen de árido fino y grueso varía considerablemente, disminuyendo el árido grueso y aumentando el fino para conseguir una mezcla más homogénea, evitando la exudación del agua y una concentración de grava en el centro de la torta, comúnmente llamado nido de gravas.

También cabe destacar que las relaciones agua/cemento en los dos hormigones son muy distintas, un 0,41 para el hormigón común y un 0,53 para el autocompactante.

## 8.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DOCILIDAD DEL HORMIGÓN

La docilidad de una amasada de hormigón fresco depende de las características y proporciones relativas del cemento, áridos, agua y aditivos que lo forman.

La docilidad de un hormigón es mayor con áridos rodados que con machacados, a igualdad de otras condiciones.

Por otra parte, la docilidad aumenta con el contenido de árido fino, con la dosificación de cemento, con el empleo de cenizas volantes, con el empleo de aditivos plastificantes e incluso aireantes y con el aumento de agua de amasado, si bien este últi-

## ENSAYO DE DOCILIDAD

mo puede resultar peligroso por la repercusión que el aumento de la relación agua/cemento puede tener sobre las resistencias del hormigón.

La docilidad de una masa de hormigón fresco depende también de la forma y tamaño del molde y de los medios de compactación disponibles. Así, un hormigón de consistencia plástica puede ser ideal para su utilización como hormigón en masa en un pavimento, mientras que puede ser totalmente inadecuado para su empleo en una viga de sección en T fuertemente armada. En el primer caso el hormigón tendrá una buena docilidad y en el segundo una mala.

Igualmente, ese mismo hormigón de consistencia plástica puede ser muy dócil si se emplea en una cimentación y su compactación se hace mediante vibración y muy poco dócil si se consolida mediante picado con barra.

En general, secciones pequeñas y muy armadas requieren hormigones de alta docilidad, como los hormigones autocompactantes, mientras que, por el contrario, en estructuras de grandes secciones y sin armar pueden colocarse mezclas menos dóciles.

Además, una baja docilidad puede resultar en resistencias mecánicas menores a las previstas y a superficies poco vistosas después de realizar el desencofrado.

## 8.2. CÓMO SE DETERMINA LA DOCILIDAD DE UN HORMIGÓN

Según la EHE, la docilidad deberá comprobarse mediante la determinación de la consistencia del hormigón fresco, por el método del asentamiento en el Cono de Abrams o del ensayo Vebe (en hormigones secos).



## 8.3. DOCILIDAD DE UN HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE

La docilidad de un hormigón autocompactante en estado fresco no puede ser evaluada mediante su asiento en el cono de Abrams, sino que es caracterizada a través de métodos de ensayo específicos como el ensayo de escurrimiento, el ensayo del embudo en V, escurrimiento con anillo Japonés y ensayos de la caja en L.

Sin embargo, lo que si se hace es llenar dicho Cono de Abrams con el hormigón sin picar, levantar el cono y dejar que el hormigón se extienda de forma perfectamente circular midiendo el tiempo  $T_{50}$ , en segundos, que tarda en alcanzar un diámetro de 50 cm previamente marcado en la chapa, dejándolo posteriormente que siga extendiéndose y midiendo el diámetro " $d_f$ " que se alcanza cuando se detiene. A este ensayo se le conoce como ensayo de "extensión de flujo", "escurrimiento" o "slump flow" y está recogido en la norma UNE 83361.

Ensayo	Parámetro a medir	Rango Admisible
Escurrimiento	$T_{50}$	$T_{50} < 8 \text{ seg}$
	$d_f$	$550 \text{ mm} < d_f < 850 \text{ mm}$

**Tabla 11 Rangos ensayo escurrimiento**

En función del lugar de trabajo y de los medios disponibles se ha optado por ejecutar el ensayo de escurrimiento arriba detallado, conocido como Cono de Abrams y el anillo J.

## 8.4. CÓMO EJECUTAR UN CORRECTO ENSAYO DE DOCILIDAD

Tras pesar los siete ingredientes de la mezcla: Grava, arena, filler, cemento, superfluidificante, plastificante y agua, se vierten en la amasadora del siguiente modo:

- Previo a trabajar con la hormigonera será necesario calcular la cantidad de agua que aporta el árido fino en forma de humedad a la mezcla. Para evitar que se produzca un excedente de agua de amasado según la dosi-

## ENSAYO DE DOCILIDAD

ficación y aparezca el fenómeno conocido como exudación. Para ello se realizarán las correcciones necesarias para conseguir el hormigón deseado para el proyecto.

- Primeramente se humedecen el fondo y las paredes de la hormigonera con agua, sin dejar líquido en su interior, para así evitar que el posible árido adosado a las paredes absorba parte del agua de amasado del hormigón.
- Se vierte la mitad de agua de amasado que se vaya a emplear.
- Se introducen, por éste orden, la grava y la arena y se pone en marcha la hormigonera hasta que los ingredientes estén húmedos y la mezcla homogénea.
- Una vez húmedas la grava y la arena, se procede a añadir el filler y se deja mezclar.
- Se vierte a continuación el cemento.
- Cuando todos los áridos y el cemento estén bien homogeneizados se vierte el superfluidificante y el plastificante mezclado con el resto de agua de amasado y se mantiene amasando durante aproximadamente 4 minutos.
- Finalmente, si es preciso, se añaden los aditivos oportunos un vez que el hormigón está amasado; en nuestro caso, las cenizas.

Antes de verter el hormigón en el Cono para realizar el ensayo, debemos humedecer la chapa donde se va a realizar el ensayo, además de colocar el anillo japonés centrado con la circunferencia dibujada en la chapa y el Cono.

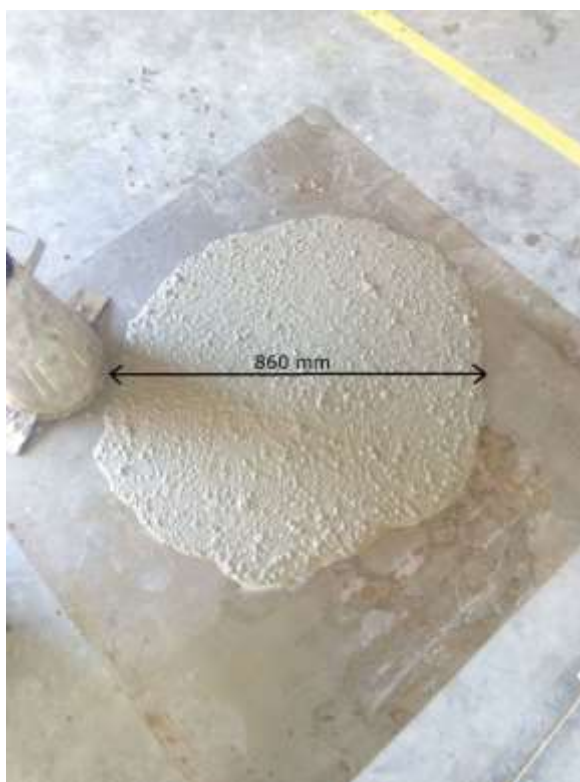
Los datos que se deberán recoger en este ensayo serán:

- En el Cono de Abrams:
  - Tiempo que tarda el hormigón en alcanzar la marca de 50 cm ( $T_{50}$ ).
  - Extensión de la torta en centímetros ( $d_f$ ).
  - Asiento del cono
- En el anillo Japonés:
  - Altura del hormigón dentro del anillo ( $H_1$ )
  - Altura del hormigón fuera del anillo ( $H_2$ )

## 8.5. DOSIFICACIÓN FINAL HAC

En la Tabla 10 de este documento se muestra la dosificación de la cual partimos como hormigón autocompactante.

Se realizó el ensayo de Cono de Abrams y se comprobó que la dosificación necesitaba un ajuste puesto que el agua presentaba exudación y la torta no era circular, tal y como se muestra en la ilustración 5.



**Ilustración 7 Prueba de dosificación del HAC**

La solución consiste en cambiar una pequeña cantidad de grava por arena y disminuir la cantidad de agua de amasado.

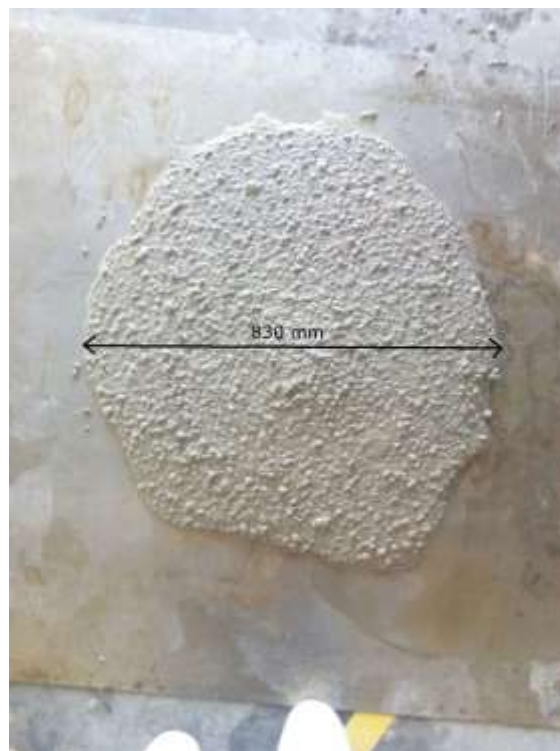
Se pensó en un pequeño ajuste de 50 gramos de gravas por 50 gramos de arena y una reducción de 50 cl de agua de amasado. El resultado fue el siguiente:

El ajuste tuvo un gran efecto en el comportamiento de nuestro hormigón. El resultado era correcto y la dosificación quedaba ajustada tal y como se ve en la Ilustración anterior.

ENSAYO DE DOCILIDAD

<b>Componentes</b>	<b>% Vol. Hormigón</b>	<b>Cantidad (Kg)</b>
Gravilla	27 %	3,850
Arena	42 %	5,990
Filler	6,74 %	0,960
Cemento	15,78 %	2,250
Superfluidificante y plásti- ficante	0,34 %	0,047
Agua	8,07 %	1,150

**Tabla 12 Dosificación final HAC**



**Ilustración 8 Dosificación final HAC**

## 9. ESTUDIO DE DOCILIDAD DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE DE CONTROL

### 9.1. HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE DE CONTROL

Una vez conseguida la dosificación final comenzamos el estudio de docilidad. Es decir, se va a repetir durante un periodo de tiempo el ensayo de Cono de Abrams, estudiando cómo varía el tiempo que tarda en alcanzar la marca de 50 cm (T50) y la medida ( $d_f$ ).

El resultado son dos gráficas, una que expresa la curva de referencia de las variaciones de T50 y otra que resume las variaciones de  $d_f$ .

Dosificando para 6,60 litros de hormigón, primero se humedece la hormigonera y la chapa donde se va a realizar el ensayo y se vierte la mitad de agua de amasado con la grava y el fino.

Se deja homogeneizar la mezcla y se vierte entonces el filler. Una vez estén mezclados, se introduce el cemento. Por último, se vierte el agua restante junto con el superfluidificante y el plastificante, dejando entonces reposar el hormigón 4 minutos aproximadamente.

Se comprueba entonces la rápida acción de los aditivos y cómo consiguen que el hormigón sea líquido.

Una vez hormigonado se llena el Cono de Abrams hasta el enrase, se levanta y se toma el tiempo que tarda en llegar a los 50 cm (T50) y la medida final ( $d_f$ ), pasando éste por las barras del anillo japonés, y así corroboramos que el hormigón es auto-compactante, por su facilidad para pasar por estas barras.

Cuando el hormigón haya dejado de extenderse se recoge el material y se vierte de nuevo en la hormigonera con una pala plana, donde reposará 8 minutos contados desde que se extrae de la hormigonera por primera vez. Pasados estos minutos se remueve el hormigón para que sea practicable (20 segundos aproximadamente).

Se vuelve a repetir el ensayo en repetidas ocasiones hasta que el hormigón deje de fluir, o no alcanza la marca de 50 cm del ensayo.

## ESTUDIO DE DOCILIDAD DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE DE CONTROL

Cabe destacar que entre ensayo y ensayo hay que limpiar la chapa, el Cono de Abrams y el anillo, para evitar que los finos se adhieran y falseen los datos recogidos en el siguiente ensayo.

A continuación se presenta una tabla-resumen, fotografías del progreso y la gráfica de representación que muestra los resultados durante los levantamientos realizados.

	<b>T<sub>50</sub> (seg)</b>	<b>d<sub>f</sub> (cm)</b>
P1 (t0:00)	1,79	83
P2 (t8:00)	2,01	81
P3 (t16:00)	2,29	80
P4 (t24:00)	2,79	78
P5 (t33:00)	3,48	74
P6 (t49:00)	7,42	67,50
P7 (t65:00)	9,24	54

**Tabla 13 Estudio de docilidad**

Para este estudio de investigación se ha escogido elaborar para cada amasada de hormigón seis probetas de las cuales:

- Tres probetas irán destinadas para el ensayo de compresión simple a 28 días
- Dos probetas se usarán para el ensayo de compresión simple a 90 días
- Una probeta se guardará para que, en caso de duda, pueda usarse en cualquiera de los casos anteriores

## 9.2. CONCLUSIÓN

Como síntesis, cabe decir que para encuadrar este hormigón como estructural dentro de la Instrucción EHE'08, el tiempo máximo que puede estar en reposo para considerarlo Hormigón Autocompactante es de aproximadamente 22 minutos, a partir de ese tiempo se debe añadir superfluidificante para mejorar su característica de fluidez.

ESTUDIO DE DOCILIDAD DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE DE CONTROL

En un primer instante, el Hormigón Autocompactante ensayado estaría tipificado con la siguiente expresión:

$$HAC - R(AC - E3 + AC - V3)/12/A$$

Donde:

- HAC: Hormigón autocompactante
- R: Resistencia característica especificada, en  $N/mm^2$
- AC-E3: Clase de Ecurrimiento según UNE-83361 ( $750 \text{ mm} \leq d_f \leq 850 \text{ mm}$ ).
- AC-V3: Clase de Viscosidad según UNE-83361 ( $T_{50} \leq 2 \text{ seg}$ )
- 12: Tamaño máximo del árido en milímetros.
- A: Designación del ambiente

Es necesario decir, antes de comenzar con el análisis de los ensayos con cada una de las fibras, que adjuntado al final de este documento se recoge un anejo fotográfico donde se muestran las fotografías realizadas a cada uno de los levantamientos efectuados en los ensayos.

## **10. ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO**

### **10.1. ENSAYO DE ESCURRIMIENTO O CONO DE ABRAMS**

Este ensayo se realizará cada vez que se realice una nueva amasada de hormigón, junto con el anillo Japonés, para comprobar que el hormigón que se realiza es autocompactante.

Según las normas UNE 83-313-90 y UNE 83-300, el ensayo se lleva a cabo en un molde en forma de tronco de cono cilíndrico, fabricado con chapa de acero galvanizado de base mayor 200 mm, base menor 100 mm y altura 300 mm, humedecido y colocado sobre una chapa metálica plana, rígida y no absorbente.

El ensayo se lleva a cabo en un molde en forma de tronco de cono cilíndrico, fabricado con chapa de acero galvanizado de base mayor 200 mm, base menor 100 mm y altura 300 mm, humedecido y colocado sobre una chapa metálica plana, rígida y no absorbente.



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO



**Ilustración 9 Llenado de cono de Abrams**

Como el hormigón es autocompactante, no es necesario usar una barra metálica para compactar el hormigón. Una vez llenado el molde, se retira el hormigón sobrante y se enrasa en la parte superior. Acto seguido, con cuidado, se levanta el molde en dirección vertical lo más rápido posible.

Finalmente, se coloca el molde al lado de la muestra de hormigón y se procede a medir la diferencia entre la altura de la pieza y el punto más largo del hormigón.



**Ilustración 10 Resultados del cono de Abrams y anillo J**

## ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO

El resultado del asentamiento se expresa en cm con aproximación de  $\pm 0,50$  cm.

Los resultados obtenidos en cada amasada realizada son:

<b>Amasada</b>	<b>Tiempo que tarda en llegar a 50 cm (<math>T_{50}</math>)</b>	<b>Diámetro final (<math>d_f</math>)</b>
Hormigón de control	1,30 seg	830 mm
Hormigón con sustitución del 20% de escoria	1,20 seg	800 mm
Hormigón con sustitución del 40% de escoria	2,17 seg	770 mm
Hormigón con sustitución del 60% de escoria	3,45 seg	720 mm
Hormigón con sustitución del 80% de escoria	4,03 seg	715 mm
Hormigón con sustitución del 100% de escoria	4,42 seg	715 mm

**Tabla 14 Resultados ensayo cono de Abrams**

## 10.2. LLENADO DE PROBETAS

En la parte referente al estudio de docilidad de hormigón ya se ha hecho referencia al llenado de probetas, pero en este apartado se va a profundizar en el tema.

El uso de probetas cúbicas es más frecuente en la actualidad por varias razones frente a las cilíndricas:

- No es necesario el refrentado de las probetas cúbicas, eliminando los problemas que este proceso produce:
  - Exposición a gases tóxicos
  - Quemaduras
  - Dispersión en los resultados

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO

- Menos volumen y por lo tanto menos peso, mejorando la ergonomía
- Menos material

Una vez estudiadas las diferencias entre una probeta y otra es necesario comentar que la decisión de llenar las probetas cilíndricas es debido a la disponibilidad de las mismas frente a las cúbicas. Además, el recipiente es similar al Cono de Abrams, por lo que podemos usar ese mismo hormigón para las probetas una vez se ha realizado el ensayo.

Antes de proceder al llenado de probetas, deben limpiarse y untarse en desencofrante, para su posterior retirada de una manera más sencilla. Además, cabe mencionar que al ser un hormigón autocompactante, a la hora de llenarlas no es necesario picarlo.



**Ilustración 11 Probetas**

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
 CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO

**Ilustración 12 Llenado de probetas**

Se ha establecido una tabla en la que se muestran las fechas de llenado de probetas donde queda reflejado el día exacto que debería haberse hecho el ensayo de hormigón a 28 y 90 días.

<b>HAC</b>	<b>HAC CONTROL</b>
<b>Fecha de llenado</b>	6-Marzo
<b>Fecha (28 días)</b>	3-Abril
<b>Fecha de Rotura</b>	3-Abril
<b>Fecha (90 días)</b>	4-Junio
<b>Fecha de Rotura</b>	5-Junio

**Tabla 15 Llenado probetas de control**

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO

HAC	HAC ESCORIA 20%
Fecha de llenado	6-Marzo
Fecha (28 días)	3-Abril
Fecha de Rotura	3-Abril
Fecha (90 días)	4-Junio
Fecha de Rotura	5-Junio

Tabla 16 Llenado de probetas con sustitución del filler por escoria en un 20%

HAC	HAC ESCORIA 40 %
Fecha de llenado	7-Marzo
Fecha (28 días)	4-Abril
Fecha de Rotura	4-Abril
Fecha (90 días)	5-Junio
Fecha de Rotura	5-Junio

Tabla 17 Llenado de probetas con sustitución del filler por escoria en un 40%

HAC	HAC ESCORIA 60 %
Fecha de llenado	7-Marzo
Fecha (28 días)	4-Abril
Fecha de Rotura	4-Abril
Fecha (90 días)	5-Junio
Fecha de Rotura	5-Junio

Tabla 18 Llenado de probetas con sustitución del filler por escoria en un 60%

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO

HAC	HAC ESCORIA 80 %
Fecha de llenado	8-Marzo
Fecha (28 días)	5-Abril
Fecha de Rotura	5-Abril
Fecha (90 días)	6-Junio
Fecha de Rotura	6-Junio

Tabla 19 Llenado de probetas con sustitución del filler por escoria en un 80%

HAC	HAC ESCORIA 100%
Fecha de llenado	8-Marzo
Fecha (28 días)	5-Abril
Fecha de Rotura	5-Abril
Fecha (90 días)	6-Junio
Fecha de Rotura	6-Junio

Tabla 20 Llenado de probetas con sustitución del filler por escoria en un 100%

### 10.3. NOMBRAMIENTO DE PROBETAS

Para el distinción de las probetas de siguió el siguiente procedimiento:

$$PDL - \% CENIZA - N^{\circ} PROBETA$$

- PDL: Probetas Diego y Leyre
- % CENIZA: Se indica el porcentaje de ceniza empleado en esa amasada (C de control, 20, 40, 60, 80 y 100)
- N° PROBETA: Se indica el número de probeta (01, 02, 03, etc.)

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO

## 10.4. REFRENTADO DE PROBETAS

Se define como refrentado de probetas a crear una capa lisa y uniforme, de pequeño espesor (3-5mm), en la cara superior de la probeta.

El objetivo final de la operación es cubrir las irregularidades de fabricación de la cara superior de la probeta, de manera que resulte una superficie totalmente plana y perpendicular a su arista, para que al proceder a su rotura, las presiones se repartan uniformemente en toda la superficie de la cara superior y que ésta y la inferior sean paralelas.



**Ilustración 13 Plato y azufre para refrentado**

Según la norma UNE 83-303-84, el dispositivo de refrentado consta de un plato de refrentado, que debe tener un diámetro superior en 25 mm al diámetro de la probeta, de superficie plana con una desviación máxima de 0,05 mm en 150 mm y dureza superior a 60 HRC, y un mecanismo de alineación que asegure la ortogonalidad entre la superficie refrentada y el eje de la probeta dentro de un margen de 0,5°.

En primer lugar se coloca en un recipiente de calentamiento el azufre sólido, normalmente un baño termostático, a una temperatura que no supere los 150°C. Se

## ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO

deshacen mientras se homogeniza la masa con ayuda de una varilla metálica. Se considera que está preparado cuando el azufre esté totalmente fundido. En este instante la temperatura de conservación habrá que situarla entre los 120 y 130°C.

Acto seguido se coge el dispositivo de refrentado, perfectamente limpio y preferiblemente un poco caliente para evitar un resfriamiento rápido del azufre y se aplica, al plato, una ligera capa de aceite o sacándolo del molde.

Se limpia y se retira el exceso de humedad superficial de la cara de la probeta a refrentar para impedir la formación de burbujas bajo material de refrentado.

Se pone una cantidad suficiente de mortero de forma que el plato quede totalmente lleno. Inmediatamente después se coloca la probeta sobre éste presionándola en sentido descendente y contra el soporte perpendicular del dispositivo.



**Ilustración 14 Azufre líquido**

De esta manera se consigue que la cara refrentada sea perpendicular al eje de la probeta.

Trascurridos 45 segundos, el mortero de azufre ha endurecido lo suficiente para proceder al desmoldado de la probeta. Esta operación se efectúa golpeando ligera-



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO

mente el contorno del plato con un martillo ligero. A continuación se extrae la probeta del dispositivo.



**Ilustración 15 Colocación de probetas para refrentado**

En esta operación hay que seguir ciertas precauciones para evitar peligros:

- Hay que hacer especial atención al mantenimiento de las condiciones de temperatura del mortero de azufre. Un sobrecalentamiento puede provocar que la masa se encienda.
- Las recargas del recipiente de calentamiento del azufre se han de efectuar una vez agotado al máximo de posibilidades, el primer material. Hay que asegurarse que el material más antiguo no ha estado recalentado más de cinco veces.
- Hay que utilizar medios de protección personal adecuados, como la careta filtrante y guantes apropiados para evitar quemaduras por el azufre caliente.

## ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO



**Ilustración 16** Probetas refrentadas

### 10.5. ROTURA DE LAS PROBETAS POR COMPRESIÓN SIMPLE A 28 DÍAS

En este apartado se han cogido 3 de las 6 probetas que se hicieron el día que los hormigones se amasaron.

Con estos ensayos tenemos ya una primera impresión del resultado final que obtendremos a 90 días.

Cabe recordar que el objeto de este estudio es la investigación del comportamiento de la ceniza cuando se usa como sustitución de filler, por lo que se ha hecho una división de sustitución del filler en porcentajes y se procede a comprobar el resultado de este cambio.

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO

### 10.5.1. Hormigón autocompactante de control

Componentes	Cantidad (gr)
CEM I 52,5 R	14625
Filler	6240
AF-R-0/4-L	38935
AG-R-4/12-L	25025
Plastificante Isoplast 006	87,75
Superplastificante Isoflex 871	219,57
Agua	7475

Tabla 21 Dosificación HAC CONTROL

HAC	CONTROL 01	CONTROL 02	CONTROL 03
<b>Edad</b>	28 días	28 días	28 días
<b>Resistencia</b>	145 KN	553,50 KN	651,50 KN
<b>Resistencia a compresión</b>	8,20 N/mm <sup>2</sup>	31,30 N/mm <sup>2</sup>	36,90 N/mm <sup>2</sup>

Tabla 22 Resultados ensayo a compresión a 28 días HAC CONTROL

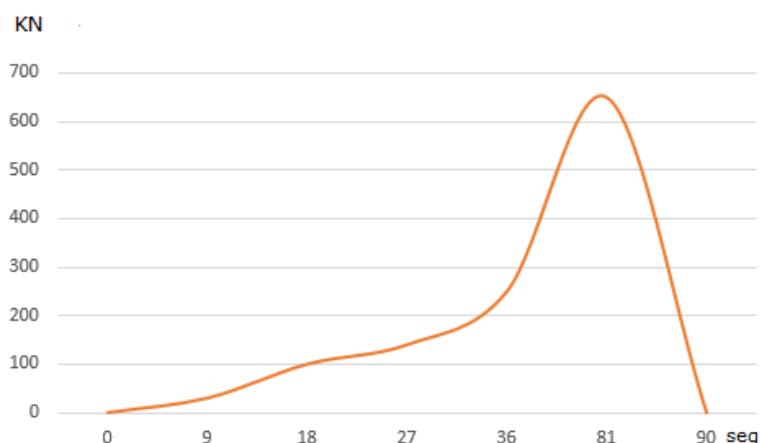


Ilustración 17 Gráfica de ensayo a compresión de HAC de control a 28 días

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO

En la Tabla se observan dos situaciones:

Por un lado dos probetas tienen resistencias similares, y por el contrario una tercera tiene un cambio drástico de resistencia. El motivo puede ser que a la hora de amasar el hormigón, esa probeta fue la última en rellenar, por lo que se ha podido producir una reducción de finos.

Como conclusión decir que hay factores que pueden influir en la reducción de resistencia de las probetas, como puede ser una granulometría discontinua. Pero todavía no es el momento de sacar conclusiones, ya que quedan probetas para romper y así se sacarán las conclusiones oportunas.

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO

### 10.5.2. Hormigón autocompactante con sustitución del filler por escoria en un 20%

Los componentes del hormigón han sido los mismos que los empleados con anterioridad en el ensayo realizado en el apartado anterior, salvo la diferencia de que la cantidad de filler se ha visto reducida en un 20%, siendo éste sustituido por escoria de fondo.

Los valores quedan entonces:

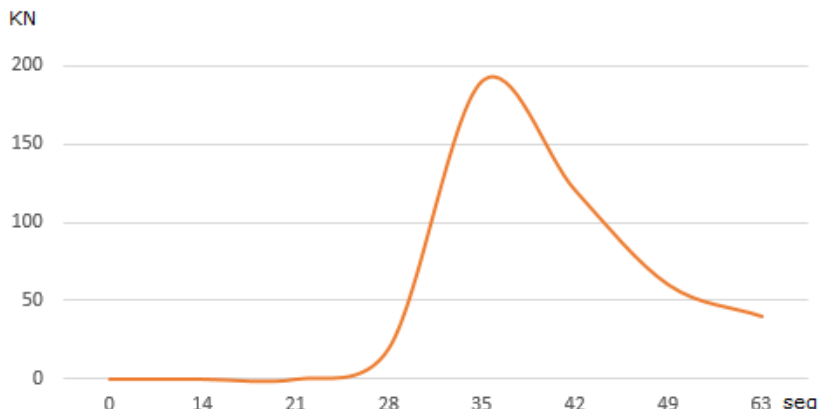
Componentes	HAC (gr)	HAC con escoria 20% (gr)
CEM I 52,5 R	14625	14625
Filler	6240	4992
AF-R-0/4-L	38935	38935
AG-R-4/12-L	25025	25025
Plastificante Isoplast 006	87,75	87,75
Superplastificante Isoflex 871	219,57	219,57
Agua	7475	7475
Escoria de fondo	0	1248

Tabla 23 Dosificación HAC con escoria 20%

HAC	PDL-20-01	PDL-20-02	PDL-20-03
Edad	28 días	28 días	28 días
Resistencia	190,50 KN	194,20 KN	470,90 KN
Resistencia a compresión	10,80 N/mm <sup>2</sup>	11,00 N/mm <sup>2</sup>	26,60 N/mm <sup>2</sup>

Tabla 24 Resultados ensayo a compresión a 28 días HAC con escoria 20%

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO



**Ilustración 18** Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria en 20% a 28 días

### 10.5.3. Hormigón autocompactante con sustitución del filler por escoria en un 40%

Los componentes del hormigón han sido los mismos que los empleados con anterioridad en el ensayo realizado en el apartado de hormigón de control, salvo la diferencia de que la cantidad de filler se ha visto reducida en un 40%, siendo éste sustituido por escoria de fondo.

Los valores quedan entonces:

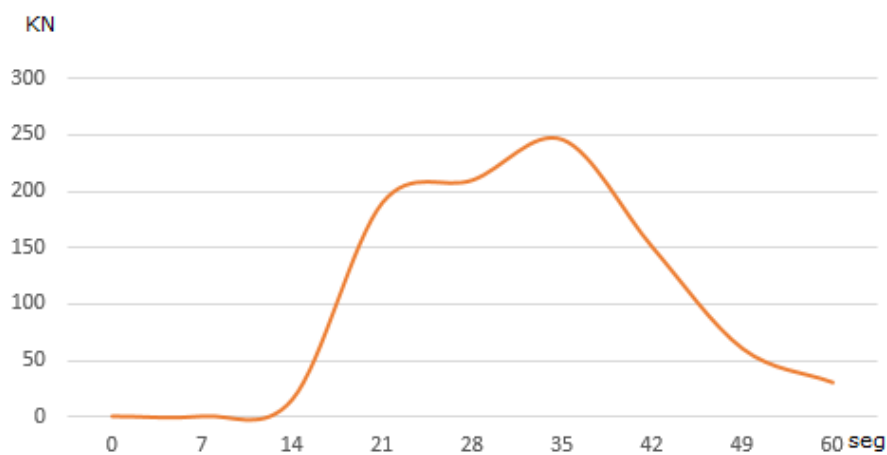
Componentes	HAC (gr)	HAC con escoria 40% (gr)
CEM I 52,5 R	14625	14625
Filler	6240	3744
AF-R-0/4-L	38935	38935
AG-R-4/12-L	25025	25025
Plastificante Isoplast 006	87,75	87,75
Superplastificante Isoflex 871	219,57	219,57
Agua	7475	7475
Escoria de fondo	0	2496

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO

**Tabla 25 Dosificación HAC con escoria 40%**

HAC	PDL-40-01	PDL-40-02	PDL-40-03
<b>Edad</b>	28 días	28 días	28 días
<b>Resistencia</b>	229,30 KN	336.89 KN	245,17 KN
<b>Resistencia a compresión</b>	13 N/mm <sup>2</sup>	19,10 N/mm <sup>2</sup>	13,90 N/mm <sup>2</sup>

**Tabla 26 Resultados ensayo a compresión a 28 días HAC con escoria 40%**



**Ilustración 19 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria en 40% a 28 días**

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO*10.5.4. Hormigón autocompactante con sustitución del filler por escoria en un 60%*

Los componentes del hormigón han sido los mismos que los empleados con anterioridad en el ensayo realizado en el apartado de hormigón de control, salvo la diferencia de que la cantidad de filler se ha visto reducida en un 60%, siendo éste sustituido por escoria de fondo.

Los valores quedan entonces:

<b>Componentes</b>	<b>HAC (gr)</b>	<b>HAC con escoria 60% (gr)</b>
CEM I 52,5 R	14625	14625
Filler	6240	2496
AF-R-0/4-L	38935	38935
AG-R-4/12-L	25025	25025
Plastificante Isoplast 006	87,75	87,75
Superplastificante Isoflex 871	219,57	219,57
Agua	7475	7475
Escoria de fondo	0	3744

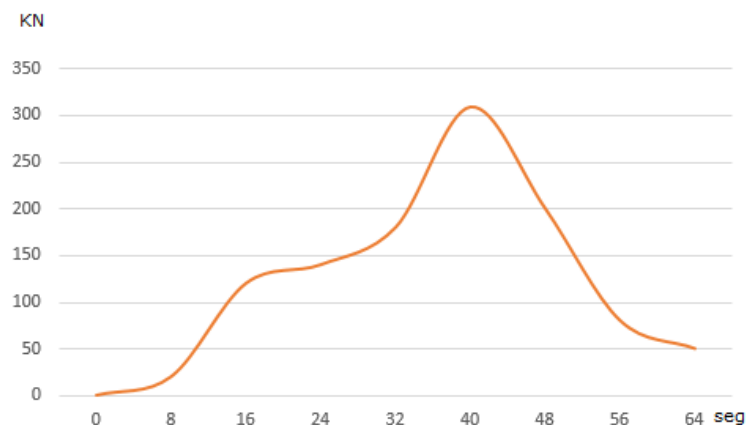
**Tabla 27 Dosificación HAC con escoria 60%**

<b>HAC</b>	<b>PDL-60-01</b>	<b>PDL-60-02</b>	<b>PDL-60-03</b>
<b>Edad</b>	28 días	28 días	28 días
<b>Resistencia</b>	221,80 KN	309,60 KN	447,30 KN
<b>Resistencia a compresión</b>	12,60 N/mm <sup>2</sup>	17,50 N/mm <sup>2</sup>	25,30 N/mm <sup>2</sup>

**Tabla 28 Resultados ensayo a compresión a 28 días HAC con escoria 60%**



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO



**Ilustración 20** Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria en 60% a 28 días

### 10.5.5. Hormigón autocompactante con sustitución del filler por escoria en un 80%

Los componentes del hormigón han sido los mismos que los empleados con anterioridad en el ensayo realizado en el apartado de hormigón de control, salvo la diferencia de que la cantidad de filler se ha visto reducida en un 80%, siendo éste sustituido por escoria de fondo.

Los valores quedan entonces:

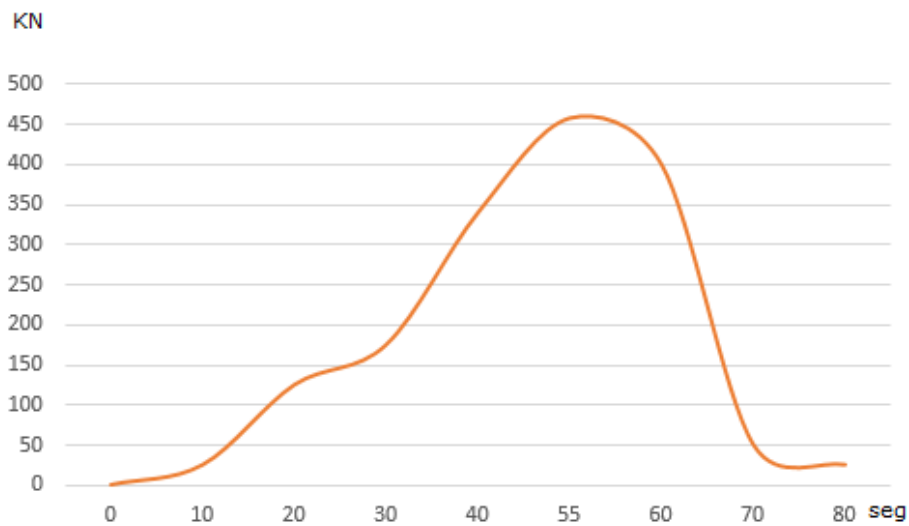
Componentes	HAC (gr)	HAC con escoria 80% (gr)
CEM I 52,5 R	14625	14625
Filler	6240	1248
AF-R-0/4-L	38935	38935
AG-R-4/12-L	25025	25025
Plastificante Isoplast 006	87,75	87,75
Superplastificante Isoflex 871	219,57	219,57
Agua	7475	7475
Escoria de fondo	0	4992

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO

**Tabla 29 Dosificación HAC con escoria 80%**

HAC	PDL-80-01	PDL-80-02	PDL-80-03
<b>Edad</b>	28 días	28 días	28 días
<b>Resistencia</b>	362,30 KN	387,04 KN	458,80 KN
<b>Resistencia a compresión</b>	20,50 N/mm <sup>2</sup>	21,90 N/mm <sup>2</sup>	26 N/mm <sup>2</sup>

**Tabla 30 Resultados ensayo a compresión a 28 días HAC con escoria 80%**



**Ilustración 21 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria en 80% a 28 días**

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO

### 10.5.6. Hormigón autocompactante con sustitución del filler por escoria en un 100%

Los componentes del hormigón han sido los mismos que los empleados con anterioridad en el ensayo realizado en el apartado de hormigón de control, salvo la diferencia de que la cantidad de filler se ha visto reducida en un 100%, siendo éste sustituido por escoria de fondo.

Los valores quedan entonces:

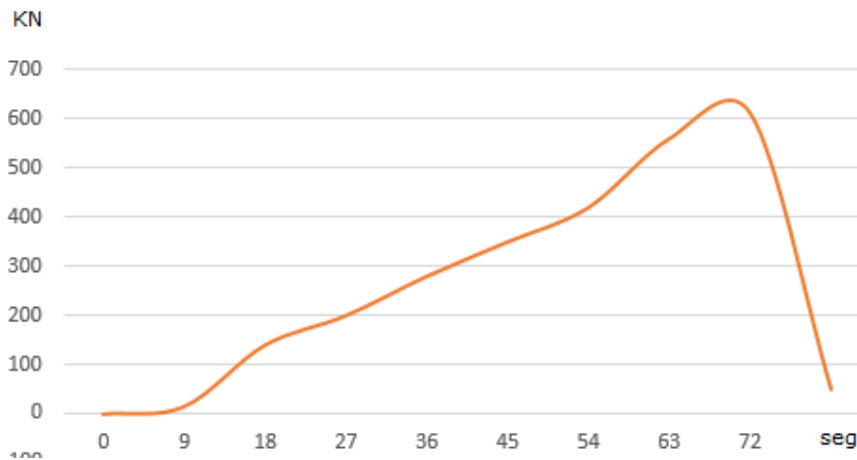
Componentes	HAC (gr)	HAC con escoria 100% (gr)
CEM I 52,5 R	14625	14625
Filler	6240	0
AF-R-0/4-L	38935	38935
AG-R-4/12-L	25025	25025
Plastificante Isoplast 006	87,75	87,75
Superplastificante Isoflex 871	219,57	219,57
Agua	7475	7475
Escoria de fondo	0	6240

**Tabla 31 Dosificación HAC con escoria 100%**

HAC	PDL-100-01	PDL-100-02	PDL-100-03
<b>Edad</b>	28 días	28 días	28 días
<b>Resistencia</b>	422,40 KN	442,80 KN	612 KN
<b>Resistencia a compresión</b>	23,90 N/mm <sup>2</sup>	25,10 N/mm <sup>2</sup>	34,60 N/mm <sup>2</sup>

**Tabla 32 Resultados ensayo a compresión a 28 días HAC con escoria 100%**

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO



**Ilustración 22 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria en 100% a 28 días**

## 10.6. ROTURA DE LAS PROBETAS POR COMPRESIÓN SIMPLE A 90 DÍAS

En este apartado se han cogido las probetas restantes que se hicieron el día que los hormigones se amasaron.

Cabe recordar que el objeto de este estudio es la investigación del comportamiento de la ceniza cuando se usa como sustitución de filler, por lo que se ha hecho una división de sustitución del filler en porcentajes y se procede a comprobar el resultado de este cambio.

### 10.6.1. Hormigón autocompactante de control

HAC	PDL-C-04	PDL-C-05
<b>Edad</b>	90 días	90 días
<b>Resistencia</b>	207,90 KN	436 KN
<b>Resistencia a compresión</b>	11,80 N/mm <sup>2</sup>	24,70 N/mm <sup>2</sup>

**Tabla 33 Resultados ensayo a compresión a 90 días HAC CONTROL**

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO

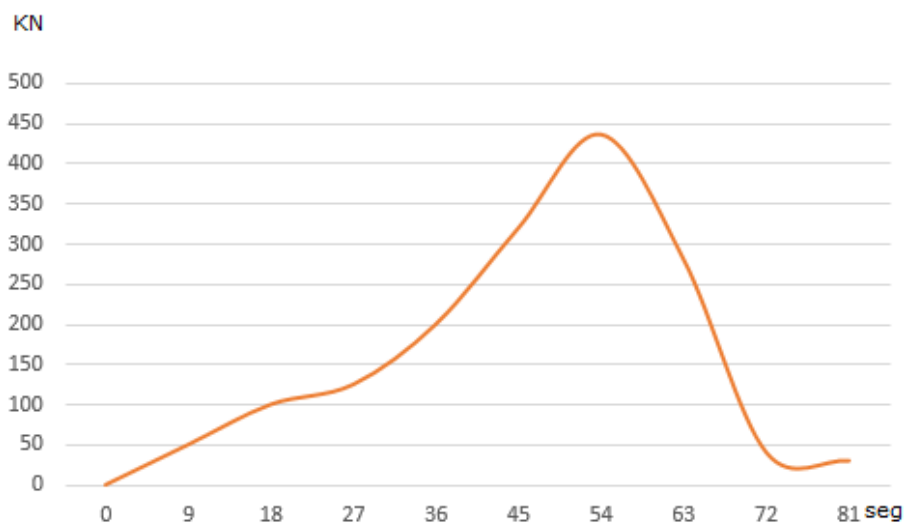


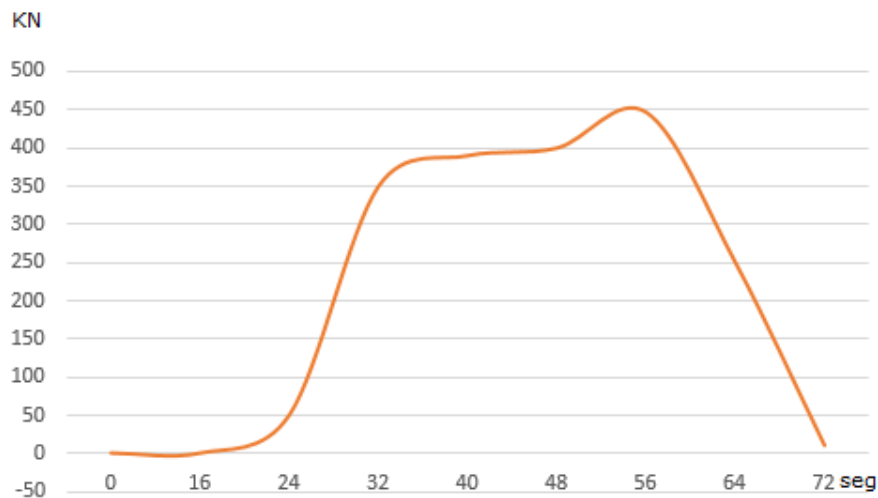
Ilustración 23 Gráfica de ensayo a compresión de HAC de control a 90 días

*10.6.2. Hormigón autocompactante con sustitución del filler por escoria en un 20%*

HAC	PDL-20-04	PDL-20-05
<b>Edad</b>	90 días	90 días
<b>Resistencia</b>	222 KN	447,80 KN
<b>Resistencia a compresión</b>	12,60 N/mm <sup>2</sup>	25,30 N/mm <sup>2</sup>

Tabla 34 Resultados ensayo a compresión a 90 días HAC con escoria 20%

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO



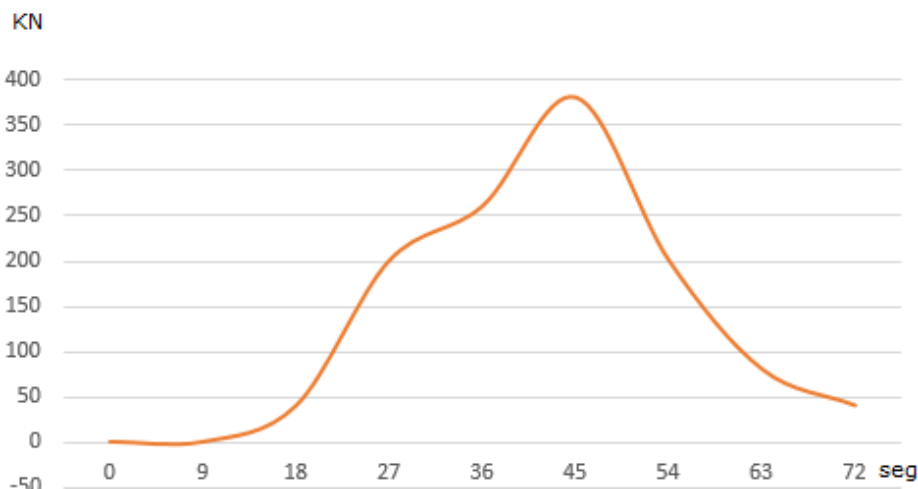
**Ilustración 24** Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria en 20% a 90 días

*10.6.3. Hormigón autocompactante con sustitución del filler por escoria en un 40% (FALTAN PROBETAS POR ROMPER)*

HAC	PDL-40-04	PDL-40-05
<b>Edad</b>	90 días	90 días
<b>Resistencia</b>	395,70 KN	380,20 KN
<b>Resistencia a compresión</b>	22,4 N/mm <sup>2</sup>	21,50 N/mm <sup>2</sup>

**Tabla 35** Resultados ensayo a compresión a 90 días HAC con escoria 40%

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO



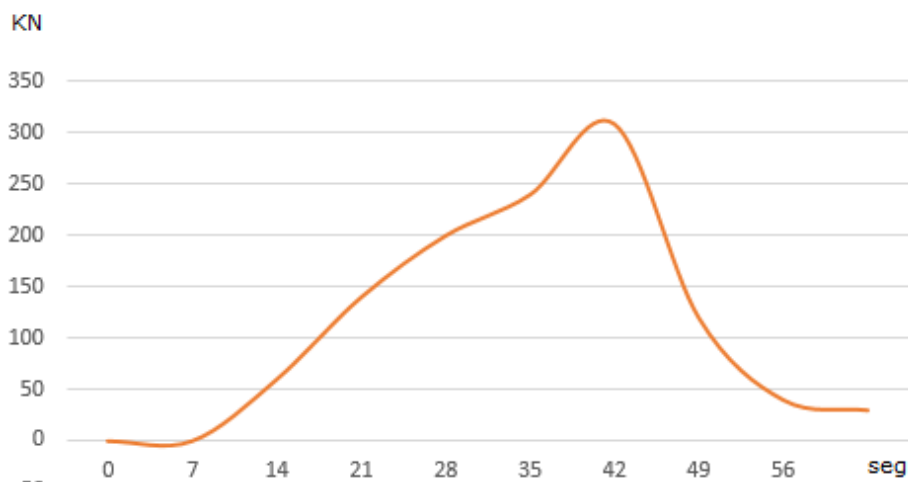
**Ilustración 25** Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria en 40% a 90 días

*10.6.4. Hormigón autocompactante con sustitución del filler por escoria en un 60%*

HAC	PDL-60-04	PDL-60-05
<b>Edad</b>	90 días	90 días
<b>Resistencia</b>	309,70 KN	399,50 KN
<b>Resistencia a compresión</b>	17,50 N/mm <sup>2</sup>	22,60 N/mm <sup>2</sup>

**Tabla 36** Resultados ensayo a compresión a 90 días HAC con escoria 60%

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO



**Ilustración 26** Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria en 60% a 90 días

*10.6.5. Hormigón autocompactante con sustitución del filler por escoria en un 80% (FALTAN PROBETAS POR ROMPER)*

HAC	PDL-80-04	PDL-80-05
<b>Edad</b>	90 días	90 días
<b>Resistencia</b>	620,50 KN	713,80 KN
<b>Resistencia a compresión</b>	35,10 N/mm <sup>2</sup>	40,40 N/mm <sup>2</sup>

**Tabla 37** Resultados ensayo a compresión a 90 días HAC con escoria 80%



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO

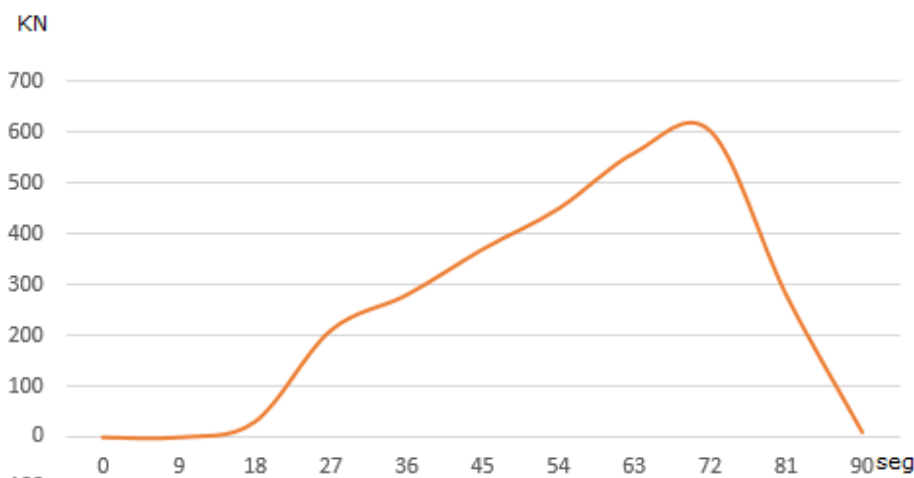
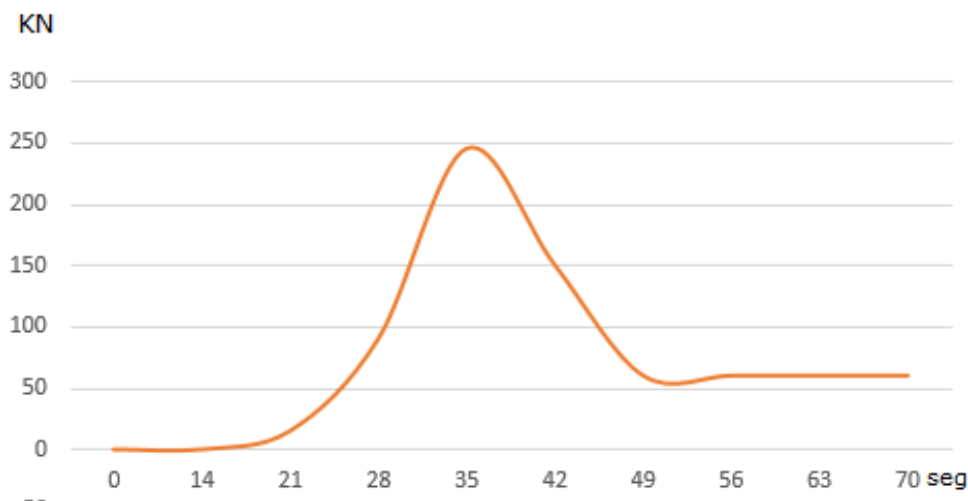


Ilustración 27 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria en 80% a 90 días

*10.6.6. Hormigón autocompactante con sustitución del filler por escoria en un 100%*

HAC	PDL-100-04	PDL-100-05
<b>Edad</b>	90 días	90 días
<b>Resistencia</b>	392,30 KN	245,10 KN
<b>Resistencia a compresión</b>	22,20 N/mm <sup>2</sup>	14 N/mm <sup>2</sup>

Tabla 38 Resultados ensayo a compresión simple a 90 días HAC con escoria 100%

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO

**Ilustración 28** Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria en 100% a 90 días

## 10.7. CONCLUSIONES

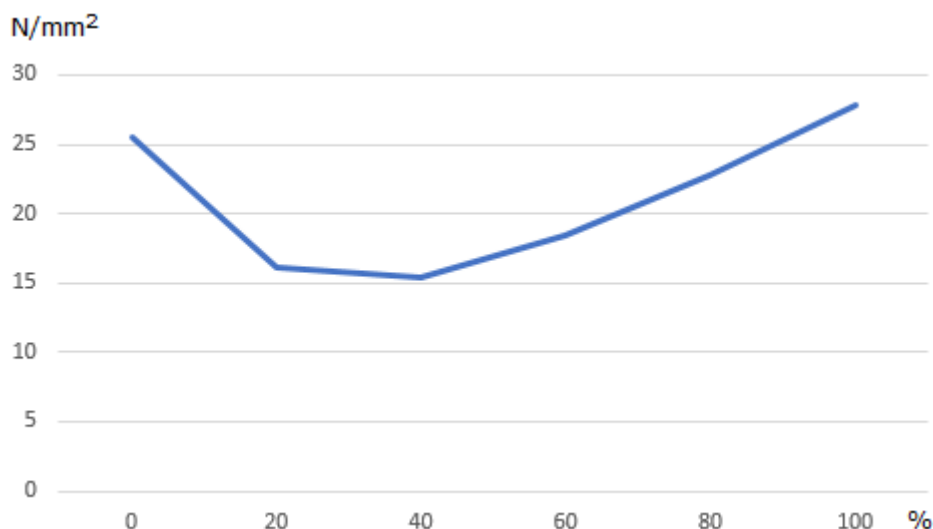
En esta fase de proyecto nos encontramos con los problemas de que la amasadora no mezclaba bien los componentes en un principio, por lo que en algunos casos los resultados eran muy variables.

Se optó por coger una cuarta probeta en unos porcentajes y, por el contrario, en el caso de 40 y 80% de sustitución de escoria se repitió el proceso ya que los resultados variaban en grandes cantidades aun utilizando la cuarta probeta. De los resultados obtenidos, la elección final fueron aquellos resultados que se mantenían constantes en la mayoría del tiempo.

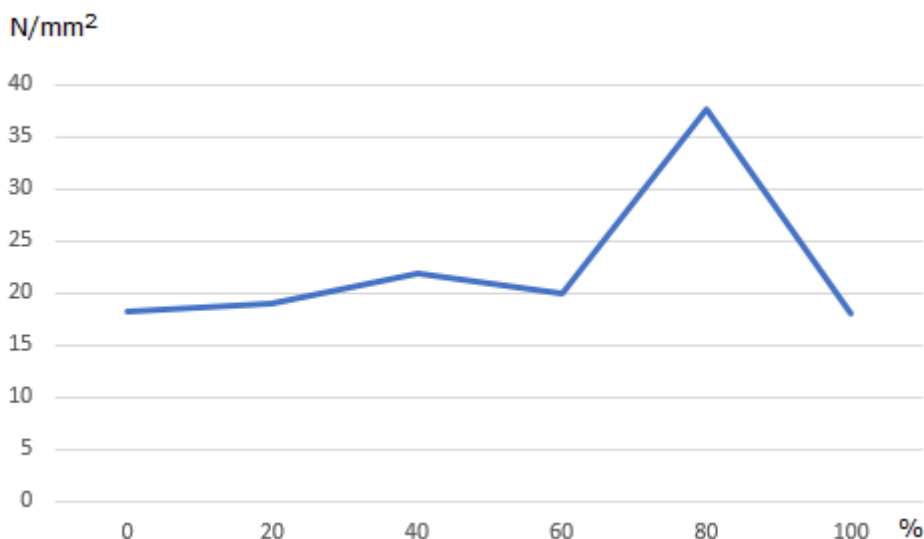
Se escogió repetir estas sustituciones puesto que la segunda parte de la investigación iba a partir desde estos datos, ya que se quiere comprobar si la cal apagada puede seguir haciendo reaccionar el sílice y, por lo tanto, aumentar la resistencia del hormigón.

Para las conclusiones se plantea una gráfica comparativa en función de la rotura media de las probetas:

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO



**Ilustración 29 Gráfica comparativa de HAC con escoria a 28 días**



**Ilustración 30 Gráfica comparativa de HAC con escoria a 90 días**

Se puede apreciar en la ilustración 25 que a partir de 40% de escoria sustituida, la resistencia se ve aumentada de manera progresiva. Este mismo resultado se ve reflejado en la segunda gráfica, exceptuando el 60% de escoria, llegando a un máximo con el 80%, que hemos considerado estudiar.

La segunda resistencia de mayor valor, siempre haciendo una media de todos ellos, la encontramos en el 40%; de ahí nuestro estudio de estos dos valores.

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON ADICIÓN DE ESCORIA DE FONDO

El uso de escoria de fondo ha sido beneficioso en lo referente a encontrar mayores resistencias a largo plazo, aunque sea necesario un 80% de sustitución del filler por éste.

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE

## 11. ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE

En este apartado del estudio se escogieron el 40 y 80% de sustitución de filler por escoria, de los cuales partimos como dos nuevos experimentos.

Ambos partirán como hormigón de control e iremos sustituyendo el filler por cal apagada en porcentajes de 25, 50 y 75%.

### 11.1. ENSAYO DE ESCURRIMIENTO O CONO DE ABRAMS

El proceso es el mismo que en el apartado anterior, por lo que se exponen los resultados directamente:

<b>Amasada</b>	<b>Tiempo que tarda en llegar a 50 cm (<math>T_{50}</math>)</b>	<b>Diámetro final (<math>d_f</math>)</b>
Hormigón 40% de escoria con 25% de cal apagada	5,97 seg	640 mm
Hormigón 40% de escoria con 50% de cal apagada	6,95 seg	620 mm
Hormigón 40% de escoria con 75% de cal apagada	6,82 seg	595 mm
Hormigón 80% de escoria con 25% de cal apagada	9,89 seg	540 mm

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
 CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE

Hormigón 80% de escoria con 50% de cal apagada	8,46 seg	500 mm
Hormigón 80% de escoria con 75% de cal apagada	5,58 seg	570mm

**Tabla 39 Resultados ensayo cono de Abrams**

## 11.2. LLENADO DE PROBETAS

El proceso es el mismo que en el apartado anterior, por lo que se exponen los resultados directamente.

Se ha establecido una tabla en la que se muestran las fechas de llenado de probetas donde queda reflejado el día exacto que debería haberse hecho el ensayo de hormigón a 28 y 90 días:

<b>HAC</b>	<b>HAC ESCORIA 40% Y CAL 25%</b>
<b>Fecha de llenado</b>	20-Marzo
<b>Fecha (28 días)</b>	17-Abril
<b>Fecha de Rotura</b>	17-Abril
<b>Fecha (90 días)</b>	18-Junio
<b>Fecha de Rotura</b>	19-Junio

**Tabla 40 Llenado de probetas con sustitución del filler por cal en un 25%**

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE

HAC	HAC ESCORIA 40% Y CAL 50%
Fecha de llenado	20-Marzo
Fecha (28 días)	17-Abril
Fecha de Rotura	17-Abril
Fecha (90 días)	18-Junio
Fecha de Rotura	19-Junio

Tabla 41 Llenado de probetas con sustitución del filler por cal en un 50%

HAC	HAC ESCORIA 40% Y CAL 75%
Fecha de llenado	20-Marzo
Fecha (28 días)	17-Abril
Fecha de Rotura	17-Abril
Fecha (90 días)	18-Junio
Fecha de Rotura	19-Junio

Tabla 42 Llenado de probetas con sustitución del filler por cal en un 75%

HAC	HAC ESCORIA 80% Y CAL 25%
Fecha de llenado	21-Marzo
Fecha (28 días)	18-Abril
Fecha de Rotura	18-Abril
Fecha (90 días)	19-Junio
Fecha de Rotura	19-Junio

Tabla 43 Llenado de probetas con sustitución del filler por cal en un 25%

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE

HAC	HAC ESCORIA 80% Y CAL 50%
Fecha de llenado	21-Marzo
Fecha (28 días)	18-Abril
Fecha de Rotura	18-Abril
Fecha (90 días)	19-Junio
Fecha de Rotura	19-Junio

Tabla 44 Llenado de probetas con sustitución del filler por cal en un 50%

HAC	HAC ESCORIA 40% Y CAL 75%
Fecha de llenado	21-Marzo
Fecha (28 días)	18-Abril
Fecha de Rotura	18-Abril
Fecha (90 días)	19-Junio
Fecha de Rotura	19-Junio

Tabla 45 Llenado de probetas con sustitución del filler por cal en un 75%

### 11.3. NOMBRAMIENTO DE PROBETAS

Para la distinción de las probetas de siguió el siguiente procedimiento:

$$PDL - \% CENIZA - \% CAL APAGADA - N^{\circ} PROBETA$$

- PDL: Probetas Diego y Leyre
- % CENIZA: Se indica el porcentaje de ceniza empleado en esa amasada (40 y 80)
- % CAL APAGADA: Se indica el porcentaje de cal empleada en esa amasada (25, 50 y 75)
- N° PROBETA: Se indica el número de probeta (01, 02, 03, etc.)



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE

## 11.4. REFRENTADO DE PROBETAS

Se seguirán los mismos pasos que en el estudio anterior.

## 11.5. ROTURA DE LAS PROBETAS POR COMPRESIÓN SIMPLE A 28 DÍAS

En este apartado se han cogido 2 de las 4 probetas que se hicieron el día que los hormigones se amasaron.

Con estos ensayos tenemos ya una primera impresión del resultado final que obtendremos a 90 días.

Cabe recordar que el objeto de este estudio es la investigación del comportamiento de la cal apagada cuando se usa como sustitución de filler, sustituido anteriormente por escoria, por lo que se ha hecho una división de sustitución del filler en porcentajes y se procede a comprobar el resultado de este cambio.

### *11.5.1. Hormigón autocompactante con sustitución del filler por cal en un 25% (Con escoria en un 40%)*

<b>Componentes</b>	<b>HAC con escoria 40% (gr)</b>	<b>HAC con cal 25% (gr)</b>
CEM I 52,5 R	14625	10125
Filler	3744	1944
AF-R-0/4-L	38935	26955
AG-R-4/12-L	25025	17325
Plastificante Isoplast 006	87,75	60,75

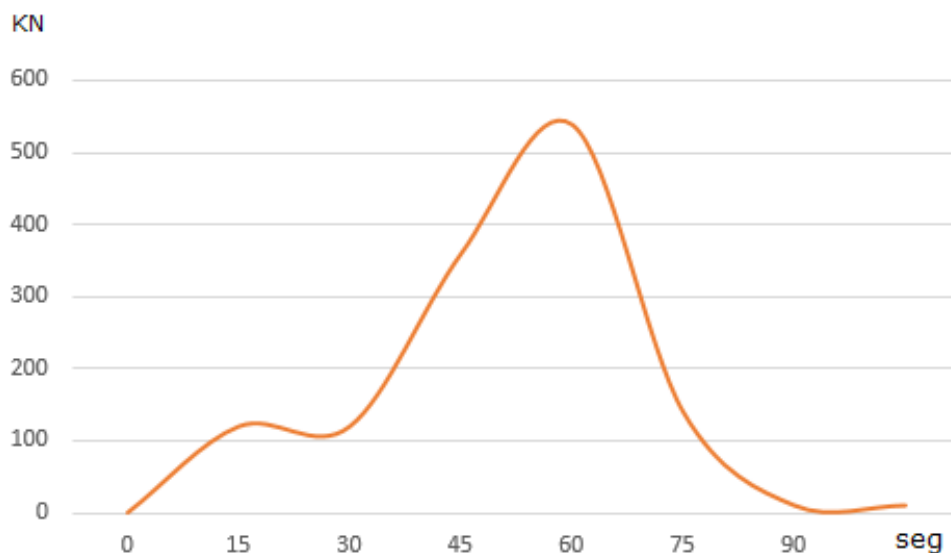
ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE

Superplastificante Isoflex 871	219,57	152,01
Agua	7475	5175
Escoria de fondo	2496	1728
Cal apagada	0	648

**Tabla 46 Dosificación HAC con cal apagada 25%**

HAC	PDL-40-25-01	PDL-40-25-02
<b>Edad</b>	28 días	28 días
<b>Resistencia</b>	540,90 KN	558,60 KN
<b>Resistencia a compresión</b>	30,60 N/mm <sup>2</sup>	31,60 N/mm <sup>2</sup>

**Tabla 47 Resultados ensayo a compresión a 28 días HAC con escoria 40% y cal apagada 25%**



**Ilustración 31 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria 40% y cal apagada 25% a 28 días**

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE

*11.5.2. Hormigón autocompactante con sustitución del filler por cal en un 50% (Con escoria en un 40%)*

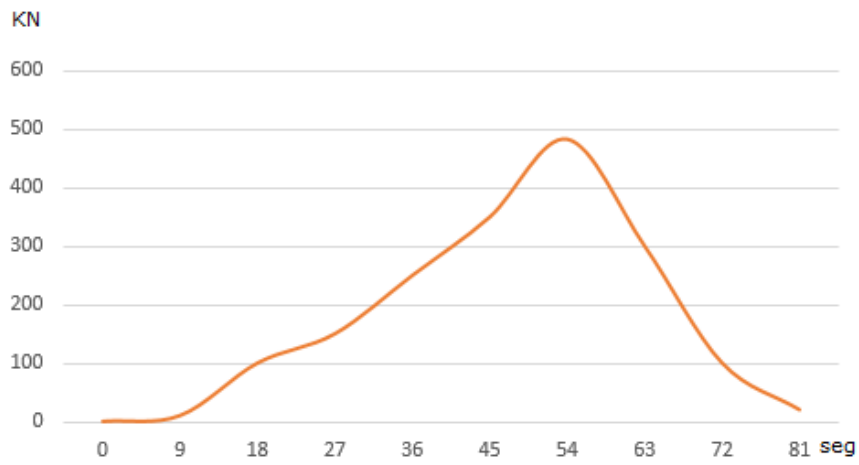
<b>Componentes</b>	<b>HAC con escoria 40% (gr)</b>	<b>HAC con cal 50% (gr)</b>
CEM I 52,5 R	14625	10125
Filler	3744	1296
AF-R-0/4-L	38935	26955
AG-R-4/12-L	25025	17325
Plastificante Isoplast 006	87,75	60,75
Superplastificante Isoflex 871	219,57	152,01
Agua	7475	5175
Escoria de fondo	2496	1728
Cal apagada	0	1296

**Tabla 48 Dosificación HAC con cal apagada 50%**

<b>HAC</b>	<b>PDL-40-50-01</b>	<b>PDL-40-50-02</b>
<b>Edad</b>	28 días	28 días
<b>Resistencia</b>	483,40 KN	352,60 KN
<b>Resistencia a compresión</b>	27,40 N/mm <sup>2</sup>	20,0 N/mm <sup>2</sup>

**Tabla 49 Resultados ensayo a compresión a 28 días HAC con escoria 40% y cal apagada 50%**

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE



**Ilustración 32 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria 40% y cal apagada 50% a 28 días**

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE

*11.5.3. Hormigón autocompactante con sustitución del filler por cal en un 75% (Con escoria en un 40%)*

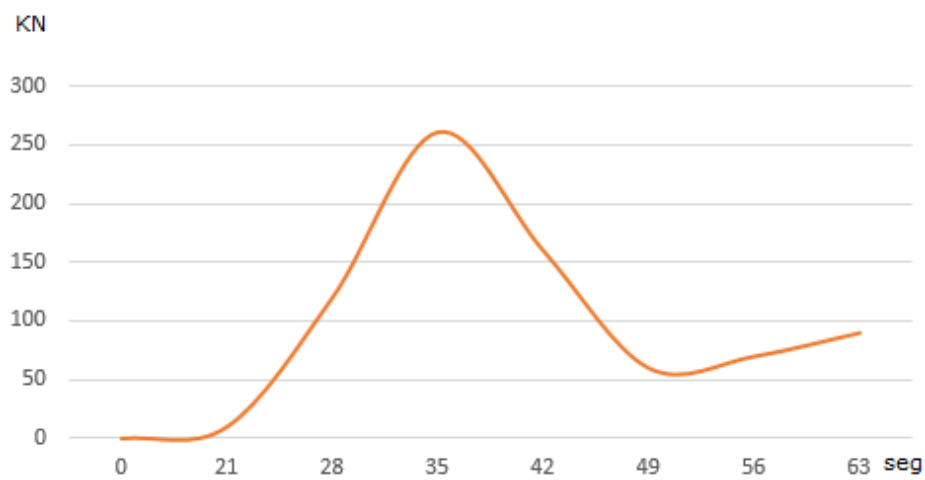
<b>Componentes</b>	<b>HAC con escoria 40% (gr)</b>	<b>HAC con cal 75% (gr)</b>
CEM I 52,5 R	14625	10125
Filler	3744	648
AF-R-0/4-L	38935	26955
AG-R-4/12-L	25025	17325
Plastificante Isoplast 006	87,75	60,75
Superplastificante Isoflex 871	219,57	152,01
Agua	7475	5175
Escoria de fondo	2496	1728
Cal apagada	0	1944

**Tabla 50 Dosificación HAC con cal apagada 75%**

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE

HAC	PDL-40-75-01	PDL-40-75-02
<b>Edad</b>	28 días	28 días
<b>Resistencia</b>	261,30 KN	211,90 KN
<b>Resistencia a compresión</b>	14,80 N/mm <sup>2</sup>	12,0 N/mm <sup>2</sup>

**Tabla 51 Resultados ensayo a compresión a 28 días HAC con escoria 40% y cal apagada 75%**



**Ilustración 33 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria 40% y cal apagada 75% a 28 días**

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE

*11.5.4. Hormigón autocompactante con sustitución del filler por cal en un 25% (Con escoria en un 80%)*

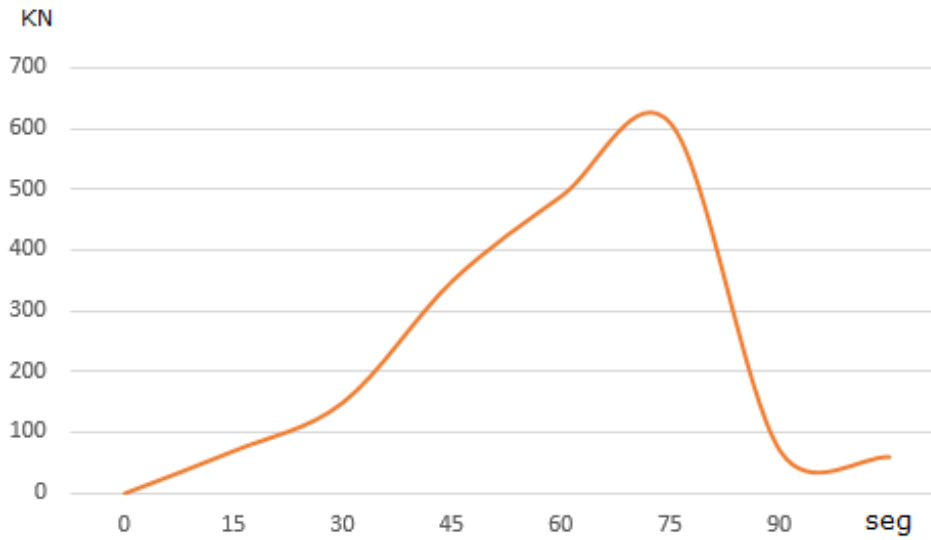
<b>Componentes</b>	<b>HAC con escoria 80% (gr)</b>	<b>HAC con cal 75% (gr)</b>
CEM I 52,5 R	14625	10125
Filler	1248	648
AF-R-0/4-L	38935	26955
AG-R-4/12-L	25025	17325
Plastificante Isoplast 006	87,75	60,75
Superplastificante Isoflex 871	219,57	152,01
Agua	7475	5175
Escoria de fondo	4992	3456
Cal apagada	0	216

**Tabla 52 Dosificación HAC con cal apagada 25%**

<b>HAC</b>	<b>PDL-80-25-01</b>	<b>PDL-80-25-02</b>
<b>Edad</b>	28 días	28 días
<b>Resistencia</b>	257,30 KN	570,60 KN
<b>Resistencia a compresión</b>	14,60 N/mm <sup>2</sup>	32,30 N/mm <sup>2</sup>

**Tabla 53 Resultados ensayo a compresión a 28 días HAC con escoria 80% y cal apagada 25%**

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE



**Ilustración 34 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria 80% y cal apagada 25% a 28 días**



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE

*11.5.5. Hormigón autocompactante con sustitución del filler por cal en un 50% (Con escoria en un 80%)*

<b>Componentes</b>	<b>HAC con escoria 80% (gr)</b>	<b>HAC con cal 75% (gr)</b>
CEM I 52,5 R	14625	10125
Filler	1248	432
AF-R-0/4-L	38935	26955
AG-R-4/12-L	25025	17325
Plastificante Isoplast 006	87,75	60,75
Superplastificante Isoflex 871	219,57	152,01
Agua	7475	5175
Escoria de fondo	4992	3456
Cal apagada	0	432

**Tabla 54 Dosificación HAC con cal apagada 50%**

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE

HAC	PDL-80-50-01	PDL-80-50-02
Edad	28 días	28 días
Resistencia	596,40 KN	580,30 KN
Resistencia a compresión	33,70 N/mm <sup>2</sup>	32,80 N/mm <sup>2</sup>

Tabla 55 Resultados ensayo a compresión a 28 días HAC con escoria 80% y cal apagada 50%

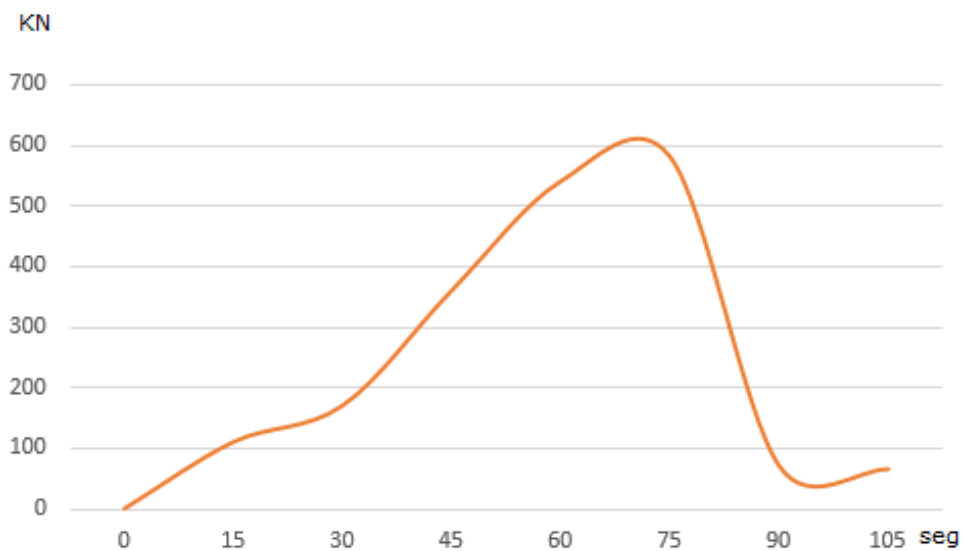


Ilustración 35 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria 80% y cal apagada 50% a 28 días

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE

*11.5.6. Hormigón autocompactante con sustitución del filler por cal en un 75% (Con escoria en un 80%)*

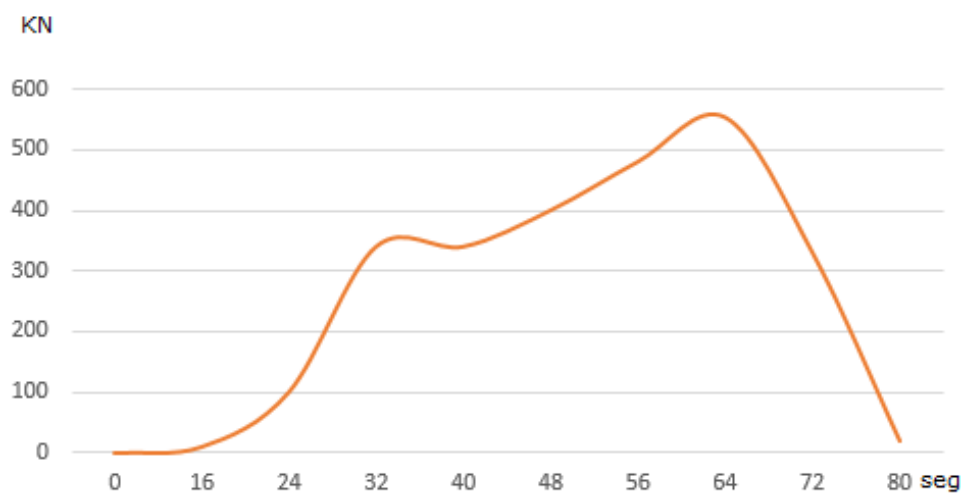
<b>Componentes</b>	<b>HAC con escoria 80% (gr)</b>	<b>HAC con cal 75% (gr)</b>
CEM I 52,5 R	14625	10125
Filler	1248	216
AF-R-0/4-L	38935	26955
AG-R-4/12-L	25025	17325
Plastificante Isoplast 006	87,75	60,75
Superplastificante Isoflex 871	219,57	152,01
Agua	7475	5175
Escoria de fondo	4992	3456
Cal apagada	0	648

**Tabla 56 Dosificación HAC con cal apagada 75%**

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE

HAC	PDL-80-75-01	PDL-80-75-02
<b>Edad</b>	28 días	28 días
<b>Resistencia</b>	443,70 KN	552,90 KN
<b>Resistencia a compresión</b>	25,10 N/mm <sup>2</sup>	31,30 N/mm <sup>2</sup>

**Tabla 57 Resultados ensayo a compresión a 28 días HAC con escoria 80% y cal apagada 75%**



**Ilustración 36 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria 80% y cal apagada 75% a 28 días**

## 11.6. ROTURA DE LAS PROBETAS POR COMPRESIÓN SIMPLE A 90 DÍAS

En este apartado se han cogido las probetas restantes que se hicieron el día que los hormigones se amasaron.

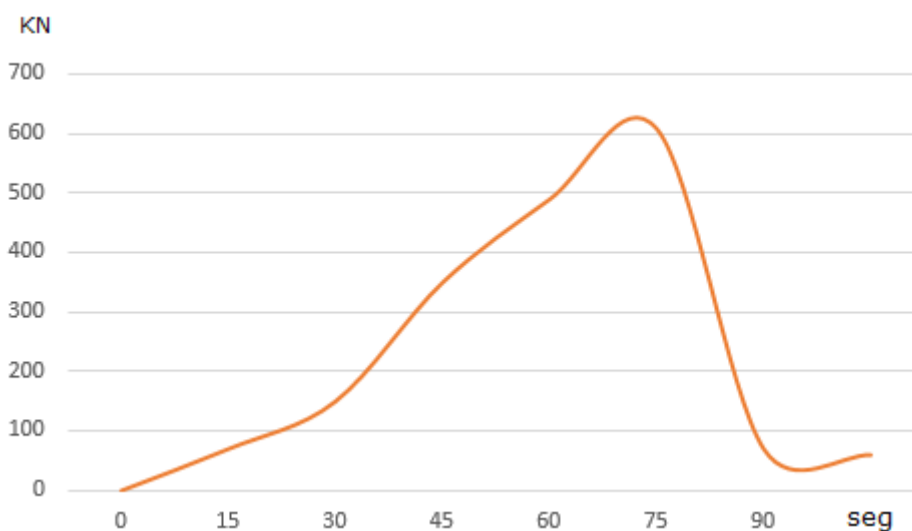
Cabe recordar que el objeto de este estudio es la investigación del comportamiento de la cal apagada cuando se usa como sustitución de filler, sustituido anteriormente por escoria, por lo que se ha hecho una división de sustitución del filler en porcentajes y se procede a comprobar el resultado de este cambio.

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE

*11.6.1. Hormigón autocompactante con sustitución del filler por cal en un 25% (Con escoria en un 40%)*

HAC	PDL-40-25-03	PDL-40-25-04
<b>Edad</b>	90 días	90 días
<b>Resistencia</b>	658,60 KN	609,20 KN
<b>Resistencia a compresión</b>	37,30 N/mm <sup>2</sup>	34,50 N/mm <sup>2</sup>

**Tabla 58** Resultados ensayo a compresión a 90 días HAC con escoria 40% y cal apagada 25%



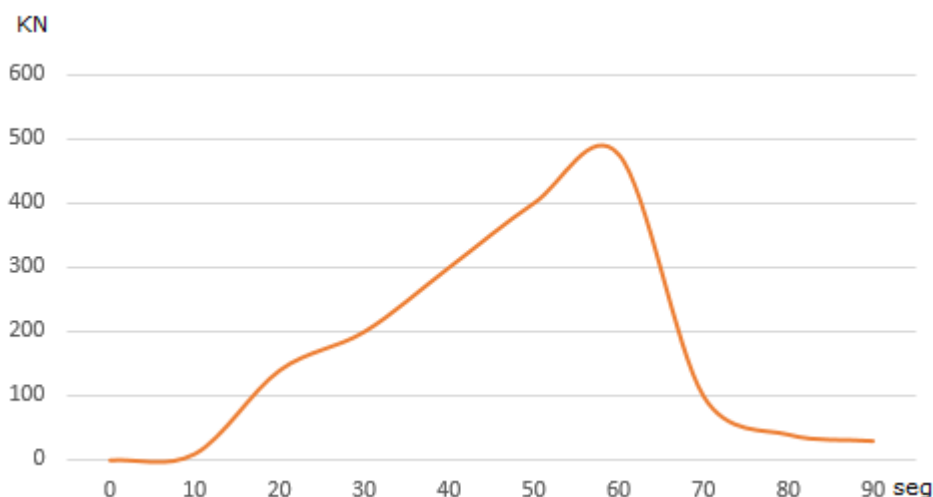
**Ilustración 37** Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria 40% y cal apagada 25% a 90 días

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE

*11.6.2. Hormigón autocompactante con sustitución del filler por cal en un 50% (con escoria en un 40%)*

HAC	PDL-40-50-03	PDL-40-50-04
<b>Edad</b>	90 días	90 días
<b>Resistencia</b>	649,80 KN	476,60 KN
<b>Resistencia a compresión</b>	35,80 N/mm <sup>2</sup>	27,00 N/mm <sup>2</sup>

**Tabla 59** Resultados ensayo a compresión a 90 días HAC con escoria 40% y cal apagada 50%



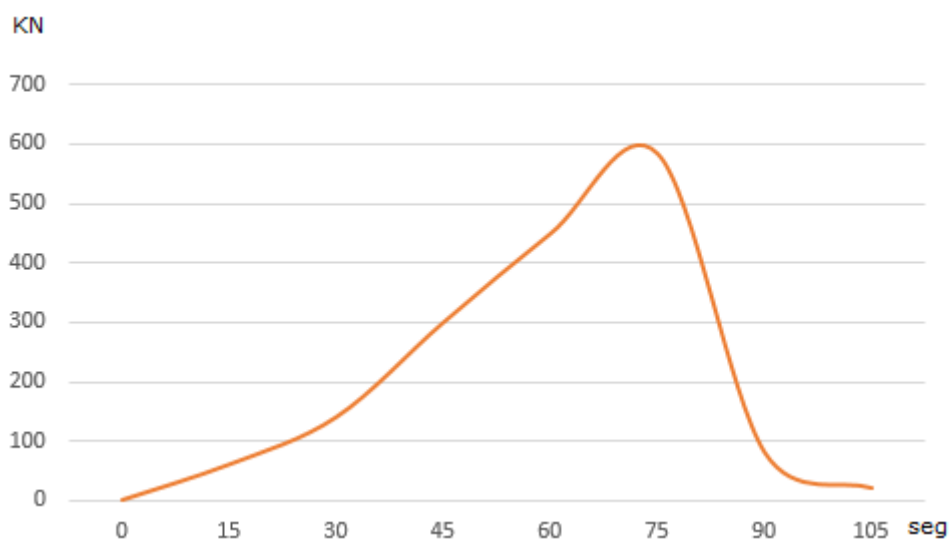
**Ilustración 38** Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria 40% y cal apagada 50% a 90 días

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE

*11.6.3. Hormigón autocompactante con sustitución del filler por cal en un 75% (con escoria en un 40%)*

HAC	PDL-40-75-03	PDL-40-75-04
<b>Edad</b>	90 días	90 días
<b>Resistencia</b>	461,40 KN	585,10 KN
<b>Resistencia a compresión</b>	26,10 N/mm <sup>2</sup>	33,10 N/mm <sup>2</sup>

**Tabla 60** Resultados ensayo a compresión a 90 días HAC con escoria 40% y cal apagada 75%



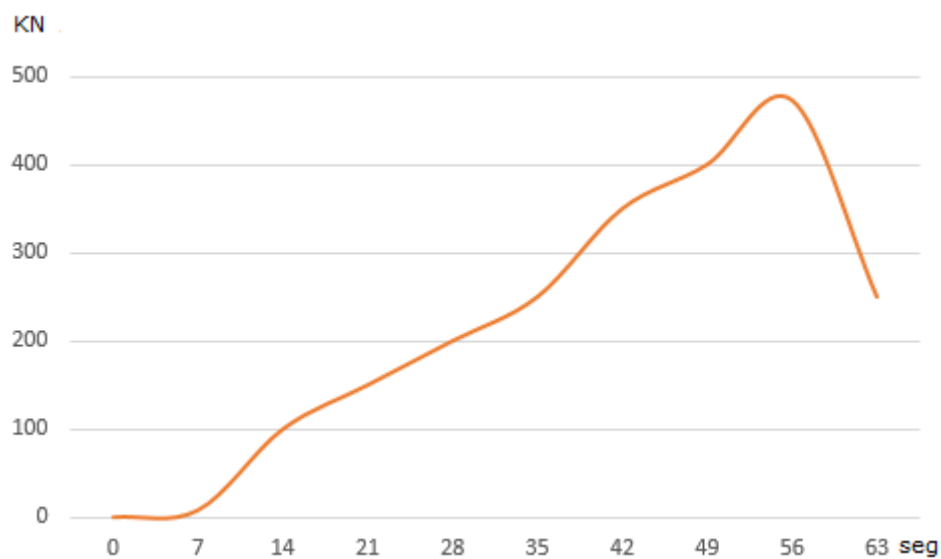
**Ilustración 39** Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria 40% y cal apagada 75% a 90 días

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE

*11.6.4. Hormigón autocompactante con sustitución del filler por cal en un 25% (con escoria en un 80%)*

HAC	PDL-80-25-03	PDL-80-25-04
<b>Edad</b>	90 días	90 días
<b>Resistencia</b>	489,20 KN	473,30 KN
<b>Resistencia a compresión</b>	27,7 N/mm <sup>2</sup>	26,80 N/mm <sup>2</sup>

**Tabla 61 Resultados ensayo a compresión a 90 días HAC con escoria 80% y cal apagada 25%**



**Ilustración 40 Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria 80% y cal apagada 25% a 90 días**

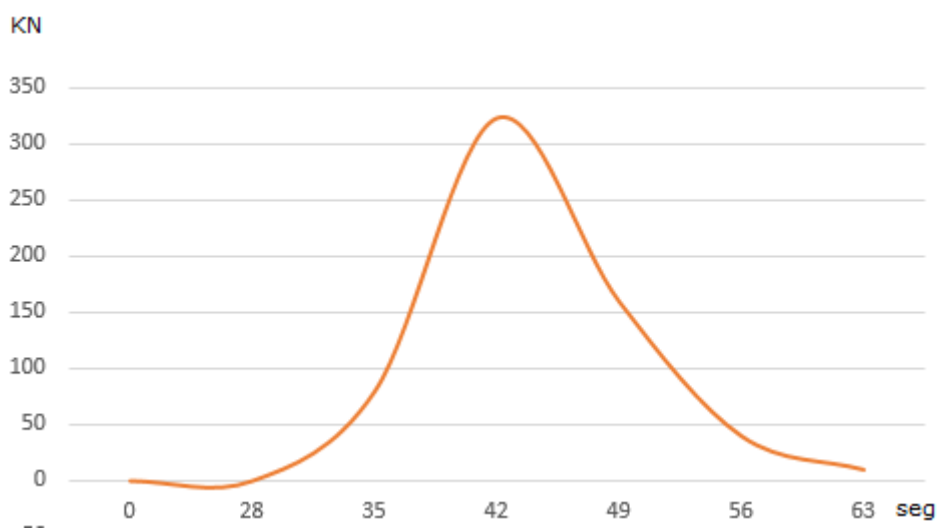


ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE

*11.6.5. Hormigón autocompactante con sustitución del filler por cal en un 50% (con escoria en un 80%)*

HAC	PDL-80-50-03	PDL-80-50-04
<b>Edad</b>	90 días	90 días
<b>Resistencia</b>	324,50 KN	261,50 KN
<b>Resistencia a compresión</b>	18,40 N/mm <sup>2</sup>	14,80 N/mm <sup>2</sup>

**Tabla 62** Resultados ensayo a compresión a 90 días HAC con escoria 80% y cal apagada 50%



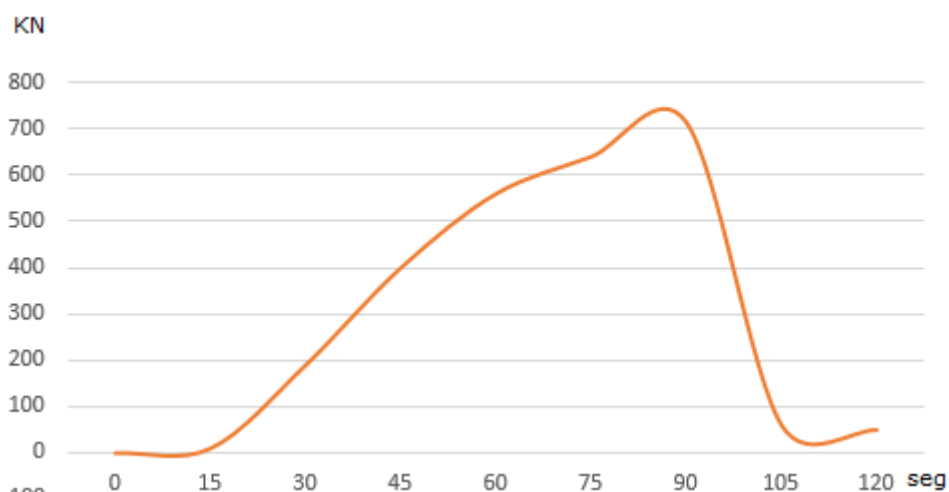
**Ilustración 41** Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria 80% y cal apagada 50% a 90 días

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE

*11.6.6. Hormigón autocompactante con sustitución del filler por cal en un 75% (con escoria en un 80%)*

HAC	PDL-80-75-03	PDL-80-75-04
<b>Edad</b>	90 días	90 días
<b>Resistencia</b>	714 KN	621 KN
<b>Resistencia a compresión</b>	40,40 N/mm <sup>2</sup>	35,10 N/mm <sup>2</sup>

**Tabla 63** Resultados ensayo a compresión a 90 días HAC con escoria 80% y cal apagada 75%



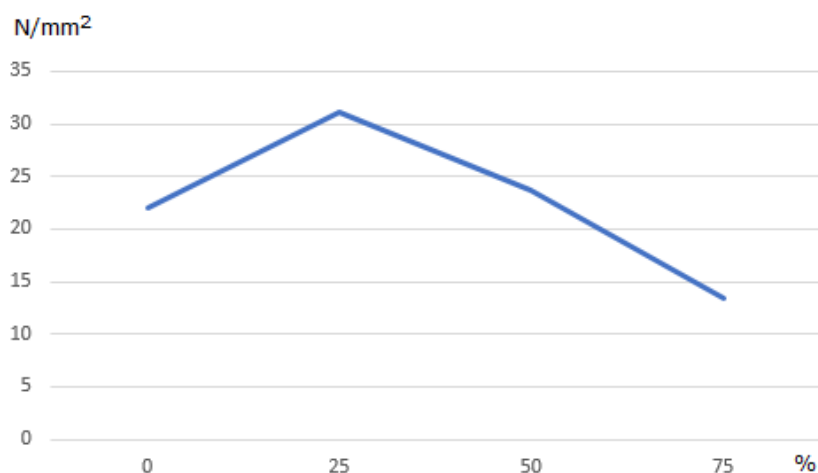
**Ilustración 42** Gráfica de ensayo a compresión de HAC con escoria 80% y cal apagada 75% a 90 días

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE  
CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE

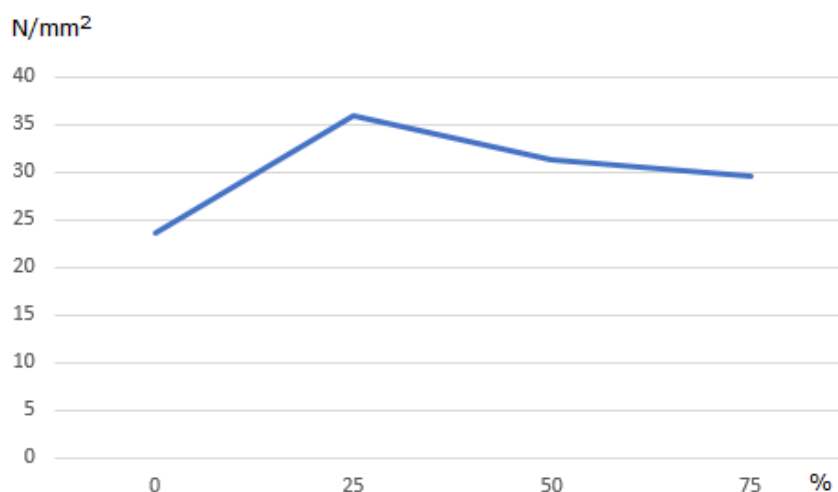
## 11.7. CONCLUSIONES

### 11.7.1. Conclusiones de HAC con escoria 40% y cal apagada

Se plantea una gráfica comparativa como en el caso anterior:



**Ilustración 43** Gráfica comparativa de HAC con 40% escoria y cal apagada a 28 días



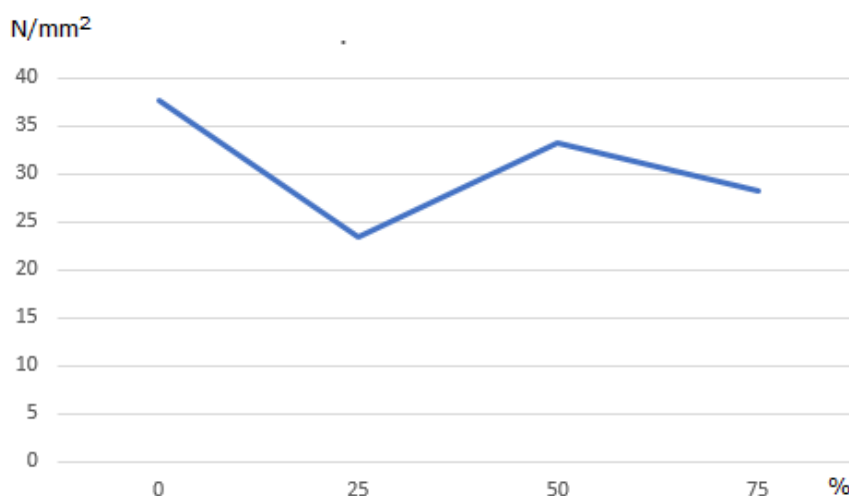
**Ilustración 44** Gráfica comparativa de HAC con 40% escoria y cal apagada a 90 días

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE

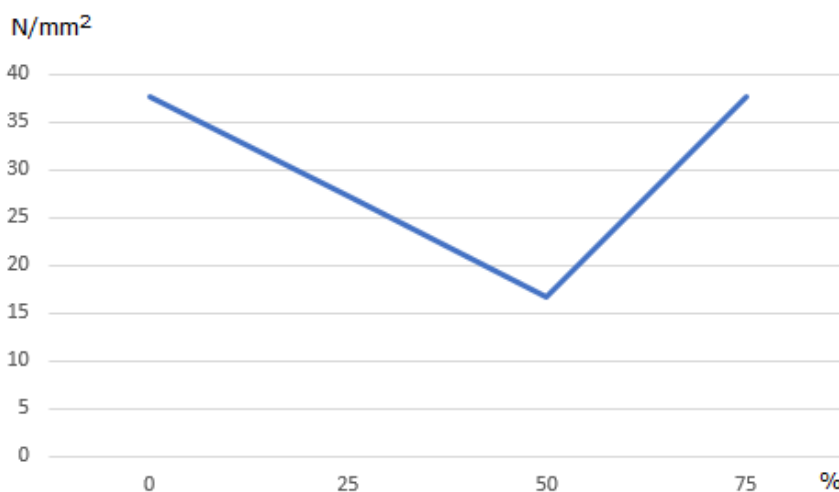
Se puede comprobar como la cal ha reaccionado en la primera fase no solo a los 28 días, sino que a largo plazo también.

La cal apagada aporta beneficios, haciendo reaccionar al sílice sobrante y aumentando la resistencia del producto final.

A partir de 25%, ya no aporta reacción, por lo que incorporamos un producto que no genera resistencia.



**Ilustración 45** Gráfica comparativa de HAC con 80% escoria y cal apagada a 28 días



**Ilustración 46** Gráfica comparativa de HAC con 80% escoria y cal apagada a 90 días

## ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON CAL APAGADA COMO CONGLOMERANTE

En este caso, la cal apagada reacciona a partir del 50% de sustitución, alcanzando su máximo en el 75%.

Como conclusión general de esta fase de proyecto, podemos comprobar como con un 40% de escoria, la reacción máxima con la cal apagada ha sido con el 25% y con el 80% de escoria, el 75%. Esto quiere decir que al incorporar ceniza tenemos un porcentaje de sílice que no ha reaccionado y por ello introducimos la cal.

Cuanta más ceniza incorporamos, más cal tendremos que meter para dicha aumentar la reacción. Pudiera ser que las resistencias se vieran afectadas, pero en este caso dan los mismos resultados en torno a 30-35 N/mm<sup>2</sup>, por lo que nos tendríamos que regir por el abarato de costes del producto final.

## 12. POSIBLES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Para mejores resultados, se debe ampliar el número de probetas, para lo cual se debería comprobar que la escoria empleada tiene las mismas características que la que se ha empleado en este estudio, y con ello obtener mayor exactitud en ellos.

Además de ello, sería correcto comprobar el comportamiento de la escoria en otros ámbitos de futuro, como pueden ser:

- Reacción del metal con la escoria
- Trazabilidad de la escoria
- Estudio de un hormigón con cemento 42.5 y cenizas volantes
- Reactividad o nivel atómico de la escoria de fondo
- Comportamiento de escoria con acero
- Corrosión del acero por el empleo de cal apagada

Sería interesante que en un futuro se pudieran elaborar estos estudios y poder llegar a una conclusión definitiva acerca del uso del hormigón que se ha empleado en el ámbito de la edificación.

## 13. RELACIÓN DE ANEJOS

Los anejos relacionados con esta memoria son:

- Anexo 1. Reportaje fotográfico

## AGRADECIMIENTOS

## 14. AGRADECIMIENTOS

Ante la dificultad de realizar este Estudio en lo referente a la obtención de materiales, quiero agradecer su apoyo a:

- **Jose Luis Sáez Hostalez** y **Jose Antonio Gutiérrez Calero**, responsables de **CEMEX España**, por proporcionarnos los materiales necesarios para la elaboración de este proyecto.
- A los **trabajadores** de **CEMEX España**, que nos echaron una mano cuando necesitábamos realizar ensayos en la cementera.

Mostrar mi agradecimiento a **Rafael Ade Beltrán**, director de este proyecto, por ponerse al mando de este proyecto, mostrarnos todo su apoyo y enseñarnos todo lo que deberíamos saber para llevar a cabo el estudio.

Quiero agradecer a **Martín Orna Carmona**, segundo director de este proyecto, por darnos la oportunidad de realizarlo y ayudarnos en todo lo posible.

Dar las gracias a la **Escuela** por permitirnos usar el laboratorio de materiales incluso cuando debe permanecer cerrado, pero también a todo el personal docente y no docente por facilitarnos el trabajo en algunas ocasiones y animarnos en todo momento.

Por supuesto, no puedo olvidarme de mi compañero de proyecto **Diego Sanchez-Pando Arístegui**, quien no dudó desde el minuto 0 en hacer este estudio conmigo y ha sido quien ha realizado la gran mayoría de trabajo físico en éste.

En este proyecto no solo hay trabajo en laboratorio, hay muchas horas detrás de todo lo físico, por lo que debo dar las gracias a mi familia por aguantar todos mis agobios por llegar a tiempo, a Daniel por ser un gran apoyo en todo momento y por aconsejarme siempre lo mejor, a Elisabeth por pasar horas y horas en la biblioteca contando los días que faltan para el final y a todos los que han hecho que esto sea posible.





## 15. BIBLIOGRAFÍA

- Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08). Propiedades tecnológicas del hormigón.
- HORMIGÓN, de Manuel Fernández Cánovas
- Normas UNE.