

3. APLICABILIDAD EN MORTEROS

3.1. Introducción

En este capítulo se detalla el procedimiento seguido para analizar la aplicabilidad de las cenizas volantes para su uso en morteros.

El estudio partió de la caracterización de los materiales a utilizar en la fabricación de los morteros. Una vez caracterizados, se procedió a la fabricación de morteros de diferentes dosificaciones reduciendo el porcentaje de cemento y añadiendo un porcentaje de cenizas que podía ser mayor, igual o menor al cemento. Una vez analizadas las diferentes propiedades mecánicas (compresión y flexotracción) obtenidas por los morteros, se pasó a realizar una segunda fase experimental en la cual se intentó optimizar las propiedades mecánicas manteniendo la misma trabajabilidad en todos los morteros frescos para poder utilizar estos resultados en la aplicación de las cenizas en la fabricación de hormigones. Finalmente, se procedió al estudio de los morteros de albañilería siguiendo las dosificaciones utilizadas comúnmente en la zona de estudio. Para este análisis nos basamos en los resultados obtenidos en las anteriores fases experimentales, y, por lo tanto fabricando únicamente aquellas mezclas que habían presentado mejores resultados.

Para esta primera fase del estudio se fabricaron mezclas con diferentes cantidades de cenizas volantes, habiendo reducido una cantidad determinada de cemento con el objetivo de obtener el porcentaje óptimo de reducción de cemento y de adición de cenizas para fabricar morteros con las mismas propiedades mecánicas que el mortero de control.

3.2. 1ª FASE EXPERIMENTAL

3.2.1. Caracterización de los materiales

A continuación se muestran las propiedades más importantes de cada uno de los materiales utilizados en la fabricación de los morteros.

3.2.1.1. Cenizas volantes

Tal y como se ha descrito en el capítulo anterior las cenizas son residuos que se obtienen en las centrales térmicas por la combustión de carbón.

Peso específico: 2,0258 kg/dm³

Superficie específica: 1993,53 cm²/g

Humedad: 0,55%

Pérdida por ignición: 0,689%/0,627% - 0,69%/0,654%

Composición química:

Tabla 2. Composición química cenizas volantes

		% en peso por componentes									
		Fe₂O₃	MnO	TiO₂	CaO	K₂O	P₂O₅	SiO₂	Al₂O₃	MgO	Na₂O
ME-CV		4.74	0.04	1.54	2.51	1.26	0.22	63.01	24.73	0.79	0.01<LL
		4.66	0.04	1.52	2.52	1.25	0.21	62.71	24.67	0.78	0.01<LL

Propiedades mecánicas:

Reactividad con cal-resistencia a compresión (N/mm²): 4.0

Resistencia a compresión a 28 días (N/mm²): 34.4

Análisis químico de metales pesados:

1.- Pb (mg/kg): 0.15

2.- Cu (mg/kg): 0.18

3.- Zn (mg/kg): < 0.1

4.- Mn (mg/kg): 0.42

5.- B (mg/kg): <0.10

En la figura 5 se puede apreciar la distribución granulométrica de las cenizas volantes a estudiar:

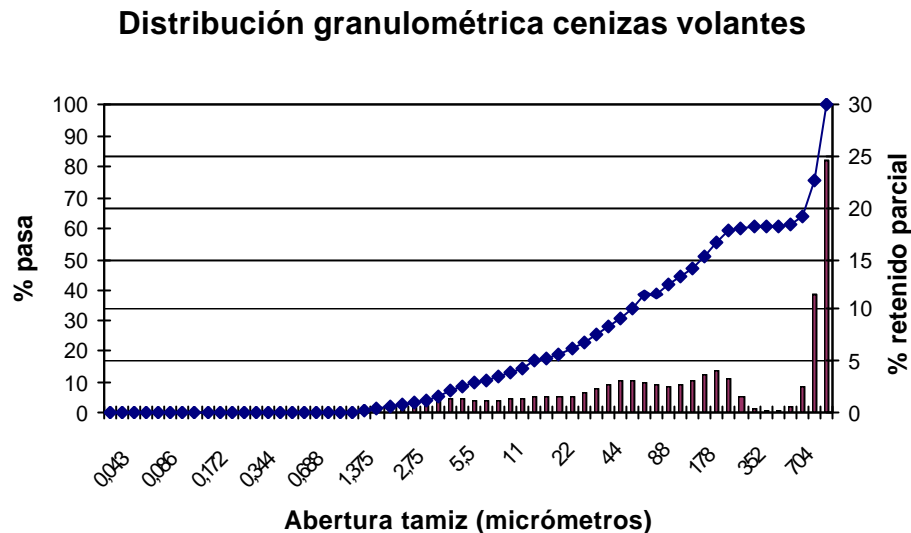


Figura 5. Granulometría cenizas volantes

La norma americana ASTM C 618 especifica ciertas propiedades que deben cumplir las cenizas volantes y otras puzolanas para su uso como mezcla mineral en el hormigón. Las siguientes especificaciones se utilizarán como criterio inicial para su aceptación en el estudio llevado a cabo:

- $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 70\%$
- $\text{SO}_3 = 5.0\%$
- $\text{LOI} = 6.0\%$ (se puede aceptar hasta un 12% si lo avalan algún estudio)

En la instrucción de hormigón estructural [11], las limitaciones son las siguientes:

- $\text{SO}_3 = 3,0\%$
- $\text{Cl}^- = 0,10\%$
- $\text{CaO} = 1\%$
- $\text{LOI} = 5,0\%$

Contrastando con los datos anteriormente expuestos, se avala el uso de esas cenizas para el estudio llevado a cabo.

3.2.1.2. Cemento

Se trata de un cemento CEM I 42.5R y las siguientes propiedades:

Densidad: 3.01g/cm^3 .
Superficie específica: $3300\text{ cm}^2/\text{g}$
Expansión Le Chatelier: 0.5mm
Inicio fraguado: 100 min
Final fraguado 150 min

Análisis químico:

- Pérdida por calcinación: 3.0%
- SO₃: 3.4%
- Cl⁻: 0.01%
- Residuo insoluble: 0.65 %

Propiedades mecánicas:

Compresión a 1 día: 13 MPa
Compresión a 2 días: 25 MPa
Compresión a 7 días: 40 MPa
Compresión a 28 días: 52 MPa

3.2.1.3. Arena

Se trata de una arena normalizada que sigue la norma UNE EN 196-1:1996 y se suministra en bolsas de 1350 ± 5g como las de la figura 6.



Figura 6. Arena utilizada para la fabricación de morteros

3.2.2. Fabricación y curado de las probetas

Se siguieron las especificaciones de la norma española UNE 80-101-88 o la norma europea EN 196-1 tanto en el tamaño y características de las probetas, como en el propio proceso de fabricación y conservación de las mismas, que se detallan en los siguientes apartados de este capítulo. Las probetas de mortero fabricadas fueron prismáticas de dimensiones 160x40x40mm en los moldes de acero disponibles en el laboratorio. En cada amasada de mortero se llenó un molde consiguiendo fabricar una serie de tres probetas.

3.2.2.1. Dosificación

Como ya se ha dicho, se fabricaron probetas prismáticas de mortero, compuesto por una relación 1:3 (cemento:arena) en peso y con una relación agua/cemento de 0,5.

Se fabricaron series de probetas sacando respectivamente un 20, un 30 y un 40% del peso del cemento respecto los morteros de control. En cada una de estas series se añadió un 10, 20, 23, 30 y un 33% de cenizas volantes respecto al peso total del material cementicio (lo que equivale respectivamente a un 11.1, 25, 30, 42.8 y 50% respecto al peso de cemento). Además cada mezcla se fabricó 4 veces para poder realizar los ensayos de resistencia a compresión y a flexotracción a 7, 28, 56 y 90 días. En total, se fabricaron 16 mezclas que suponen 64 series de 3 probetas cada una, lo que suma un total de 192 probetas de mortero.

3.2.2.2. *Marcado de las probetas*

Se estableció un código para clasificar las probetas y saber en qué momento se debían retirar de la cámara húmeda (donde se realizó el curado con unas condiciones de 21°C y 100% de humedad) para realizar los correspondientes ensayos.

El criterio utilizado fue el siguiente:

- Las probetas de mortero de control se marcaron con las letras MC y con un número que va del 1 al 4. El número indica la edad de la rotura considerando que el número 1 se rompe a 7 días, el 2 a 28, el 3 a 56 y el 4 a 90 días.
- Las probetas con adiciones de cenizas volantes están marcadas con las letras MCV seguidas de 3 códigos de números. El primer número indica la cantidad de cemento sacada respecto al mortero de control. Se trata de un número que va del 1 al 3, considerando que el número 1 ha reducido en un 20 % la cantidad de cemento, el 2 un 30 % y el número 3 un 40%. El segundo número indica el porcentaje en peso de cenizas volantes añadidas sobre el total del material cementicio. Finalmente el último número indica directamente la edad a la que se debe romper.

Así, una probeta que esté marcada de la siguiente manera:

MCV-3-23-56

Representa una probeta con adición de cenizas volantes a la que se le ha sacado un 40% del cemento (número 3), con un 23% de cenizas volantes respecto la masa total de material cementicio y que se debe ensayar a los 56 días de edad.

Siguiendo estas propiedades, las dosificaciones utilizadas fueron las que se muestran en la tabla 3:

Tabla 3. Dosificaciones mortero 1ª fase experimental

DOSIFICACIÓN MORTERO	% cemento quitado	% cenizas *1	1a FASE EXPERIMENTAL			
			Cemento (g)	Arena (g)	Agua (g)	Cenizas (g)
1 MC	0	0 (0) *2	450,0	1350,0	225,0	0,0
2 MCV-1-10	20	10 (11.1) *2	360,0	1200,0	200,0	40,0
3 MCV-1-20	20	20 (25) *2	360,0	1350,0	225,0	90,0
4 MCV-1-23	20	23 (30) *2	360,0	1404,0	234,0	108,0
5 MCV-1-30	20	30 (42.8) *2	360,0	1542,3	257,1	154,1
6 MCV-1-33	20	33 (50) *2	360,0	1620,0	270,0	180,0
7 MCV-2-10	30	10 (11.1) *2	362,3	1207,5	201,3	40,3
8 MCV-2-20	30	20 (25) *2	315,0	1181,3	196,9	78,8
9 MCV-2-23	30	23 (30) *2	315,0	1228,5	204,8	94,5
10 MCV-2-30	30	30 (42.8) *2	315,0	1349,4	224,9	134,8
11 MCV-2-33	30	33 (50) *2	315,0	1417,5	236,3	157,5
12 MCV-3-10	40	10 (11.1) *2	351,0	1170,0	195,0	39,0
13 MCV-3-20	40	20 (25) *2	351,0	1316,3	219,4	87,8
14 MCV-3-23	40	23 (30) *2	324,0	1263,6	210,6	97,2
15 MCV-3-30	40	30 (42.8) *2	270,0	1156,7	192,8	115,6
16 MCV-3-33	40	33 (50) *2	270,0	1215,0	202,5	135,0

*1 En porcentaje sobre la masa total de material cementicio

*2 En porcentaje sobre el peso de cemento

3.2.2.3. Amasado

Para la fabricación siguiendo la norma UNE 80-101, hemos de añadir antes que nada el agua y el cemento, junto con las cenizas si es el caso, en el cuenco normalizado de la amasadora mecánica. Entonces ponemos el cuenco en la amasadora y la ponemos en marcha, siguiendo el procedimiento normalizado:

1. Amasamos a velocidad lenta durante 30 segundos.
2. Durante los siguientes 30 segundos, también a baja velocidad, introduciremos toda la arena.
3. A continuación dejaremos que amase durante 30 segundos más a velocidad rápida.
4. Parar la amasadora durante 90 segundos, de los cuales los 15 primeros usaremos para quitar el mortero adherido fuera de la zona de amasado.
5. Continuar el amasado a velocidad rápida durante 60 segundos más.

3.2.2.4. Medida de la consistencia

Después del amasado se midió la consistencia según la norma ASTM C1437-99. Según esta norma se necesita una mesa de sacudidas con la superficie circular de 255 ± 2.5 mm de diámetro y un molde de bronce de forma troncocónica de 50 ± 0.5 mm de altura y de superficies superior e inferior

circulares con diámetros de 70 ± 0.5 mm y 100 ± 0.5 mm respectivamente. El espesor del molde debe ser de 5 mm y con acabado liso en todas sus caras.

El molde se llena en 2 tongadas, cada una de las cuales recibe una ligera compactación por medio de la caída de un palo de madera de forma cilíndrica (acción que se realiza 10 veces por cada compactación). Esta compactación sirve únicamente para asegurar que el molde se llene completamente. El exceso de mortero después de la 2ª compactación se corta y se retira del molde.

A continuación se retira el molde para realizar 25 sacudidas en 15 segundos. Después se procede a medir los 4 diámetros de mortero siguiendo las marcas de la parte superior de la mesa de sacudidas (hasta la precisión del milímetro más cercano).

La consistencia se mide como el incremento del diámetro medio de la masa de mortero, expresado como el porcentaje del diámetro original.



Figura 7. Mesa de sacudidas y molde utilizados para medir la consistencia de los morteros

3.2.2.5. Enmoldado

Las probetas se han de poner en el molde después de haberlas amasado. Con el molde y la tolva unidos a la mesa de la compactadora, se introducirá desde el cuenco de la amasadora la primera de las dos capas de mortero en cada uno de los tres compartimentos del molde. Se compacta esa primera capa con sesenta golpes en 60 segundos, se introduce la segunda capa y se vuelve a compactar con otros sesenta golpes más.

Después de esto sólo queda por retirar la tolva y eliminar con una espátula el exceso de mortero, alisando la superficie superior de las probetas. Un detalle importante aquí es etiquetar las probetas, pues después será imposible diferenciarlas.

3.2.2.6. Curado de las probetas

Una vez se haya fabricado una serie y esté marcada adecuadamente, se deberá introducir en una cámara húmeda, que debe estar próxima al 100% de humedad y a una temperatura aproximada de 21°C, hasta que llegue el momento del desmoldeo que se realizará transcurridas 24 horas.

Después de las primeras 24 horas, se desmoldean las probetas y se introducirán inmediatamente en agua para acabar de hacer el curado hasta el momento de los ensayos, a 7, 28, 56 o 90 días.

3.2.2.7. Limpieza de los moldes

Aunque no tiene relación directa con la fabricación de las probetas, es muy importante la limpieza y montaje de los moldes para poderlos usar posteriormente de nuevo. Es una de las tareas más pesadas y lentas de todo el proceso de fabricación. Primero se debe rascar y eliminar el mortero pegado a las paredes del molde con una espátula, después acabamos de limpiar con un trapo y engrasamos todas las piezas para acabarlo montando de nuevo.

3.2.3. Ensayos de las probetas

El estudio se centró básicamente en el estudio de la resistencia de las probetas tanto a flexotracción como a compresión. Para ello, se utilizaron 2 prensas diferentes del laboratorio.

3.2.3.1. Ensayo de flexotracción

Para el ensayo de flexotracción, se siguieron las especificaciones que marcan las normas UNE 80-101 EN-196-1. Se utilizó una prensa que expresa los resultados en un papel milimetrado en el cual, a partir del factor de conversión correspondiente, podremos obtener la relación existente entre el desplazamiento de su puntero con la carga aplicada. La carga se aplica a una velocidad de 5 kp/s en el centro de la probeta que se coloca de forma biapoyada con una luz de 100mm. La resistencia a flexotracción se estima a partir de la siguiente expresión:

$$R_f = \frac{1.5 \cdot F_f \cdot l}{b^3} \quad (2)$$

Donde:

- F_f carga de rotura
- l distancia entre soportes (100 mm)
- b lado de la sección cuadrada de la probeta

A continuación se muestran algunas fotos relativas al ensayo de flexotracción:



Figura 8. Imagen de la prensa utilizada para el ensayo de flexotracción en morteros (1)



Figura 9. Ensayo de flexotracción en morteros (2)

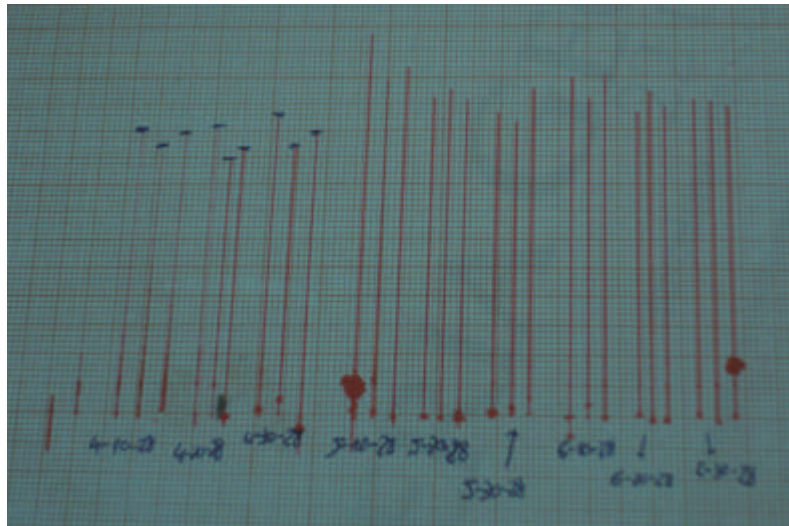


Figura 10. Expresión de resultados de flexotracción

3.2.3.2. Ensayo a compresión

Para el ensayo de compresión seguimos las especificaciones de la norma UNE 80-101-88 correspondiente a la Norma Europea EN 196-1 y se utilizó una prensa conectada a un ordenador en el que se podían visualizar los resultados y obtener informes más detallados. Con esta prensa se pudieron obtener los gráficos tensión-deformación para cada probeta ensayada.

La carga se aplicó a una velocidad de 240 ± 20 kp/s sobre una superficie cuadrada de 4×4 cm² correspondiente a uno de los lados de la probeta. La resistencia a compresión se calcula según la siguiente expresión:

$$R_c = \frac{F_c}{S} \quad (3)$$

donde:

F_c carga de rotura

S superficie de aplicación de la carga ($= 4 \times 4 \text{ cm}^2 = 1600 \text{ mm}^2$)

En las siguientes imágenes se puede ver la prensa utilizada para el ensayo y el ordenador con el que se cuantificaron los resultados, así como también una parte del informe obtenido por el programa:



Figura 11. Imagen del ensayo de compresión en morteros



Figura 12. Imagen de la prensa utilizada para el ensayo de compresión en morteros

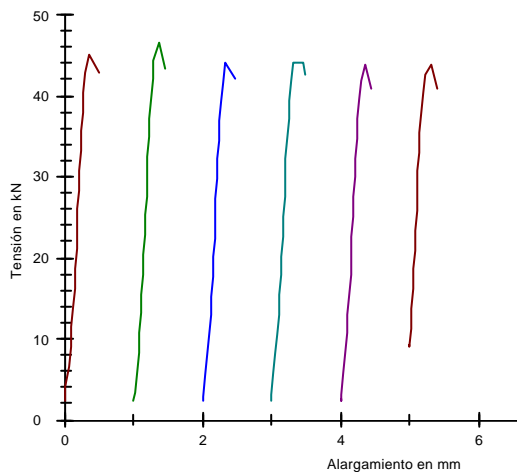


Figura 13. Resultados obtenidos en el ensayo de compresión (1)

Nr	F_{max} kN	S_m N/mm ²	e_m mm	x_1 mm	x_2 mm
1	42,65	26,66	0,39	40,00	40,00
2	42,68	26,67	0,32	40,00	40,00
3	43,45	27,16	0,47	40,00	40,00
4	42,33	26,46	0,46	40,00	40,00
5	45,60	28,50	0,42	40,00	40,00
6	41,58	25,99	0,34	40,00	40,00

Figura 14. Resultados obtenidos en el ensayo de compresión (2)

Cada probeta se ensayó primeramente a flexotracción, obteniendo de cada una de ellos dos mitades que fueron después ensayadas a compresión. Así pues, para cada dosificación y para cada edad se consiguieron 3 resultados de resistencia a flexotracción y 6 de compresión.



Figura 15. Probetas ensayadas a flexotracción para ser ensayadas a compresión

3.3. Resultados y discusión 1ª fase experimental

3.3.1. Consistencia

La primera campaña experimental proporcionó 4 valores de consistencia para cada una de las dosificaciones. A partir de estos resultados se calculó el valor promedio que nos permitió caracterizar la trabajabilidad de las mezclas y observar sus propiedades en estado fresco.

Los resultados obtenidos se pueden ver gráficamente en la figura 16:

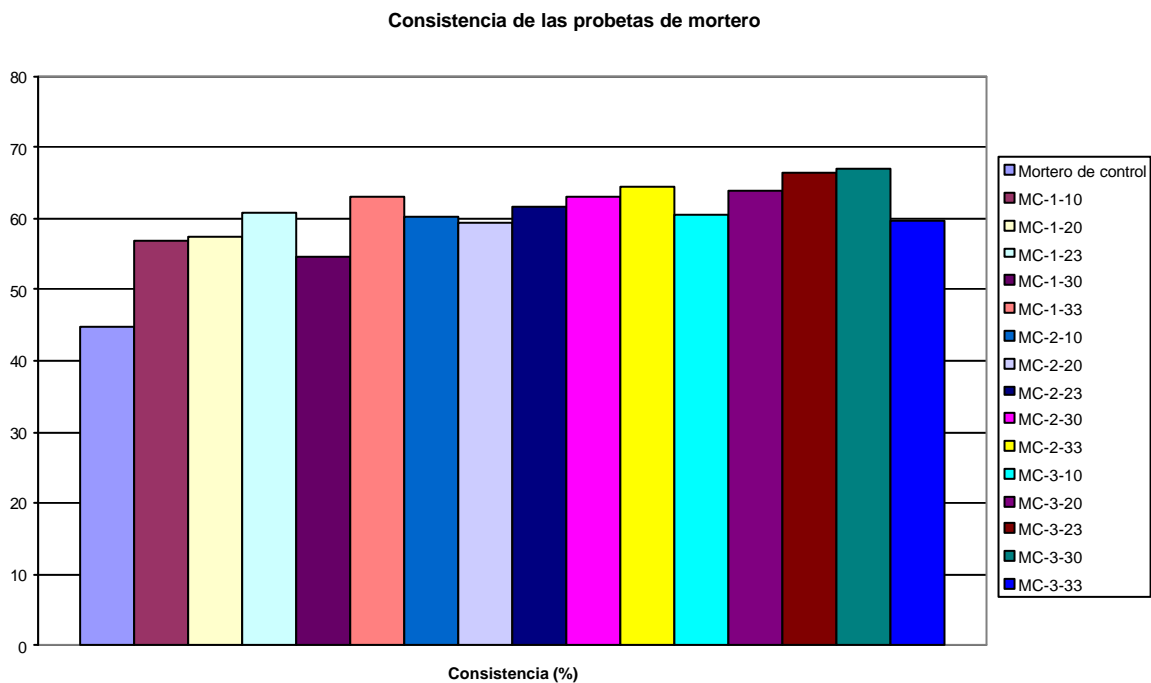


Figura 16. Resultados consistencia 1ª fase experimental

En el gráfico de la figura 16 se puede ver que la consistencia aumenta a medida que se reduce la cantidad de cemento y aumenta la cantidad de cenizas presentes en la mezcla.

La trabajabilidad se puede relacionar con la relación agua/material cementicio de manera que a mayor relación agua/material cementicio, también aumenta la trabajabilidad. Pero también se puede aumentar la trabajabilidad añadiendo algún aditivo plastificante o cenizas volantes. Además, un valor alto de la relación agua/cemento suele desarrollar menores resistencias a igualdad del resto de parámetros. En las dosificaciones utilizadas en esta fase experimental, la relación que se ha mantenido constante es la de agua / (cemento + cenizas) con un valor de 0.5. A priori, este valor se puede considerar bajo, pero debemos tener en cuenta que la eficiencia de las cenizas no es la misma que la del cemento.

Aunque no se trate de dosificaciones de hormigones, hemos utilizado algunas especificaciones de la instrucción del hormigón estructural para proseguir con el análisis, así que los resultados obtenidos deben de considerarse en su justa medida. Así pues, según el artículo 37.3.2 de la instrucción EHE [11], se propone una modificación de la relación a/c para el caso de hormigones con cenizas volantes de la siguiente manera:

$$\frac{A}{C + k \cdot F} \quad (4)$$

Donde A es la cantidad de agua, C el contenido de cemento y F , el de cenizas volantes. En esta expresión se ha introducido un valor k que se define como el coeficiente de eficacia de las cenizas volantes. Según la instrucción, este valor no debe ser superior a 0.30. También se puede adoptar un valor de hasta 0.40 (en el caso de edificación) o de 0.50 (en el caso de las obras públicas) siempre que ello se deduzca de la realización de un exhaustivo estudio experimental previo donde se consideren no sólo aspectos resistentes, sino también de durabilidad.

Cogiendo el valor de 0.3 como adecuado a nuestras cenizas volantes, se obtienen las siguientes relaciones agua/material cementicio:

Tabla 4. Relación agua-material cementicio morteros fabricados

MORTERO		A/(C+k·F)
1	MC	0,5000
2	MCV-1-10	0,5376
3	MCV-1-20	0,5814
4	MCV-1-23	0,5963
5	MCV-1-30	0,6328
6	MCV-1-33	0,6522
7	MCV-2-10	0,5376
8	MCV-2-20	0,5814
9	MCV-2-23	0,5963
10	MCV-2-30	0,6327
11	MCV-2-33	0,6522
12	MCV-3-10	0,5376
13	MCV-3-20	0,5814
14	MCV-3-23	0,5963
15	MCV-3-30	0,6328
16	MCV-3-33	0,6522

Como se puede ver, estos valores son ligeramente superiores al valor de 0.5 que habíamos considerado en el momento de hacer la dosificación.

Este aspecto lo tendremos en cuenta en el momento de plantear la dosificación de la segunda fase experimental.

A partir de estos resultados se plantea la posibilidad de encontrar una relación entre los valores de la consistencia y la relación agua/material cementicio para poder ajustar un valor de k más apropiado para las cenizas volantes en cuestión.

Si nos representamos en un gráfico el valor de la consistencia con su respectiva relación agua/material cementicio obtenemos la figura 17:

Relación A/(C+kF) - consistencia

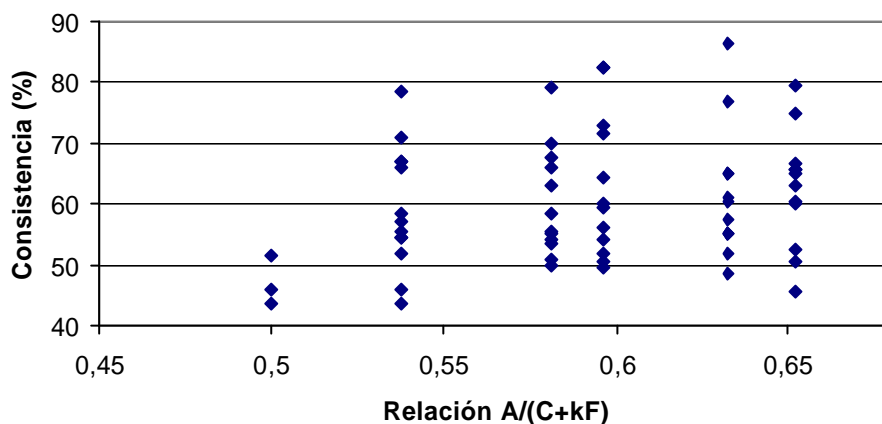


Figura 17. Relación agua/material cementicio - consistencia

Según este gráfico, podemos observar que existen 6 relaciones agua/material cementicio con diferentes valores de la consistencia. Es cierto que la dispersión es muy grande en cada uno de ellos, como se puede ver en la tabla 5:

Tabla 5. Desviación estándar valores obtenidos de la relación agua/material cementicio

A/(C+kF)	Desviación estándar
0,5000	5,406
0,5376	10,063
0,5814	8,884
0,5963	11,854
0,6328	10,842
0,6522	9,671

Pero, a pesar de ello, podemos intuir una cierta relación lineal entre ellos. En la figura 18 se representa el valor promedio de los valores de la consistencia y además se ha añadido la correspondiente recta de regresión:

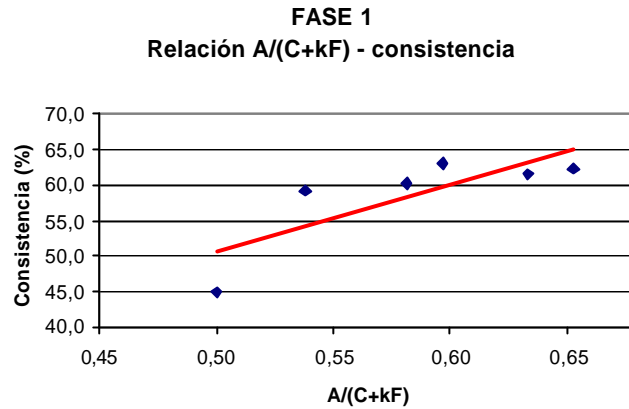


Figura 18. Regresión datos relación agua/material cementicio – consistencia

El coeficiente de correlación de esta regresión lineal tiene un valor de 0,8052, con lo cual es un ajuste que se puede empezar a considerar como adecuado.

Si planteamos la posibilidad de que se pueda ajustar a otro tipo de relación con un programa estadístico, observaremos que quizá la relación lineal no es la más adecuada. Así pues, podemos obtener que, si lo intentamos ajustar a una expresión de tipo cuadrática, el coeficiente de correlación obtenido será superior, concretamente de 0,957 y respondería a la siguiente expresión:

$$Consistencia(\%) = -1372.945 \left(\frac{A}{C+k \cdot F} \right)^2 - 1678.84 \left(\frac{A}{C+k \cdot F} \right) - 449.842 \quad (5)$$

3.3.2. Resistencia a flexotracción

Los resultados obtenidos a partir de esta primera fase experimental se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 6. Resultados flexotracción fase 1

Código probeta	Flexotracción (N/mm ²)			
	7 días	28 días	56 días	90 días
MC	2,93	6,44	7,61	9,01
MCV-1-10	3,39	8,27	5,69	9,57
MCV-1-20	2,81	8,35	5,64	9,40
MCV-1-23	2,67	7,41	5,30	9,44
MCV-1-30	2,42	6,36	5,73	9,24
MCV-1-33	2,16	5,38	4,99	8,78
MCV-2-10	3,04	6,47	8,54	9,67
MCV-2-20	2,96	5,64	8,64	9,71
MCV-2-23	2,63	5,11	7,96	9,73
MCV-2-30	2,46	4,70	8,89	9,63
MCV-2-33	2,26	4,82	8,27	9,32
MCV-3-10	3,35	5,38	8,17	9,48
MCV-3-20	2,83	5,03	9,22	9,28
MCV-3-23	2,54	4,88	8,42	9,20
MCV-3-30	2,36	4,60	7,84	9,17
MCV-3-33	2,09	4,72	7,25	9,03

Estos resultados se entienden mejor de forma gráfica, como se puede ver en la figura 19:

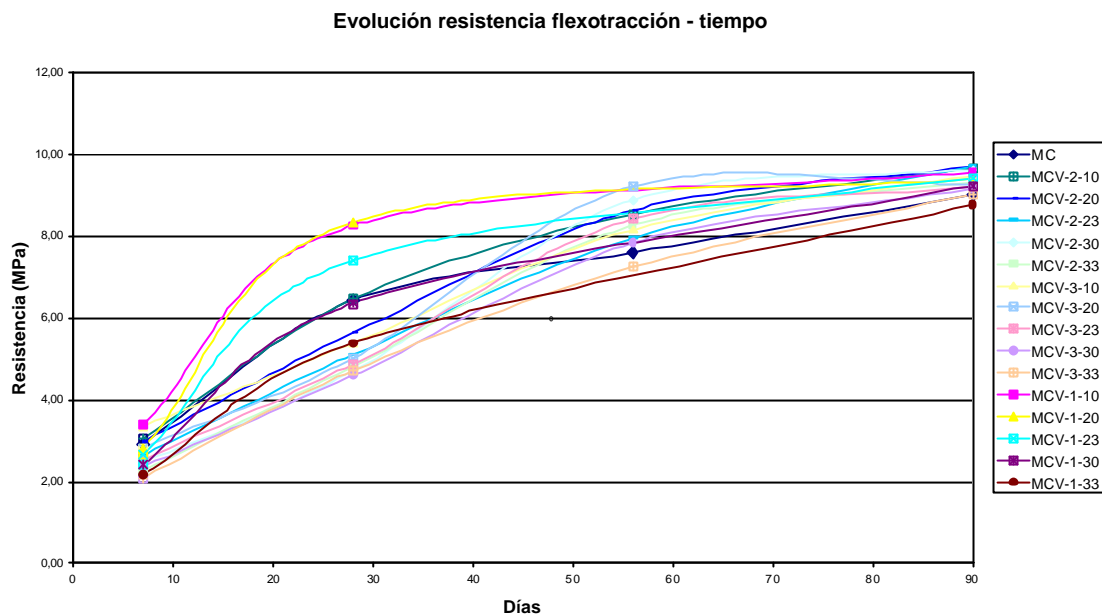


Figura 19. Evolución resistencia flexotracción-tiempo fase 1

En este gráfico se ha suprimido los resultados correspondientes a la resistencia a flexotracción a 56 días de las dosificaciones MCV-1-10, MCV-1-20, MCV-1-23, MCV-1-30 y MCV-1-33 porque se habían obtenido resultados inferiores a la edad de 28 días. El error se ha atribuido a un error de la máquina, puesto que no es posible que se pierda resistencia y luego se gane. Es fácil pensar que fue un error de la máquina en ese día ya que todas esas probetas se ensayaron en un periodo de tiempo muy corto.

Se ha marcado con un trazo con mayor grosor los resultados correspondientes al mortero de control.

Se puede observar que el mortero de control es uno de los que mayores resistencias iniciales desarrolla (véase a 28 días), junto con los morteros con menor reducción de cemento (es decir, los de la serie MCV-1, reducción del 20%). Esto es debido a que el cemento es el que proporciona la resistencia inicial porque es el primero en hidratarse y producir el CSH. Es importante recordar que las cenizas volantes reaccionan más tarde porque reaccionan con uno de los productos de la hidratación del cemento. Con el paso del tiempo, el resto de morteros consiguen su resistencia que, en la mayoría de casos es superior al correspondiente al mortero de control de 9.01 N/mm².

En general, podemos decir que se ha conseguido mayores resistencias a flexotracción a 90 días con los morteros de cenizas volantes que con el mortero de control.

A continuación se hará un análisis de la resistencia de los morteros a partir del porcentaje de cemento que se le haya sacado. Así, podremos ver en los

siguientes gráficos la evolución de la resistencia según el porcentaje de cenizas presente en la mezcla.

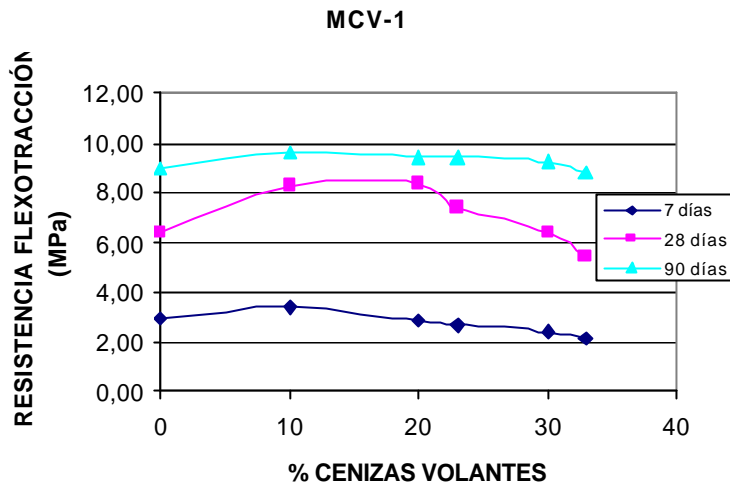


Figura 20. Resistencia flexotracción MCV-1

En la figura 20 podemos ver la evolución de las resistencias a flexotracción desarrolladas por las mezclas a las cuales se les ha sacado un 20% de cemento. Si nos fijamos en la curva correspondiente a 90 días de edad se puede ver que la resistencia conseguida es prácticamente la misma para todos los porcentajes de cenizas ensayados (oscila entre los 8.78 y los 9.57 MPa). Se trata de un buen resultado porque indica que con estas dosificaciones se pueden obtener las mismas resistencias a flexotracción. También se puede observar que las mezclas con mayor cantidad de cenizas volantes consiguen la resistencia más tarde.

Del mismo modo que se ha analizado la resistencia a flexotracción de las probetas con una reducción del 20%, se procede a hacer el mismo análisis de las probetas a las cuales se ha sacado un 30 % de cemento (MCV-2):

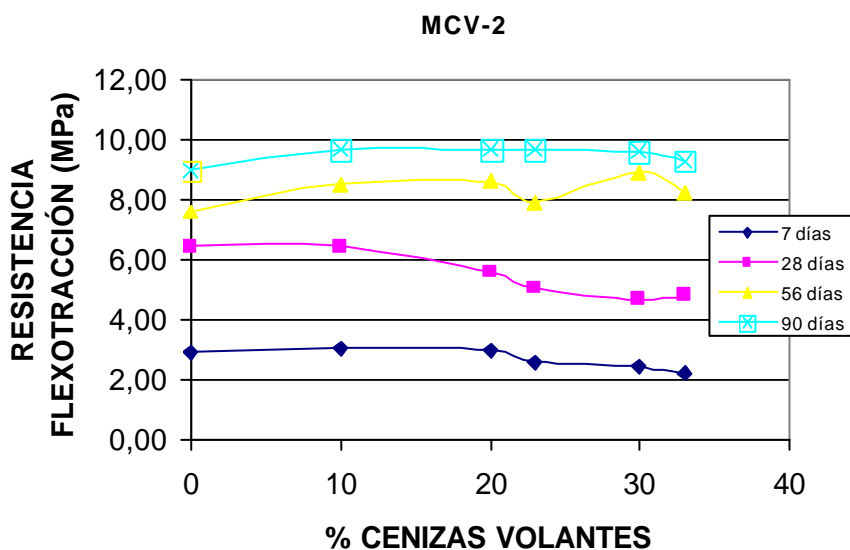


Figura 21. Resistencia flexotracción MCV-2

A la vista de este gráfico, se puede hacer un análisis similar al anterior, ya que las resistencias conseguidas a los 90 días en estas mezclas son todas superiores a las del mortero de control, pero también son muy similares. Además, se sigue observando que el mortero de control, es el que más rápidamente desarrolla su resistencia y que, a mayor cantidad de cenizas volantes, se tarda más tiempo en conseguir la resistencia.

Análogamente se mostrarán los resultados correspondientes a las mezclas elaboradas sin el 40% del cemento:

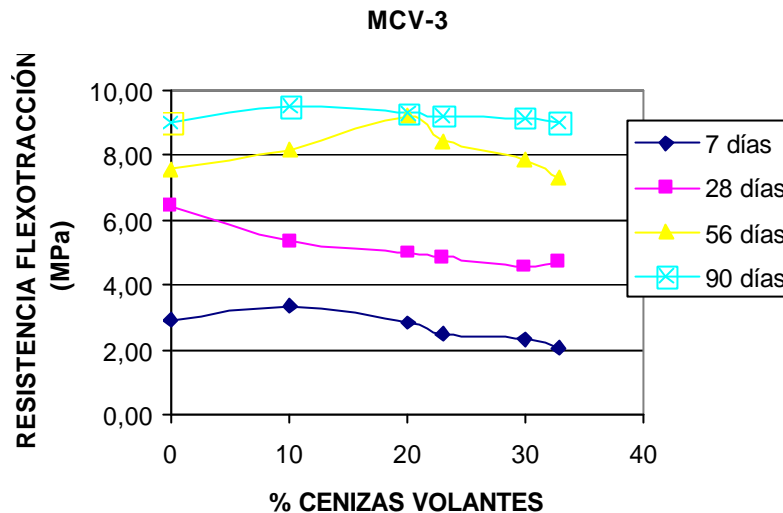


Figura 22. Resistencia flexotracción MCV-3

Se puede comprobar que los resultados comentados para los dos gráficos anteriores son aplicables también en este caso, remarcando especialmente la similitud entre todos los resultados obtenidos a los 90 días.

En resumen, se puede decir que las probetas de mortero de cemento fabricadas con las cenizas volantes tienen una resistencia a 90 días muy parecida a las de mortero de control. Además, las probetas con cenizas desarrollan la resistencia a edades superiores aumentando esta edad a mayor porcentaje de cenizas.

Las dosificaciones que han proporcionado mayores resistencias a flexotracción han sido las de la serie 2 (las que han reducido un 30% la cantidad de cemento) con un máximo en la mezcla MCV-2-20. Es importante destacar también los resultados de las mezclas de la serie 3, concretamente la correspondiente a MCV-3-10, ya que se trata de probetas a las cuales se les ha sacado un 40% de la cantidad de cemento. Uno de los objetivos del estudio es reducir los costes de construcción, por lo tanto nos interesa reducir la presencia de cemento en las mezclas, y por ello es importante este resultado.

3.3.3. Resistencia a compresión

Los resultados obtenidos a partir de las probetas ensayadas a compresión se presentan en la tabla 7. Recordemos que por cada probeta que habíamos

fabricado se obtenía un valor para la resistencia a flexotracción y dos para la compresión, una para cada una de las mitades en las que se divide la probeta una vez se ha ensayado a flexotracción:

Tabla 7. Resistencia a compresión fase 1

Código probeta	Compresión (N/mm ²)			
	7 días	28 días	56 días	90 días
MC	31,53	44,83	49,90	50,98
MCV-1-10	29,05	40,61	42,56	48,67
MCV-1-20	23,00	39,26	42,47	49,79
MCV-1-23	22,85	35,79	38,75	48,10
MCV-1-30	20,16	33,15	37,66	43,82
MCV-1-33	18,02	27,86	35,12	41,83
MCV-2-10	26,91	39,33	43,62	50,85
MCV-2-20	23,11	34,13	40,04	52,06
MCV-2-23	22,52	31,74	38,15	47,08
MCV-2-30	20,34	30,09	39,24	45,41
MCV-2-33	17,67	28,87	37,20	44,17
MCV-3-10	29,87	36,67	41,81	54,24
MCV-3-20	26,88	35,24	40,27	48,95
MCV-3-23	23,33	31,99	43,67	47,22
MCV-3-30	21,67	30,14	38,21	45,64
MCV-3-33	18,23	27,52	35,19	44,66

Para el cálculo de la media no se han considerado aquellos valores que diferían en $\pm 10\%$ del valor promedio de los resultados. Gráficamente se puede ver la evolución de las resistencias como sigue en la figura 23:

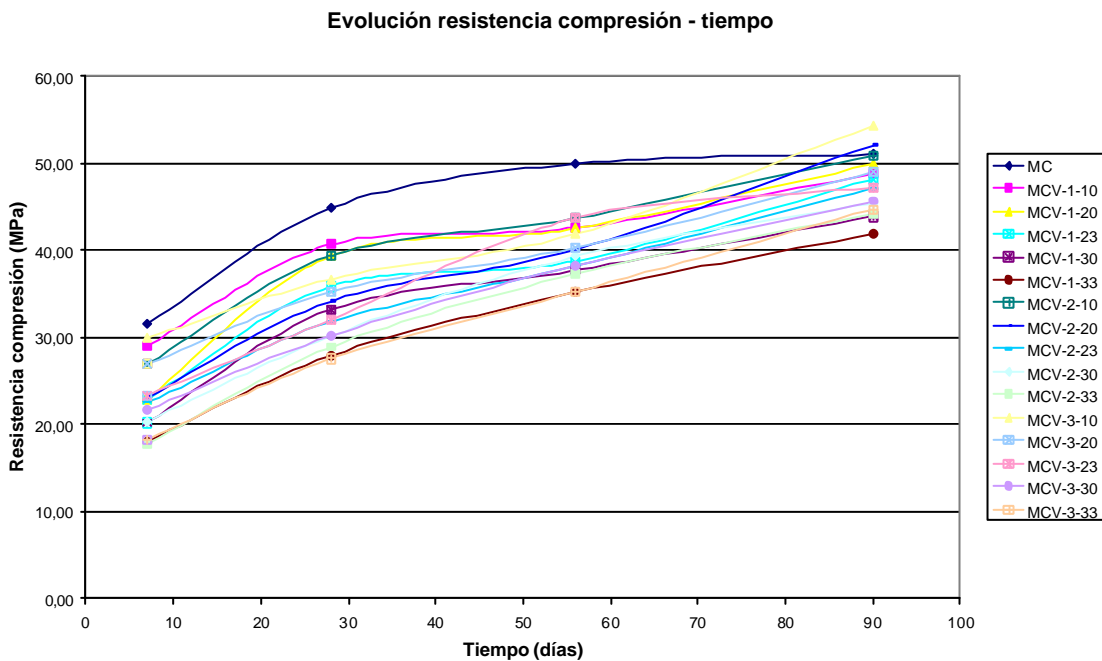


Figura 23. Evolución resistencia a compresión-tiempo fase 1

En esta figura, se puede observar cómo la evolución de la resistencia es superior en el caso del mortero de control hasta la edad de 56 días, edad a partir de la cual la pendiente de las probetas con cenizas volantes es superior a la del mortero de control. Como era de esperar, la resistencia en las mezclas con cenizas volantes se desarrolla más tarde puesto que las reacciones son más tardías y se producen en el momento que ha reaccionado todo el cemento generando la cal como subproducto que reacciona con las cenizas produciendo el silicato cálcico hidratado (CSH), de acuerdo con lo que expone Sear [1].

Del mismo modo que se había analizado en la resistencia a flexotracción, se puede observar que se han conseguido mezclas con cenizas volantes que han obtenido mayores resistencias a compresión a 90 días que el mortero de control.

A continuación, en las figuras 24, 25 y 26 se presentan consecutivamente los resultados correspondientes a las mezclas a las cuales se les ha sacado un 20%, un 30% y un 40% del cemento (series MCV-1, MCV-2 y MCV-3, respectivamente) para poder analizar los resultados en función de esta reducción:

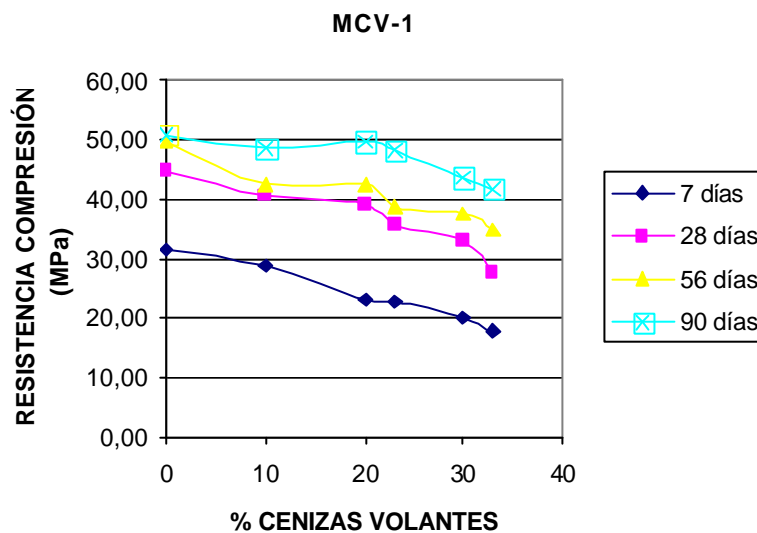


Figura 24. Resistencia compresión MCV-1

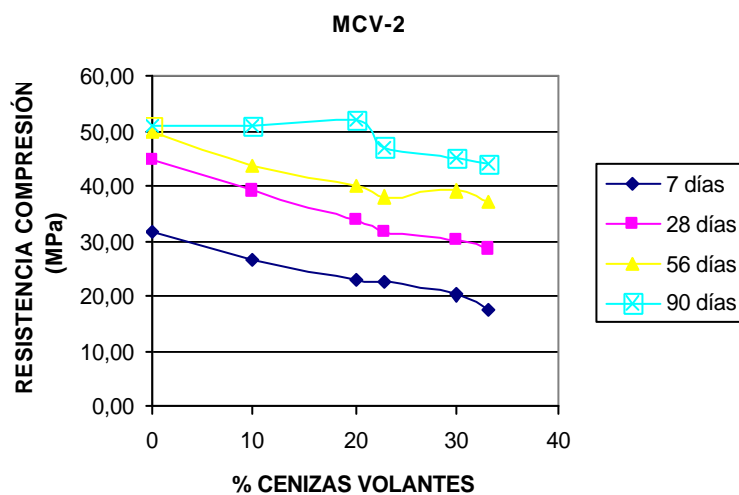


Figura 25. Resistencia compresión MCV-2

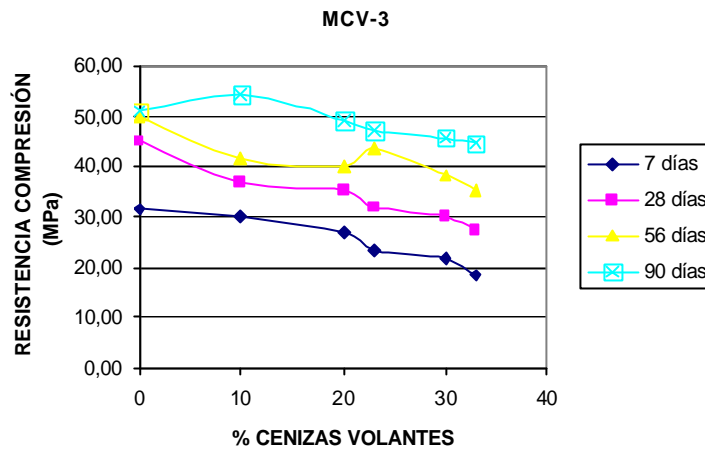


Figura 26. Resistencia compresión MCV-1

En cada uno de estos gráficos, podemos ver que los resultados obtenidos no son tan similares entre ellos como para el caso de la flexotracción. Así, las resistencias a 90 días difieren entre ellas a diferencia de lo que se había obtenido antes. En el caso de la compresión, a mayor cantidad de cenizas volantes no se obtienen valores tan elevados como en el mortero de control. A pesar de ello, se han podido observar algunas mezclas con un valor de la resistencia a compresión superior al del mortero de control a 90 días. Teniendo en cuenta que el mortero de control presenta un valor de la resistencia a 90 días de 50.98MPa, las mezclas MCV-2-20 y MCV-3-10 han conseguido unas resistencias de 52.06 y 54.24 MPa respectivamente.

3.3.4. Relación resistencia a compresión-flexotracción / tiempo

A partir de los resultados anteriormente comentados se propone la posibilidad de analizar la evolución de la relación entre la resistencia a compresión y a flexotracción. De esta manera, se podrá ver cuál se desarrolla antes y en qué medida se hace.

Si nos representamos en un gráfico la mencionada relación en función del tiempo, se puede observar los resultados de la figura 27:

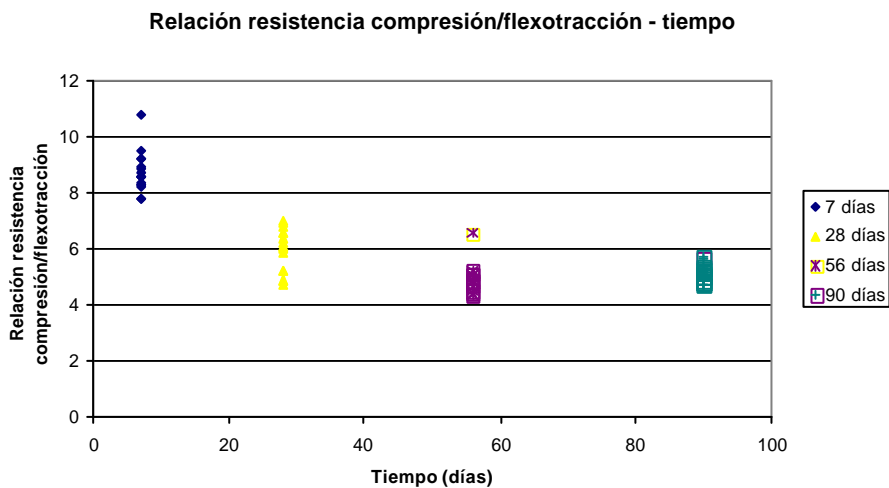


Figura 27. Evolución relación resist. comp./flexot. - tiempo fase 1

Así pues, se puede observar una tendencia a empezar con un valor de esta relación inicialmente alto (de aproximadamente 9) que se reduce rápidamente hasta llegar a un valor aproximadamente constante. Esto significa que en un principio se desarrolla la resistencia a compresión y, a medida que pasa el tiempo la resistencia a flexotracción va ganando importancia hasta llegar a un valor que parece estable de aproximadamente 5.

Si ahora comparamos esta relación separando los valores correspondientes al mortero de control de los morteros con cenizas, se obtienen las curvas representadas en la figura 28:

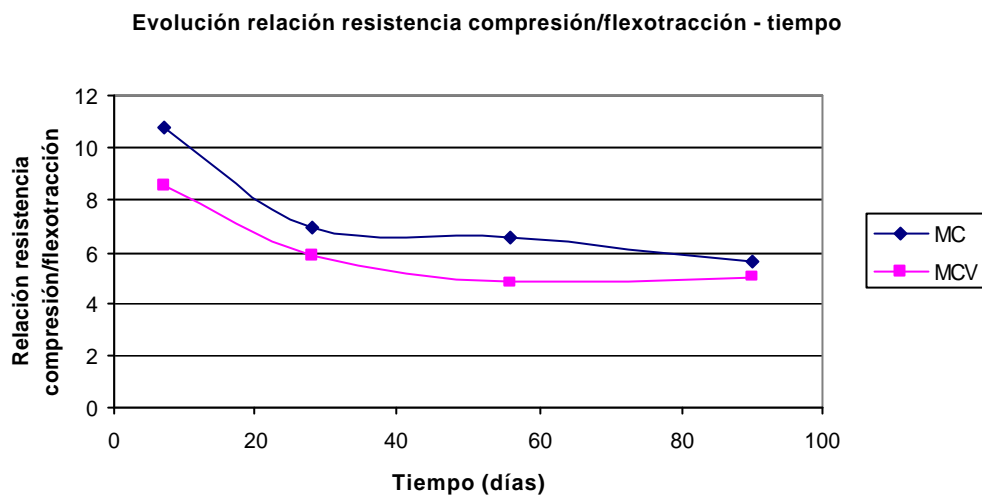


Figura 28. Resumen evolución relación resist. comp./flexot. - tiempo fase 1

Según esta curva se puede deducir que la resistencia a compresión en el caso del mortero de control es más importante que en el caso del mortero con cenizas volantes. Esto se traduce en que los valores medios de la resistencia a flexotracción son superiores a los de compresión comparativamente en el caso de los morteros con cenizas volantes. Esto se puede justificar con el hecho que el hidróxido de calcio, producto de la hidratación del cemento, se concentra alrededor del árido debilitando la zona de transición entre el árido y la pasta. Debido a que las cenizas volantes reaccionan con este hidróxido de calcio, produciendo un ligante durable, reducen la cantidad de éste en la mezcla, haciendo que la zona de transición no sea tan débil. Como es la zona de transición la que determina la resistencia a flexotracción, al reducir los elementos que la debilitan hacen que aumente la resistencia a flexotracción de la mezcla.

Si intentamos aproximar nuestros resultados a una distribución con el objetivo de modelizar este comportamiento, nos podemos plantear diferentes tipos, entre los que destacarían la exponencial, logarítmica y la cuadrática. Analizando nuestros datos mediante un programa estadístico, se observa que, a pesar de nuestra intuición, los datos demuestran la correlación de los datos con estas distribuciones propuestas como se muestra en la tabla 8:

Tabla 8. Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros de la evolución relación resist. comp./flexot. – tiempo fase 1

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros		
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2
Lineal	,605	81,176	1	53	,000	7,894	-,038	
Logarítmica	,838	274,173	1	53	,000	11,206	-1,473	
Cuadrático	,895	220,665	2	52	,000	9,522	-,155	,001
Exponencial	,609	82,516	1	53	,000	7,792	-,006	

La variable independiente es tiempo (días).

Variable dependiente: Relación resist. Comp./flexo

Su gráfica asociada es la que se muestra en la figura 29:

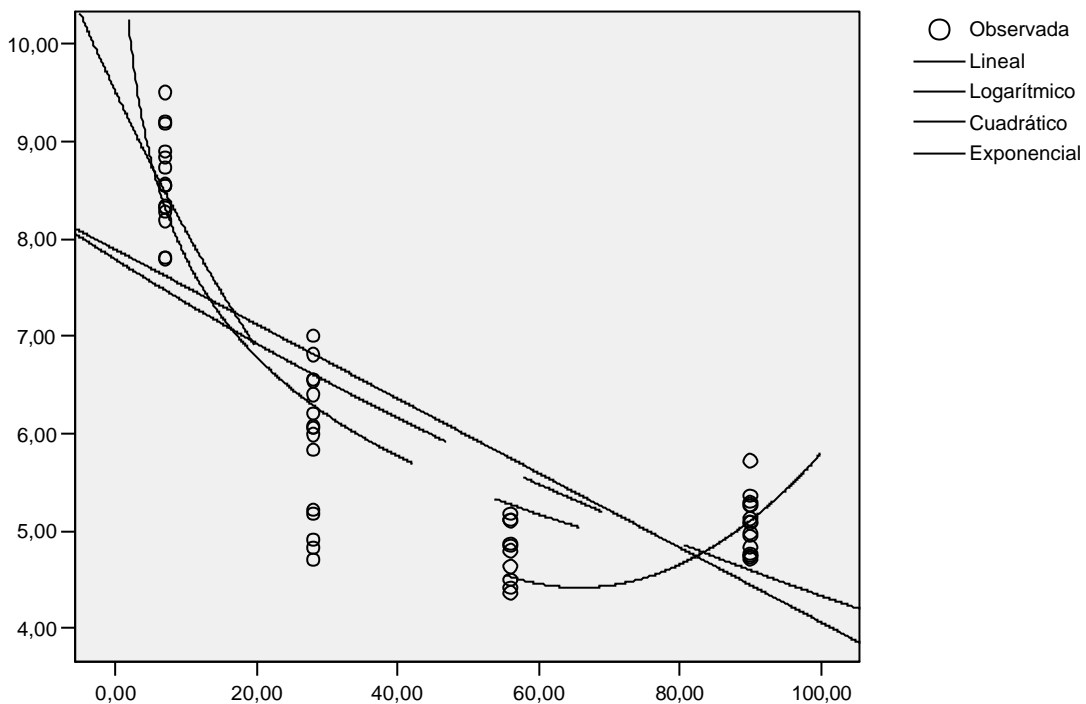


Figura 29. Modelización evolución relación resist. comp./flexot. – tiempo fase 1

Según todo esto, se indica que la mejor relación entre ambas variables se trataría de una relación de tipo cuadrático siguiendo la siguiente expresión:

$$rel_comp / flexo = 0.001t^2 - 0.155t + 9.522 \quad (6)$$

Obteniéndose así un coeficiente de correlación de 0.946, que se puede considerar como bastante aceptable. Físicamente esta relación debería estar acotada superiormente porque, si no, estaríamos diciendo que la resistencia a compresión puede llegar a ser infinitamente superior a la resistencia a flexotracción a edades avanzadas. Es más lógico pensar que llega un momento en que dicha relación se mantiene constante o, al menos, prácticamente estable. A falta de resultados a edades más avanzadas, es preferible acotar este modelo a las edades de las cuales disponemos resultados (hasta 90 días).

3.3.5. Análisis evolución resistencia según porcentaje de cenizas

A partir de los resultados obtenidos hasta el momento, nos planteamos la posibilidad de establecer un modelo que pueda prever la evolución de la resistencia.

Para llevar a cabo este estudio, hemos agrupado los resultados obtenidos en función del porcentaje de cenizas, considerando así que las cenizas empiezan a reaccionar en un momento determinado, después de haberse hidratado el cemento.

Este análisis se ha hecho considerando únicamente los resultados correspondientes a la resistencia a compresión, que son los más representativos y que sirven para caracterizar una mezcla. Se podría realizar un estudio análogo para la resistencia a flexotracción, pero no tendría mucha trascendencia porque se evita que este tipo de materiales llegue a trabajar de esta manera debido a su baja resistencia a este tipo de esfuerzos.

Se ha considerado que la resistencia a 90 días es la resistencia máxima que se desarrolla para poder tener un valor de comparación, aunque sabemos que puede seguir aumentando una vez pasado este tiempo. Según esto, se considera el valor de la resistencia a 90 días como el valor correspondiente al 100%.

Cabe esperar que a medida que aumente la cantidad de cenizas volantes presentes en la mezcla, el desarrollo de la resistencia se produzca a edades más avanzadas que en las mezclas con porcentajes inferiores.

Realizando los correspondientes cálculos a partir de nuestros datos, se obtendría la tabla 9:

Tabla 9. Evolución % resistencias a compresión y desviaciones asociadas fase 1

	Evolución % resistencias a compresión				Desviación estándar		
	7 días	28 días	56 días	90 días	7 días	28 días	56 días
0	61,84	87,94	97,88	100			
10	55,89	76,13	83,44	100	3,45	7,98	5,57
20	48,50	72,13	81,49	100	5,63	6,64	4,24
23	48,25	69,85	84,69	100	1,03	3,95	6,75
30	46,09	69,32	85,35	100	1,35	5,48	1,45
33	41,30	64,53	82,33	100	1,59	2,59	3,06

En la primera columna se puede observar el porcentaje de cenizas de la mezcla (cabe recordar que es un porcentaje en peso sobre el total del material cementicio de la mezcla). Las 3 últimas columnas corresponden a los valores de la desviación estándar de los datos de partida. De esta manera se puede ver que al no encontrar ningún valor muy elevado justifica el análisis que se presenta en este apartado. Además, también permite ver que a medida que aumenta el porcentaje de cenizas, la desviación disminuye. Este hecho está en consonancia con la idea que se ha ido comentando en apartados anteriores,

donde se decía que las mezclas con cenizas volantes no presentan tanta dispersión entre sus resultados.

Los resultados de la tabla anterior, se pueden representar gráficamente de la siguiente manera:

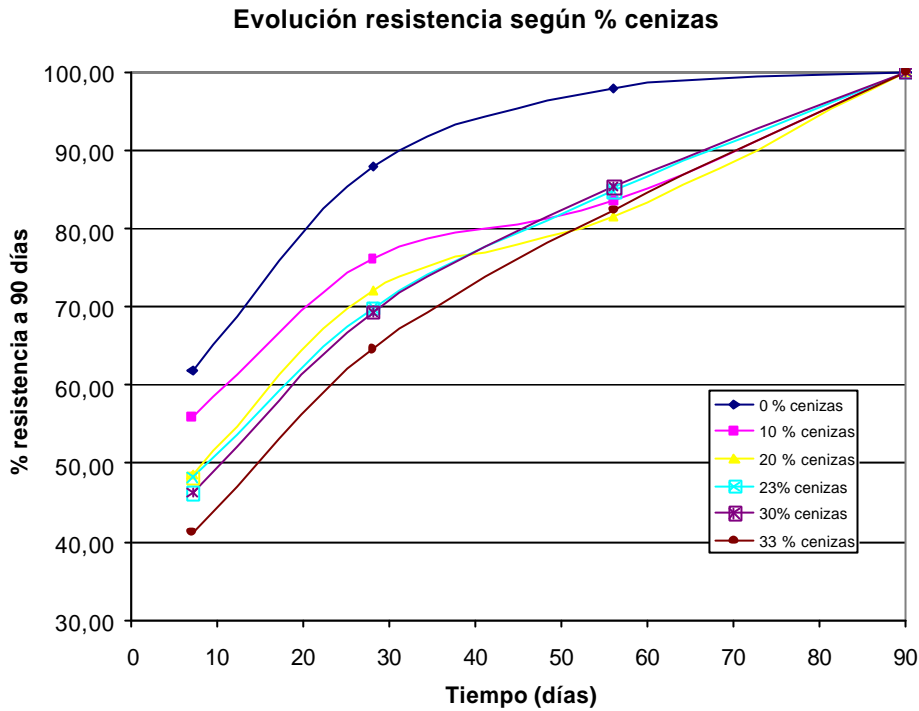


Figura 30. Evolución resistencia según % cenizas fase 1

Como se había previsto, a medida que aumenta la cantidad de cenizas, la resistencia se desarrolla a edades más avanzadas. A pesar de ello, se puede observar que las mezclas tanto del 10 como del 20% de cenizas, presentan un comportamiento que no sigue la tendencia del resto de porcentajes entre las edades de 28 y de 56 días, ya que disminuyen su pendiente para luego volver a conseguirla. También se destaca que todas las pendientes de las mezclas con cenizas son muy similares para las edades entre 56 y 90 días.

A partir de este análisis se pretende plantear un modelo que responda a este estudio de manera que se determine la resistencia de las mezclas en función del porcentaje de cenizas y de la edad del ensayo. Este modelo se debe considerar únicamente para los casos de estudio y partiendo de la dosificación del mortero de control (ya que el resto dependen de ella). Además, no debemos salir de los márgenes que se han estudiado porque, a priori, no sabemos cuál puede ser la evolución de una mezcla a la que se le reduzca la cantidad de cemento en porcentajes superiores al 40% o que tenga un porcentaje de cenizas superior al 33% respecto al total del material cementicio.

Para cada edad de ensayo se ha buscado aquel modelo de regresión que más se ajustara a los datos y se han obtenido los siguientes modelos:

$$\begin{aligned} R_{c_{7\text{días}}} \text{ (MPa)} &= -0.03 \cdot FA^2 - 0.284FA + 31.582 & r_{7\text{días}} &= 0.996 \\ R_{c_{28\text{días}}} \text{ (MPa)} &= -0.475 \cdot FA + 44.556 & r_{28\text{días}} &= 0.989 \\ R_{c_{56\text{días}}} \text{ (MPa)} &= 0.005 \cdot FA^2 - 0.547 \cdot FA + 49.255 & r_{56\text{días}} &= 0.975 \\ R_{c_{90\text{días}}} \text{ (MPa)} &= -0.012 \cdot (FA)^2 + 0.152 \cdot FA + 50.992 & r_{90\text{días}} &= 0.985 \end{aligned} \quad (7)$$

Donde FA representa el porcentaje de cenizas de la mezcla.

Según estas expresiones, se puede decir que la adición de cenizas produce en todos los casos resistencias menores que sin ellas, a excepción de la resistencia a 90 días. A esta edad se produce un máximo de la resistencia en un porcentaje de 12.7% de cenizas y que daría una resistencia de 51 MPa.

Las correlaciones obtenidas son bastante buenas, lo cual justifica su determinación.

Hemos de tener en cuenta que para la aplicabilidad de las expresiones se limita a las relaciones agua/(cemento + cenizas) de 0.5, considerando una relación 1:3 (cemento:arena) y para reducciones de cemento que no excedan el 40%.

3.3.6. Relación cantidad de cenizas-superficie específica-volumen

Otro aspecto que hasta el momento no se ha considerado es la diferente superficie específica y peso específico de las cenizas volantes con respecto al cemento.

Como se puede ver en el apartado en el que se describen las propiedades de las cenizas, éstas tienen una superficie específica de 1993.53 cm²/gr, mientras que la del cemento es de 3300 cm²/gr. Esto se traduce físicamente en que la granulometría del cemento es más fina que la de las cenizas.

Consecuentemente, para un mismo peso de material, el cemento tendrá más superficie de contacto que facilitará las reacciones químicas producidas. De la misma manera, las cenizas tendrán una velocidad de reacción más lenta.

Si partimos de la hipótesis de que las reacciones se producen por contacto de los materiales potencialmente reactivos (cemento y cenizas con el agua), nos interesará estudiar aquellas muestras que produzcan una misma superficie específica. Así, para los materiales ensayados, por cada 100gr de cemento que reduzcamos, deberemos introducir 150.49gr de cenizas.

Manteniendo esta misma hipótesis, nos planteamos la posibilidad de relacionar la superficie específica de los materiales con el volumen de agua de las mezclas para intentar corroborar aquello que habíamos supuesto. Entonces, continuando con los mismos resultados, se obtienen las relaciones que se muestran en la tabla 10:

Tabla 10. Superficie específica material cementicio probetas fase 1

Designación probeta	Relación superficie específica (cemento + cenizas) / volumen agua
MC	0,6
MCV-1-10	0,5798706
MCV-1-20	0,5597412
MCV-1-23	0,55354754
MCV-1-30	0,5396627
MCV-1-33	0,532902
MCV-2-10	0,5798706
MCV-2-20	0,5597412
MCV-2-23	0,55354754
MCV-2-30	0,53967445
MCV-2-33	0,532902
MCV-3-10	0,5798706
MCV-3-20	0,5597412
MCV-3-23	0,55354754
MCV-3-30	0,53966818
MCV-3-33	0,532902

Si intentamos relacionarlo con la resistencia obtenida a 28 días, obtenemos el gráfico de la figura 31:

Relación superficie específica cemento + cenizas / volumen de agua contra resistencia a compresión a 28 días

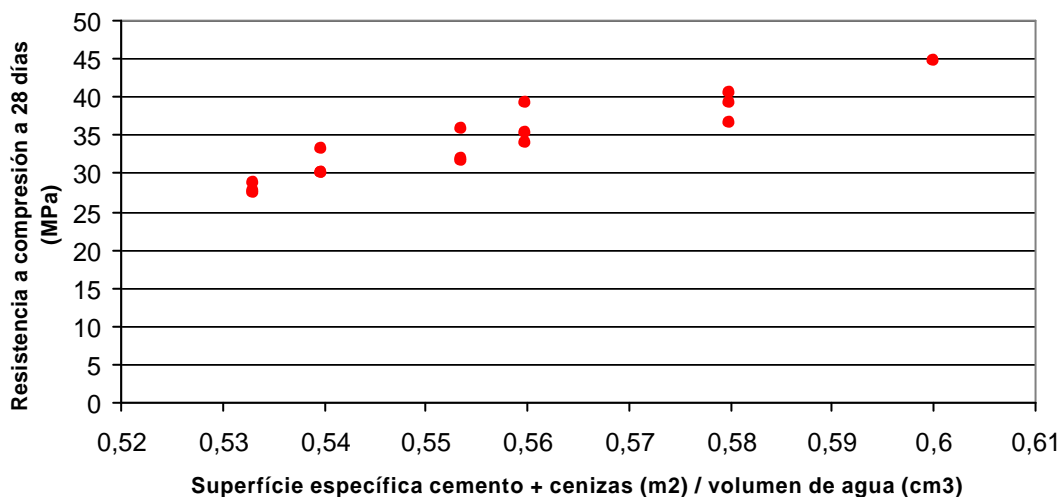


Figura 31. Relación superficie específica material cementicio-resistencia a compresión fase 1

Según este gráfico, podemos plantearnos la posibilidad de que exista una cierta correlación entre estos parámetros, ya que el coeficiente de correlación para estos datos es de 0,9304, corroborando la hipótesis de partida.

Análogamente, podríamos hacer el mismo análisis a partir del volumen, ya que la diferencia entre sus respectivos pesos específicos hace que la reducción de 100gr de cemento supone la reducción de 32.79cm³ del volumen de la mezcla que se podrían llenar con tan sólo 66.42gr de las cenizas volantes estudiadas.

Si planteáramos la hipótesis de que la reacción se produce por volumen, se podría hallar la relación entre el volumen de cemento + cenizas sobre el volumen de agua, obteniendo gráficamente la figura 32:

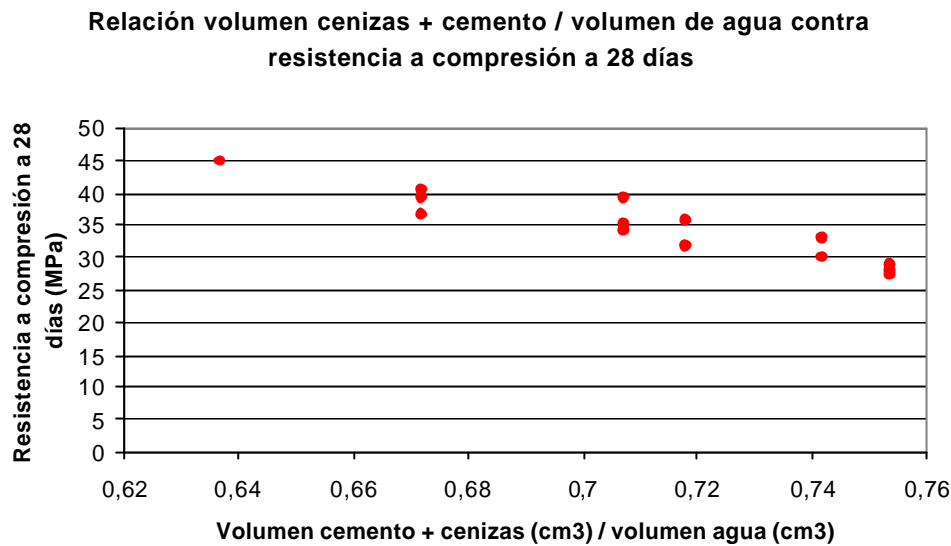


Figura 32. Relación volumen material cementicio-resistencia a compresión fase 1

Este gráfico es exactamente igual que el anterior pero invertido. Esto significa que a mayor volumen de ligante, se reduce la resistencia a 28 días. Era lógico esperar que los resultados estuvieran relacionados con los anteriores, puesto que se trata de propiedades físicas relacionadas entre sí. Por este mismo motivo, el coeficiente de correlación es el mismo que en el análisis anterior de 0,9304. Matemáticamente, se puede ver que la relación entre la densidad y la superficie específica de ambos materiales es muy similar, lo que hace que para un mismo volumen tengamos una superficie específica muy similar en ambos.

A partir de esto podríamos modelizar los mencionados comportamientos linealmente de la siguiente manera:

$$R_{comp28días} = 230,43 \cdot \frac{S_{esp_{cemento}} + S_{esp_{cenizas}}}{V_{agua}} - 93,94 = 128,66 - 132,41 \cdot \frac{V_{cemento} + V_{cenizas}}{V_{agua}} \quad (8)$$

Como se ha comentado anteriormente, estos resultados deberían considerarse únicamente para las cenizas y el cemento estudiados y tan sólo dentro de los márgenes establecidos en el estudio, ya que fuera de ellos el comportamiento puede ser muy diferente al esperado.

Lo que se puede deducir de estos gráficos es que la resistencia aumenta a medida que se aumenta la superficie específica y disminuye el volumen, es decir, que son preferibles los materiales finos como material cementicio ya que aumentan la superficie específica sin aumentar tanto el volumen. De esto podríamos deducir que podríamos mejorar las propiedades de nuestras cenizas si pudiéramos aumentar su superficie específica, esto se podría conseguir con una trituración de las partículas, aunque para corroborarlo, se debería realizar un estudio exhaustivo con las cenizas trituradas.

3.4. 2ª FASE EXPERIMENTAL

3.4.1. Fabricación de probetas

A partir de los resultados obtenidos en la primera campaña experimental, nos planteamos fabricar morteros con cenizas volantes con la misma trabajabilidad que el mortero de control, consiguiendo resistencias más elevadas que éste. Los materiales utilizados para la fabricación de las probetas correspondientes a esta segunda fase experimental fueron los mismos que en la primera fase.

Teniendo en cuenta que esta propiedad está ligada directamente con la relación agua/material cementicio, se propusieron de entrada unas dosificaciones análogas a las de la primera fase, pero cambiando la cantidad de agua. En un principio, se consideró la fórmula propuesta en la EHE [11] comentada anteriormente:

$$\frac{A}{C + k \cdot F} \quad (4)$$

Considerando el valor de k de 0.3 (tal y como se propone en la instrucción de hormigón) y manteniendo esta relación en 0.5 como habíamos considerado en el caso del mortero de control.

A pesar de esto, el objetivo de la segunda fase era obtener el valor de la consistencia del mortero con cenizas volantes aproximadamente constante respecto al mortero de control, así que esta relación podía modificarse. Una vez en el laboratorio, partiendo de las nuevas dosificaciones planteadas, se definieron las dosificaciones para obtener una consistencia del 45%, como en el mortero de control. En esta fase experimental se fabricaron morteros con adición de cenizas del 10, 20 y 30% (no se fabricaron los de 23 y 33% por similitud de resultados).

En algunas de las mezclas fabricadas en esta fase se tuvo que añadir cierta cantidad de agua de más respecto lo que se había estimado, puesto que la consistencia resultaba ser inferior a la buscada. Después de ajustar las dosificaciones en función de la consistencia, las mezclas de la segunda fase fueron las que se muestran en la tabla 11:

Tabla 11. Dosificación morteros 2ª fase experimental

DOSIFICACIÓN MORTERO	2a FASE EXPERIMENTAL			
	Cemento	Arena	Agua	Cenizas
MCV-4-10	360,0	1200,0	186,0	40,0
MCV-4-20	360,0	1350,0	210,0	90,0
MCV-4-30	360,0	1542,3	235,0	154,1
MCV-5-10	362,3	1207,5	190,0	40,3
MCV-5-20	315,0	1181,3	185,0	78,8
MCV-5-30	315,0	1349,4	205,0	134,8
MCV-6-10	351,0	1170,0	185,0	39,0
MCV-6-20	351,0	1316,3	207,0	87,8
MCV-6-30	270,0	1156,7	192,5	115,6

3.5. Resultados y discusión de resultados 2ª fase experimental

3.5.1. Consistencia

Con estas mezclas se obtuvieron los valores de la consistencia que se muestran en la tabla 12:

Tabla 12. Consistencias 2ª fase experimental

Código probeta	Consistencia (%)
65	50
66	40
67	43
68	46,5
69	40
70	39
71	50
72	46
73	44,5
74	55
75	56
76	65
77	54
78	43
79	49,5
80	44,5
81	39,5
82	41,5
83	54
84	58,5
85	59
86	48
87	55,5
88	53,5
89	64,5
90	41,5
91	74

Si representamos gráficamente estos resultados, como se muestra en la figura 33, se puede observar que ahora ya no hay tanta dispersión como en la fase anterior:

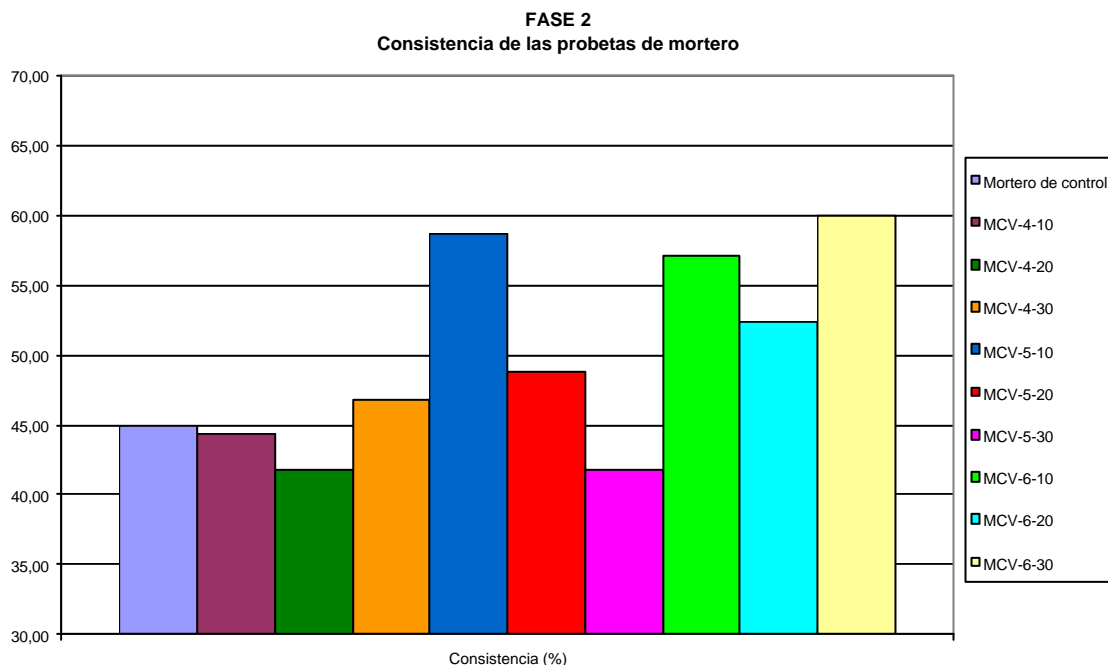


Figura 33. Consistencias 2ª fase experimental

Mientras que el promedio de las consistencias en la fase 1 era de 60.3% y la desviación estándar era de 10.6%, en esta nueva fase se ha conseguido que el

promedio fuera de 50.2% con una desviación del 8.9%. Así pues, se ha conseguido mantener la trabajabilidad que es uno de los aspectos más importantes del presente estudio.

A partir de estas dosificaciones se pretende hallar algún tipo de relación entre la consistencia y la relación existente entre agua-cemento-cenizas, continuando con lo que se había encontrado con los resultados de la fase 1.

Realizando un análisis análogo al de la fase anterior, se podría obtener el gráfico representado en la figura 34:

Relación A/(C+kF) - consistencia

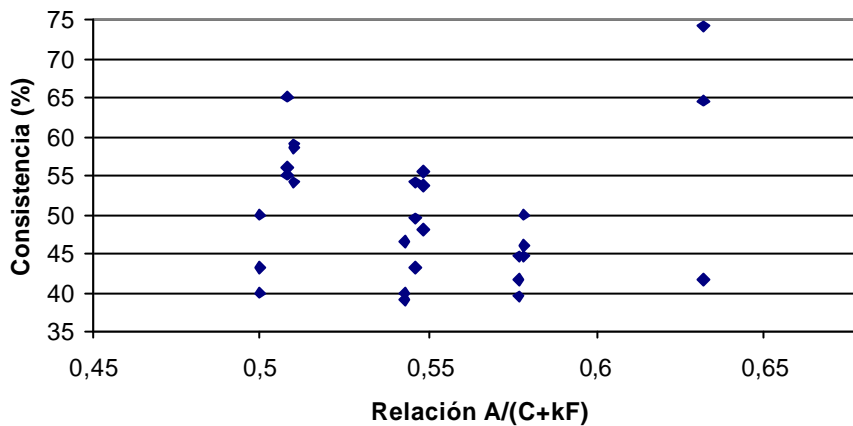


Figura 34. Relación agua/material cementicio – consistencia fase 2

En este caso, se puede observar un alto grado de dispersión de los resultados, lo que implica una mayor dificultad para correlacionarlo tal y como habíamos hecho anteriormente. En este caso, por mucho que calculemos el promedio de los valores, no se puede obtener relación alguna, como se puede ver en el siguiente gráfico:

Relación A/(C+kF) - consistencia

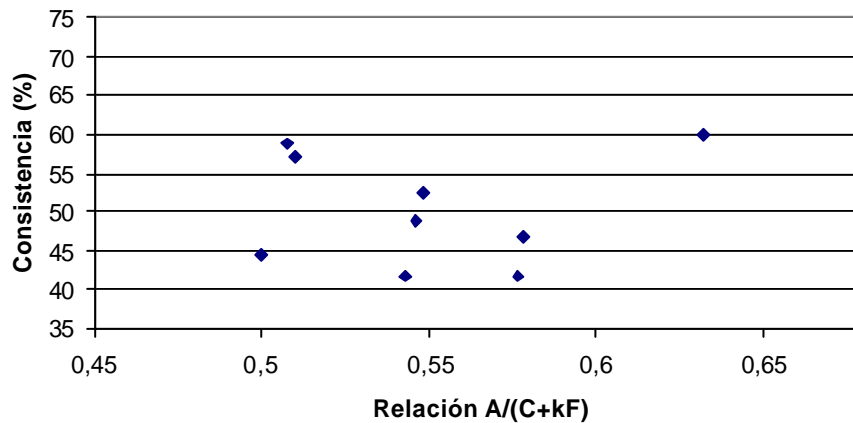


Figura 35. Resumen relación agua/material cementicio – consistencia fase 2

De esta manera, no se proseguirá con este análisis, porque no se puede observar ninguna tendencia. Así, se puede concluir que la consistencia no depende únicamente de la relación agua/material cementicio

3.5.2. Resistencia a flexotracción

Las resistencias a flexotracción obtenidas en esta fase experimental fueron las que se pueden ver en la tabla 13:

Tabla 13. Resistencia flexotracción fase 2

Código probeta	Flexotracción (N/mm ²)		
	28 días	56 días	90 días
MC	6,44	7,61	9,01
MCV-4-10	5,77	8,39	6,06
MCV-4-20	5,58	8,97	6,01
MCV-4-30	5,85	8,31	6,40
MCV-5-10	7,43	8,85	6,44
MCV-5-20	6,65	8,79	5,97
MCV-5-30	6,34	8,56	6,36
MCV-6-10	6,90	9,07	6,45
MCV-6-20	6,42	8,85	6,28
MCV-6-30	6,47	8,40	5,71

Antes de seguir con este análisis debemos comentar que los resultados a 90 días para las mezclas fabricadas con cenizas volantes se descartaron porque no son correctos, ya que no puede ser que su resistencia a 90 días sea inferior a la de 56 días, e incluso a la de 28 días. Se supone que la prensa de rotura a flexotracción no funcionaba correctamente porque los resultados a compresión (como se verá en el siguiente apartado) mantuvieron la coherencia que se había podido observar hasta este momento.

Considerando únicamente los resultados aceptados como “correctos”, el gráfico asociado sería el que se muestra en la figura 36:

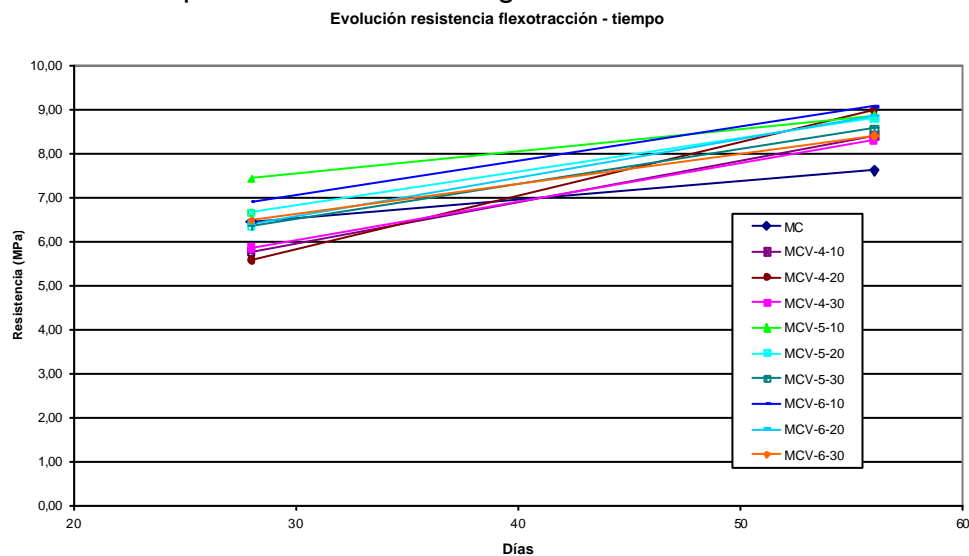


Figura 36. Evolución resistencia flexotracción fase 2

El hecho de haber descartado los resultados a 90 días y no haber obtenido resultados de rotura a 7 días (en esta segunda campaña experimental no se creyó necesario), nos ha permitido obtener 2 valores con lo cual sólo se puede ver una recta como resultado. Para obtener las curvas de antes se deberían conseguir los resultados a 90 días,

Lo que se puede destacar de este gráfico es que todos los morteros han desarrollado resistencias superiores respecto al mortero de control a la edad de 56 días, y la mayoría ya la habían superado a los 28 días. Consecuentemente, el objetivo de optimización de resistencias se cumplió de acuerdo con lo que se esperaba.

3.5.3. Resistencia a compresión

En este caso las resistencias a compresión fueron las que se muestran en la tabla 14:

Tabla 14. Resultados compresión fase 2

Código probeta	Compresión (N/mm ²)		
	28 días	56 días	90 días
MC	44,83	49,90	50,98
MCV-4-10	50,86	55,01	56,76
MCV-4-20	42,88	49,97	51,84
MCV-4-30	40,82	44,89	51,06
MCV-5-10	50,28	50,24	58,21
MCV-5-20	40,91	50,34	53,64
MCV-5-30	40,74	46,45	50,40
MCV-6-10	49,39	57,08	57,08
MCV-6-20	42,09	53,58	53,74
MCV-6-30	33,58	44,46	45,31

Gráficamente, se puede representar como sigue en la figura 37:

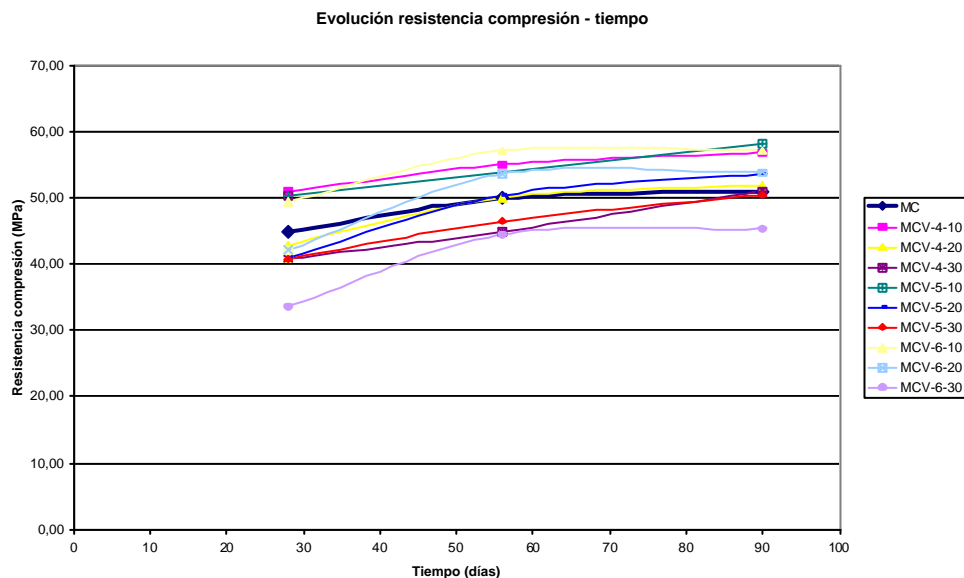


Figura 37. Evolución resistencia a compresión fase 2

Tal y como se había podido apreciar en las resistencias a flexotracción, se puede ver que la mayoría de las resistencias a compresión de los morteros con cenizas volantes también son superiores a las del mortero de control. Las únicas dosificaciones que no consiguen superar la resistencia del mortero sin cenizas son la MCV-5-30 y la MCV-6-30.

También es importante destacar que las resistencias, tal y como se ha comentado para el caso de la flexotracción se consiguen a edades más tempranas. Así como en la primera fase la pendiente de la evolución de la resistencia de los morteros con cenizas volantes era muy superior a la del mortero de control (especialmente entre las edades de 56 y 90 días), en este caso son más similares. Así, el crecimiento de la resistencia entre 28 y 56 días es superior en las mezclas con cenizas volantes respecto al mortero de control, pero no lo es a partir de esa edad.

Lo que se puede extraer de este análisis es que el hecho de reducir la cantidad de agua permite desarrollar las resistencias mucho más rápido que en el caso anterior.

Realizando el análisis en función del porcentaje de cemento que se ha sacado, los gráficos obtenidos son los que siguen en las figuras 38, 39 y 40:

MCV-4

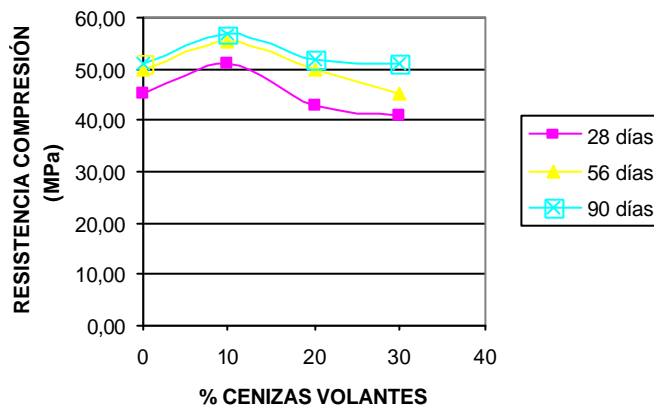


Figura 38. Resistencia compresión MCV-4

MCV-5

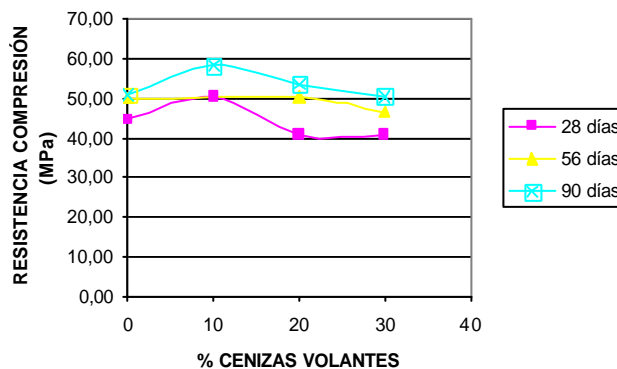


Figura 39. Resistencia compresión MCV-5

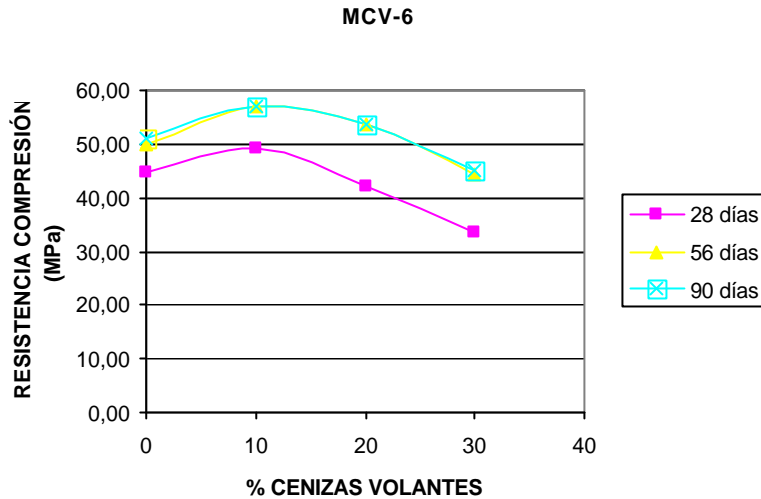


Figura 40. Resistencia compresión MCV-6

En ellas se puede ver que las curvas correspondientes a los 56 y a los 90 días son prácticamente iguales, lo que denota que la resistencia a los 56 días es prácticamente la máxima que desarrolla.

La conclusión más importante que se puede extraer de estos últimos gráficos es que el porcentaje óptimo de cenizas que se puede añadir a la mezcla es del 10%, ya que incluso a edades cortas proporciona resistencias superiores a las del mortero de control para edades más avanzadas. También se debe destacar los resultados que proporcionan las adiciones del 20% ya que en todos los casos son iguales o superiores al hormigón de control.

3.5.4. Relación resistencia a compresión-flexotracción / tiempo

Este análisis sólo se podrá hacer con los datos de 28 y de 56 días, pero será suficiente. A continuación se puede ver gráficamente, en la figura 41, la comparación entre los resultados obtenidos por los morteros de fase 1, fase 2 y el de control en lo que se refiere a la evolución de la relación entre la resistencia a compresión y a flexotracción en el tiempo:

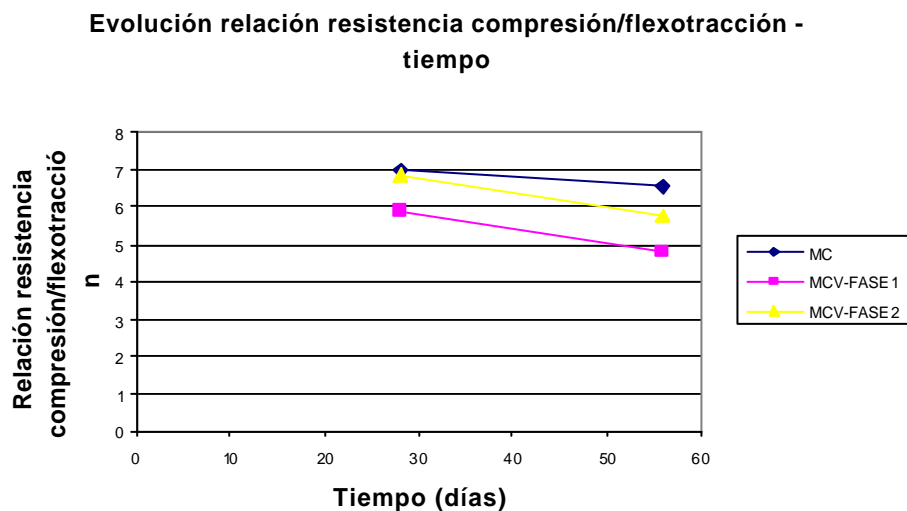


Figura 41. Evolución relación comp./flexo.-tiempo fase 2

Aunque sólo tengamos 2 puntos, se puede apreciar lo que más nos interesaba destacar. En esta fase la resistencia a flexotracción continúa siendo más importante que la resistencia a compresión en comparación al mortero de control, pero no tanto como en la primera fase. También se debe destacar que la tendencia a ir ganando importancia de la resistencia a flexotracción frente a la compresión, tal y como cabía esperar.

3.5.5. Análisis evolución resistencia según porcentaje de cenizas

Tal y como se ha comentado anteriormente, se ha podido detectar que se han alcanzado los valores de resistencia a edades más tempranas. En la figura 42, podemos ver la evolución de la resistencia en el tiempo, comparándola con los valores obtenidos en la primera fase. Tal y como se ha expuesto en el capítulo anterior, se han expresado en forma de porcentaje respecto a la resistencia obtenida a 90 días.

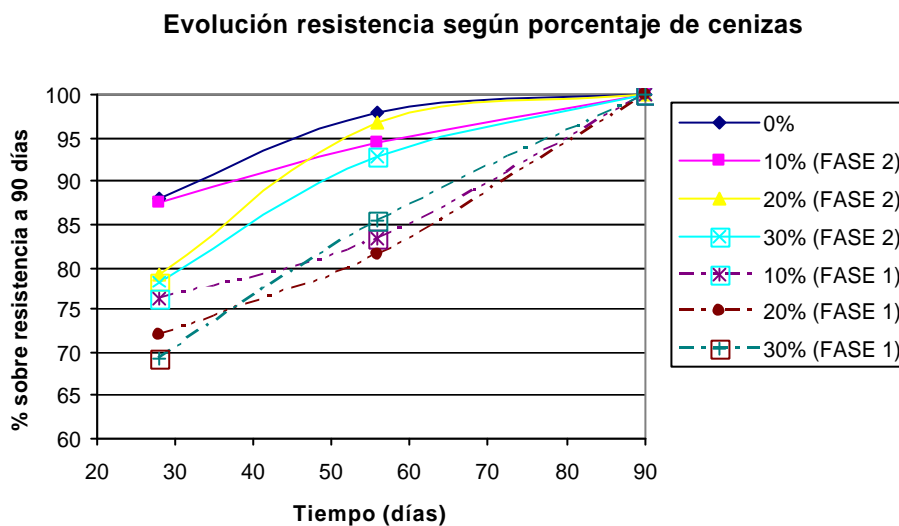


Figura 42. Evolución resistencia según porcentaje de cenizas fase 2

Los resultados correspondientes a la primera campaña experimental se han representado en línea discontinua para destacar la diferencia respecto a los nuevos datos. Así pues, se puede observar que el desarrollo de las resistencias se produce con más rapidez que en la primera fase.

3.6. MORTEROS DE ALBAÑILERÍA

3.6.1. Introducción

El mortero de albañilería se utiliza para realizar cerramientos, muros, tabiques, pilares, así como también rejuntado y trabazón de albañilería. También se puede utilizar como revoco o enfoscado o enlucidos interiores. Los morteros de albañilería se pueden clasificar en función de distintos parámetros, bien sea el concepto, el conglomerante o conglomerantes empleados, las propiedades y/o aplicación a la que se destina, o bien el sistema mediante el que se fabrica el mortero. La tipología se resume en la siguiente tabla:

Tabla 15. Tipología morteros albañilería

<i>Clasificación según</i>	<i>Clasificación</i>
El concepto	Mortero diseñado Mortero prescrito
El conglomerante	Mortero de cemento (CEM) Mortero de cemento para albañilería (MC) Mortero de cal aérea (L) Mortero de cal hidráulica (HL) Mortero de cal y cemento (L/HL-CEM)
Las propiedades aplicación	Mortero para revoco/enlucido de uso corriente (G) ligero (LW) coloreado (CR) monocapa (OC) para restauración (R) para aislamiento térmico (T) Mortero para albañilería para uso corriente (G) para juntas y capas finas (T) ligera (L)
El sistema de fabricación	Mortero industrial Mortero industrial semiterminado Mortero hecho en obra

Las propiedades exigibles a los morteros van a depender de la utilización a la que se destine y se pueden agrupar en dos categorías, las correspondientes al estado fresco y al estado endurecido y se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 16. Propiedades morteros albañilería en función del estado

En estado fresco	En estado endurecido
<ul style="list-style-type: none"> - Consistencia - Capacidad de retención de agua - Contenido de aire - Tiempo de utilización - Densidad aparente - Contenido de iones cloruro 	<ul style="list-style-type: none"> - Resistencia mecánica a compresión - Adhesión - Retracción - Absorción de agua - Densidad - Permeabilidad al vapor de agua - Conductividad térmica - Aislamiento y absorción acústica - Durabilidad

Los morteros de albañilería diseñados pueden designarse por su clase (letra M), seguida de la categoría resistente y del conglomerante empleado. Las

clases resistentes en las que se clasifican estos morteros se recogen en la tabla 17:

Tabla 17. Clasificación morteros

Clase	M-1	M-2.5	M-5	M-10	M-15	M-20	M-d
Resistencia a compresión N/mm ²	1	2.5	5	10	15	20	d

Donde “d” es una resistencia a compresión superior a 25 N/mm².

En la norma americana ASTM C 270 – 00 se exponen otros requerimientos para la clasificación de los morteros de albañilería. El primer requerimiento que se marca es la proporción de los materiales, en el que se dan algunas indicaciones para las dosificaciones a realizar. También se deben determinar algunas propiedades como en el caso de la norma europea. En este caso, se debe obtener resultados de consistencia, resistencia a compresión a 28 días, retención de agua, contenido de aire, relación de áridos. Finalmente tiene un apéndice en el que se proponen criterios para la selección y uso del mortero de albañilería.

Según la norma americana tan sólo existen 4 tipos de mortero de albañilería que deben tener estas propiedades:

Tabla 18. Clasificación morteros según ASTM C 270-00

Tipo de mortero	Resistencia a compresión, min (MPa)	Retención de agua, min (%)	Contenido de aire, máx (%)	Relación de áridos
M	17.2	75	18	No inferior a 2 ¼ y no superior a 3 ½ de la suma de los volúmenes de los materiales cementicios por separado
S	12.4	75	18	
N	5.2	75	20	
O	2.4	75	20	

A partir de los resultados obtenidos tanto en la primera como en la segunda fase experimental de morteros, se planteó la posibilidad de realizar el análisis de la aplicabilidad de las cenizas en morteros de albañilería.

3.6.2. Fabricación probetas

La propiedad más importante que se le requiere a estos morteros según los propios albañiles es la trabajabilidad, en cambio según los criterios de diseño y durabilidad es la resistencia a compresión. Además, otras características importantes son la capacidad de cohesión, adherencia, capacidad impermeable, rapidez de fraguado y estabilidad en el tiempo.

Las dosificaciones más habituales para este tipo de morteros en la zona de estudio son para este tipo de morteros de 1:6 (cemento:arena).

Para la caracterización de los morteros de albañilería nos de acuerdo con Chindaprasirt et al. [2], que destaca la trabajabilidad como la propiedad más característica. La trabajabilidad resulta de la combinación de diferentes

parámetros como la consistencia, cohesividad y plasticidad entre otros. En el laboratorio, se puede evaluar la trabajabilidad utilizando diferentes parámetros como la demanda de agua, la fluidez y la retención de agua. En obra, se evalúa empíricamente con los albañiles, observando directamente el comportamiento del mortero en la paleta.

Chindaprasirt et al. [2] propone una relación entre la consistencia de la mezcla, la aplicabilidad del mortero de albañilería y la relación agua/cemento. Teniendo en cuenta que se utiliza una dosificación 1:3 (cemento:arena), se cogieron los valores de consistencia para poder realizar nuestras mezclas de dosificación 1:6. Los valores propuestos para la consistencia eran de $70 \pm 5\%$ para los morteros destinados a la unión de ladrillos, y de 100-110% para el caso de los morteros para enlucidos de paredes.

Observando los resultados obtenidos en la primera fase, vemos que algunas de las mezclas fabricadas con cenizas volantes, presentan consistencias que entrarían en el rango de valores de los morteros para unión de ladrillos. De esta manera podríamos utilizar esas dosificaciones para la fabricación de ese tipo de morteros.

A continuación, se plantearon las dosificaciones para la fabricación de morteros de albañilería para enlucidos. Se trataba que tuvieran la consistencia propuesta en el mencionado artículo y la dosificación 1:6. El parámetro que se podría ir variando para obtener la consistencia deseada sería el agua. Tan sólo se probaron las dosificaciones correspondientes a aquellos morteros que habían obtenido resistencias más elevadas en la primera fase experimental, cogiendo una mezcla por cada porcentaje de cemento sacado. La codificación o marcado utilizada para estas mezclas fue muy similar a la anterior, añadiendo al código de letras una A (refiriéndose a albañilería), el primer número indica el porcentaje de cemento sacado (7=20%, 8=30% y 9=40%) y el último número designa el porcentaje de cenizas añadidas. Así pues, las mezclas fabricadas y sus respectivas consistencias fueron las que muestra la tabla 19:

Tabla 19. Dosificación morteros albañilería

DOSIFICACIÓN MORTERO		3a FASE EXPERIMENTAL				
		Cemento	Arena	Agua	Cenizas	Consistencia (%)
1	MCA	258,2	1549,2	205,7	0,0	102,0
2	MCVA-7-10	204,5	1533,8	220,0	51,1	93,5
3	MCVA-8-20	186,4	1597,5	220,0	46,6	90,0
4	MCVA-9-10	172,3	1722,7	215,0	19,1	90,5

Es importante destacar que en la fabricación de la mezcla MCV-9-10, se obtuvo una mezcla en la que se podía observar un exceso de arena para la poca cantidad de material cementicio y se tuvo que añadir agua reiteradamente para obtener la consistencia deseada. La pasta presentaba un aspecto próximo a la segregación y por lo tanto se desaconseja su uso. A pesar de ello, se continuarán analizando sus resultados.

Las correspondientes relaciones agua/material cementicio son muy superiores a las utilizadas en la primera fase experimental y oscilan entre el 0.80 del mortero de control hasta el 1.21 del mortero MCVA-9-10.

En este caso los resultados asociados a la consistencia no se analizarán, puesto que son resultados muy elevados y no encontraríamos la relación lineal que habíamos conseguido en un principio. Ya se había advertido que esa relación únicamente podía considerarse dentro de los valores en los que se había analizado.

3.7. Resultados y discusión de morteros de albañilería

3.7.1. Resistencia a flexotracción y compresión

Los resultados que se obtuvieron después de ensayar estas mezclas a una edad de 28 días fueron los que se muestran en la tabla 20:

Tabla 20. Resultados resistencias flexotracción y compresión morteros albañilería

Código probeta	Flexotracción (N/mm ²)	Compresión (N/mm ²)
	28 días	28 días
MCA	2,59	22,97
MCV-7-20	1,79	15,64
MCV-8-20	1,56	12,62
MCV-9-10	0,74	6,27

En este caso las resistencias obtenidas son en todos los casos inferiores al mortero de albañilería de control.

A partir de estos resultados podemos catalogar estos morteros con las siguientes designaciones:

Según UNE EN 998-2:2004:

MCA	M20
MCV-7-20	M15
MCV-8-20	M10
MCV-9-10	M5

Según ASTM C 270-00:

MCA	M
MCV-7-20	S
MCV-8-20	S
MCV-9-10	N

Después de esta designación, podremos utilizar los morteros fabricados siguiendo las especificaciones correspondientes para estas designaciones.