

Tesis Doctoral

ESTUDIO DE LA RESISTENCIA Y REOLOGÍA DE
HORMIGONES CON ADICIÓN DE ESCORIAS DE
COBRE COMO SUSTITUTO DEL ÁRIDO FINO

Autor

Manuel Cruz Carrasco

Directores

Dr. Francisco J. Rubio Hernández

Dra. M^a Dolores Rubio Cintas

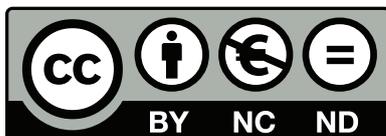
Málaga, 2014



Publicaciones y
Divulgación Científica

AUTOR: Manuel Cruz Carrasco

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está sujeta a una licencia Creative Commons:

Reconocimiento - No comercial - SinObraDerivada (cc-by-nc-nd):

[Http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es)

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización
pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer
obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de
Málaga (RIUMA): riuma.uma.es

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA II**

TESIS DOCTORAL

**ESTUDIO DE LA RESISTENCIA Y REOLOGÍA DE
HORMIGONES CON ADICIÓN DE ESCORIAS DE
COBRE COMO SUSTITUTO DEL ÁRIDO FINO**

**Manuel Cruz Carrasco
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos**

Málaga, 2014

ESTUDIO DE LA RESISTENCIA Y REOLOGÍA DE HORMIGONES CON ADICIÓN DE ESCORIAS DE COBRE COMO SUSTITUTO DEL ÁRIDO FINO

Memoria presentada para optar al Título de Doctor por la Universidad de Málaga.

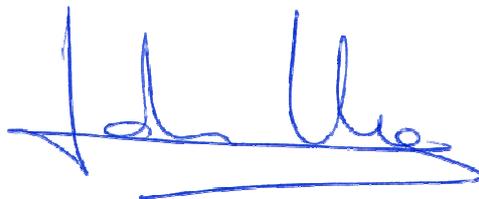


Fdo: Manuel Cruz Carrasco

DIRECTORES:



Fdo: Dr. Francisco José Rubio Hernández
Catedrático de Universidad. Universidad de Málaga



Fdo: Dra. María Dolores Rubio Cintas
Profesora Titular de Escuela Universitaria. Universidad de Cádiz

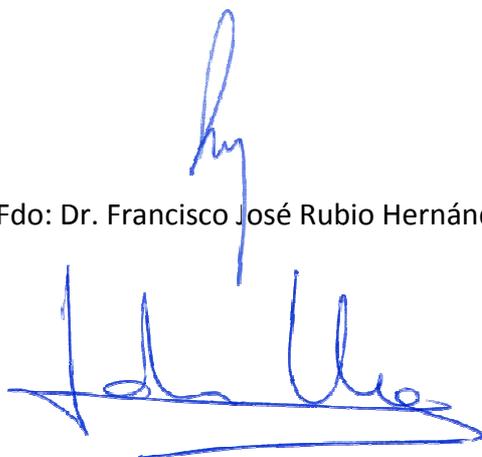
FRANCISCO JOSÉ RUBIO HERNÁNDEZ, Catedrático de Universidad del Departamento de Física Aplicada II de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de la Universidad de Málaga,

MARÍA DOLORES RUBIO CINTAS, Profesora Titular de Escuela Universitaria del Área de Conocimiento Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras del Departamento de Ingeniería Industrial e Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Superior de Algeciras, Universidad de Cádiz,

CERTIFICAN:

Que el presente trabajo de investigación titulado **“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA Y REOLOGÍA DE HORMIGONES CON ADICIÓN DE ESCORIAS DE COBRE COMO SUSTITUTO DEL ÁRIDO FINO”**, constituye la Memoria de Tesis Doctoral de D. MANUEL CRUZ CARRASCO, que ha sido realizada en el laboratorio de Reología y Electrocinética del Departamento de Física Aplicada II de la Universidad de Málaga y en el laboratorio de Hormigones y Materiales del Departamento de Ingeniería Civil e Ingeniería Industrial de la Universidad de Cádiz, bajo nuestra dirección y cuya presentación autorizamos en Málaga, a 30 de junio de 2014.

Fdo: Dr. Francisco José Rubio Hernández



Fdo: Dra. María Dolores Rubio Cintas

AGRADECIMIENTOS

A mis directores de tesis Paco y Lola por haberme proporcionado la formación necesaria para el desarrollo y finalización de este trabajo, por su esfuerzo, apoyo, dedicación y por su infinita paciencia.

A Manolo compañero del laboratorio de Materiales y Hormigones de Algeciras, un amigo, alguien en quien poder confiar. Gracias por tu constancia, dedicación, consejos, apoyo en los momentos difíciles y sobre todo porque sin duda alguna este trabajo no hubiera visto la luz sin tu ayuda. Y como no podía ser menos a María José por su colaboración; echaré de menos los rapapolvos por no dejar recogido el laboratorio.

A los profesores José Calavera Ruiz y Manuel Fernández Cánovas por la oportunidad de recibir sus valiosos consejos y orientaciones.

Al Instituto Eduardo Torroja, en especial a María Isabel Sánchez Rojas y a Moisés Frías por su asesoramiento y material facilitado a lo largo de este trabajo.

A la empresa Atlantic Copper por haber suministrado la escoria de cobre para la realización de este trabajo, principalmente a Miguel Ángel Estrada y a Isabel García quienes en todo momento prestaron su máxima disposición. Igualmente a Drace por el suministro de todo los árido necesarios, fundamentalmente a Francisco por su colaboración.

A mis compañeros de trabajo Paco y Manolo, que como es normal protestaban mucho cada vez que les daba algún croquis para delinear, pero al final lo entregaban en fecha y con previo pago de alguna cerveza sin tapa. Y por cierto Paco, aprovecho estas líneas para decirte que al final verás la luz y encontrarás el camino, hay algo más, tú ya sabes a que me refiero.

A la empresa SERGEYCO, en especial a Manolo, Miguel, Quirós y Paco por su cooperación en los ensayos.

A Jose, por su colaboración en el diseño de la portada. Ahora que tendré un poco de más tiempo libre iremos a tomar un café.

A Victoriano Casas de la empresa BASF, por el suministro de materiales y por sus consejos.

A Procedimientos Integrados S.L, a José Luis y especialmente a Jorge por sus sugerencias y aportaciones en la fabricación de hormigones.

Y aunque lo pongo el último pero tiene tanta importancia como el primero, a ÉL, que no se ve y que no se oye pero siempre está presente.

A todos mi más sincero agradecimiento.

A mis hijos, Daniel y Javier

A mis abuelos *in memoriam*

REFLEXIÓN

“Para empezar un gran proyecto, hace falta valentía. Para terminar un gran proyecto, hace falta perseverancia (Anónimo)”.

La motivación personal es el aspecto más importante en el logro de una meta y por ello el mayor catalizador a la hora de lanzarse a la realización de un proyecto. A menudo, intentamos alcanzar demasiadas metas a la vez, pero si fuésemos capaces de centrarnos en una sola, lograríamos esa meta con mayor rapidez. Fácil es decirlo pero difícil llevarlo a cabo.

Lo principal al emprender un proyecto, es quitarse la idea del miedo a encontrarnos grandes obstáculos en el camino y no conseguir lo propuesto. Debemos tener claro nuestra meta, a pesar de las dudas, de los contratiempos que nos apartan del rumbo y de la falta de ganas a la hora de hacer lo que se requiere. Una vez hayamos fijado nuestro objetivo es importante no dejarse llevar por lo que opinen otras personas y, por supuesto, nunca hemos de olvidar que el elemento fundamental es la confianza en uno mismo, el sentirse capaz de conseguirlo.

Todo proyecto personal, por diminuto o grande que sea, implica un compromiso y no necesariamente, un gran proyecto requiere un gran compromiso o viceversa. Lo importante es que de nuestro compromiso por alcanzar el final, obtengamos un resultado positivo. El solo deseo de querer lograrlo no basta y es imprescindible contar con otros factores como la concreción, los obstáculos, el desánimo, el tiempo.

Solo uno mismo conoce, y si lo ignora lo descubrirá a lo largo del camino, cuál es la mejor forma de alcanzar la meta propuesta, cuál es su potencial y cuáles son los valores que hay que utilizar y poner en juego a la hora de concretarla.

RESUMEN

Las escorias de cobre son un residuo procedente del proceso pirometalúrgico de los minerales sulfurados de cobre. Estas normalmente se depositan en vertederos autorizados anexos a las plantas de fundición. Los volúmenes de escorias vertidos tras el proceso industrial crece cada año, por lo que cada vez se necesitan mayores superficies de acopio, superficies que en muchos casos no se encuentran junto a las plantas de producción por haber sido agotadas. Es por ello que en los últimos años, existe un interés creciente en buscar alternativas de uso para este residuo.

La incorporación de los residuos de la industria a la fabricación de hormigones ya sea como adiciones en la formulación del cemento o la sustitución parcial o total de los áridos, hacen que por un lado se minimicen las actividades extractivas, las cuales degradan enormemente el medio ambiente y por otro, se de salida a los subproductos industriales.

Entre los múltiples aspectos atractivos del hormigón se encuentra su capacidad para aceptar como componentes propios diferentes tipos de sustancias, es decir, se convierte en un material adecuado para incorporar subproductos industriales, con el beneficio medio ambiental que esto conlleva.

En la presente investigación se estudian hormigones con características diferentes a las del hormigón convencional, donde se ha sustituido el árido fino por escorias de cobre en diferentes proporciones.

Inicialmente se ha realizado una caracterización física, química y mineralógica de la escoria de cobre, así como clasificación ambiental, obteniendo como resultado que se trata de un residuo no ecotóxico y que cumple con las exigencias de la instrucción de hormigón estructural EHE-08 para ser tratado como árido para hormigones.

Posteriormente se analiza la evolución de los nuevos hormigones desde su consistencia primaria hasta su consolidación final, mediante ensayos reológicos del mortero equivalente en estado fresco y mediante el estudio de probetas del propio

hormigón en estado endurecido, comparando los resultados con un hormigón de referencia que no tiene escorias.

Se evalúa la trabajabilidad, escurrimiento, límite de fluencia, viscosidad plástica y la capacidad autocompactante en los hormigones en estado fresco. Para el estado endurecido se determina la densidad, porosidad y absorción, succión, permeabilidad, así como las resistencias a compresión, tracción, flexo-tracción, abrasión superficial y desgaste, además del módulo de elasticidad, índice de rebote, estudio ultrasónico y comportamiento frente a la carbonatación.

Los resultados medidos en estado fresco a través del mortero equivalente, señalan que se obtienen hormigones de buena trabajabilidad, produciéndose un aumento del límite de fluencia y de la capacidad autocompactante, no observándose variaciones apreciables en la viscosidad plástica.

Las mediciones efectuadas en el estado endurecido indican un aumento de la densidad, así como una disminución de la porosidad y la absorción, succión y permeabilidad lo que indica que el hormigón con escorias mejora notablemente la durabilidad del hormigón al disminuir el acceso de los agentes agresivos, eliminando o retardando el ataque sobre las armaduras y la degradación interna del hormigón.

Igualmente las resistencias a compresión, tracción, flexotracción, abrasión superficial y desgaste se incrementan en función del contenido de escorias de cobre utilizado en la mezcla. De la misma forma se mejoran el módulo de elasticidad y el comportamiento frente a la carbonatación. Las mediciones efectuadas mediante el índice de rebote y ultrasonidos reflejan una mejora en la calidad de los hormigones con adición de escorias de cobre.

En base a los resultados obtenidos, el uso de las escorias de cobre es viable para la elaboración de hormigones dado que se comporta como un árido con capacidad puzolánica significativa para tiempos iguales o superiores a 90 días mejorando notablemente todas las propiedades del hormigón.

SUMMARY

Copper slags are a residue from the pyrometallurgical process for copper sulfide minerals. These are typically placed in approved landfills annexed to the smelters. The volumes of materials dumped after the industrial process increases each year, therefore requiring bigger spaces of recollection which in many cases are not near production plants as they have been exhausted. That is why in recent years there has been an increasing interest in finding alternative uses for these.

Incorporating the waste of the industry in the manufacturing of concrete, either as additions to the cement formulation or the partial or total replacement of aggregates, causes on one hand a reduction in extractive activities, which are very harmful to the environment and, on the other hand, gives use to other industrial by-products.

Among the many attractive features of concrete is its ability to make its own components as different types of substances: becomes a suitable material to include industrial by-products, keeping in mind the environmental benefits that this implies.

The investigation presented above shows the study of concretes with different characteristics in comparison to conventional concretes, mainly having the different of replacing the fine aggregate with copper slag in different proportions.

Initially the copper slag has been identified, chemical and mineralogically, as well as, the environmental classification, resulting in a non-ecotoxic waste that meets the requirements of the Statement of Structural Concrete EHE-08 that state it has to be treated as an aggregate for concrete.

Further on there is an analysis of developments of the new concrete, from its primary consistency to the final consolidation, by thanks to rheological tests in a fresh equivalent mortar and by studying samples of hardened concrete, comparing the results with a reference sample of concrete that does not have slag.

The workability, runoff, yield point, plastic viscosity and self-compacting capacity is evaluated in the concrete's fresh state. In its hard state the density, porosity and absorption, suction, permeability, is determined, as well as, its resistance to compressive strengths, traction, flexural strength, surface abrasion and wearing, apart from the elasticity modul, rebound index, ultrasonic test and its reaction to carbonation.

The results obtained in a fresh state through the equivalent mortar show that, there is a result of concrete of good workability, which increases the yield strength and self-compacting ability with no significant changes in plastic viscosity.

Measurements in its hardened state indicate an increase in density and a reduced porosity and absorption, suction and permeability which show an improvement in the durability of concrete by decreasing the access of aggressive agents by eliminating or delaying the attack on armor and internal concrete degradation.

Also, there is an increase in the compressive strength, traction, flexural, surface abrasion and wear depending on the content of copper slag used in the mixture. Likewise the elasticity modul and the reaction to carbonation are improved. The measurements made by ultrasonic test and rebound index show an improvement in the quality of concrete with addition of copper slag.

Based on the results obtained, the application of copper slag is viable for the production of concrete since it behaves as it is an aggregate with a significant pozzolanic capacity that equals or is greater than 90 days significantly improving concrete's properties.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: Introducción	3
1.1 Antecedentes	3
1.2 Hipótesis.....	10
1.3 Objetivos principales.....	11
1.4 Objetivos secundarios	12
1.5 Estructura de la tesis doctoral.....	12
1.6 Bibliografía	15
CAPÍTULO 2: Industria del cobre. Generación de escorias	21
2.1 El cobre en la historia	23
2.2 Minería del cobre	24
2.3 Industria y procesos de obtención del cobre	28
2.3.1 Pirometalurgia del cobre	29
2.3.2 Hidrometalurgia del cobre	32
2.3.3 Producción industrial del cobre.....	34
2.3.3.1 Producción mundial de cobre	34
2.3.3.2 Producción minera de cobre por regiones.....	35
2.3.3.3 Producción minera de cobre por países.....	36
2.3.3.4 Producción mundial de cobre de fundición	37
2.3.3.5 Producción de cobre de fundición por continentes.....	38
2.3.3.6 Países productores de cobre de fundición.....	38
2.4 Escorias de cobre.....	39
2.4.1 Introducción	39
2.4.2 Proceso de obtención de las escorias de cobre	41
2.4.3 Caracterización de las escorias de cobre.....	43
2.4.3.1 Caracterización química	43
2.4.3.2 Caracterización mineralógica	44
2.4.4 Actividad puzolánica de las escorias de cobre	45
2.4.5 Lixiviación de elementos contenidos en la escoria de cobre	46
2.4.6 Toxicidad de la escoria de cobre	49
2.5 Bibliografía	51

CAPÍTULO 3: Materiales. Dosificación y elaboración de hormigones	55
3.1 Introducción	57
3.2. Granulometría de áridos y escoria de cobre	58
3.2.1 Granulometría y curva granulométrica del árido fino.....	62
3.2.2 Granulometría y curva granulométrica del árido intermedio	63
3.2.3 Granulometría y curva granulométrica árido grueso.....	64
3.2.4 Granulometría y curva granulométrica de la escoria	65
3.2.5 Tamaño máximo de los áridos empleados	66
3.3. Ajuste granulométrico de la escoria de cobre	68
3.4 Densidad y absorción de los áridos y la escoria de cobre	74
3.5 Ensayo de friabilidad del árido fino y escoria de cobre 0/2	82
3.6 Otros ensayos realizados a la escoria de cobre	85
3.6.1 Compuestos totales de azufre.....	85
3.6.2 Contenido de sulfatos solubles en ácido	86
3.6.3 Contenido de cloruros	86
3.6.4 Contenido de materia orgánica	86
3.6.5 Reactividad de los áridos con los álcalis del cemento.....	87
3.6.6 Cumplimiento con la EHE-08	87
3.7 Dosificación del hormigón.....	88
3.7.1 Introducción	88
3.7.2 Criterios para la dosificación del hormigón de referencia	89
3.7.2.1 Clases de exposición.....	90
3.7.2.2 Tipología del cemento utilizado	92
3.7.2.3 Mínimo contenido de cemento. Máxima relación a/c.....	93
3.7.2.4 Resistencia mínima	93
3.7.2.5 Docilidad del hormigón	94
3.7.3 Requisitos generales.....	95
3.7.4 Estimación de la resistencia media de diseño del hormigón	97
3.7.5 Relación agua/cemento. Método de La Peña II	100
3.7.6 Cantidad de agua de amasado	102
3.7.7 Determinación de la composición y proporciones de los materiales del hormigón de referencia.....	104
3.7.7.1 Cálculo de proporciones de árido fino y árido intermedio	105
3.7.7.2 Dosificación del hormigón. Método de Bolomey.....	110

3.7.7.3 Correcciones a la dosificación teórica de Bolomey	117
3.8 Hormigones con sustitución del árido fino por escoria de cobre	128
3.9 Fabricación del hormigón.....	130
3.10 Moldes y probetas.....	131
3.11 Fabricación de probetas.....	133
3.12 Desmoldado y curado de probetas	134
3.13 Bibliografía	135
CAPÍTULO 4: Estudio reológico del hormigón en estado fresco	139
4.1 Introducción	141
4.2 Fundamentos teóricos. Reología y reometría.....	142
4.2.1 Reología	142
4.2.2 Reometría	147
4.3 Modelos reológicos	149
4.3.1 Modelo de Bingham	149
4.3.2 Modelo de Bingham modificado	150
4.3.3 Modelo de Herschel-Bulkley.....	151
4.3.4 Comparativa de los modelos Bingham y Herschel-Bulkley	152
4.4 Protocolo experimental y descripción del sistema	153
4.4.1 Condiciones de contorno y fuentes de incertidumbre.....	154
4.4.2 Rango de velocidades de cizalla	159
4.5 Instrumentos y métodos de medida	160
4.5.1 Reómetro rotacional.....	160
4.5.2 Geometría de vanos	163
4.5.3 Agitador de laboratorio	167
4.5.4 Otros aparatos utilizados.....	167
4.6 Diseño del mortero equivalente	168
4.6.1 Fundamentos.....	168
4.6.2 Granulometría 0/1 de áridos y escoria de cobre.....	170
4.6.3 Densidad y absorción de los áridos 0/1 y escoria 0/1	172
4.6.4 Superficie específica de los áridos 0/1 y escoria 0/1.....	172
4.6.5 Nomenclatura	175
4.6.6 Formulación.....	175
4.6.7 Dosificación y preparación del mortero equivalente de referencia	178

4.6.8 Morteros equivalentes con sustitución del árido fino por escoria de cobre	181
4.7 Ensayo de asentamiento del hormigón.....	182
4.7.1 Introducción	182
4.7.2 Proceso de elaboración del ensayo	183
4.7.3 Resultados y discusión.....	185
4.7.4 Modelización	189
4.8 Ensayo de mini-cono aplicado a los morteros equivalentes.....	190
4.8.1 Introducción	190
4.8.2 Proceso de elaboración del ensayo	191
4.8.3 Resultados y discusión.....	192
4.8.4 Modelización	193
4.9 Resultados y discusión de los ensayos reológicos	194
4.9.1 Curvas de flujo	195
4.9.2 Ajuste de puntos según el modelo reológico de Bingham modificado.....	198
4.10 Conclusiones	206
4.11 Bibliografía	207
CAPÍTULO 5: Estudio mecánico del hormigón endurecido	213
5.1 Introducción	215
5.2 Ensayo de densidad, porosidad y absorción	216
5.2.1 Introducción	216
5.2.1.1 Densidad	216
5.2.1.2 Porosidad.....	218
5.2.1.3 Absorción.....	222
5.2.2 Elaboración del ensayo.....	223
5.2.3 Resultados y discusión.....	224
5.2.4 Modelización de los parámetros	226
5.2.5 Conclusiones.....	229
5.3 Ensayo para la determinación de la succión	229
5.3.1 Introducción	229
5.3.2 Proceso de elaboración del ensayo	231
5.3.3 Resultados y discusión.....	235
5.3.4 Modelización	238
5.3.5 Conclusiones.....	239

5.4 Ensayo de permeabilidad al agua bajo presión.....	240
5.4.1 Introducción	240
5.4.2 Proceso de elaboración del ensayo	243
5.4.3 Resultados y discusión.....	245
5.4.4 Modelización de los parámetros	246
5.4.5 Conclusiones.....	248
5.5 Resistencia a compresión.....	249
5.5.1 Introducción	249
5.5.2 Proceso de elaboración del ensayo	253
5.5.3 Resultados y discusión.....	257
5.5.4 Modelización	258
5.5.5 Conclusiones.....	260
5.6 Resistencia a tracción indirecta. Ensayo Brasileño	260
5.6.1 Introducción	260
5.6.2 Proceso de elaboración del ensayo	263
5.6.3 Resultados y discusión.....	265
5.6.4 Modelización de los parámetros	267
5.6.5 Conclusiones.....	269
5.7 Resistencia a flexotracción.....	269
5.7.1 Introducción	269
5.7.2 Proceso de elaboración del ensayo.....	273
5.7.3 Resultados y discusión.....	276
5.7.4 Modelización	277
5.7.5 Conclusiones.....	278
5.8 Módulo de elasticidad en compresión.....	278
5.8.1 Introducción	278
5.8.2 Proceso de elaboración del ensayo	282
5.8.3 Resultados y discusión.....	286
5.8.4 Modelización	290
5.8.5 Conclusiones.....	291
5.9 Ensayo de abrasión superficial	291
5.9.1 Introducción	291
5.9.2 Proceso de elaboración del ensayo	294
5.9.3 Resultados y discusión.....	299

5.9.4 Modelización de los parámetros	300
5.9.5 Conclusiones.....	301
5.10 Ensayo Cántabro modificado	302
5.10.1 Introducción	302
5.10.2 Proceso de elaboración del ensayo.....	302
5.10.3 Resultados y discusión.....	304
5.10.4 Modelización de los parámetros	305
5.10.5 Conclusiones.....	306
5.11 Ensayo del índice de rebote o esclerómetro.....	307
5.11.1 Introducción	307
5.11.2 Proceso de elaboración del ensayo.....	309
5.11.3 Resultados y discusión.....	311
5.11.4 Modelización	314
5.11.5 Conclusiones.....	315
5.12 Ensayo de ultrasonidos	315
5.12.1 Introducción	315
5.12.2 Proceso de elaboración del ensayo.....	322
5.12.3 Resultados y discusión.....	324
5.12.4 Modelización	324
5.12.5 Conclusiones.....	326
5.13 Carbonatación	326
5.13.1 Introducción	326
5.13.2 Determinación de la profundidad y velocidad de la carbonatación	328
5.13.3 Resultados y discusión.....	332
5.13.4 Modelización	333
5.13.5 Conclusiones.....	333
5.14 Bibliografía del capítulo.....	334
CAPÍTULO 6: Correlaciones entre parámetros reológicos y mecánicos	343
6.1 Introducción	345
6.2 Correlaciones entre el límite de fluencia y parámetros del estado endurecido.....	346
6.2.1 Límite de fluencia-densidad	347
6.2.2 Límite de fluencia-porosidad.....	348
6.2.3 Límite de fluencia-resistencia a compresión	348

6.2.4 Límite de fluencia-tracción pura.....	350
6.2.5 Límite de fluencia-flexotracción	352
6.2.6 Límite de fluencia-módulo de elasticidad	353
6.2.7 Límite de fluencia-índice de rebote.....	353
6.2.8 Límite de fluencia-abrasión superficial.....	354
6.3 Correlaciones entre la viscosidad plástica y parámetros del estado endurecido.....	355
6.3.1 Viscosidad plástica-densidad.....	355
6.3.2 Viscosidad plástica-porosidad	356
6.3.3 Viscosidad plástica-resistencia a compresión	357
6.3.4 Viscosidad plástica-tracción pura	359
6.3.5 Viscosidad plástica-flexotracción	360
6.3.6 Viscosidad plástica-módulo de elasticidad.....	361
6.3.7 Viscosidad plástica-índice de rebote	361
6.3.8 Viscosidad plástica-abrasión superficial.....	362
6.4 Conclusiones.....	363
6.5 Bibliografía	364
CAPÍTULO 7: Conclusiones.....	365
7.1 Conclusiones parciales	367
7.2 Conclusiones generales.....	371
7.3 Futuras líneas de investigación	372
CAPÍTULO 8: Bibliografía	375
8.1 Autores	377
8.2 Normas	392

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPITULO 2: Industria del cobre generación de escorias

<i>Figura 2.1.</i> Zonificación de un pórfido cuprífero	25
<i>Figura 2.2.</i> Diferentes minerales de cobre.....	28
<i>Figura 2.3.</i> Procesos de producción del mineral de cobre.....	29
<i>Figura 2.4.</i> Producción pirometalúrgica de minerales sulfurados de cobre	30
<i>Figura 2.5.</i> Producción hidrometalúrgica de minerales oxidados de cobre	33
<i>Figura 2.6.</i> Producción primaria de cobre a nivel mundial	35
<i>Figura 2.7.</i> Producción primaria de cobre por regiones	36
<i>Figura 2.8.</i> Producción primaria de cobre por países	37
<i>Figura 2.9.</i> Producción mundial primaria y secundaria del cobre	37
<i>Figura 2.10.</i> Producción de cobre de fundición por continentes.....	38
<i>Figura 2.11.</i> Producción de cobre de fundición por países.....	39
<i>Figura 2.12.</i> Escoria granulada de fundición de cobre.....	40
<i>Figura 2.13.</i> Difracción por rayos X de la escoria de cobre.....	45
<i>Figura 2.14:</i> Comparativa de la actividad puzolánica de distintos elementos.....	46
<i>Figura 2.15.</i> Ensayo de lixiviación.....	47

CAPITULO 3: Materiales. Dosificación y elaboración de hormigones

<i>Figura 3.1.</i> Tamizadora y balanza utilizada en la elaboración de la granulometría.....	61
<i>Figura 3.2.</i> Curva granulométrica del árido fino 0/2.....	62
<i>Figura 3.3.</i> Curva granulométrica del árido intermedio 0/4	63
<i>Figura 3.4.</i> Curva granulométrica del árido grueso 4/16	64
<i>Figura 3.5.</i> Curva granulométrica de la escoria de cobre 0/4	65
<i>Figura 3.6.</i> Semejanza de triángulos para la obtención D_{max}	67
<i>Figura 3.7.</i> Curva granulométrica de la escoria de cobre 0/2	70
<i>Figura 3.8.</i> Comparativa entre fracciones granulométricas del árido fino 0/2 y escoria 0/2	71
<i>Figura 3.9.</i> Diferencias % acumulado entre tamices del árido fino 0/2 y la escoria 0/2	72
<i>Figura 3.10.</i> Curvas granulométricas del árido fino 0/2 y escoria de cobre 0/2	73
<i>Figura 3.11.</i> Equipos generales utilizados en el método del picnómetro y en el método de la balanza hidrostática.....	76
<i>Figura 3.12.</i> Equipos especiales utilizados en el método del picnómetro.....	77
<i>Figura 3.13.</i> Equipos especiales utilizados en el método de la balanza hidrostática	77

<i>Figura 3.14.</i> Orientaciones sobre condiciones de saturación y superficie seca de los áridos finos.....	79
<i>Figura 3.15.</i> Equipo para la elaboración del ensayo de friabilidad.....	84
<i>Figura 3.16.</i> Curvas granulométricas del árido fino 0/2, árido intermedio 0/4 y mezcla de ambos según método de Fuller	108
<i>Figura 3.17.</i> Comparativa entre las curvas granulométricas del árido mezcla y la curva teórica de Fuller.....	109
<i>Figura 3.18.</i> Curva granulométrica del árido compuesto y curva de Bolomey.....	115
<i>Figura 3.19.</i> Curva granulométrica del árido compuesto y curva de Bolomey modificada.....	121
<i>Figura 3.20.</i> Curva granulométrica del árido compuesto para la dosificación-3 y curva de Bolomey modificada	128
<i>Figura 3.21.</i> Hormigonera utilizada en la fabricación de probetas.....	131
<i>Figura 3.22.</i> Moldes utilizados para la fabricación de probetas	132
<i>Figura 3.23.</i> Mesa vibrante para el compactado de probetas.....	133
<i>Figura 3.24.</i> Fracción de probetas en estado fresco tras el proceso de fabricación	134

CAPITULO 4: Estudio reológico del hormigón en estado fresco

<i>Figura 4.1.</i> Flujos no newtonianos	144
<i>Figura 4.2.</i> Deformación experimentada por un elemento de un material sometido a la acción de la componente tangencial de una fuerza	145
<i>Figura 4.3.</i> Cinemática empleada para obtener la curva de flujo estacionario	148
<i>Figura 4.4.</i> Diferencia del comportamiento viscoplástico entre los modelos de Bingham y Herschel-Bulkley.....	153
<i>Figura 4.5</i> Evolución del torque y de la estructura de la muestra con el tiempo.....	158
<i>Figura 4.6.</i> Rango de velocidades de cizalla a las que se ve sometido el hormigón.....	159
<i>Figura 4.7.</i> Reómetro Malvern Gemini 150	162
<i>Figura 4.8.</i> Esquema de la geometría de vanos utilizada en los ensayos reométricos.....	164
<i>Figura 4.9.</i> Geometría de vanos utilizada en este estudio.....	166
<i>Figura 4.10.</i> Mezcladora con paletas de agitación.....	167
<i>Figura 4.11.</i> Curva granulométrica de los áridos 0/1 y escoria de cobre 0/1.....	172
<i>Figura 4.12.</i> Ensayo completo del Cono de Abrams	184
<i>Figura 4.13.</i> Resultado del cono de Abrams para el hormigón tipo HSA.....	185
<i>Figura 4.14.</i> Microscopía electrónica de las partículas de árido fino.....	187
<i>Figura 4.15.</i> Microscopía electrónica de las partículas de escoria de cobre.....	187
<i>Figura 4.16.</i> Microscopía electrónica de la superficie de partículas árido fino	188
<i>Figura 4.17.</i> Microscopía electrónica de la superficie de partículas de escoria	188

<i>Figura 4.18.</i> Resultado y modelización del ensayo de asentamiento.....	189
<i>Figura 4.19.</i> Geometría del mini-cono	190
<i>Figura 4.20.</i> Resultado del ensayo del mini-cono y medición de los diámetros de escurrimiento en un mortero equivalente	191
<i>Figura 4.21.</i> Resultado y modelización del ensayo de escurrimiento del mini-cono	194
<i>Figura 4.22.</i> Curva de flujo del mortero equivalente de referencia, MEQ-0	195
<i>Figura 4.23.</i> Curvas de flujo de los morteros equivalentes.....	196
<i>Figura 4.24.</i> Ajuste según modelo de Bingham Modificado para morteros con concentración de escorias 0, 20 y 40%.....	199
<i>Figura 4.25.</i> Ajuste según modelo de Bingham Modificado para morteros con concentración de escorias 60, 80 y 100%.....	200
<i>Figura 4.26.</i> Límite de fluencia según la concentración de escorias en el mortero equivalente.....	202
<i>Figura 4.27.</i> Viscosidad plástica según la concentración de escorias en el mortero equivalente	204
<i>Figura 4.28.</i> Parámetro de segundo orden C, según la concentración de escorias en el mortero equivalente	205

CAPITULO 5: Estudio mecánico del hormigón en estado endurecido

<i>Figura 5.1.</i> Tipos de poros en una matriz cementante	221
<i>Figura 5.2.</i> Resultado y modelización del ensayo de densidad del hormigón según el porcentaje de escoria de cobre.....	227
<i>Figura 5.3.</i> Resultados y modelización del ensayo de absorción del hormigón según el porcentaje de escoria de cobre.....	228
<i>Figura 5.4.</i> Resultados y modelización del ensayo de porosidad del hormigón según el porcentaje de escoria de cobre.....	228
<i>Figura 5.5.</i> Esquema del ensayo de succión capilar	232
<i>Figura 5.6.</i> Probetas en contacto con agua durante el ensayo de succión.....	234
<i>Figura 5.7.</i> Impermeabilización de caras laterales en el ensayo de succión	234
<i>Figura 5.8.</i> Capacidad de succión capilar de los diferentes hormigones estudiados	236
<i>Figura 5.9.</i> Recta de regresión del hormigón tipo HSA ajustada a los valores de capacidad de succión para un periodo de 72 horas.....	237
<i>Figura 5.10.</i> Resultados y modelización del coeficiente de succión (S), según el porcentaje de escoria de cobre	239
<i>Figura 5.11.</i> Detalle de probeta montada en equipo durante el ensayo de permeabilidad al agua bajo presión	244

<i>Figura 5.12.</i> Frente de penetración de agua y calca sobre papel milimetrado para determinar la penetración máxima y media del hormigón.....	244
<i>Figura 5.13.</i> Resultado y modelización de la penetración media del agua a presión según el porcentaje de escoria de cobre.....	247
<i>Figura 5.14.</i> Resultado y modelización de la penetración máxima del agua a presión según el porcentaje de escoria de cobre.....	248
<i>Figura 5.15.</i> Influencia del módulo granulométrico del árido en la resistencia relativa a compresión	251
<i>Figura 5.16.</i> Prensa de rotura a compresión.....	254
<i>Figura 5.17.</i> Roturas a compresión satisfactorias en probetas cúbicas.....	255
<i>Figura 5.18.</i> Rotura a compresión en forma de hiperboloide.....	256
<i>Figura 5.19.</i> Rotura a compresión por explosión.....	256
<i>Figura 5.20.</i> Resistencia a compresión para diferentes edades	257
<i>Figura 5.21.</i> Modelización de resistencia a compresión a 7 días.....	259
<i>Figura 5.22.</i> Modelización de resistencia a compresión a 28 días.....	259
<i>Figura 5.23.</i> Modelización de resistencia a compresión a 90 días.....	259
<i>Figura 5.24.</i> Modelización de resistencia a compresión a 150 días.....	259
<i>Figura 5.25.</i> Tensiones aplicadas en el ensayo brasileño	261
<i>Figura 5.26.</i> Distribución de tensiones en el ensayo brasileño.....	261
<i>Figura 5.27.</i> Probeta colocada en prensa de rotura con adaptador para la realización del ensayo brasileño	264
<i>Figura 5.28.</i> Secciones de probeta tras el ensayo brasileño.....	265
<i>Figura 5.29.</i> Resistencia a tracción pura según el ensayo Brasileño.....	266
<i>Figura 5.30.</i> Modelización de la resistencia a tracción pura para edades de 28 y 90 días	268
<i>Figura 5.31.</i> Ensayo de flexotracción con carga centrada	269
<i>Figura 5.32.</i> Ensayo de flexotracción con carga a un tercio.....	269
<i>Figura 5.33.</i> Diferencia entre los resultados obtenidos en flexotracción con carga centrada y a un tercio de la luz.....	271
<i>Figura 5.34.</i> Distribución de tensiones en el ensayo de flexotracción	272
<i>Figura 5.35.</i> Relación entre resistencias a flexotracción y tracción pura	272
<i>Figura 5.36.</i> Ensayo de flexotracción carga a un tercio	273
<i>Figura 5.37.</i> Equipo utilizado en el ensayo de flexotracción	274
<i>Figura 5.38.</i> Probeta colocada en el equipo de ensayo de flexotracción	275
<i>Figura 5.39.</i> Rotura de probeta finalizado el ensayo de flexotracción	275
<i>Figura 5.40.</i> Modelización y resultados del ensayo de flexotracción	277
<i>Figura 5.41.</i> Módulos de elasticidad de un hormigón	279

<i>Figura 5.42.</i> Módulo de elasticidad de la pasta, áridos y hormigón	280
<i>Figura 5.43.</i> Equipo de medida digital para determinar el módulo de elasticidad.....	284
<i>Figura 5.44.</i> Gráfico de adquisición de datos para el cálculo del módulo de elasticidad	285
<i>Figura 5.45.</i> Gráfico tensión/deformación obtenidos del equipo de medida	286
<i>Figura 5.46.</i> Módulo de elasticidad estático según el porcentaje de escoria de cobre.....	287
<i>Figura 5.47.</i> Comparativa entre el módulo de elasticidad experimental y módulo según modelo de Takizaki.....	289
<i>Figura 5.48.</i> Modelización del módulo elasticidad estático a 28 días según el porcentaje de escoria de cobre	290
<i>Figura 5.49.</i> Esquema máquina de ensayo para determinar la resistencia a la abrasión.....	295
<i>Figura 5.50.</i> Equipo utilizado en el ensayo de abrasión.....	296
<i>Figura 5.51.</i> Probeta colocada en el equipo para el ensayo de abrasión	297
<i>Figura 5.52.</i> Situación de las líneas de medida en la huella del ensayo de abrasión	298
<i>Figura 5.53.</i> Medida del ancho central en la huella de abrasión superficial	298
<i>Figura 5.54.</i> Resultados y modelización del ensayo de resistencia al desgaste medido como volumen de material perdido	301
<i>Figura 5.55.</i> Máquina de Los Ángeles utilizada en el ensayo Cántabro.....	303
<i>Figura 5.56.</i> Estado de la probeta tras el ensayo Cántabro	304
<i>Figura 5.58.</i> Funcionamiento del martillo Schmidt.....	307
<i>Figura 5.59.</i> Martillo Schmidt utilizado en los ensayos.....	310
<i>Figura 5.60.</i> Determinación del índice de rebote	311
<i>Figura 5.61.</i> Relación entre el índice de rebote y la resistencia a compresión	312
<i>Figura 5.62.</i> Comparativa entre resistencia a compresión estimada según el índice de rebote y la resistencia real.....	313
<i>Figura 5.63.</i> Resultados y modelización del ensayo del índice de rebote	314
<i>Figura 5.64.</i> Posición de transductores en transmisión directa.....	316
<i>Figura 5.65.</i> Posición de transductores en transmisión semidirecta	316
<i>Figura 5.66.</i> Posición de transductores en transmisión indirecta.....	317
<i>Figura 5.67.</i> Distribución de transductores en medición indirecta.....	318
<i>Figura 5.68.</i> Ajuste de la velocidad de propagación en medición indirecta	318
<i>Figura 5.69.</i> Influencia de la longitud de la trayectoria en la velocidad de propagación	320
<i>Figura 5.70.</i> Equipo de ultrasonidos utilizado en los ensayos	323
<i>Figura 5.71.</i> Resultados y modelización del tiempo de propagación ultrasónica.....	325
<i>Figura 5.72.</i> Esquema del recinto para el ensayo de carbonatación en el ambiente B.....	329
<i>Figura 5.73.</i> Medida de la profundidad de carbonatación	330

<i>Figura 5.74.</i> Probeta rociada con fenolftaleína para la determinación de la profundidad de carbonatación	331
--	-----

CAPITULO 6: Correlación entre parámetros reológicos y mecánicos

<i>Figura 6.1.</i> Correlación límite de fluencia-densidad	347
<i>Figura 6.2.</i> Correlación límite de fluencia-porosidad.....	348
<i>Figura 6.3.</i> Correlación límite de fluencia-resistencia a compresión a 28 días.....	349
<i>Figura 6.4.</i> Correlación-límite de fluencia- resistencia a compresión a 90 días	349
<i>Figura 6.5.</i> Correlación límite de fluencia-resistencia a compresión a 150 días.....	350
<i>Figura 6.6.</i> Correlación límite de fluencia-tracción pura a 28 días	351
<i>Figura 6.7.</i> Correlación límite de fluencia-tracción pura a 90 días	351
<i>Figura 6.8.</i> Correlación límite de fluencia-flexotracción.....	352
<i>Figura 6.9.</i> Correlación límite de fluencia-módulo de elasticidad a 28 días	353
<i>Figura 6.10.</i> Correlación límite de fluencia-índice de rebote	354
<i>Figura 6.11.</i> Correlación límite de fluencia-abrasión superficial	354
<i>Figura 6.12.</i> Correlación viscosidad plástica-densidad	356
<i>Figura 6.13.</i> Correlación viscosidad plástica-porosidad.....	356
<i>Figura 6.14.</i> Correlación viscosidad plástica-resistencia a 28 días.....	357
<i>Figura 6.15.</i> Correlación viscosidad plástica-resistencia a 90 días.....	358
<i>Figura 6.16.</i> Correlación viscosidad plástica-resistencia a 150 días.....	358
<i>Figura 6.17.</i> Correlación viscosidad plástica-tracción pura a 28 días	359
<i>Figura 6.18.</i> Correlación viscosidad plástica-tracción pura a 90 días	359
<i>Figura 6.19.</i> Correlación viscosidad plástica-flexotracción.....	360
<i>Figura 6.20.</i> Correlación viscosidad plástica-módulo de elasticidad	361
<i>Figura 6.21.</i> Correlación viscosidad plástica-índice de rebote.....	362
<i>Figura 6.22.</i> Correlación viscosidad plástica-abrasión superficial	362

ÍNDICE DE TABLAS

CAPITULO 2: Industria del cobre generación de escorias

Tabla 2.1: Minerales de cobre y su contenido en cobre, azufre y hierro	26
Tabla 2.2: Composición química de las escorias de cobre	44
Tabla 2.3: Principales óxidos presentes en las escorias de cobre.....	44
Tabla 2.4: Resultados del análisis del lixiviado y su limite admisible según R.D 849/1986	49
Tabla 2.5: Resultados del test de toxicidad.....	50

CAPITULO 3: Materiales. Dosificación y elaboración de hormigones

Tabla 3.1: Nomenclatura y tamaños de los áridos empleados	58
Tabla 3.2: Muestras de áridos empleadas en el ensayo granulométrico	59
Tabla 3.3: Granulometría del árido fino 0/2	62
Tabla 3.4: Granulometría del árido intermedio 0/4.....	63
Tabla 3.5: Granulometría del árido grueso 4/16.....	64
Tabla 3.6: Ganulometría de la escoria de cobre 0/4.....	65
Tabla 3.7: Clases generales de los tamaños máximo D y minimo d de un árido	66
Tabla 3.8: Granulometría de los áridos, expresada en % pasa acumulado	68
Tabla 3.9: Tamaño máximo de los áridos.....	68
Tabla 3.10: Granulometría de la escoria de cobre 0/2	70
Tabla 3.11: Comparativa granulométrica entre el árido 0/2 y la escoria de cobre 0/2.....	71
Tabla 3.12: Reproducción granulométrica de la escoria de cobre 0/2 en base a la del arido fino 0/2.....	74
Tabla 3.13: Muestras empleadas en el ensayo de densidad y absorción	75
Tabla 3.14: Densidad y absorción de los áridos y la escoria de cobre	81
Tabla 3.15: Masa retenida en el tamiz 0,05 mm.....	84
Tabla 3.16: Coeficiente de friabilidad árido 0/2 y escoria 0/2	84
Tabla 3.17: Compuestos totales de azufre de escoria granulada de fundicion de cobre	85
Tabla 3.18: Contenido de sulfatos solubles en ácido de escoria granulada de fundicion de cobre.....	86
Tabla 3.19: Contenido de cloruros en la escoria granulada de fundición de cobre.....	86
Tabla 3.20: Contenido de materia orgánica en la escoria granulada de fundicion de cobre	86
Tabla 3.21: Reactividad de la escoria de cobre con los álcalis del cemento.....	87
Tabla 3.22: Contenido de materia orgánica en la escoria granulada de fundicion de cobre	87
Tabla 3.23: Clases generales de exposición relativas a la corrosión de las armaduras	90

Tabla 3.24: Clases específicas de exposición relativas a procesos de deterioro distintos de la corrosión	91
Tabla 3.25: Tipos de cemento utilizables según la instrucción de hormigón estructural EHE-08	92
Tabla 3.26: Máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento	93
Tabla 3.27: Resistencias mínimas recomendadas en función de los requisitos de durabilidad .	93
Tabla 3.28: Tipos de consistencia y tolerancias	94
Tabla 3.29: Parámetros mínimos exigibles al hormigón de referencia.....	96
Tabla 3.30: Valores de la desviación típica y coeficiente de variación en función de la uniformidad de fabricación del hormigón	98
Tabla 3.31: Valores orientativos entre la resistencia media y característica.....	99
Tabla 3.32: Valores de la resistencia media f_{cm} dada la resistencia característica f_{ck} según distintas fuentes	99
Tabla 3.33: Valores del parámetro K_z	101
Tabla 3.34: Valores del parámetro K_w	103
Tabla 3.35: Módulo granulométrico y tamaño máximo de los áridos	105
Tabla 3.36: Granulometría de la mezcla árido 0/2 y 0/4 por método de Fuller	107
Tabla 3.37: Granulometría mezcla de áridos y curva teórica de Fuller.....	109
Tabla 3.38: Parámetros necesarios en el método de Bolomey	110
Tabla 3.39: Valores del parámetro a en el método de Bolomey	111
Tabla 3.40: Granulometría del árido compuesto aplicando método de Bolomey.....	114
Tabla 3.41: Resumen de dosificación teórica por m^3 según el método de Bolomey.....	116
Tabla 3.42: Granulometría del árido compuesto aplicando el método de Bolomey corregido, $a=16$	120
Tabla 3.43: Contenido de aire oculto para distintos tamaños del árido	122
Tabla 3.44: Agua debida al superplastificante en función del porcentaje según peso cemento	124
Tabla 3.45: Resumen de dosificación-1 del hormigón de referencia por m^3	124
Tabla 3.46: Resumen de dosificación-2 del hormigón de referencia por m^3	125
Tabla 3.47: Resumen de dosificación-3 del hormigón de referencia por m^3	126
Tabla 3.48: Granulometría del árido compuesto para la dosificación-3.....	127
Tabla 3.49: Nomenclatura y porcentaje de escoria de cobre en los distintos hormigones empleados	129
Tabla 3.50: Dosificación por metro cúbico de los distintos hormigones empleados	129

CAPITULO 4: Estudio reológico del hormigón en estado fresco

Tabla 4.1: Especificaciones técnicas del reómetro Malvern Gemini 150.....	161
Tabla 4.2: Constantes características de la geometría de vanos empleada en este estudio....	165
Tabla 4.3: Nomenclatura áridos 0/1	170
Tabla 4.4: Granulometría del árido fino 0/1 y escoria de cobre 0/1.....	171
Tabla 4.5: Granulometría del árido 0/1.....	171
Tabla 4.6: Densidad y absorción de los áridos 0/1 y escoria de cobre 0/1.....	172
Tabla 4.7: Cálculo de la superficie específica del árido fino 0/2	174
Tabla 4.8: Superficies específicas de los áridos y la escoria de cobre.....	174
Tabla 4.9: Nomenclatura y porcentaje de escoria de cobre en los morteros equivalentes	175
Tabla 4.10: Dosificación del hormigón de referencia por m ³	178
Tabla 4.11: Dosificación del mortero equivalente de referencia por m ³	180
Tabla 4.12: Dosificación del mortero equivalente de referencia para 300 mL.....	180
Tabla 4.13: Dosificación de los distintos morteros equivalentes empleados por m ³	181
Tabla 4.14: Dosificación de los distintos morteros equivalentes empleados para muestras de 300 mL.....	182
Tabla 4.15: Tipos de consistencia y tolerancias	183
Tabla 4.16: Resultados del ensayo del cono de Abrams.....	185
Tabla 4.17: Resultados del diámetro de escurrimiento en el ensayo del mini-cono.....	192
Tabla 4.18: Límite de fluencia por observación directa	197
Tabla 4.19: Parámetros del modelo de Bingham modificado.....	199

CAPITULO 5: Estudio mecánico del hormigón endurecido

Tabla 5.1: Calidad del hormigón según su porosidad	222
Tabla 5.2: Valores medios de densidad, porosidad y absorción	225
Tabla 5.3: Modelos analíticos propuestos para la determinación de la densidad, porosidad y absorción del hormigón	227
Tabla 5.4: Valores medios de la capacidad de succión capilar.....	235
Tabla 5.5: Coeficientes de succión de los hormigones estudiados.....	237
Tabla 5.6: Profundidad de penetración máxima y media según la EHE-08	242
Tabla 5.7: Valores medios de permeabilidad al agua bajo presión	245
Tabla 5.8: Coeficientes de permeabilidad según Valenta.....	245
Tabla 5.9: Coeficientes de conversión según geometría de probetas	252
Tabla 5.10: Carga de rotura y resistencia media a compresión en probetas cúbicas 15x15x15 cm	257

Tabla 5.11: Rectas de regresión para modelos de resistencia a compresión	259
Tabla 5.12: Valores de carga de rotura en el ensayo Brasileño. Valores de tracción indirecta y tracción pura	266
Tabla 5.13: Ecuaciones del modelo analítico de resistencia a tracción pura.....	268
Tabla 5.14: Valores de carga de rotura y resistencia a flexotracción	276
Tabla 5.15: Módulo de elasticidad a 28 días	286
Tabla 5.16: Resultados del modulo de elasticidad según Takizaki.....	288
Tabla 5.17: Relación entre valores de la cuerda L y el volumen de materia eliminada V.....	299
Tabla 5.18: Valores medios de cuerda L y resistencia a la abrasión medida como V	299
Tabla 5.19: Pérdidas por desgaste según el ensayo Cántabro modificado.....	304
Tabla 5.20: Valores medios del índice de rebote.....	312
Tabla 5.21: Valores de la resistencia real y estimada mediante el índice de rebote.....	313
Tabla 5.22: Calidad del hormigón según la velocidad de propagación ultrasónica	319
Tabla 5.23: Valores medios del tiempo y velocidad de propagación ultrasónica	324
Tabla 5.24: Profundidad del frente de carbonatación a 90 y 210 días	332
Tabla 5.25: Velocidad de carbonatación a 90 y 210 días	332

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El inevitable crecimiento de los residuos generados como consecuencia de la actividad industrial se ha convertido en los últimos años en un problema complejo y difícil de tratar, sobre todo debido al endurecimiento de las normativas y políticas medioambientales. Además de los cambios normativos en materia medioambiental se destaca el hecho de que existe una mayor demanda y concienciación social con el medio natural. Estos cambios de normativa unidos al crecimiento del compromiso social por el medioambiente, pone de manifiesto que es necesario plantear otros modelos de consumo diferentes a los que actualmente existen, de manera que sean más sostenibles.

Para paliar los efectos negativos producidos en el medio ambiente, se plantean proyectos que sean respetuosos con el medio natural, ya sea cambiando los procesos productivos industriales, reutilizando los residuos o aplicando ambos procedimientos a la vez. La gestión de residuos basada en su destrucción sin aprovechamiento alguno o el vertido sin más de estos se considera como no adecuado desde un punto de vista medioambiental. Otras formas de gestión se fundamentan en plantear procedimientos para obtener un rendimiento de los residuos a la vez que permiten su reincorporación a los ciclos productivos. De este modo se obtiene un aprovechamiento más óptimo de los recursos naturales, minimizando el impacto sobre el medio ambiente, al reducir la contaminación.

Logrando una protección del medio ambiente adecuada, se mejora la economía nacional porque no se necesita ni el consumo de materias primas ni el de energía, además de que constituye una fuente de empleos e ingresos de gran beneficio y, sin duda, contribuye al equilibrio ecológico [1.1].

Por todo ello existe una tendencia mundial a buscar y estudiar nuevas formas de utilización y aprovechamiento de los residuos, resultando interesante la búsqueda de alternativas de uso, unido a que la colocación de los mismos en el mercado conlleve una rentabilidad comercial.

La incorporación de los residuos de la industria a la fabricación de hormigones ya sea como adiciones a la formulación del cemento o la sustitución parcial o total de los áridos, hacen que por un lado se minimicen las actividades extractivas, las cuales degradan enormemente el medio ambiente y por otro, se de salida a los subproductos industriales. Evidentemente y previamente a su utilización dichos subproductos estarán respaldados por la experiencia de uso además de contar con una base científica, las cuales hayan acreditado la viabilidad para las aplicaciones requeridas [1.2-1.11]

En consecuencia existe un justificado interés por el uso de residuos como adiciones en materiales cementosos y su comportamiento en lo referente a su sostenibilidad ambiental. Sirvan, como ejemplo, algunas de las muchas publicaciones que ha generado este tema en los últimos años, así como el hecho de que la última Instrucción de Hormigón Estructural elaborada por el Ministerio de Fomento en su edición de diciembre de 2008 introduce un anejo específico [1.12].

Entre los múltiples aspectos atractivos del hormigón se encuentra su capacidad para aceptar como componentes propios diferentes tipos de sustancias, es decir, se convierte en un material adecuado para incorporar subproductos industriales, con el beneficio medio ambiental que esto conlleva. No obstante, no todos los materiales subproductos de la industria son compatibles con una respuesta óptima del hormigón, de ahí que se necesite un respaldo basado en la experiencia con una base científica, tal y como se ha indicado anteriormente.

Una vez se haya comprobado que el material adicionado es efectivamente compatible con el resto de componentes del hormigón y que dota a este de las características y cualidades deseadas, se fijará la dosificación adecuada para cada aplicación. En este sentido, dado que hasta la fecha hay pocos estudios realizados en lo que se refiere a la adición de residuos procedentes de los procesos metalúrgicos como sustitutos de algún componente del hormigón, o bien como aditivos o sustitutos de los cementos y considerando el interés adicional que despierta esta solución debido a su aportación a

la sostenibilidad y al cuidado del medio ambiente, se plantea realizar un estudio sobre hormigones que incorporen escorias de cobre como sustituto del árido fino [1.13].

Las escorias de cobre son un residuo procedente del proceso pirometalúrgico de los minerales sulfurados de cobre. Estas normalmente se depositan en vertederos autorizados anexos a las plantas de fundición.

A efectos medioambientales, las escorias de cobre se consideran como un pasivo ambiental, llegando a permanecer en los lugares de acopio años, lo que conlleva a la ocupación de enormes superficies de terreno.

Los volúmenes de escorias vertidos tras el proceso industrial crece cada año, por lo que cada vez se necesitan mayores superficies de acopio; superficies que en muchos casos no se encuentran junto a las plantas de producción por haber sido agotadas. En este caso los vertederos se enclavan en lugares cada vez más alejados de las zonas de producción con el consiguiente incremento de costes de transporte y contaminación ambiental unido al impacto visual que conlleva la existencia de vertederos fuera de la zona industrial.

A escala mundial se generan aproximadamente 25 millones de toneladas y la mayor parte de estas son vertidas sin el reciclaje apropiado [1.14].

Debido a esa cantidad de escoria de cobre generada, existe un creciente interés por buscar alternativas viables. A nivel mundial, la escoria de cobre es usada en diversos sectores productivos, lo que está ayudando a reducir el tamaño de los vertederos y por ende el impacto ambiental que producen.

Actualmente algunos usos alternativos de la escoria de cobre son los que se indican a continuación [1.15-1.23]:

1. Balasto para líneas de ferrocarril.
2. Terraplenes y rellenos localizados.

3. Capas granulares de firmes, tanto como estructura portante o capa drenante.
4. Áridos para la fabricación de mezclas bituminosas.
5. Áridos para la fabricación de morteros y hormigones.
6. Abrasivos. Muy utilizados para limpieza a chorro de estructuras metálicas.
7. Albañilería. Fabricación de bloques moldeados prefabricados.
8. Adición al clinker del cemento Portland.
9. Sustitutivo de forma parcial del cemento Portland.

Las investigaciones sobre usos de la escoria de cobre comienzan a principio de los años 70 debido a que es en estos años cuando comienza un verdadero auge en la producción de cobre y, en consecuencia, de la generación de escoria de cobre, sin bien en 1967 existe ya una patente alemana que utiliza la escoria de cobre para la fabricación de cementos [1.22].

Los pioneros en la reutilización de escorias de cobre son Europa y Australia, donde los primeros estudios y puesta en práctica se basaban en la sustitución parcial del cemento Portland en rellenos sobre todo de las mismas minas de donde se extraía el mineral de cobre. El interés de estas aplicaciones consistía en disminuir los costes de las producciones mineras y del transporte del cemento al lugar de la mina, que en repetidas ocasiones eran remotas [1.24].

En esos mismos años 70, concretamente en el año 1972 Canadá patentó su uso en cementos, siendo este mismo país en los años 80 el que comienza a utilizar las escorias de cobre como sustituto de los áridos para la fabricación de hormigones, así como en rellenos utilizados en obras de ingeniería civil [1.25, 1.26].

Igualmente durante la década de los 70 existen estudios donde se analizan mezclas de cemento Portland con escoria, de los cuales se obtuvieron resultados óptimos en relación al aumento de la resistencia mecánica según el grado de molienda [1.27].

El Comité Europeo de Normalización incluyó en el año 1992 a la escoria de cobre como una puzolana industrial y autorizó su adición al cemento portland con un límite del 15% en peso [1.28].

Las líneas de investigación más importantes de las escorias de cobre en la ingeniería civil se centran fundamentalmente en el estudio del comportamiento de cementos y hormigones, y de sus propiedades puzolánicas.

En resumen, se diferencian tres grandes campos de investigación relacionados con el uso de las escorias de cobre [1.29-1.42]:

1. Áridos artificiales para la fabricación de morteros y hormigones.
2. Adiciones al clinker del cemento Portland.
3. Sustitutivo del cemento Portland, debido a las propiedades puzolánicas que posee.

En todos los casos las investigaciones muestran que las resistencias obtenidas en los hormigones/morteros fabricados son superiores a las de hormigones/morteros sin sustituciones de árido o con cementos convencionales. De hecho esta tesis doctoral plantea el estudio de hormigones con diferentes proporciones de sustitución del árido fino por escorias de cobre. Las sustituciones de áridos por escoria dan lugar a un menor coste de producción debido a que no involucra gastos derivados del proceso de molienda necesario de la escoria para su adición al cemento.

El uso alternativo de la escoria en los campos antes descritos contribuyen a una reducción del impacto ambiental debido a:

1. La utilización de la escoria como sustituto de los áridos en hormigones y su adición a cementos, hace que disminuya la explotación natural de las canteras.
2. Al presentarse como una alternativa al cemento Portland se reducen las emisiones de CO₂ a la atmósfera debida a la fabricación de este, además de

reducir costes en la cadena productiva al disminuir el precio de todos aquellos productos en los cuales el cemento sea parte fundamental: hormigones y morteros.

Existen diferentes autores que han realizados estudios sobre la idoneidad del uso de las escorias de cobre en la ingeniería civil. Así por ejemplo los resultados obtenidos por Douglas y Mainwaring [1.19] ratifican que algunas escorias de cobre tienen propiedades puzolánicas y pueden considerarse como materiales alternativos al cemento.

Tanto Frías [1.41] en el seminario IECA (2010) “Nuevas adiciones al cemento” como Sánchez de Rojas [1.42] en su estudio sobre el comportamiento puzolánico y fijación de los elementos pesados en morteros, realizaron una comparativa entre las actividades puzolánicas de las escorias de cobre, cenizas volantes y el humo de sílice. A 28 días la actividad puzolánica de las escorias es muy pequeña, valores del 8%, en comparación al de las cenizas volantes, 10% y el polvo de humo 88%. Sin embargo a 90 días estos valores se elevan al 60% en el caso de la escoria de cobre, 72% en las cenizas volantes y el polvo de humo se mantiene prácticamente igual. A 360 días la actividad puzolánica es prácticamente la misma en todos los casos. Con ello se observa que la actividad puzolánica de la escoria de cobre se manifiesta a largo plazo ya que a cortas edades (menos de 90 días) apenas existe actividad puzolánica.

Al igual que Frías y Sánchez de Rojas hicieron una comparativa y un estudio de la actividad puzolánica de la escoria de cobre, Douglas y Mainwaring realizaron un trabajo paralelo sobre la hidratación y la actividad puzolánica de las escorias no férricas, obteniendo resultados similares.

De la misma forma, de los estudios realizados por Shi [1.23] y Resende [1.29], se obtienen morteros de cemento con propiedades puzolánicas mejoradas respecto a morteros sin adición de escorias.

Otros trabajos realizados arrojan resultados excelentes para hormigones fabricados con escoria de cobre como sustituto de áridos, evaluándose en la mayoría de los casos las propiedades físicas del hormigón y su resistencia a compresión y/o flexotracción [1.20, 1.30-1.36].

En la ponencia del congreso IBEROMET XI de Viña del Mar, Chile: “Una revisión de los usos de las escorias de cobre” a cargo de Nazer, A. et al. [1.21], se expresa: *“las resistencias obtenidas en el hormigón con escoria de cobre son mayores en un 34% respecto a las obtenidas en el hormigón de referencia”*, por lo que se deduce que la adición de escoria de cobre a los hormigones contribuye a una mejora de la resistencia. Este aumento de la resistencia contribuiría a la disminución de la cantidad de cemento usada originalmente y con ello se obtendría un hormigón con las mismas características resistentes.

Otros autores evalúan las propiedades físicas de cementos donde se han incorporado diferentes porcentajes de escoria de cobre en la fabricación del clinker. En todos los casos los resultados han sido satisfactorios, arrojando una mejora resistente a los cementos así fabricados [1.37-1.40]

Wu et al. [1.43] pone de manifiesto las mejoras de las propiedades mecánicas y el aumento de la resistencia a cargas dinámicas en hormigones reforzados con escorias de cobre.

Con objeto de poner en valor el enorme acopio que la empresa Atlantic Copper tiene de escorias de cobre en la planta de Huelva se ha realizado un estudio para la utilización de las mismas como sustituto del árido fino en hormigones y como adición al clinker del cemento [1.22]. Los resultados obtenidos son del todo satisfactorios, cumpliendo con las especificaciones de la instrucción de hormigón estructural EHE-08 [1.12].

1.2 Hipótesis

Las hipótesis en las que se basa esta tesis doctoral, las cuales justifican el procedimiento experimental seguido, son las siguientes:

- I. Existe una correlación entre la respuesta mecánica resistente del hormigón en estado fresco y estado endurecido.
- II. La respuesta mecánica del hormigón en estado fresco está correlacionada con la del correspondiente mortero equivalente, definiendo el mortero equivalente de un hormigón, como aquel material cementoso que se obtiene sustituyendo todos los áridos por un único árido fino con la misma área específica, manteniendo constantes el resto de parámetros [1.44].
- III. Es posible obtener un material con un comportamiento mecánico determinado a partir de los análisis experimentales efectuados en el laboratorio.

Con relación a la primera de estas hipótesis de partida se destaca que nos estamos refiriendo al mismo material, es decir, dicha correlación se refiere a hormigón en estado fresco y a hormigón en estado endurecido, o a mortero en estado fresco y a mortero en estado endurecido. La razón por la que se considera pertinente realizar esta aclaración es que somos conscientes de que la presencia de áridos gruesos (fase inerte de la mezcla) en la composición del hormigón, le dota de una respuesta mecánica en estado endurecido que únicamente es cuantificable cuando se estudia su comportamiento mecánico en estado fresco.

No obstante, al hilo de lo indicado en la segunda hipótesis, que está justificada por otros estudios [1.9], es cierto que las respuestas en estado fresco del hormigón y del mortero equivalente están, a su vez, correlacionadas, por lo que solventaremos de esta forma, aunque sea asumiendo cierta incertidumbre, la imposibilidad de realizar con nuestros dispositivos ensayos reológicos con el hormigón, a cambio de contar con resultados precisos y de validez absoluta (independiente de la geometría y/o del reómetro utilizado).

Finalmente, la tercera hipótesis recoge el hecho contrastado de que a partir de ensayos en condiciones de flujo estándar es posible inducir la respuesta de flujo del material en cualquier otra situación práctica.

Para comprobar la validez de las hipótesis planteadas y en última instancia obtener una formulación útil del material objeto de estudio, se realizan diferentes ensayos normalizados de los hormigones en estado endurecido [1.45-1.47]. Además se estudia el comportamiento reológico [1.48] de los hormigones en estado fresco a través de la medida directa sobre morteros equivalentes [1.49].

1.3 Objetivos principales

El objetivo principal de esta tesis doctoral es analizar los efectos que tiene la incorporación de la escoria de cobre como sustituto del árido fino sobre las prestaciones del hormigón en estado fresco y endurecido.

Para ello se estudian diferentes tipos de hormigones, donde a partir de un hormigón de referencia se procederá a realizar distintas sustituciones en volumen del árido fino por escoria de cobre.

De la bibliografía consultada se deduce que los estudios relacionados con la sustitución del árido fino por la escoria de cobre en el hormigón, se basan fundamentalmente en analizar la evolución de la resistencia a compresión en el tiempo, no analizando ninguna otra propiedad del nuevo hormigón.

Por ello y con objeto de enriquecer la investigación en este campo se realizan diferentes ensayos entre los que destacamos: reología, densidad, porosidad, absorción, succión, penetración de agua bajo presión, resistencia a compresión, resistencia a tracción, flexotracción, abrasión, desgaste, ultrasonidos, módulo de elasticidad, carbonatación, análisis del índice de rebote.

1.4 Objetivos secundarios

Para la consecución de dicho objetivo principal se procederá a examinar cada uno de los siguientes objetivos secundarios:

- Fabricar un hormigón con características diferentes a las convencionales, garantizando la estabilidad de los materiales elaborados con escoria de cobre.
- Analizar la evolución, desde su consistencia primaria hasta su consolidación final, mediante ensayos reológicos del mortero equivalente en estado fresco.
- Evaluar las prestaciones resistentes del nuevo hormigón, aportadas por la adición de la escoria de cobre, en comparación con las del hormigón convencional.
- Correlacionar la respuesta del material en estado fresco y endurecido.
- Establecer la posibilidad de obtener un material con un comportamiento mecánico resistente determinado a partir de los ensayos experimentales realizados en laboratorio.

1.5 Estructura de la tesis doctoral

Para alcanzar los objetivos propuestos hemos desarrollado distintos capítulos a lo largo de la tesis doctoral. A continuación describiremos brevemente el contenido de cada uno de ellos.

Capítulo 1

Este capítulo es el que nos ocupa y en él se realiza una breve descripción de los antecedentes y objetivos, así como una breve descripción de los capítulos que conforman la tesis doctoral.

Capítulo 2

Se realiza una breve reseña del uso del cobre en la historia. Seguidamente se describen las propiedades físicas y químicas del cobre, así como el proceso geológico de su formación.

A continuación se indican los distintos procedimientos industriales existentes para la obtención del cobre a partir de sus minerales y el proceso de generación de la escoria de cobre. Se incluyen las estadísticas de la producción de cobre mundial.

Capítulo 3

Se definen los materiales utilizados en la fabricación de hormigones y morteros, así como la caracterización de cada uno de ellos.

Igualmente se detallan las dosificaciones utilizadas para la fabricación de hormigones, de tal forma que se permita la reproducibilidad de esta tesis.

Capítulo 4

En este capítulo se realiza el estudio reológico de los morteros equivalentes de cada uno de los hormigones desarrollados a partir de las dosificaciones establecidas previamente.

Igualmente se definen y realizan los ensayos del hormigón en estado fresco.

Capítulo 5

En este capítulo se desarrollan los distintos ensayos del hormigón en estado endurecido, para posteriormente realizar una presentación de los resultados obtenidos.

Para finalizar, se modelizan cada uno de los ensayos en función de las mediciones obtenidas con el objetivo de conseguir formulaciones que nos hagan una prognosis de aquellos valores no experimentados.

Capítulo 6

Análisis de los resultados obtenidos en los capítulos 4 y 5, intentando buscar correlaciones entre las mediciones efectuadas en el estado fresco y endurecido de los distintos hormigones estudiados.

Capítulo 7

Presentación de las conclusiones derivadas de los distintos ensayos realizados en la presente tesis. Con posterioridad expondremos las futuras líneas de investigación surgidas como consecuencia del desarrollo de este trabajo.

Capítulo 8

Exposición de la bibliografía general utilizada en el desarrollo de la tesis doctoral.

1.6 Bibliografía

- [1.1] Ferrer Prada, R. (2011): *Percepción social sobre la gestión de residuos en Madrid*. Universidad Complutense de Madrid.
- [1.2] Sales A., Rodrigues de Souza F. (2009): *Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble*. Construction and Building Materials, **23**, pp. 2362-2370.
- [1.3] Eguchi K., Teranishi K., Nakagome A., Kishimoto H., Shinozaki K, Narikawa M. (2007): *Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction*. Construction and Building Materials, **21**, pp. 1542-1551.
- [1.4] Parrón Vera M.A. (1999): *Pirometalurgia con reductores no convencionales aplicada a la recuperación de metales de los óxidos de residuos de acerías*. Tesis doctoral Universidad de Cádiz.
- [1.5] Ahmed S.F.U., Mihashi H. (2007): *A review on durability properties of strain hardening fibre reinforced cementitious composites*. (SHFRCC), Cement and Concrete Composites., **29**, pp. 365-376.
- [1.6] Peris-Mora E. (2007): *Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials*. Building and Environment, **42**, pp. 1329-1334
- [1.7] Aitcin P.C (2000): *Cements of yesterday and today, concrete of tomorrow*. Cement and Concrete Research, **30**, pp. 1349-1359
- [1.8] Vivian W.Y., Tam C.M., Wang Y. (2007): *Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach*. Construction and Building Materials, **21**, pp. 1928-1939
- [1.9] Velázquez Navarro J. (2009): *Reología de pastas y morteros equivalentes de hormigones autocompactables*. Tesis doctoral Universidad de Málaga.

- [1.10] Mendonça P., Bragança L. (2007): *Sustainable housing with mixedweight strategy. A case study*. Building and Environment, **42**, pp. 3432-3443.
- [1.11] Sánchez de Rojas, M.I., Rivera J., Frías M. (2008): *Use of recycled copper slag for blended cements*. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, pp. 83-209
- [1.12] EHE-08: *Instrucción de Hormigón Estructural*. Serie Normativas, Ministerio de Fomento. 2ª edición, Ed. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento, febrero 2009.
- [1.13] Rubio Cintas M.D. (2010): *Influencia de la adición de polvo de humo ferrítico en el comportamiento reológico y resistente de morteros y hormigones*. Tesis doctoral Universidad de Cádiz.
- [1.14] Gorai, B. , R.K. Jana, and Premchand (2003): *Characteristics and utilization of copper slag—a review*. Resources, Conservation and Recycling, **39**, pp. 299-313.
- [1.15] Geocisa (1997): *Estudio de escoria de cobre granulada de horno eléctrico*. Atlantic Copper, 1997.
- [1.16] Akihiko Y., Takashi Y. (1996): *Study of utilization of copper slag as fine aggregate for concrete*. Ashikaya Kogyo Daigaku Kenkyu Shoroku, **23**, pp.79-85
- [1.17] Kambham K., Sangameswaran S., Datar S., Kura B. (2007): *Copper slag: optimization of productivity and consumption for cleaner production in dry abrasive blasting*. Journal of Cleaner Production, **15**, pp. 465-473.
- [1.18] Al-Jabri K., Tana R., Al-Hashmi A., Al-Harthy A. (2006): *Effect of copper slag and cement by-pass dust addition on mechanical properties of concrete*. Construction and Building Materials, **20**, pp. 322-331

- [1.19] Douglas E., Mainwaring P. (1985): *Hydration and puzzolanic activity of nonferrous slags*. The Bulletin of the American Ceramic Society, **64**, pp. 700-706.
- [1.20] Nazer A., Pavez O., Rojas F., Palacios J. (2005): *Uso de las escorias de cobre como agregado pétreo en hormigones*. X Congreso de Control de Calidad en la Construcción. VIII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción. Asunción, Paraguay, 2005.
- [1.21] Nazer A., Pavez O., Rojas F., Aguilar C. (2010): *Una revisión de los usos de las escorias de cobre*. Congreso IBEROMET XI, XCONAMET/SAM. Viña del Mar, Chile. 2010
- [1.22] Atlantic Copper (2012): *Estudios y usos alternativos de la escoria de cobre*.
- [1.23] Shi C., Meyer C., Behnood A. (2008): *Utilization of copper slag in cement and concrete*. Resources, Conservation and Recycling, **52**, pp. 1115-1120
- [1.24] Biswas A.K., Davenport W.G (1980): *El cobre: metalurgia extractiva*. Ed. Limusa. México.
- [1.25] Malhotra, V.M. (1987): *Supplementary cementing materials for concrete*. Canmet, Ministry of Supply and Services. Canadá.
- [1.26] Ueno K., Kokubu K., Uji K. (2005): *A fundamental study on blending control of concrete containing slag fine aggregates*. In: Banthia et al. editors. Proceedings of the third international conference on construction materials: Performance, innovations and structural implications and mindess symposium, Vancouver, Canada. pp. 22-24.
- [1.27] Merrit, F.S. (1993): *Manual del ingeniero civil*. 3ª edición, Ed. McGraw Hill.

- [1.28] ENV 197-1. *Cemento. Composición, especificaciones y criterios de conformidad. Cementos comunes*. Comité Europeo de Normalización, 1992.
- [1.29] Resende C., Cachim P., Bastos A.M. (2008): *Copper slag mortar properties*. Materials Science Forum, **587-588**, pp. 862-866
- [1.30] Akihiko Y., Takashi Y. (1996): *Study of utilization of copper slag as fine aggregate for concrete*. Ashikaya Kogyo Daigaku Kenkyu Shoroku, **23**, pp.79-85
- [1.31] Ayano Toshiki, Kuramoto Osamu, Sakata Kenji (2000): *Concrete with copper slag fine aggregate*. Society of Materials Science, **49**, pp. 1097-1102
- [1.32] Ishimaru K., Mizuguchi H., Hashimoto C., Ueda T., Fujita K., Ohmi M. (2005): *Properties of copper slag and second class fly ash as a part of fine aggregate*. Japan Society of Materials Science, **54**, pp. 828-833.
- [1.33] Wu W., Zhang W., Ma G. (2010): *Optimum content of copper slag as a fine aggregate in high strength concrete*. Materials and Design, **31**, pp. 2878-2883
- [1.34] Al-Jabri K., Tana R., Hisada M., Al-Oraimi SK., Al-Saidy AH. (2009): *Copper slag as sand replacement for high performance concrete*. Cement and Concrete Composites, **31**, pp. 483-488.
- [1.35] Al-Jabri K., Hisada M., Al-Saidy AH., Al-Oraimi SK. (2009): *Performance of high strength concrete made with copper slag as a fine aggregate*. Construction and Building Materials, **23**, pp. 2132-2140
- [1.36] Zong L. (2003): *The replacement of granulated copper slag for sand concrete*. Journal of Qingdao Institute of Architecture and Engineering, **24**, pp. 20-22
- [1.37] Tixier R., Arino-Moreno A., Mobasher B. (1996): *Properties of cementitious mixture modified by copper slag*. Symposium: HH, Structure-Property

Relationships in Hardened Cement Paste and Composites. Tucson, Arizona, USA: Minerals Research and Recovery.

- [1.38] Al-Jabri K., Tana RA., Al-Ghassani M. (2002): *Use of copper slag and cement by-pass dust as cementitious materials*. Cement Concrete Aggregates, **24**, pp. 7-12.
- [1.39] Tixier R., Devaguptapu R., Mabasher B. (1997): *The effect of copper slag on the hydration and mechanical properties of cementitious mixtures*. Cement and Concrete Research, **27**, pp. 1569-1580
- [1.40] Al-Jabri K., Tana RA., Al-Hashmi A., Al-Harthy AS. (2006): *Effect of copper slag and cement by-pass dust addition on mechanical properties of concrete*. Construction and Building Materials, **20**, pp. 322-331
- [1.41] Frías Rojas, M. (2010): *Nuevas adiciones al cemento*. Seminario IECA. Instituto Eduardo Torroja. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- [1.42] Sánchez de Rojas, M.I., Rivera J., Frías M. (2004): *Escorias de cobre: comportamiento puzolánico y fijación de los elementos metálicos en morteros*. Instituto Eduardo Torroja. VIII Congreso Nacional de materiales. SPUPV.
- [1.43] Wu W., Zhang W., Ma G. (2010): *Mechanical properties of copper slag reinforced concrete under dynamic compression*. Construction and Building Materials, **24**, pp. 910-917.
- [1.44] Schwartzentruber A. y Catherine C. (2000): *Method of the concrete equivalent mortar (CEM): A new tool to design concrete containing admixture*. Materials and Structures, **33**, pp. 475-782.
- [1.45] Hooton R.D. (2008): *Bridging the gap between research and standards*. Cement and Concrete Research, **38**, pp. 247-258

- [1.46] Siddique R., Khatib J., Kaur I. (2008): *Use of recycled plastic in concrete: A review*. Waste Management Journal, **28**, pp. 1835-1852
- [1.47] Shi C., Zheng K. (2007): *A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete*. Resources, Conservation and Recycling, **52**, pp. 234-247
- [1.48] Weeks C., Hand R.J., Sharp J.H. (2008): *Retardation of cement hydration caused by heavy metals present in ISF slag used as aggregate*. Cement and Concrete Composites, **30**, pp. 970-978.
- [1.49] Rubio-Hernández F.J., J.F. Velázquez-Navarro, Ordoñez-Belloc L.M. (2012): *Rheology of concrete: a study case based upon the use of the concrete equivalent mortar*. Materials and Structures, DOI 10.1317/s11527-012-9915-1

CAPÍTULO 2

INDUSTRIA DEL COBRE. GENERACIÓN DE ESCORIAS

2.1 El cobre en la historia

El uso del cobre se remonta a los orígenes de la civilización hace unos 10.000 años, cuando en algún lugar del mundo el ser humano dejó de depender de las herramientas de piedra y comenzó a usar un metal disponible en la naturaleza, manipulable, dúctil y con una resistencia hasta entonces desconocida.

Todo parece indicar que la minería del cobre pudo desarrollarse entre civilizaciones avanzadas algunos milenios antes de Cristo, como los sumerios y los egipcios [2.1].

Las civilizaciones romana y griega disponían de conocimientos de aleaciones de cobre, las cuales constituían la base de sus conocimientos técnicos, dado que el trabajo del hierro todavía debía perfeccionarse y el plomo era apenas conocido [2.2].

Durante el siglo XIX, en plena Revolución Industrial y ante el inicio de una cadena de inventos relacionados con la electricidad y las telecomunicaciones, la demanda de cobre aumentó de forma vertiginosa. Se había descubierto una de sus propiedades esenciales: la conductividad.

Hasta el auge de la revolución industrial, el peso de la extracción del cobre recaía en Europa donde la gran demanda hizo que las reservas no fueran suficientes, dando lugar en algunos casos, al agotamiento de los yacimientos. También hay que añadir que a partir del siglo XIX empezaron a usarse otros metales como el níquel y el aluminio para la obtención de aleaciones cobre-aluminio y cobre-níquel. La aparición de nuevas tecnologías hizo que se elevara aún más la demanda de cobre por parte de la industria y de artesanos. En el año 1900 se generaron unas 500.000 t de cobre refinado, cien años más tarde, en 1975, fueron 7.000.000 t, en el 2000 se produjeron hasta 13.500.000 t de cobre y en el año 2013 la producción fue de 20.500.000 t [2.2, 2.3].

A comienzos del siglo XX la demanda mundial de cobre rondaba el medio millón de toneladas, pero la mayor parte de los yacimientos en forma de vetas que permitían acceder a un mineral de alta pureza ya habían sido explotados. Sin embargo, el

desarrollo y perfeccionamiento de tecnologías permitieron obtener el cobre incluso cuando se encontraba asociado a otros elementos en concentraciones muy bajas. Esos adelantos permitieron el desarrollo de la minería del cobre, que cada año incorpora nuevos avances para lograr una producción más eficiente y sustentable.

2.2 Minería del cobre

En la naturaleza existen distintos tipos de yacimientos de cobre, encontrándose de diversas maneras, dependiendo de los procesos geológicos que dieron origen a su concentración. De esta forma el cobre se encuentra en la corteza terrestre en forma de mineral o en forma nativa.

Un tipo de yacimiento es aquel que se origina vía disolución del cobre desde los magmas (o rocas fundidas) por aguas termales, las que son conducidas hacia la superficie de la tierra a través de fracturas en las rocas. El cobre aparece entonces como vetas de mineral de alta ley o incluso de cobre nativo. Esta fue la primera fuente de cobre que utilizó el hombre.

Otra forma de concentración de cobre, también a partir de magmas, viene de las fuentes termales submarinas, que son verdaderos géiseres ricos en metales. Al salir y mezclarse con el agua fría del mar, los metales precipitan en forma de sulfuros que quedan atrapados en el sedimento del fondo marino. Millones de años más tarde, producto del levantamiento de la corteza terrestre, estos sedimentos emergen a la superficie en forma de yacimientos.

También existen los yacimientos denominados de pórfido cuprífero que se caracterizan por contener grandes masas de rocas con minerales de cobre sulfurado que generalmente es de baja ley. Estos se originan por el ascenso de rocas fundidas cuando la corteza oceánica se introduce bajo la corteza continental.

Los yacimientos porfídicos suelen presentarse en el borde de las grandes cadenas montañosas, donde el cobre nativo suele acompañar a sus minerales en bolsas que

afloran a la superficie. Generalmente en las capas superiores del yacimiento se encuentran los minerales de cobre oxidados, junto al cobre nativo en pequeñas cantidades. A continuación, por debajo del nivel freático, se encuentran los sulfuros primarios y finalmente los sulfuros secundarios, cuya explotación es más rentable que los anteriores [2.3].

Los minerales primarios se formaron como resultado de la intrusión, es decir, de la penetración del magma líquido en fusión, al formarse el cuerpo mineralizado, en las capas superiores de la corteza terrestre. Los minerales secundarios se obtuvieron de los primarios bajo influencia de los procesos lentos de meteorización y lixiviación [2.4].

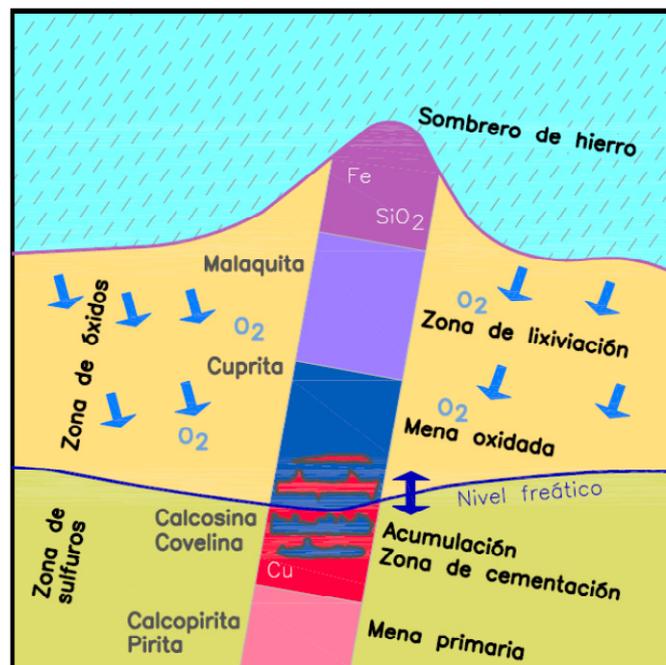


Figura 2.1. Zonificación de un pórfido cuprífero
[Fuente: <http://www.geovirtual.cl>]

Hay, además, otros yacimientos donde el cobre se encuentra en la parte superior que ha sido alterada por la acción de agentes atmosféricos a través de millones de años. Son los llamados yacimientos de mineral de cobre oxidado.

En consecuencia, los minerales de cobre se agrupan según sean sulfurados u oxidados. Los minerales sulfurados representan el 80%, mientras que los oxidados representan el 20%. El cobre nativo se encuentran muy raramente y en pequeñas cantidades [2.5]

Según Beregovski y Kistiaovski [2.6] en la naturaleza se encuentran principalmente las menas de cobre sulfuradas en las cuales el cobre está unido al azufre, aunque existe también mucha difusión de menas de cobre oxidadas en las cuales el cobre se encuentra en combinaciones con el oxígeno.

Entre los minerales sulfurados, la calcopirita y la bornita, son las que se encuentran con mayor frecuencia en los yacimientos de menas cupríferas. Entre los minerales oxidados los más difundidos son la malaquita y la crisocola [2.4].

Tabla 2.1

Minerales de cobre y su contenido en cobre, azufre y hierro
[Fuente: [2.6] Beregovski y Kistiaovski]

Mineral	Fórmula química	Contenidos en cobre, azufre y hierro, %		
		Cobre	Azufre	Hierro
Minerales sulfurados				
Calcopirita	CuFeS_2	34,5	35,0	30,5
Bornita	Cu_5FeS_4	55,5	28,1	16,4
Covelina	CuS	66,4	33,6	---
Calcosina	Cu_2S	79,8	20,2	---
Minerales oxidados				
Malaquita	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	57,3	---	---
Azurita	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	55,1	---	---
Crisocola	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	37,9	---	---
Cuprita	Cu_2O	88,8	---	---

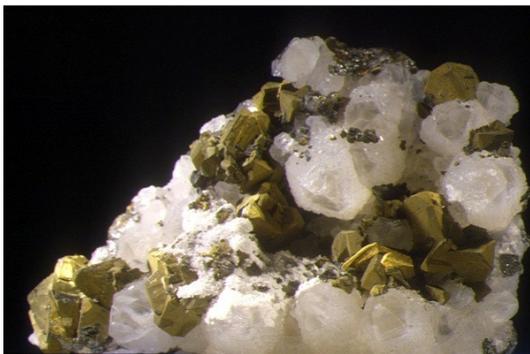
En cada una de las zonas del yacimiento porfídico cuprífero los minerales poseen diferentes concentraciones de cobre [2.7]:

- Zona lixiviada u oxidada con una ley de cobre inferior al 0,5%.
- Zona de sulfuros primarios con una ley del 1%.

- Zona de sulfuros secundarios con leyes de cobre entre el 1-5%.

La tecnología de obtención del cobre está muy bien desarrollada aunque es laboriosa debido a la pobreza de la ley de los minerales. Los yacimientos de cobre contienen generalmente concentraciones muy bajas del metal. Esta es la causa de que muchas de las distintas fases de producción tengan por objeto la eliminación de impurezas

A continuación se ilustran una serie de minerales de cobre, tanto sulfuros como óxidos, utilizados mayoritariamente en la producción industrial de cobre.



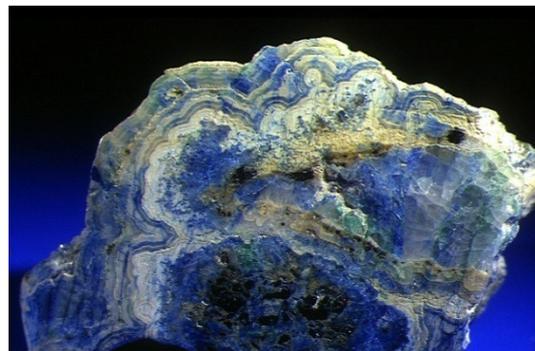
Calcopirita



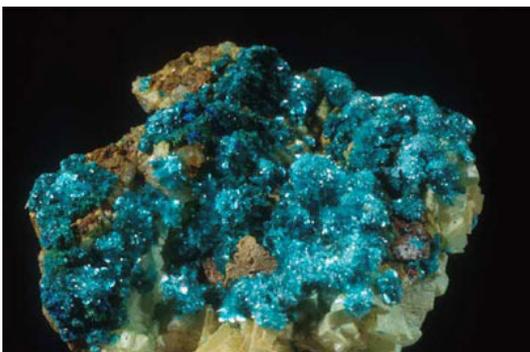
Bornita



Malaquita



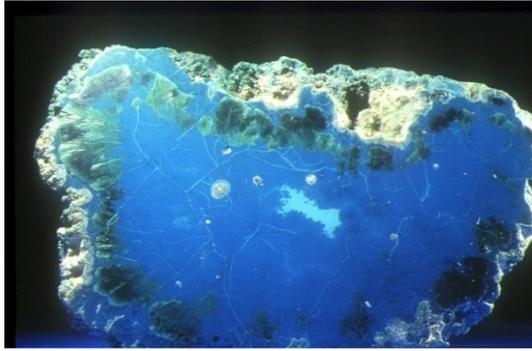
Azurita



Covelina



Calcosina



Crisocola



Cuprita

Figura 2.2. Diferentes minerales de cobre.
[Fuente: Instituto Geominero Español, ITGE]

2.3 Industria y procesos de obtención del cobre

El cobre aparece vinculado en su mayor parte a minerales sulfurados, aunque también se encuentra asociado a minerales oxidados. Estos dos tipos de mineral requieren procesos productivos diferentes para la obtención de cobre. Si el mineral de cobre es del tipo sulfuro se utiliza la vía pirometalúrgica en la que se producen ánodos y cátodos. En el caso de que el mineral sea óxido se utiliza la vía hidrometalúrgica en la que se producen directamente cátodos.

Independientemente del tipo de proceso empleado, en ambos procesos el punto de partida es el mismo: la extracción del material desde la mina a cielo abierto o subterránea que, en forma de roca, es transportado a la planta de trituración, para continuar allí el proceso productivo del cobre. El proceso de trituración consta de dos etapas:

1. Trituración: Operación que normalmente se realiza en seco utilizando trituradoras de mandíbulas. Tiene por objeto la reducción de los minerales extraídos del yacimiento a un tamaño del orden de 20 centímetros a 1 centímetro.
2. Molienda: Reducción del material resultante de la trituración mediante molinos, hasta llegar a tamaños del orden de 100 y 300 micras. La molienda se realiza mediante la combinación de mecanismos de impacto y abrasión.

El proceso de trituración y molienda también es conocido por el nombre de conminución. Esta etapa de reducción del tamaño del mineral resulta del todo de gran importancia, ya sea para [2.10]:

- Producir partículas de un cierto tamaño y forma.
- Liberar minerales valiosos de la ganga para facilitar su concentración.
- Incrementar su área superficial disponible para alguna reacción química.

En la figura 2.3 se indica el proceso general de producción de cobre dependiendo del tipo de mineral proveniente de la mina [2.11]:

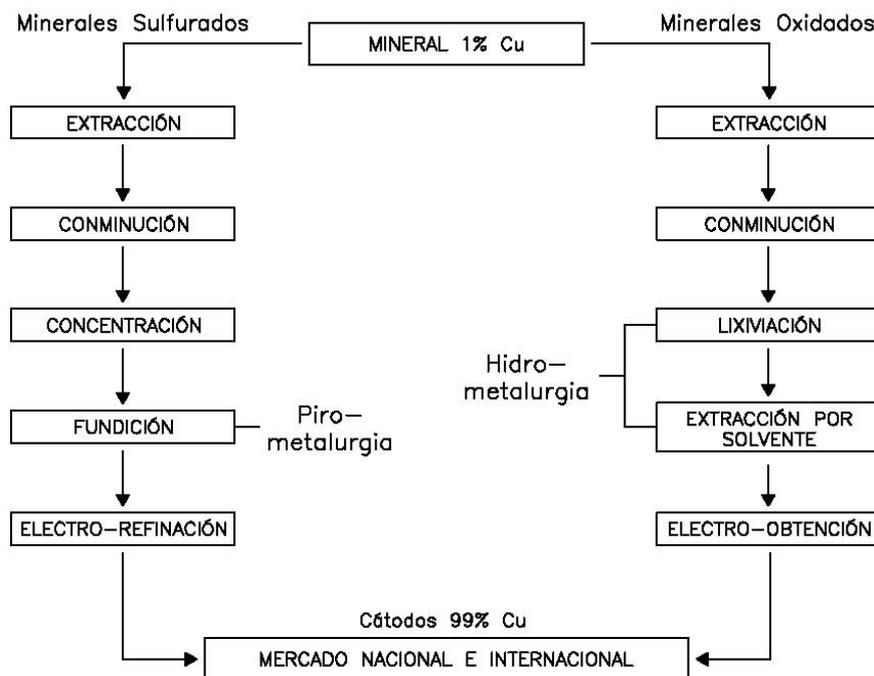


Figura 2.3. Procesos de producción del mineral de cobre

[Fuente: [2.11] Sepúlveda Estay C.A.]

2.3.1 Pirometalurgia del cobre

La pirometalurgia es una etapa de una de las dos ramas de la metalurgia donde la obtención y refinado de minerales se realiza mediante calor, por lo que también es conocida como producción por fundición. El concentrado de mineral de cobre es

convertido mediante la pirometalurgia y posterior electrorefino en los cátodos de cobre comercializados en el mercado.

El proceso de producción por vía pirometalúrgica de los minerales sulfurados de cobre se describe en la figura 2.4.

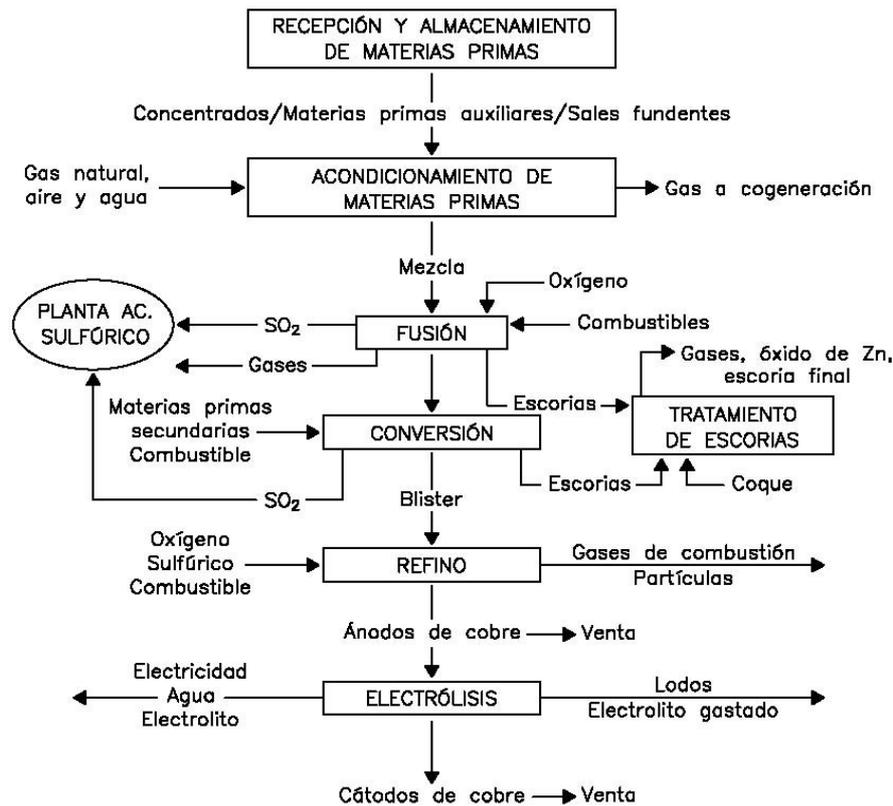


Figura 2.4. Producción pirometalúrgica de minerales sulfurados de cobre [Fuente: Guías tecnológicas. Ministerio de Industria y Energía]

El mineral sulfuro de cobre en la mina tiene un contenido entre el 0,5-0,2% de cobre, por esto se concentra en la mina mediante flotación, para su transporte y uso final en la fundición. La flotación es un proceso físico-químico que permite la separación de los minerales sulfurados de cobre del resto de los minerales que componen la mayor parte de la roca original [2.12].

Una vez realizada la concentración por flotación se obtiene un concentrado de cobre que contiene entre 20 y 45% de cobre. Los otros dos componentes principales son el

azufre y el hierro, además de otros metales entre los que se encuentra el oro y la plata como positivos y el plomo, arsénico y mercurio como impurezas.

El concentrado de cobre se recibe en la fundición cuya principal etapa industrial es el horno de Fusión, donde se recupera el cobre, eliminando el azufre y el hierro mediante oxidación en estado fundido a una temperatura entre 1200° y 1300°C. En el horno, el azufre se convierte en gas SO_2 , mientras que el cobre y el hierro, conjuntamente con sílice procedente de la arena que se introduce en el horno, permanece en estado líquido. En esta fase líquida, el cobre, por su mayor densidad, se deposita en la parte inferior y se extrae del horno con un contenido del 62% de cobre, mientras que la mezcla de hierro y sílice en forma de silicato permanece en la parte superior del horno y se extrae en forma de escoria con un contenido del 0,8% de cobre, 45% de hierro y 30% de sílice.

La mata de cobre pasa a la sección de convertidores, para incrementar la riqueza de cobre del producto, donde se le somete a una gran oxidación adicional en un proceso discontinuo conocido como “batch”, consiguiendo un productor intermedio llamado “blíster” con un contenido en cobre del 99% y gases ricos en SO_2 que se unen a los gases anteriores del horno y escorias con un contenido del 6% de cobre.

El blíster pasa al horno de afino donde se incrementa su contenido en cobre hasta el 99,6% y posteriormente a la rueda de moldeo de ánodos, donde se da a los ánodos la forma geométrica semejante a una camiseta de mangas cortas extendidas “T-shirt”, necesaria para su utilización en la refinera.

Los gases SO_2 producidos en el horno y convertidores se recogen, se oxidan y se convierten en ácido sulfúrico en una planta de doble absorción, mientras que las escorias, después de tratarlas en un horno eléctrico para recuperar todo el cobre que contienen, se enfrían y granulan para su posterior utilización como material estéril.

Como regla general una fundición que produzca 310.000 t/año de ánodos consume 1.000.000 t/año de concentrado de cobre y como subproductos produce 900.000 t/año de ácido sulfúrico y 300.000 t/año de escorias.

Los ánodos pasan a la refinería, que es la fase final del proceso de producción de los cátodos con un contenido de del 99,9% de cobre. El proceso utilizado en la refinería es el electrolisis de los ánodos, que consiste en disponer los ánodos en celdas (balsas) de forma que actúen como electrodo positivo, separados por una placa inerte que actúa como electrodo negativo, sumergidos en una disolución de sulfato de cobre denominada electrolito y utilizar una corriente eléctrica de bajo voltaje, que al ser selectiva para el cobre disuelve los ánodos en el electrolito y los iones de cobre resultante se depositan sobre la placa inerte obteniendo los cátodos que son unas planchas de 1 m² y un peso de 55 kg [2.7].

2.3.2 Hidrometalurgia del cobre

En la más amplia definición, el campo de la hidrometalurgia comprende la recuperación de componentes valiosos de materiales primarios y secundarios por reacciones efectuadas a relativa baja temperatura en una fase acuosa, o en otros términos. La lixiviación es la operación unitaria fundamental de los procesos hidrometalúrgicos, orientado a extraer una especie química desde una matriz sólida al contactarla con una fase líquida que contiene un disolvente en condiciones de proceso apropiadas.

La vía hidrometalúrgica es más conocida por su nomenclatura anglosajona SX-EW. En este proceso de producción los minerales oxidados de cobre son sometidos a una serie de transformaciones, según se describe en la figura 2.5 [2.7].

En el proceso por esta vía se parte del mineral oxidado de cobre procedente de la mina o residuos mineros sin concentrar, se tritura a tamaños inferiores a 10 mm siendo posteriormente transportado a los montones o tanques donde serán tratados

posteriormente. La instalación suele estar anexa a la mina con objeto de ahorrar costes y optimizar servicios.

A continuación se lixivian (disuelven) los minerales de cobre, óxidos o sulfuros secundarios, mediante el riego de una disolución acuosa de ácido sulfúrico, obteniéndose una solución de sulfato de cobre con bajo contenido en cobre. Este proceso es lento y complejo pues además de la disolución del cobre, debe obtenerse una estabilidad en las concentraciones del licor.

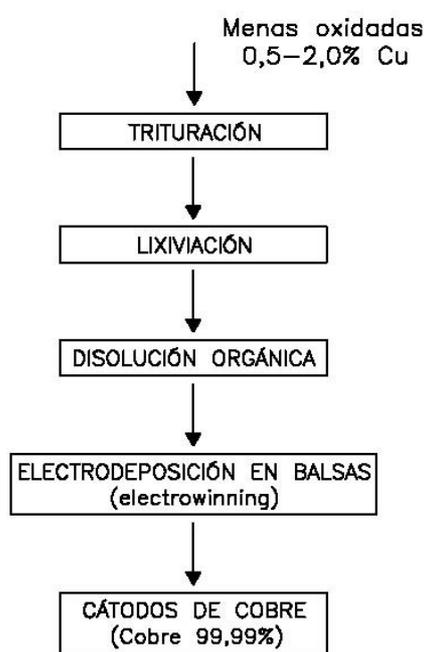


Figura 2.5. Producción hidrometalúrgica de minerales oxidados de cobre
[Fuente: [2.7] Arlandis Rubio J.]

La disolución de bajo contenido de cobre con otros metales e impurezas se tratan con un reactivo extractante orgánico, en un circuito cerrado y a contracorriente, que extrae el cobre y permite obtener un electrolito con alto contenido de cobre y limpio de todos los elementos indeseables. Actualmente se está investigando la biolixiviación utilizando bacterias que capturen directamente el cobre existente en la disolución.

La disolución con un alto contenido de cobre y limpia de impurezas pasa a las celdas (balsas) de electrolisis, donde la energía eléctrica hace que los iones de cobre

presentes en la solución se depositen en los cátodos, de ahí su nombre de electrodeposición, a diferencia del electrorefino, que se realiza para pasar de ánodos de cobre a cátodos.

Los cátodos obtenidos mediante el proceso de hidrometalurgia son de alta pureza con valores del 99,99% de cobre.

2.3.3 Producción industrial del cobre

Como bien se comentó anteriormente el proceso metalúrgico del cobre depende del tipo de minerales que se obtengan en la mina. En el caso de obtener minerales sulfurosos se utiliza la vía pirometalúrgica, también conocida como “producción por fundición o concentrados” y en el caso de minerales oxidados será la vía hidrometalúrgica, normalmente conocida por sus siglas en inglés SX-EW.

La producción de cobre procedente de los procesos metalúrgicos vía pirometalurgia (concentrados) o hidrometalurgia (SX-EW) se conoce como producción primaria de cobre. Pero existe otra vía de producción de cobre; la procedente de chatarras, es decir, del reciclaje. Esta última vía es conocida como producción secundaria del cobre.

Dentro de los procesos metalúrgicos del cobre solamente se genera escoria en el proceso pirometalúrgico y según se indicó en apartados anteriores por cada tonelada de mineral de cobre se generan 0,3 toneladas de escoria, es decir, aproximadamente sería una proporción mineral/escoria de 10/3.

2.3.3.1 Producción mundial de cobre

En la figura 2.6 se indica la producción mundial de cobre debido a la producción primaria entre los años 1900 y 2012. Desde 1900, cuando la producción de cobre estaba por debajo de 500 toneladas, la producción de cobre ha crecido un 3,2% anual, hasta alcanzar la cantidad de 16,7 millones de toneladas en el año 2012.

En la misma figura se aprecia como la producción de cobre por vía hidrometalúrgica no existía antes de 1960 [2.13].

Es importante indicar que según los valores representados en el gráfico, la producción de cobre por vía pirometalúrgica es de 13 millones de toneladas.

Si por cada tonelada de mineral de cobre se generan 0,3 toneladas de escoria, la producción de escoria en el año 2012 fue de 5 millones de toneladas.

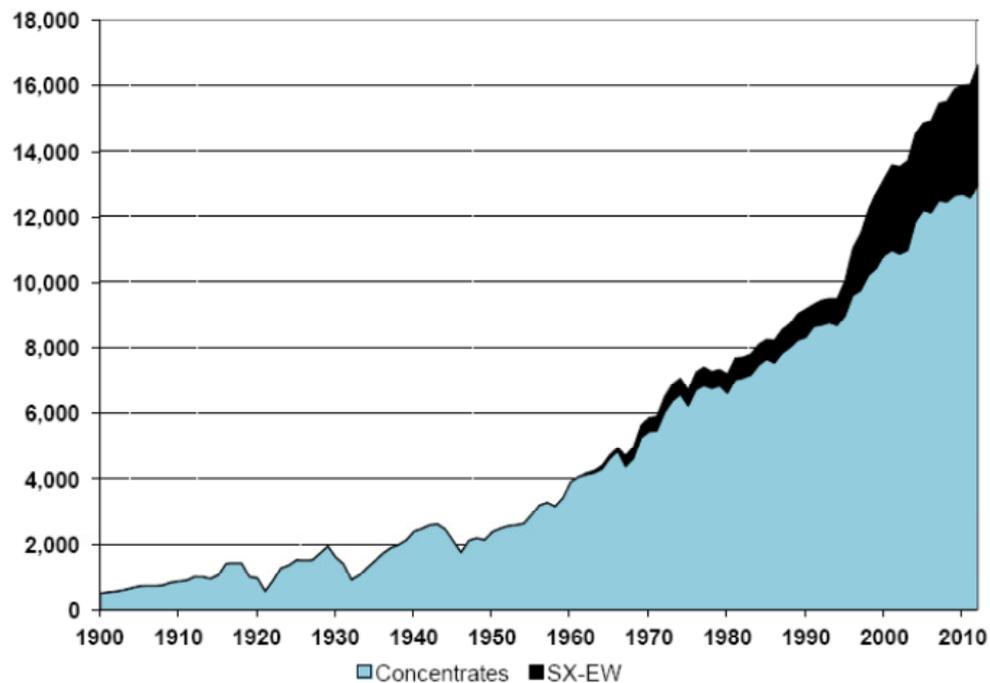


Figura 2.6. Producción primaria de cobre a nivel mundial (miles de toneladas)
[Fuente: World Copper Factbook 2013]

2.3.3.2 Producción minera de cobre por regiones

En la figura 2.7 se representa la producción primaria de cobre según las distintas regiones del planeta.

Con menos de 750.000 toneladas en 1960, ha sido a partir de los años 80 del siglo pasado cuando latinoamérica ha experimentado un crecimiento en la producción de mineral mucho mayor que el resto de continentes [2.13].

La producción latinoamericana en los años 80 era de 1.435.000 toneladas y sin embargo en 2012 fue de 7.135.000 toneladas, lo que representa un incremento del 390%.

El continente asiático también ha sufrido un incremento en la producción junto con el latinoamericano en el mismo periodo de tiempo. El crecimiento en este caso ha sido del 340%.

La producción en el Norteamérica y África ha experimentado un leve crecimiento. En Europa y Oceanía los crecimientos han sido del 64% y 150% respectivamente.

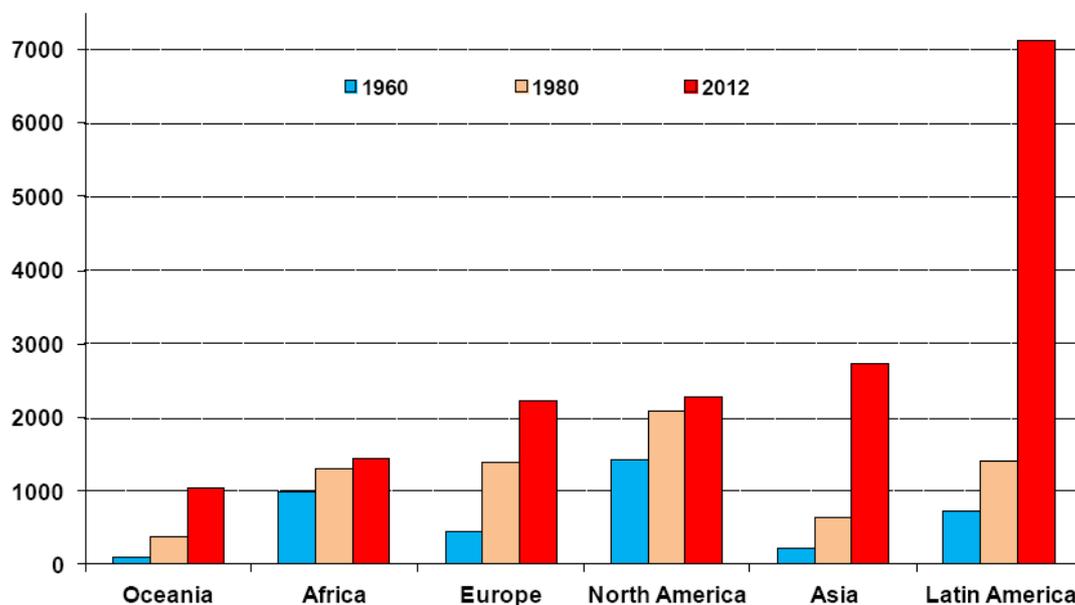


Figura 2.7. Producción primaria de cobre por regiones (miles de toneladas)
[Fuente: World Copper Factbook 2013]

2.3.3.3 Producción minera de cobre por países

En la figura 2.8 se representa la producción primaria de cobre de los 20 primeros países más representativos. Se observa que Chile es el mayor productor del mundo con 5,4 millones de toneladas en el año 2013.

Como segundo productor China con 1,5 millones de toneladas, seguido por Perú y Estados Unidos con 1,3 y 1,2 millones de toneladas respectivamente [2.13].

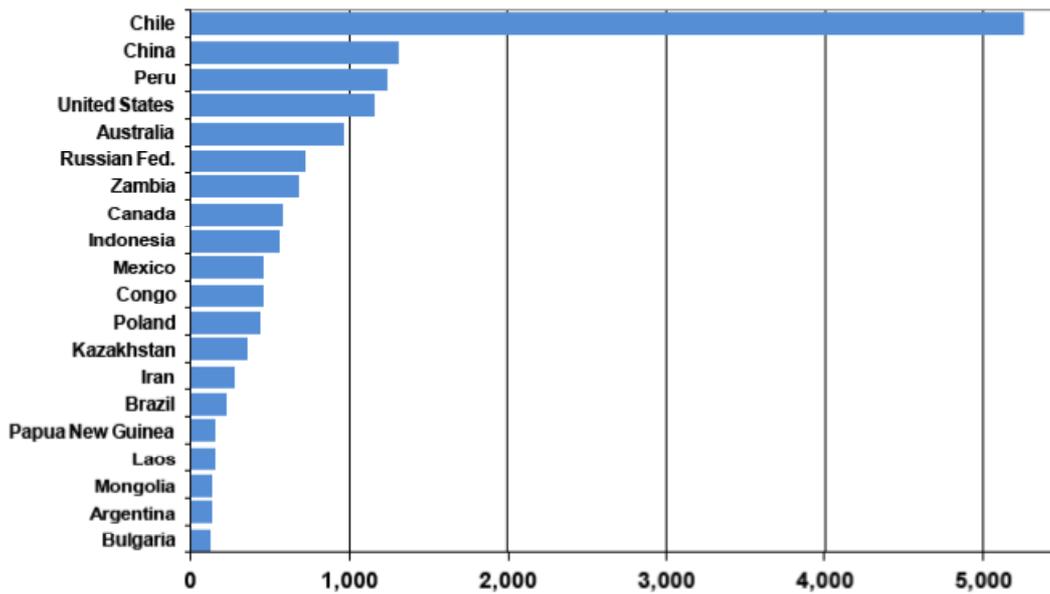


Figura 2.8. Producción primaria de cobre por países (miles de toneladas)
[Fuente: World Copper Factbook 2013]

2.3.3.4 Producción mundial de cobre de fundición

En la figura 2.9 se indica la producción de cobre por vía pirometalúrgica e hidrometalúrgica, producción primaria, así como la procedente de chatarras, producción secundaria, en el periodo de tiempo 1980-2012.

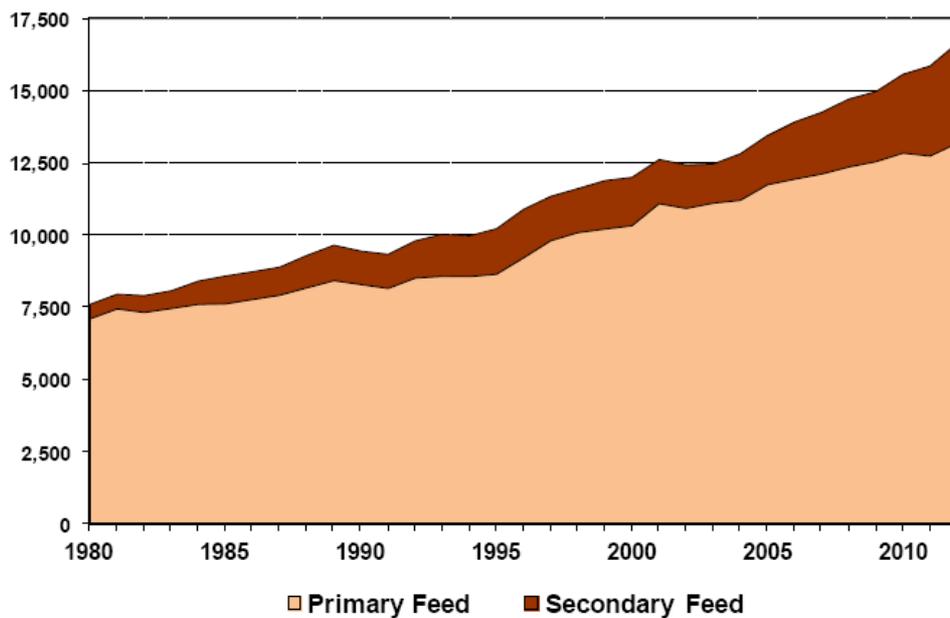


Figura 2.9. Producción mundial primaria y secundaria del cobre (miles de toneladas)
[Fuente: World Copper Factbook 2013]

En el año 2012 la producción total de cobre fue de 16,7 millones de toneladas. En los últimos años la tendencia de producir cobre de los minerales mediante lixiviación ha ido incrementándose [2.13].

La producción primaria “primary feed” utiliza concentrados de cobre (minerales de mina), mientras que la producción secundaria “secondary feed” utiliza chatarras.

2.3.3.5 Producción de cobre de fundición por continentes

En la figura 2.10 se representa la producción de cobre de fundición por cada continente en el periodo de tiempo 1990-2012. La participación del continente asiático en la producción mundial de cobre de fundición en el 1990 era del 27%, incrementándose al 56% en el año 2012. Este crecimiento es debido a China [2.13].

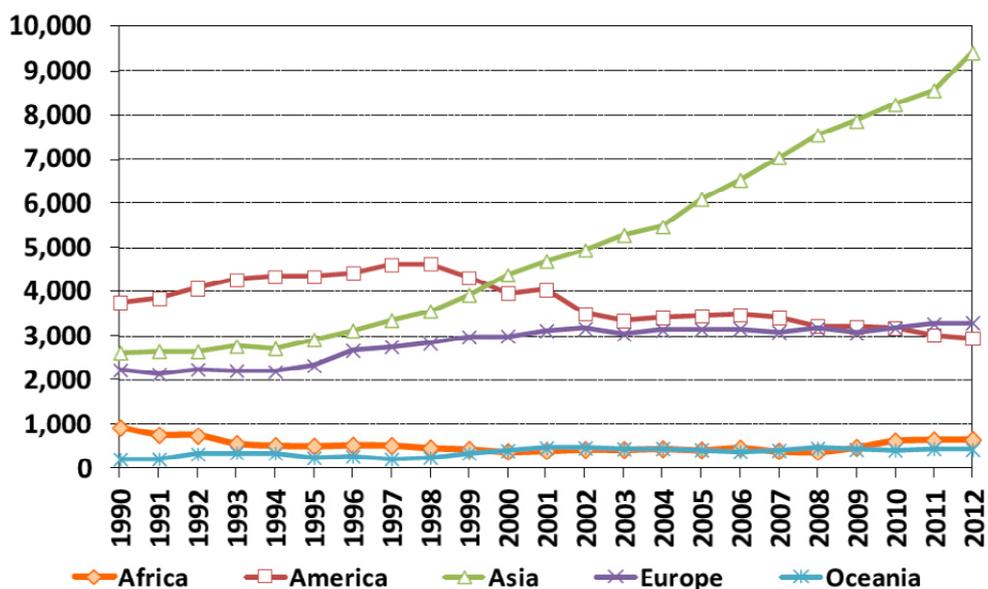


Figura 2.10. Producción de cobre de fundición por continentes (miles de toneladas)
[Fuente: World Copper Factbook 2013]

2.3.3.6 Países productores de cobre de fundición

En la figura 2.11 se indican los 20 primeros países productores de cobre de fundición. En el año 2012, China representó el 32% de la producción de cobre de fundición a nivel mundial, seguida por Japón con un 10%, Chile con un 8% y Rusia con el 5% [2.13].

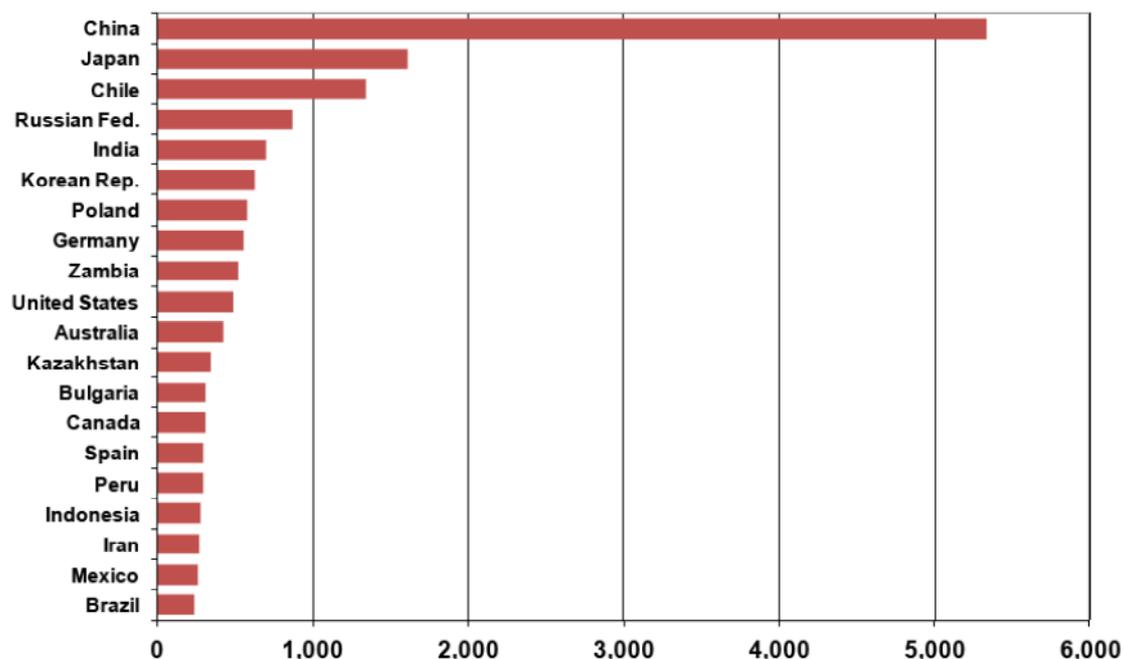


Figura 2.11. Producción de cobre de fundición por países (miles de toneladas)
[Fuente: World Copper Factbook 2013]

2.4 Escorias de cobre

2.4.1 Introducción

En la actualidad se utilizan diversos procesos metalúrgicos para la obtención y recuperación de metales y en cada uno de ellos se producen inevitablemente residuos como la formación de escorias. En todo momento se intenta conseguir un doble resultado, esto es; que los residuos finales contengan la mínima cantidad de metales y que el residuo sea aprovechable para posteriores procesos industriales.

La escoria de cobre es un subproducto procedente de la metalurgia del cobre, donde el cobre metálico se obtiene a partir de concentrados de este mineral. Los principales minerales son sulfuros complejos de cobre y hierro con pequeñas cantidades de sulfuros de otros metales. El proceso de obtención se realiza por medios pirometalúrgicos, oxidando el mineral con aire atmosférico o aire enriquecido con oxígeno, para eliminar el azufre de los gases como dióxido de azufre, y el hierro en forma de escorias obtenidas al añadir un fundente que se combina con el óxido de hierro que se produce.



Figura 2.12. Escoria granulada de fundición de cobre

En un proceso de fundición, la escoria puede ser definida como una fase que contiene sustancias inútiles de un mineral y que inevitablemente estará en cualquier operación pirometalúrgica que involucre sistemas fundidos. Las escorias de cobre tienen un papel fundamental durante la pirorefinación, debido a la disolución de impurezas de la fase metálica [2.14, 2.15, 2.16].

Según Lovera, Arias y Coronado [2.17] las escorias de cobre deben poseer una serie de características, de forma que se garantice la máxima eficiencia durante la operación pirometalúrgica, es decir, que la escoria contenga una cantidad mínima de metal. Estas características son las siguientes:

1. La escoria debe encontrarse completamente líquida a la temperatura de fusión del metal o de la mata.
2. La escoria debe ser fácilmente manejable durante el proceso pirometalúrgico.
3. Las cantidades de metal presente en la escoria deben ser mínimos.

4. Se debe asegurar una buena eliminación de los elementos no deseados.
5. El rango de operación de la escoria debe admitir variaciones tanto en la composición de la misma como en la alimentación del reactor, sin que se produzcan variaciones en el funcionamiento del sistema.

En las escorias generadas en los procesos de fusión metalúrgicos, es recomendable su transformación mediante tratamiento en horno. De esta forma se puede obtener un producto químicamente estable y que pueda ser comercializado para diferentes usos.

Todas las escorias utilizadas en el desarrollo de esta tesis doctoral han sido suministradas por la planta que la empresa Atlantic Copper tiene ubicada en la ciudad de Huelva.

2.4.2 Proceso de obtención de las escorias de cobre

Las escorias de cobre se obtienen como material de desecho a partir del proceso pirometalúrgico de minerales sulfurados de cobre, a los que previamente al proceso de fusión, han sido concentrados mediante flotación. Los principales minerales de cobre utilizados son sulfuros complejos de cobre y hierro con pequeñas cantidades de sulfuros de otros minerales.

Durante la fundición del mineral concentrado de cobre se producen dos fases líquidas inmiscibles entre sí. Estas dos fases líquidas son: la mata, rica en cobre (sulfuros) y la escoria, rica en óxidos. La mata pasa a procesos posteriores de conversión, mientras que la escoria fundida se descarga directamente o pasa a procesos de recuperación de cobre, logrando que tengan un porcentaje de cobre menor al 1% antes de descartarlas [2.18]

La escoria se forma a partir de los óxidos contenidos en la carga del horno y los óxidos de hierro que se producen por la oxidación durante el proceso pirometalúrgico. La composición de óxidos de la escoria varía fundamentalmente en función de la

naturaleza de los minerales, de los concentrados, de los fundentes y de las condiciones de la operación [2.15].

La eliminación del hierro se realiza mediante la adición de sílice como fundente. Este sílice se combina con los óxidos de hierro producidos en la combustión del concentrado formando silicatos, en particular fayalita cuya nomenclatura química es $(\text{SiO}_2)\text{FeO}$, la cual da lugar a la escoria. En el reposador del Horno Flash (horno empleado en el proceso de fusión) se separa por gravedad la escoria del material cobrizo (mata de cobre), vaciándose la escoria producida mediante sangrías periódicas en un Horno Eléctrico (HLE). La misión de este horno es la de limpiar las escorias de partículas cobrizas que no hubieran decantado en el reposador del Horno Flash. Para ello se realiza una reducción de la magnetita presente en la escoria del coque y se adiciona sílice si fuese necesario hasta obtener concentraciones del orden del 30%. La escoria se enfría mediante un sistema de granulación con agua dulce. Una vez enfriada, la escoria se seca y clasifica, dando lugar a un producto final de silicato de hierro químicamente estable [2.19].

Dentro de la etapa de recuperación del cobre contenido en las escorias que provienen de los procesos de fusión o conversión (ver esquema de proceso en la figura 2.3), se destacan aquellas denominadas de alta ley. Estas escorias poseen un porcentaje de cobre comprendido entre el 4% y el 10% y su recuperación se realiza en hornos de limpieza o del tipo HLE.

Existen diferentes tipos y calidades comerciales de la escoria de cobre, según humedad y tamaño, todo ello en función de las condiciones del mercado.

Como orden de magnitud por cada tonelada de cobre producido se generan 2,2 toneladas de escorias pirometalúrgicas [2.20].

2.4.3 Caracterización de las escorias de cobre

En general es posible encontrar tres grupos diferentes de escoria de cobre generada en el proceso pirometalúrgico de los minerales sulfurados de cobre. Los tres grupos son los siguientes:

- Escorias granalladas:
Las escorias son obtenidas mediante un rápido enfriamiento directo con el agua. Este es el caso de la planta de Atlantic Copper en Huelva.
- Escorias de vertedero:
Las escorias se depositan en los vertederos y el enfriamiento de las mismas se realiza lentamente.
- Escorias de material de descarte (relave) de flotación:
Corresponden a aquellas escorias que debido a un contenido mayor a 2,5% de cobre son reprocesadas mediante flotación, el cual genera escorias como material de desecho.

2.4.3.1 Caracterización química

Según lo indicado anteriormente las escorias se forma a partir de los óxidos contenidos en la carga del horno y los óxidos de hierro que se producen por la oxidación durante el proceso pirometalúrgico. La composición de óxidos de la escoria varía fundamentalmente en función de la naturaleza de los minerales, de los concentrados, de los fundentes, de las condiciones de la operación.

La escoria de cobre está formada por hierro, silicio y aluminio como elementos principales, con concentraciones bajas de elementos como zinc, cobre, calcio y álcalis. La composición química de las escorias utilizadas en esta tesis doctoral se presenta en la tabla 2.2.

Con carácter general, los principales óxidos que representan a las escorias se indican en la tabla 2.3.

Tabla 2.2

Composición química de las escorias de cobre

[Fuente: [2.21] Atlantic Copper]

Elemento	Composición	Elemento	Composición
SiO ₂	27-30	Zn	0,7-1,5
Al ₂ O ₃	0-4,5	Ni	20-50 gr/ton
Fe ₂ O ₃	40-50	Cd	30-160 gr/ton
CaO	0-1,8	Bi	90-150 gr/ton
MgO	0,2-0,8	Se	10-50 gr/ton
S	0,2-0,5	Cl	< 30gr/ton
Pb	0,08-0,20	Sílica libre	No contiene

Tabla 2.3

Principales óxidos presentes en las escorias de cobre

[Fuente: [2.15] Biswas, A.K]

Tipo óxido	Formulación	Porcentaje, %
Óxido de hierro	FeO, Fe ₃ O ₄	30-40
Óxido de silicio	SiO ₂	35-40
Óxido de aluminio	Al ₂ O ₃	hasta 10
Óxido de calcio	CaO	Hasta 10

2.4.3.2 Caracterización mineralógica

Del estudio de difracción por rayos X se observa que mineralógicamente la escoria de cobre está compuesta fundamentalmente por fayalita, que no es más que un ortosilicato de hierro de la familia de los olivinos SiO₄Fe₂, además de por óxido de hierro [2.22].

En la figura 2.13 se indica el resultado de la difracción por rayos X. Los índices nombrados con "F" corresponden al compuesto fayalita.

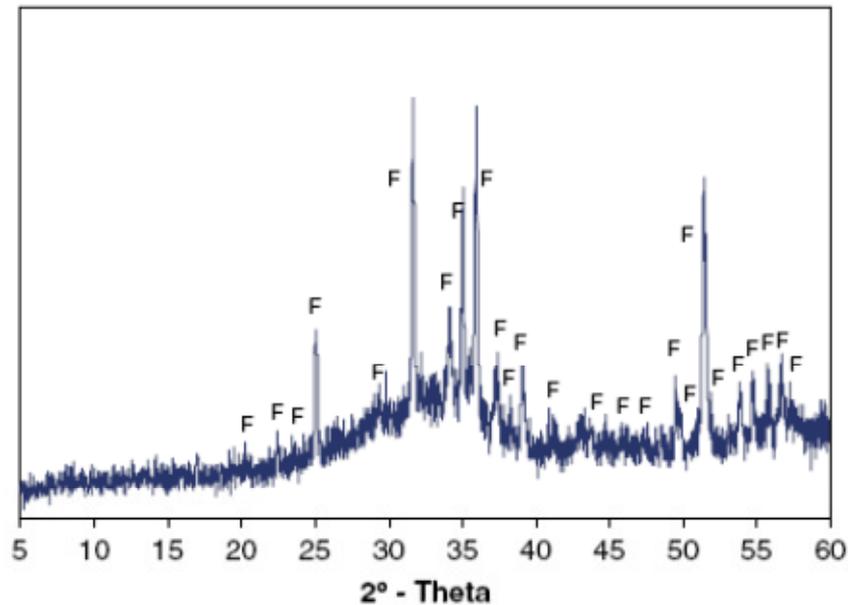


Figura 2.13. Difracción por rayos X de la escoria de cobre
[Fuente: [2.22] Sánchez de Rojas *et al.*]

2.4.4 Actividad puzolánica de las escorias de cobre

Según estudios realizados por Sánchez de Rojas *et al.* [2.23] la actividad puzolánica de la escoria es insignificante hasta los 90 días, mientras que en otros materiales tales como el humo de sílice o cenizas volantes, dicha actividad es apreciable a las pocas horas. Esto es debido a que la escoria de cobre presenta una menor velocidad de reacción en el mecanismo de fijación de la cal.

A pesar de que el mecanismo de fijación de la cal es más lento, la actividad puzolánica a largo plazo es semejante al de otros materiales.

En la figura 2.14 se indica la actividad puzolánica como medida de la cal fijada en distintos elementos, entre ellos la escoria de cobre. Dicha figura representa que la actividad puzolánica a 28 días es pequeña. A 90 días dicha actividad se encuentra claramente en desarrollo, obteniéndose valores muy significativos. Para tiempos de 360 días la actividad puzolánica está plenamente desarrollada y se obtienen valores similares a los de otros elementos con actividad puzolánica como son las cenizas volantes y el humo de sílice.

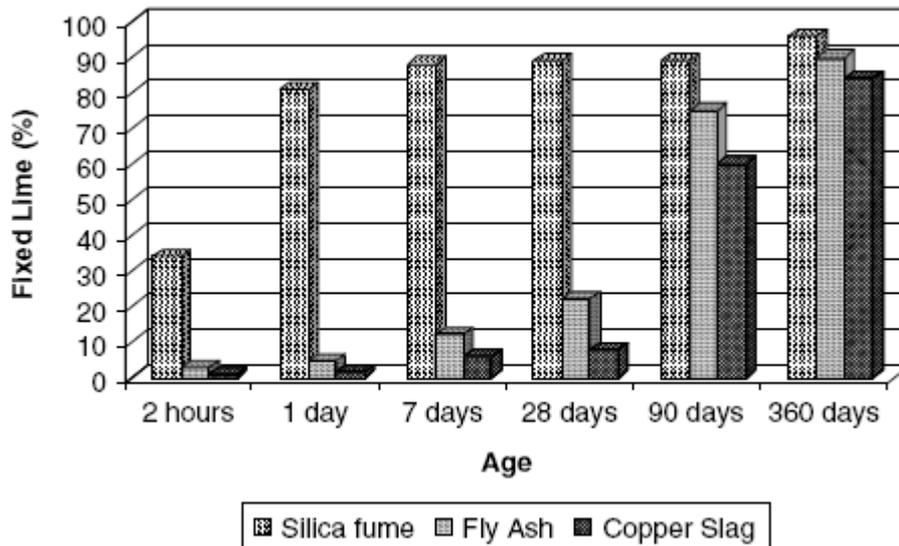


Figura 2.14: Comparativa de la actividad puzolánica de distintos elementos
 [Fuente: [2.23] Sánchez de Rojas *et al.*]

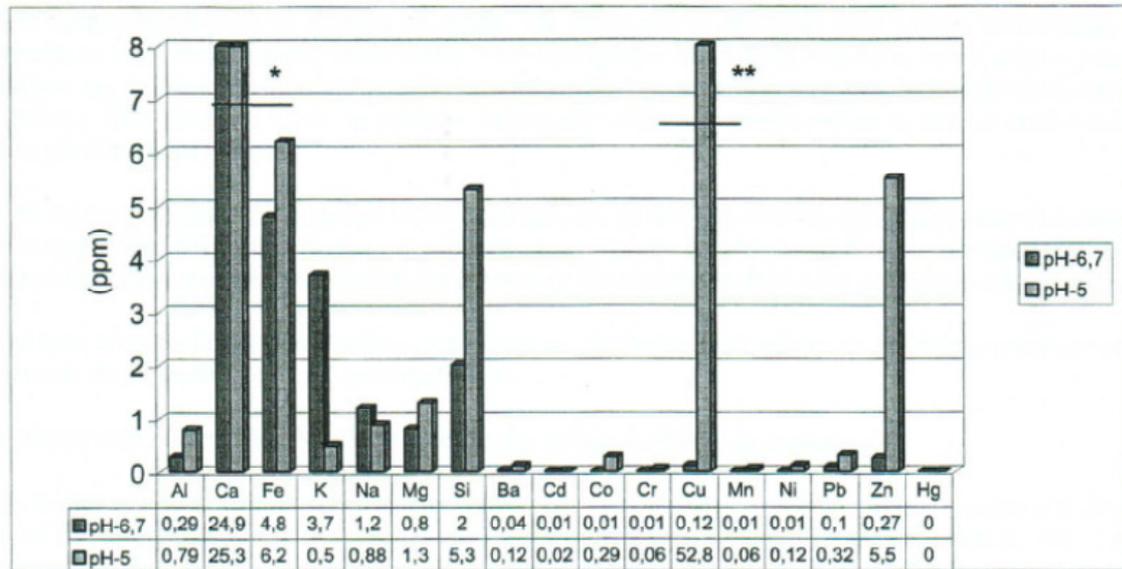
2.4.5 Lixiviación de elementos contenidos en la escoria de cobre

Para el análisis de lixiviados de los elementos contenidos en la escoria hemos considerado los estudios realizados por Sánchez de Rojas *et al.* [2.23] y por Atlantic Copper [2.21] en la planta de procesado de cobre que dicha empresa tiene ubicada en Huelva y que es además la suministradora de la escoria utilizada en esta tesis doctoral.

El estudio realizado por Sánchez de Rojas se fundamenta en el análisis del lixiviado de una muestra de escoria de cobre original y de una escoria incorporada a un mortero.

En el caso de la muestra de escoria de cobre original el análisis del lixiviado se realiza según el método descrito en la Orden Ministerial de 13 de octubre de 1989 para residuos tóxicos y peligrosos [2.24]. Se trata de un método para la extracción de sustancias solubles contenidas en un residuo sólido o pastoso. El procedimiento consiste en determinar la movilidad del residuo de determinados constituyentes tóxicos, sean elementos o compuestos químicos, tanto de origen orgánico como inorgánico.

Los lixiviados permiten conocer, analíticamente, la concentración de las sustancias tóxicas que contiene. Los resultados de este método se presentan en la figura 2.15



*pH-5 Ca=25.3 ppm, pH-6.7 Ca=24.9 ppm

**pH-5 Cu=52.8 ppm

Figura 2.15. Ensayo de lixiviación
[Fuente: [2.23] Sánchez de Rojas *et al.*]

Analizando los resultados representados en la figura 2.15, se observa que el elemento más soluble es el calcio, con 25,3 ppm a pH-5 y 24,9 a pH-6,7 respectivamente, esto es debido a que para ambos valores de pH el calcio se encuentra como Ca^{2+} y no como precipitado [2.26]. Como era de esperar, las cantidades lixiviadas disminuyen con el aumento del pH.

En el caso del hierro, el lixiviado es similar en los dos pH, ya que para los dos pH estudiados el hierro estaría mayoritariamente en disolución.

Otros elementos como el cobre, zinc y plomo, que se encuentran en la escoria original, lixivian de forma diferente según el pH. En el caso del cobre a pH-5 el valor del lixiviado es muy superior al del pH-6,7. Esta notable diferencia es debido a que para $\text{pH} > 5$ el cobre o precipita como CuO o $\text{Cu}(\text{OH})_2$.

Igualmente le ocurre al zinc. A partir de pH-6 puede estar en forma de precipitado de $Zn(OH)_2$, por lo que a pH-6,7 la concentración de Zn^{2+} es inferior a la de pH-5.

El mismo razonamiento se puede aplicar al plomo dado que también existen diferencias en los valores de lixiviación.

Para la muestra de escoria incorporada a un mortero se pretende evaluar las diferencias en el lixiviado entre un mortero elaborado con un cemento sin adiciones y un mortero en el que parte del cemento (30% en el estudio) es sustituido por escoria de cobre. Los morteros se fabrican con arena silíceo normalizada, relación cemento/arena de 1/3 y una relación agua/cemento de 0,5. El cemento utilizado es del tipo CEM I 42,5 [2.25].

Las conclusiones al estudio efectuado por Sánchez de Rojas [2.23] se resumen en dos:

1. La incorporación de escoria al fluido receptor (agua desionizada) no provoca un aumento de los elementos lixiviables.
2. Elementos como el cobre, hierro, zinc, presentes en la escoria original y en el lixiviado de esta, arrojan unas concentraciones prácticamente nulas al mortero con escoria.

El estudio de lixiviación realizado por Atlantic Copper [2.21] se realiza mediante el Test Estándar de lixiviación de acuerdo con la Norma DIN 38414 Fangos y Sedimentos (grupo S), determinación de la lixiviación en agua [2.26].

EL resultado de los análisis de los lixiviados de las escorias se indica en la tabla 2.4. Igualmente en la misma tabla 2.4 se representan los valores límites admisibles de los parámetros de un vertido industrial en base a lo dictaminado por el Real Decreto 849/1986 y posteriores revisiones [2.27]. A efectos de aplicación de la norma se utilizan los valores más restrictivos de esta, determinados por la tabla 3 de dicha norma.

Como se aprecia en la tabla 2.4 todos los valores cumplen sobradamente con los límites establecidos por el Real Decreto 849/1986 y posteriores revisiones.

Tabla 2.4

Resultados del análisis del lixiviado y su límite admisible según R.D 849/1986
[Fuente: [2.21] Atlantic Copper]

Referencia	Análisis	Norma
Plomo (Pb)	<0,1 mg/l	0,2 mg/l
Cromo (Cr)	<0,01 mg/l	0,2 mg/l
Cobre (Cu)	<0,11 mg/l	0,2 mg/l
Zinc (Zn)	<0,11 mg/l	3,0 mg/l
Hierro (Fe)	<0,01 mg/l	2,0 mg/l
Cadmio (Cd)	<0,01 mg/l	0,1 mg/l
Níquel (Ni)	<0,01 mg/l	2,0 mg/l
Arsénico (Ar)	<0,2 mg/l	0,5 mg/l
Mercurio (Hg)	<0,05 mg/l	0,05 mg/l
Cloruros (Cl ⁻)	273,4 mg/l	2000 mg/l
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	46 mg/l	2000 mg/l
pH	6,73	5,5-9,5

2.4.6 Toxicidad de la escoria de cobre

La toxicidad del lixiviado de las escorias de cobre ha sido determinada por el bioensayo de luminiscencia según la Orden de 13 de octubre de 1989 por la que se determinan los métodos de caracterización de los residuos tóxicos y peligrosos [2.24]

Los efectos biológicos producidos en el ensayo de la toxicidad del lixiviado son definidos como la concentración del efluente que provoca efectos negativos apreciables en un porcentaje determinado de la población de ensayo. Normalmente se usa el EC₅₀, que sería la concentración efectiva que afecta al 50% de la población.

El ensayo utilizado para determinar la toxicidad se fundamenta en la luminiscencia de la bacteria *Photobacterium phosphoreum* y de acuerdo al mismo se considera que un

residuo es tóxico si los lixiviados presentan una concentración efectiva EC_{50} (15 minutos, 15°C) inferior o igual a 3000 mg/litro.

Para ello se determina la inhibición de la emisión de luz por las bacterias luminiscentes en presencia de sustancias químicas. La cuantificación de esta inhibición es considerada como una medida de la toxicidad de las sustancias químicas presentes.

Según los ensayos realizados por Atlantic Copper [2.21] el valor de la concentración efectiva EC_{50} (15 minutos, 15°C) es 23.400 mg/l y por lo tanto se trata de un **lixiviado no tóxico**, al estar muy por encima del valor límite de 3.000 mg/l marcado por el método.

Tabla 2.5
Resultados del test de toxicidad
[Fuente: [2.21] Atlantic Copper]

Muestra	Análisis EC_{50} (15 minutos, 15°C)	Valor límite para toxicidad EC_{50} (15 minutos, 15°C)	Toxicidad
Lixiviado de escoria de cobre	23.400 mg/l	≤ 3.000 mg/l	NO

2.5 Bibliografía

- [2.1] Corporación Nacional del Cobre Chilena. <http://www.codelco.com>
- [2.2] Breve historia del cobre. <http://www.cimsaww.com>
- [2.3] Comisión Chilena del Cobre. <http://www.cochilco.cl>
- [2.4] Sarmentero Regueira J.C. (2010): *Impacto de la lógica inversa en el mercado del cobre en España*. Tesis de Master. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [2.5] International Copper Study Group. <http://www.icsg.org>
- [2.6] Beregovski, V., Kistiakouski, B. (1974): *Metalurgia del cobre y del níquel*. Editorial Mir. Moscú.
- [2.7] Arlandis Rubio J. (1999): *La metalurgia del cobre*. Boletín de estudios y desarrollo corporativo de Atlantic Copper S.A. Madrid, p. 13-15
- [2.8] Copper Development Association. <http://www.copper.org>
- [2.9] European Copper Institute. <http://www.copperalliance.eu>
- [2.10] Díaz Marinovic J. (2012): *Metalurgia extractiva del cobre*. Ingeniería civil de Minas. Universidad de Chile. p. 25-34.
- [2.11] Sepúlveda Estay C.A. (2006): *Utilización de escorias de fundición para la producción de compuestos de hierro*. Memoria de Grado. Universidad de Chile.
- [2.12] Corporación Nacional del Cobre Chilena. Documentación e información técnica. <http://www.codelcoeduca.cl>
- [2.13] World Copper Factbook 2012. International Copper Study Group.

- [2.14] Tantaleán Vanini, G. (2004): *Recursos metalúrgicos*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú
- [2.15] Biswas, A.K., Davenport, W.G (1993): *EL cobre: metalurgia extractiva*. Ed. Limusa. México.
- [2.16] Mackey P.J (1982): *The physical Chemistry of Copper Smelting Slags-a review*. Can Metall., **21**, p. 221
- [2.17] Lovera Dávila D.F., Arias V., Coronado Falcón R. (2004): *La valoración de las escorias de metalúrgicas como recursos industriales*. Revista del Instituto de Investigación FIGMMG, **7**, pp. 26-28. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú.
- [2.18] Santander, Nelson H. (1979): *Pirometalurgia del cobre*. 2ª edición. Ed. UTE. Chile, 1979.
- [2.19] Atlantic Copper (2013): *Declaración ambiental*.
- [2.20] Gorai B., R.K. Jana, and Premchand (2003): *Characteristics and utilization of copper slag—a review*. Resources, Conservation and Recycling, **39**, pp. 299-313.
- [2.21] Atlantic Copper (2012): *Estudios y usos alternativos de la escoria de cobre*.
- [2.22] Sánchez de Rojas, M.I., Rivera J., Frías M. (2008): *Use of recycled copper slag for blended cements*. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, pp. 83-209.
- [2.23] Sánchez de Rojas, M.I., Rivera J., Frías M. (2004): *Escorias de cobre: comportamiento puzolánico y fijación de los elementos metálicos en morteros*. Instituto Eduardo Torroja. VIII Congreso Nacional de materiales. Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia (SPUPV).

- [2.24] BOE 10 noviembre 1989. Orden de 13 de octubre de 1989. *Residuos Tóxicos y Peligrosos. Métodos de caracterización.*
- [2.25] RC-08: *Instrucción para la recepción de cementos.* Serie Normativas, Ministerio de Fomento. 1ª edición, Ed. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento, 2008.
- [2.26] DIN 38414. *German standard methods for the examination of water, waste water and sludge; sludge and sediments (group S)*, 1989.
- [2.27] Real Decreto 849/1986, 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico que desarrolla los títulos preliminar, I, IV, V, VI, VII y VIII del texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, y última revisión 22 de septiembre de 2013.

CAPÍTULO 3

MATERIALES. DOSIFICACIÓN Y ELABORACIÓN DE HORMIGONES

3.1 Introducción

En este capítulo se analizan los ensayos a los que han sido sometidos los áridos y la escoria de cobre, y que forman la base para la dosificación de todos y cada uno de los hormigones y morteros equivalentes desarrollados en esta tesis doctoral.

Además de dichos ensayos, se ha procedido al ajuste granulométrico de las escorias de cobre para obtener un material equivalente granulométricamente al árido fino, y de esta forma sustituir el árido fino por la escoria de cobre en los hormigones y morteros desarrollados.

Básicamente se estudian tres propiedades fundamentales; la granulometría, la densidad y la absorción.

La granulometría de los áridos es uno de los parámetros fundamentales en el proceso de dosificación del hormigón y por ello en los morteros equivalentes, dado los numerosos métodos de dosificación que se basan en las granulometrías óptimas que debe tener el árido compuesto.

El árido es el material granular, generalmente inerte, resultante de la desintegración natural y/o desgaste de rocas, o que se obtiene mediante la trituración de ellas, de escorias siderúrgicas convenientemente preparadas para tal fin o de otros materiales suficientemente duros, que permiten obtener partículas de forma y tamaño estables, destinados a ser empleadas en el hormigón [3.1].

La importancia del uso, el tipo y la calidad correcta de árido no se puede subestimar. Los áridos finos y gruesos ocupan entre el 60% y el 75% del volumen del hormigón (70% al 85% de la masa) e influyen fuertemente en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido; sobre todo, en la densidad, elasticidad, deformación, porosidad, etc., en las proporciones de la mezcla y en la economía del hormigón.

En consecuencia se considera que los áridos no son elementos inertes en la masa del hormigón, sino que le confieren gran parte de sus propiedades.

De la misma forma la densidad y la absorción de los áridos intervendrán en el peso y en la cantidad de agua de amasada necesaria en la dosificación.

3.2. Granulometría de áridos y escoria de cobre

Previa a la dosificación de los hormigones y morteros equivalentes utilizados en esta tesis doctoral se definen las características de los distintos tipos de áridos utilizados incluyendo a la escoria de cobre como un árido más. Cada uno de los áridos empleados han sido facilitados por la fábrica de prefabricados que la empresa DRACE (grupo DRAGADOS) tiene ubicada en Los Barrios, Cádiz. La escoria de cobre ha sido facilitada por la empresa ATLANTIC COOPER ubicada en Huelva.

Se utilizan tres tipos de áridos de naturaleza caliza y una adición, escoria de cobre, de naturaleza metalúrgica. La denominación de cada uno de los áridos y de la escoria se realiza en función de la granulometría. Dicha denominación se indica en la tabla 3.1.

Tabla 3.1
Nomenclatura y tamaños de los áridos empleados

Nomenclatura	Tipo de árido	Tamaño (mm)	
		Min.	Max.
Árido 0/2	Fino	0	2
Árido 0/4	Intermedio	0	4
Árido 4/16	Grueso	4	16
Escoria de cobre	Sustitución	0	4

En los apartados siguientes se determinará la granulometría de los áridos y de la escoria de cobre según las normas UNE correspondientes, mediante división y separación con una serie de tamices en fracciones granulométricas de tamaño decreciente, además de la curva granulométrica de cada uno de los áridos y de la escoria. Igualmente se definirá el tamaño máximo del árido utilizado en la dosificación, tamaño que como se indica más adelante estará en función de los pasas acumulado más próximos a un determinado porcentaje, definiendo pasas acumulado como las

diferencias a 100 de los tantos por ciento de los retenidos acumulados, siendo estos lo que retendría cada tamiz en el caso de que no existiera por encima de él ninguno de abertura mayor.

Para obtener la granulometría se siguen las especificaciones indicadas en la norma UNE-EN 933-1:2012 [3.2]. La masa de las muestras ensayadas se reduce conforme a la norma UNE-EN 932-2:1999 [3.3], con el objetivo de obtener un número de porciones a ensayar. En nuestro caso se han utilizado las muestras que se indican en tabla 3.2.

Tabla 3.2
Muestras de áridos empleadas en el ensayo granulométrico

Tipo árido utilizado	Muestra según UNE (gr)	Muestra utilizada (gr)
Árido fino 0/2	200	1000
Árido intermedio 0/4	200	1000
Escoria de cobre	200	1000
Árido grueso 4/16	2600	3000

Ha sido necesaria la utilización de una báscula de precisión, una tamizadora con tamices de ensayo con aberturas tal y como se especifica en la norma UNE-EN 933-2:1996 [3.4] y de acuerdo con los requisitos de las normas ISO 3310-1 [3.5] e ISO 3310-2 [3.6], así como una estufa ventilada que mantenga una temperatura de $110^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$ de forma que se obtenga un adecuado secado de los áridos sin causar la rotura de ningún tamaño de partículas.

El ensayo granulométrico se efectúa por vía seca dado que los áridos empleados tienen perfectamente definidas sus partículas a diferencia de un suelo que se trataría de un conglomerado donde las partículas no están definidas y habría que proceder a su lavado para disgregarlo.

Los pasos necesarios para la elaboración del ensayo granulométrico por vía seca son los siguientes:

1. Secado de las muestras de áridos en estufa ventilada durante 24 horas. La temperatura de secado ha sido $110^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$.
2. Preparación de la columna granulométrica a colocar en la tamizadora. Se distribuyen los tamices de menor a mayor, colocando tras el tamiz mayor el siguiente superior en la serie. Con ello se asegura que no existen tamaños de partículas superiores a las ensayadas.
3. Vertido del material secado en la columna de tamizado. La columna está formada por cierta cantidad de tamices ensamblados y dispuestos, de arriba a abajo, en orden decreciente de tamaños de abertura, con el fondo y la tapa.
4. Se agita mecánicamente la muestra mediante la tamizadora. El proceso de tamizado se considera finalizado cuando realizado un tamizado adicional el cambio de masa del material retenido en cualquier tamiz no conlleve un cambio de masa superior al 1%. En nuestro caso el tiempo de tamizado ha sido de 10 minutos.
5. Se retiran los tamices uno a uno, comenzando con el de mayor tamaño de abertura.
6. Se pesa el material retenido en cada uno de los tamices de la columna granulométrica, registrando cada uno de ellos como peso retenido parcial de cada tamiz.
7. Confección de la curva granulométrica colocando en el eje de abscisas los tamices empleados y en el eje de ordenada el porcentaje acumulado de la masa de la porción de ensayo que pasa por cada uno de los tamices, redondeando al número decimal más próximo para el tamiz 0,063 mm y al número entero más próximo para el resto de tamices.

Del ensayo granulométrico también se obtiene su módulo, definiéndolo como la suma de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices según la serie UNE 7050-3:1997 [3.7] hasta el de abertura máxima dividida por 100. Este módulo da una idea del tamaño medio del árido empleado en un hormigón pero, nunca es índice de granulometría del mismo pues pueden existir infinidad de áridos con el mismo módulo granulométrico, que tengan granulometrías totalmente diferentes; no obstante, es interesante conocer su valor debido a que todas las mezclas de áridos que poseen el mismo módulo precisan la misma cantidad de agua para producir hormigones de la misma docilidad y resistencia siempre que se empleen idéntica cantidad de cemento, y a que variaciones en el módulo de los áridos indican que existen alteraciones en los de una misma procedencia [3.8].



Figura 3.1. Tamizadora y balanza utilizada en la elaboración de la granulometría de los áridos

3.2.1 Granulometría y curva granulométrica del árido fino

Tomada una muestra de 1000 gramos de árido fino 0/2, en la tabla 3.3 y figura 3.2 se indican la granulometría y la curva granulométrica del árido respectivamente.

Tabla 3.3
Granulometría del árido fino 0/2

Tamiz serie UNE (mm)	Retenido Parcial (gr)	Retenido %		Pasa acumulado %
		Parcial	Acumulado	
20	0,0	0,00	0,00	100,00
16	0,0	0,00	0,00	100,00
8	0,0	0,00	0,00	100,00
4	0,0	0,00	0,00	100,00
2	30,0	3,00	3,00	97,00
1	140,0	14,00	17,00	83,00
0,50	160,0	16,00	33,00	67,00
0,25	242,0	24,20	57,20	42,80
0,125	275,0	27,50	84,70	15,30
0,063	137,8	13,78	98,48	1,52
Fondo	15,2	1,52	100,00	0,00
TOTAL	1000,0			

El módulo granulométrico tiene un valor de $M.G_{0/2}=1,95$

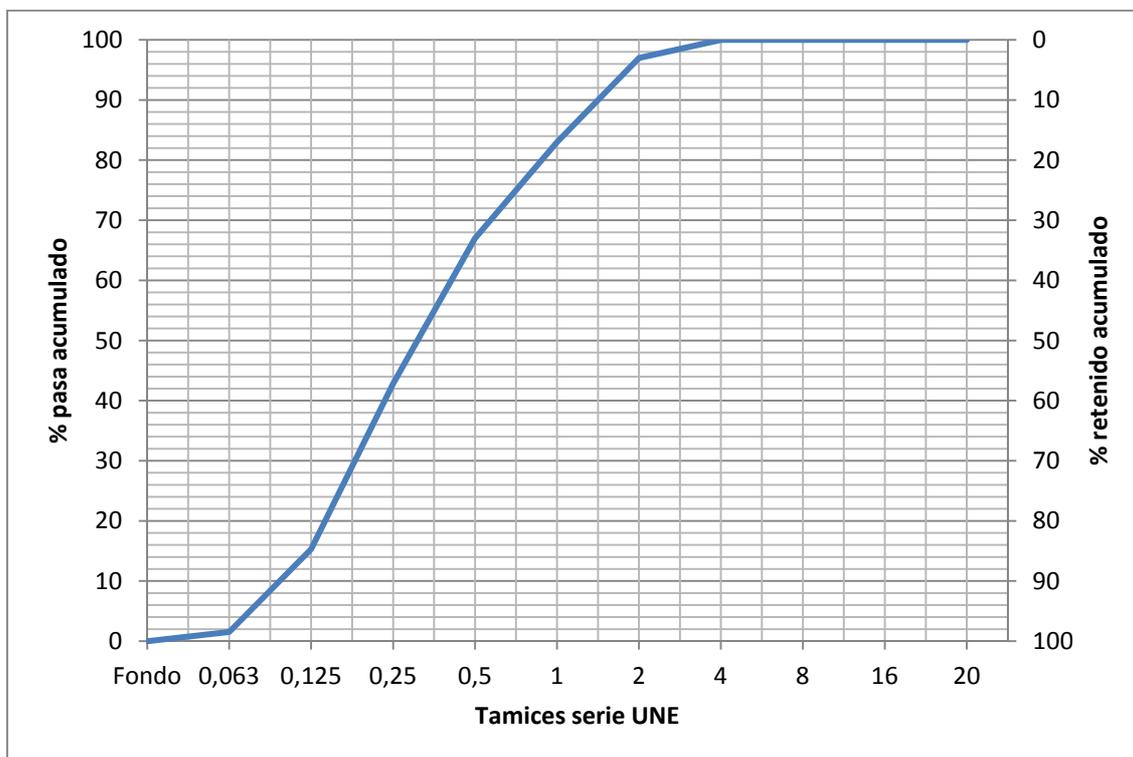


Figura 3.2. Curva granulométrica del árido fino 0/2

3.2.2 Granulometría y curva granulométrica del árido intermedio

Tomada una muestra de 1000 gramos de árido fino 0/4, en la tabla 3.4 y figura 3.3 se indica la granulometría y la curva granulométrica del árido respectivamente.

Tabla 3.4
Granulometría del árido intermedio 0/4

Tamiz serie UNE (mm)	Retenido Parcial (gr)	Retenido %		Pasa acumulado %
		Parcial	Acumulado	
20	0,0	0,00	0,00	100,00
16	0,0	0,00	0,00	100,00
8	0,0	0,00	0,00	100,00
4	67,80	6,78	6,78	93,22
2	350,0	35,00	41,78	58,22
1	330,0	33,00	74,78	25,22
0,50	137,2	13,72	88,50	11,50
0,25	66,0	6,60	95,10	4,90
0,125	34,0	3,40	98,50	1,50
0,063	8,0	0,80	99,30	0,70
Fondo	7,0	0,70	100,00	0,00
TOTAL	1000,0			

El módulo granulométrico tiene un valor de $M.G_{0/4}=4,05$

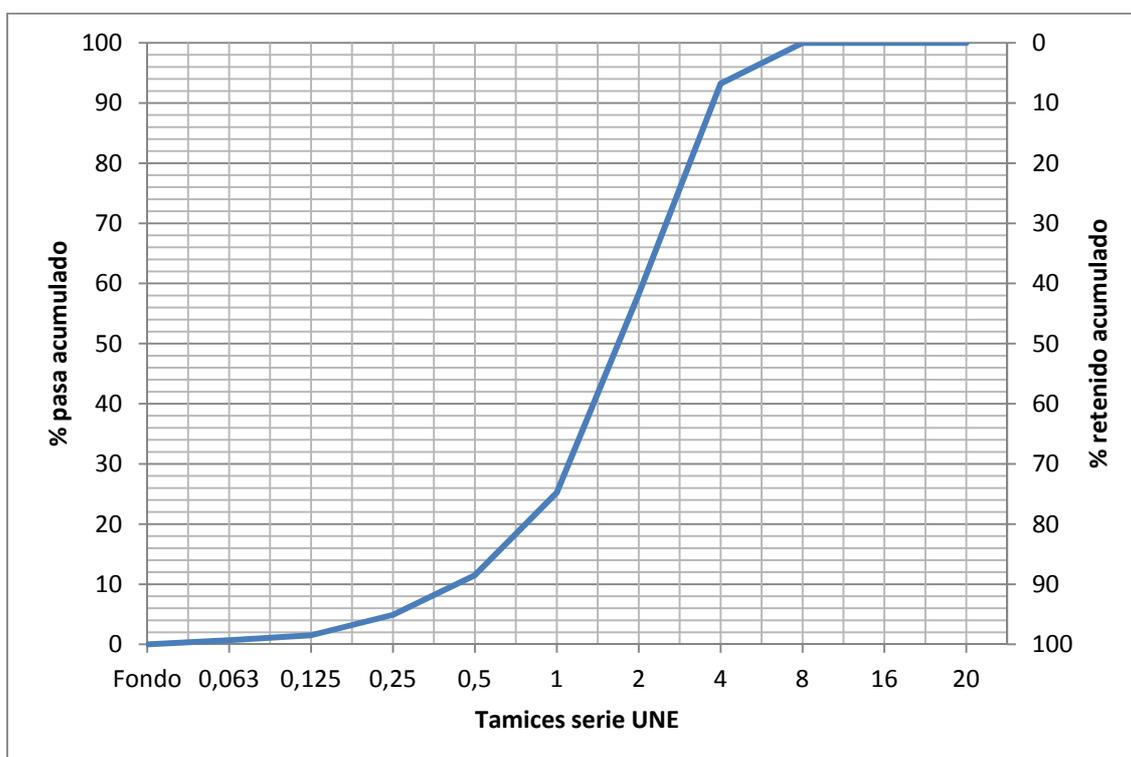


Figura 3.3. Curva granulométrica del árido intermedio 0/4

3.2.3 Granulometría y curva granulométrica árido grueso

Tomada una muestra de 3000 gramos de árido fino 4/16, en la tabla 3.5 y figura 3.4 se indica la granulometría y la curva granulométrica del árido respectivamente.

Tabla 3.5
Granulometría del árido grueso 4/16

Tamiz serie UNE (mm)	Retenido Parcial (gr)	Retenido %		Pasa acumulado %
		Parcial	Acumulado	
20	0,0	0,00	0,00	100,00
16	5,0	0,17	0,17	99,83
8	1653,0	55,10	55,27	44,73
4	1245,0	41,50	96,77	3,23
2	74,0	2,47	99,23	0,77
1	23,0	0,77	100,00	0,00
0,50	0,0	0,00	100,00	0,00
0,25	0,0	0,00	100,00	0,00
0,125	0,0	0,00	100,00	0,00
0,063	0,0	0,00	100,00	0,00
Fondo	0,0	0,00	100,00	0,00
TOTAL	3000,0			

El módulo granulométrico tiene un valor de $M.G_{4/16}=6,51$

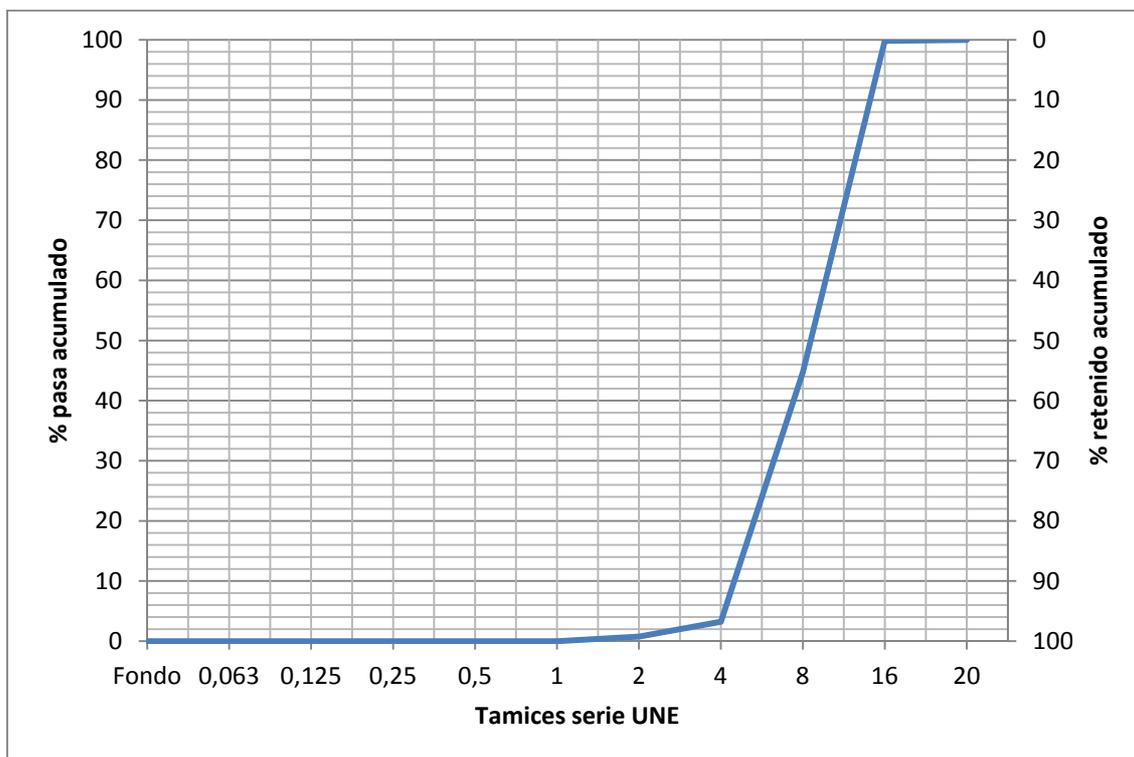


Figura 3.4. Curva granulométrica del árido grueso 4/16

3.2.4 Granulometría y curva granulométrica de la escoria

Tomada una muestra de 1000 gramos de escoria de cobre, en la tabla 3.6 y figura 3.5 se indica la granulometría y la curva granulométrica del árido respectivamente.

Tabla 3.6
Granulometría de la escoria de cobre 0/4

Tamiz serie UNE (mm)	Retenido Parcial (gr)	Retenido %		Pasa acumulado %
		Parcial	Acumulado	
20	0,0	0,00	0,00	100,00
16	0,0	0,00	0,00	100,00
8	0,0	0,00	0,00	100,00
4	12,0	1,20	1,20	98,80
2	200,0	20,00	21,20	78,80
1	440,0	44,00	65,20	34,80
0,50	236,0	23,60	88,80	11,20
0,25	54,0	5,40	94,20	5,80
0,125	41,0	4,10	98,30	1,70
0,063	8,8	0,88	99,18	0,82
Fondo	8,2	0,82	100,00	0,00
TOTAL	1000,0			

El módulo granulométrico tiene un valor de $M.G_{Cu}=3,69$

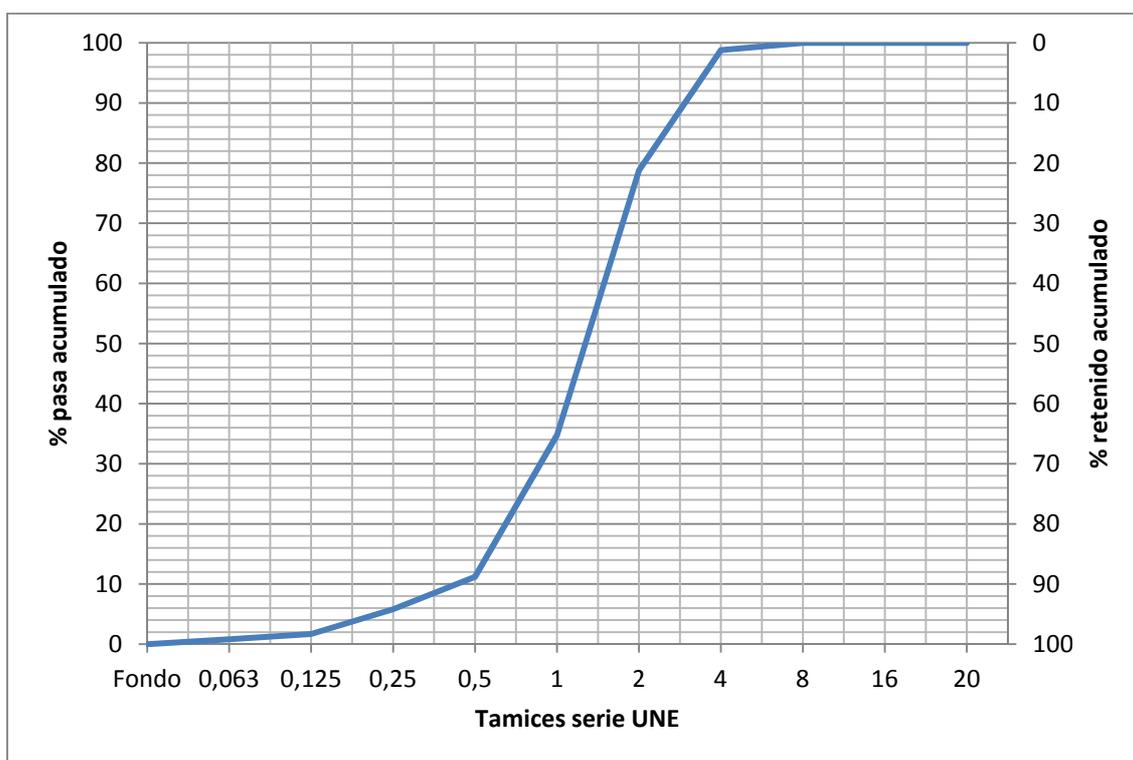


Figura 3.5. Curva granulométrica de la escoria de cobre 0/4

3.2.5 Tamaño máximo de los áridos empleados

Una vez definida la granulometría de los áridos se determina el tamaño máximo de cada uno de los áridos empleados en la fabricación del hormigón.

A la pregunta qué valor del tamaño máximo del árido se debe utilizar, hay diversidad de opiniones. Los diferentes métodos de dosificación teóricos existentes utilizan diversos tamaños. Por ejemplo el método de Fuller [3.8] considera como tamaño máximo la abertura del menor tamiz que retiene menos del 25 por ciento, mientras que en el método de Bolomey [3.8] es el tamiz más pequeño de la serie empleada que retenga menos del 15%.

La instrucción de hormigón estructural EHE-08 [3.9] en su artículo 28.3 denomina tamaño máximo D de un árido grueso o fino, la mínima abertura de tamiz UNE-EN 933-2:1996 [3.4] que cumple los requisitos generales en la tabla 28.3.a de dicho articulado, en función del tamaño máximo del árido.

Tabla 3.7

Clases generales de los tamaños máximo D y mínimo d de un árido
[Fuente: EHE-08 tabla 28.3.a]

		Porcentaje que pasa (en masa)				
		2D	1,4D	D	d	d/2
Árido grueso	$D > 11,2$ o $\frac{D}{d} > 2$	100	98 a 100	90 a 99	0 a 15	0 a 5
	$D \leq 11,2$ o $\frac{D}{d} \leq 2$	100	98 a 100	85 a 99	0 a 20	0 a 5
Árido fino	$D \leq 4$ y $d = 0$	100	95 a 100	85 a 99	---	---

En nuestro caso y a tenor de lo indicado en el artículo 3 de la instrucción de hormigón estructural EHE-08, se adopta una solución alternativa para definir el tamaño máximo del árido para la dosificación del hormigón de esta tesis doctoral, observando siempre que se cumplan las exigencias de dicha instrucción porque las prestaciones de los elementos diseñados son, al menos, equivalentes a las que se obtendrían por la aplicación de los procedimientos de esta.

Para la determinación del tamaño máximo del árido se utiliza la base de cálculo y manual de aplicación del software para dosificación de hormigones de la comercial Procedimientos Integrados S.L [3.10]. En ella el tamaño máximo se calcula por interpolación lineal. Para ello se seleccionan los dos tamices cuyos pasas sean más próximos al 95%, uno por defecto D_d y otro por exceso D_e . El porcentaje de árido que pasa por cada tamiz será P_d y P_e respectivamente.

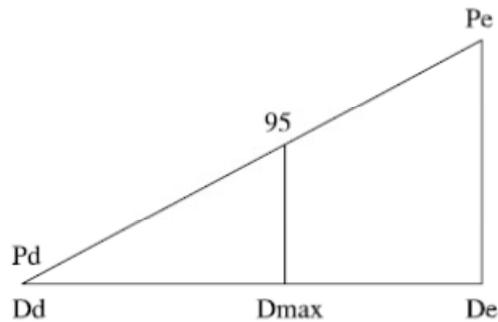


Figura 3.6. Semejanza de triángulos para la obtención D_{max}
[Fuente: Procedimientos Integrados S.L.]

Aplicando semejanza de triángulos según la representación de la figura 3.6 se obtiene:

$$\frac{\log D_e - \log D_d}{\log D_{max} - \log D_d} = \frac{P_e - P_d}{95 - P_d} \quad (3.1)$$

Despejando D_{max} se obtiene:

$$D_{max} = 10^{\left[\frac{\log \frac{D_e}{D_d}}{\frac{P_e - P_d}{95 - P_d}} + \log D_d \right]} \quad (3.2)$$

Al aplicar esta metodología para el cálculo del tamaño máximo del árido se obtienen mezclas que se ajustan mejor a la máxima compacidad, obteniendo hormigones de mejor calidad.

Utilizando la granulometría obtenida en apartados anteriores y aplicando la ecuación 3.2, en la tabla 3.9 se indican los tamaños máximos para cada uno de los áridos que formarán parte de los hormigones elaborados en este trabajo.

Tabla 3.8
Granulometría de los áridos, expresada en % pasa acumulado

Tamiz serie UNE (mm)	% pasa acumulado		
	Árido fino 0/2	Árido intermedio 0/4	Árido grueso 4/16
20	100,00	100,00	100,00
16	100,00	100,00	99,83
8	100,00	100,00	44,73
4	100,00	93,22	3,23
2	97,00	58,22	0,77
1	83,00	25,22	0,00
0,50	67,00	11,50	0,00
0,25	42,80	4,90	0,00
0,125	15,30	1,50	0,00
0,063	1,52	0,70	0,00
Fondo	0,00	0,00	0,00

Tabla 3.9
Tamaño máximo de los áridos

Árido	T _{max} (mm)
Fino 0/2	1,81
Intermedio 0/4	4,80
Grueso 4/16	15,06

3.3. Ajuste granulométrico de la escoria de cobre

El objetivo de esta tesis es estudiar la reología y el estado endurecido de hormigones en el que se sustituye en volumen el árido fino 0/2 por escoria de cobre de la misma granulometría. Para este fin es necesario realizar un proceso de ajuste de forma que la curva granulométrica y el módulo granulométrico de la escoria sean similares al del árido fino. Sería fruto del azar que las curvas y/o los módulos granulométricos de ambos materiales coincidieran, sobre todo por el origen tan distinto que poseen, machaqueo de cantera caliza y proceso metalúrgico del cobre.

Dado que *“el azar no existe; Dios no juega a los dados”* (Albert Einstein), se realiza un proceso de encaje de la granulometría de la escoria de cobre de forma que se haga coincidir la curva granulométrica del árido 0/2, árido sustituido, con la curva granulométrica de la escoria de cobre, árido sustituto.

El proceso de encaje se realizará mediante tamizado. La escoria de cobre tiene un tamaño máximo de partícula de 4 mm, por lo que el primer paso sería eliminar esta fracción de la granulometría y obtener una nueva curva granulométrica. Seguidamente se comparan las curvas del árido 0/2 y la nueva escoria, ahora de tamaño 0/2, la cual se denominará escoria de cobre 0/2.

Para eliminar la fracción 4 mm de la escoria, se procede a tomar una muestra de 1000 gramos y se pasa por el tamiz 4 mm. El material retenido en este tamiz serán las partículas mayores a la abertura del tamiz, 4 mm. El material que pasa será la escoria que hemos denominado 0/2, al igual que ocurría con el árido fino 0/2. Tras el proceso de tamizado el material retenido en el tamiz 4 mm, tiene una masa de 12 gramos, por lo que la muestra de escoria 0/2 tiene una masa de 988 gramos.

Siguiendo la misma metodología descrita en el apartado 3.2, se realiza la granulometría de la escoria 0/2 obtenida. Para ello se toma la muestra de 988 gramos de escoria de cobre, procedente de eliminar la fracción de 4 mm. En la tabla 3.10 se indican los valores obtenidos una vez realizado el procedimiento de tamizado así como el módulo granulométrico del árido. De la misma forma en la figura 3.7 se representan gráficamente dichos valores para obtener la curva granulométrica de la escoria 0/2.

Realizando una comparativa entre las granulometrías del árido fino 0/2 y la escoria de cobre 0/2, se observa que la masa de partículas en función de los tamaños varía mucho de un material a otro. Si se toman los valores relativos al porcentaje retenido parcial en cada tamiz de cada uno de estos dos materiales se aprecia claramente la diferencia. Para ello se utilizan los datos de la tabla 3.3 *“granulometría árido 0/2”* y tabla 3.10 *“granulometría de la escoria de cobre 0/2”*. En la tabla 3.11 se reflejan los datos comparativos.

Tabla 3.10
Granulometría de la escoria de cobre 0/2

Tamiz serie UNE (mm)	Retenido Parcial (gr)	Retenido %		Pasa acumulado %
		Parcial	Acumulado	
20	0,0	0,00	0,00	100,00
16	0,0	0,00	0,00	100,00
8	0,0	0,00	0,00	100,00
4	0,0	0,00	0,00	100,00
2	200,0	20,24	20,24	79,76
1	440,0	44,53	64,78	35,22
0,50	236,0	23,89	88,66	11,34
0,25	54,0	5,47	94,13	5,87
0,125	41,0	4,15	98,28	1,72
0,063	8,8	0,89	99,17	0,83
Fondo	8,2	0,83	100,00	0,00
TOTAL	988,0			

El módulo granulométrico tiene un valor de $M.G_{Cu\ 0/2}=3,66$

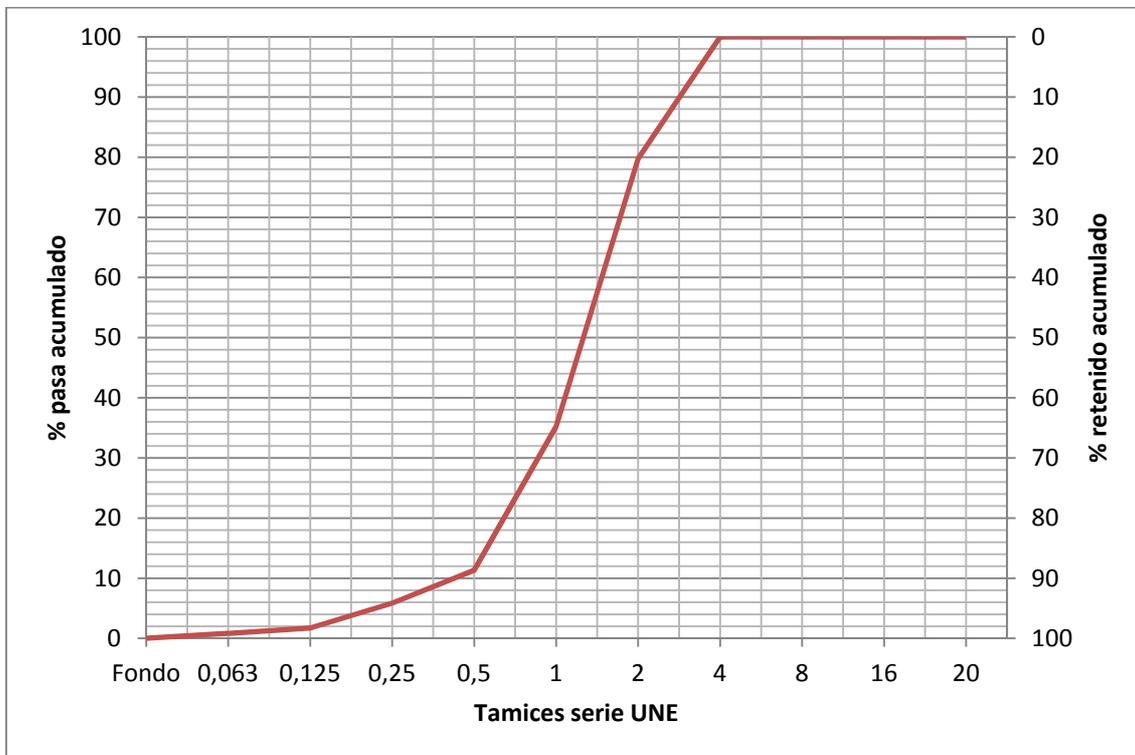


Figura 3.7. Curva granulométrica de la escoria de cobre 0/2

Tabla 3.11

Comparativa granulométrica entre el árido 0/2 y la escoria de cobre 0/2

Tamiz serie UNE (mm)	Retenido Parcial %		Pasa acumulado %		Diferencias % (árido-escoria)
	Árido 0/2	Escoria 0/2	Árido 0/2	Escoria 0/2	
20	0,00	0,00	100,00	100,00	0,00
16	0,00	0,00	100,00	100,00	0,00
8	0,00	0,00	100,00	100,00	0,00
4	0,00	0,00	100,00	100,00	0,00
2	3,00	20,24	97,00	79,76	-17,24
1	14,00	44,53	83,00	35,22	-30,53
0,50	16,00	23,89	67,00	11,34	-7,89
0,25	24,20	5,47	42,80	5,87	18,73
0,125	27,50	4,15	15,30	1,72	23,35
0,063	13,78	0,89	1,52	0,83	12,89
Fondo	1,52	0,83	0,00	0,00	0,00

En la figura 3.8 se muestra mediante diagramas de barras los porcentajes retenidos parciales de cada tamiz para el árido fino 0/2 y la escoria de cobre 0/2. En ella se observa como la escoria de cobre es deficitaria en todas las fracciones granulométricas comprendidas entre el tamiz 0,063 mm y 0,25 mm.

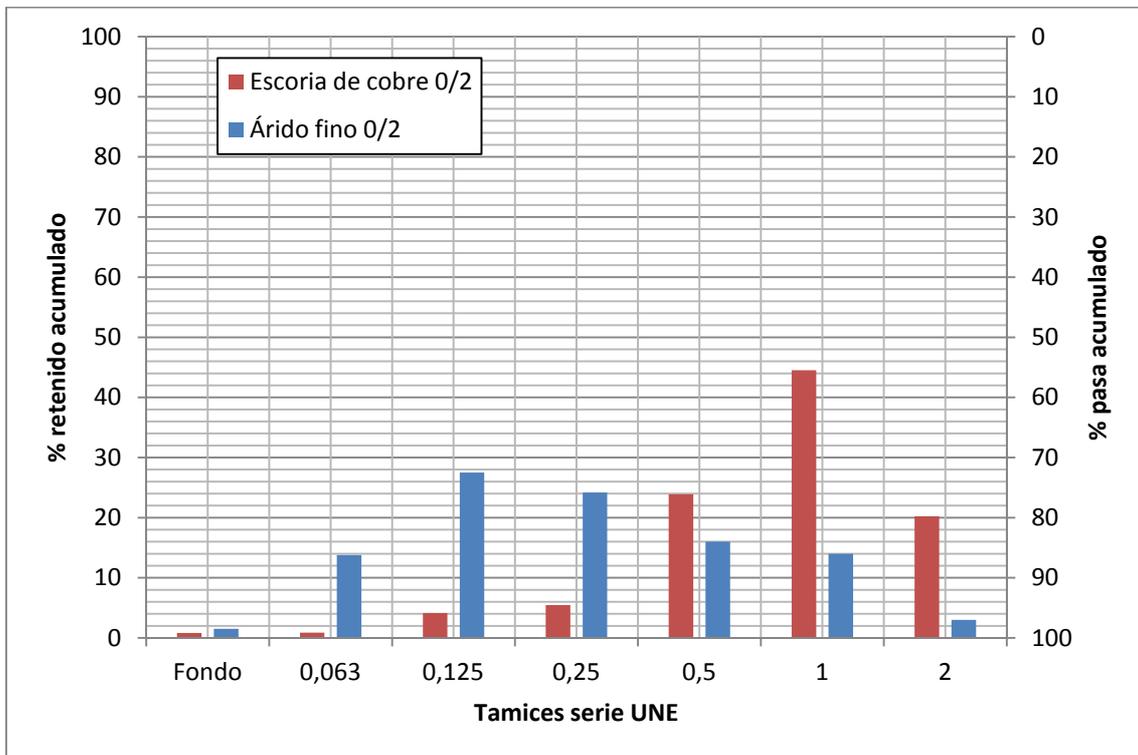


Figura 3.8. Comparativa entre fracciones granulométricas del árido fino 0/2 y escoria 0/2

En la figura 3.9 se representan los excesos y defectos por tamices que existen entre el árido fino 0/2 y la escoria de cobre 0/2, según se indica en la columna relativa a las diferencias porcentuales de la tabla 3.11.

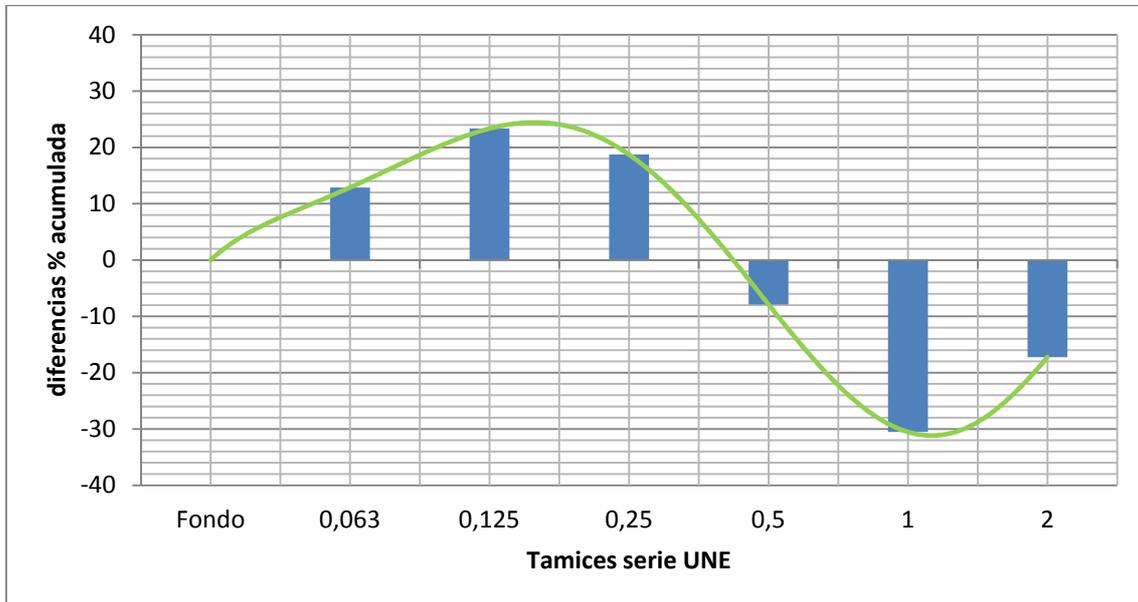


Figura 3.9. Diferencias % acumulado entre tamices del árido fino 0/2 y la escoria de cobre 0/2

Representando en un mismo gráfico las granulometrías del árido fino 0/2 y la escoria 0/2 se observa lo indicado anteriormente; las curvas son completamente distintas, lo que conllevará a realizar un ajuste granulométrico de la escoria que permita asemejar las curvas granulométricas y el módulo granulométrico de ambos materiales.

Es importante indicar que la condición de que las curvas granulométricas de los materiales, árido 0/2 y escoria 0/2, sean semejantes, es una condición necesaria pero no suficiente, para lo cual se ha de añadir la condición de que la granulometría debe tener el mismo módulo granulométrico. De hecho es posible obtener granulometrías idénticas pero con distinto módulo granulométrico.

Según Abrams, Humel y otros autores, no es necesario ceñirse exactamente a una curva granulométrica teórica [3.11], lo cual conlleva a que se pueda flexibilizar la curva granulométrica del árido que se pretenda ajustar dado que a veces resulta muy difícil y costoso obtener alguna de las fracciones granulométricas.

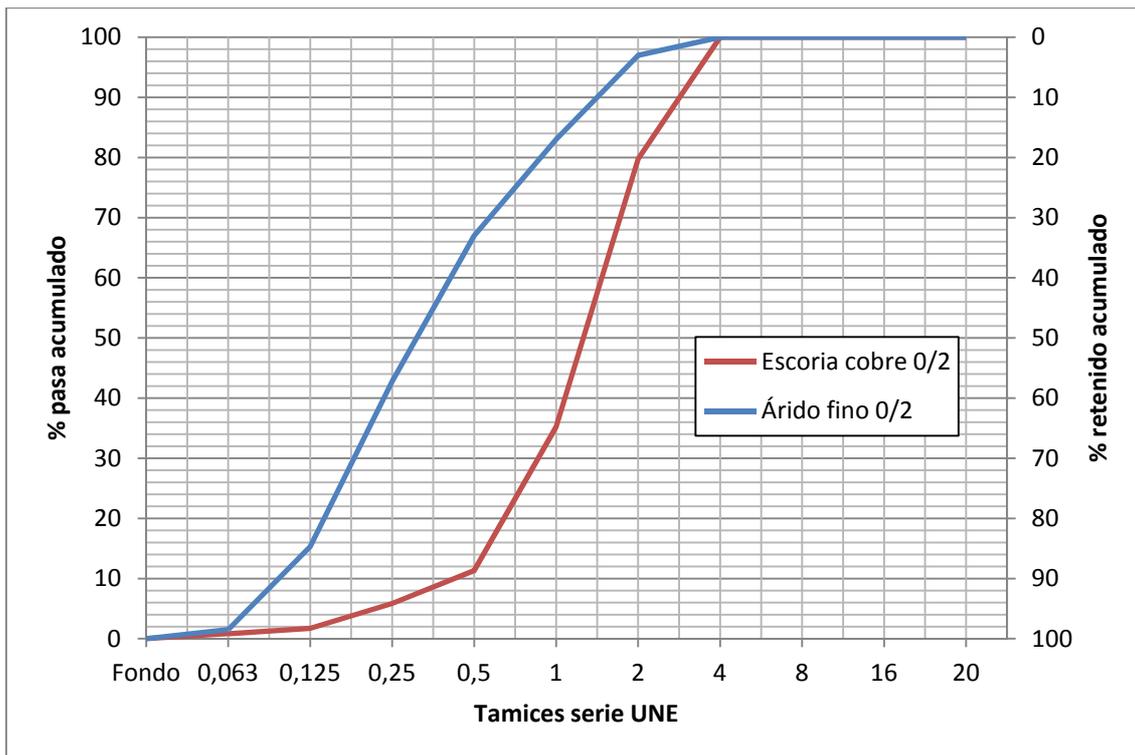


Figura 3.10. Curvas granulométricas del árido fino 0/2 y escoria de cobre 0/2

En nuestro caso la reproducción de las fracciones granulométricas de la escoria de cobre 0/2 partiendo de la curva teórica del árido fino 0/2 ha sido exacta, dado que el proceso de tamizado no supone un coste exagerado, la obtención de las fracciones granulométricas se realiza mecánicamente por vibración y la obtención de una u otra fracción se hace en función del número de tamices que se coloquen en la columna granulométrica.

Según se desprende de las tablas 3.3 y 3.10 los módulos granulométricos del árido fino 0/2 y la escoria de cobre 0/2 sin corregir son 1,95 y 3,66 respectivamente, lo cual indica una diferencia notable en la distribución de los distintos tamaños de granos de cada material.

Para conseguir una escoria de cobre 0/2 con las mismas propiedades granulométricas que el árido fino, se procede a tamizar la escoria 0/4 de forma que se separen por tamices según serie UNE 7050-3:1997 [3.7] todos los tamaños de la misma. Posteriormente y conocida la granulometría del árido fino 0/2 reproducimos esta con

los tamaños obtenidos tras el tamizado de la escoria original 0/4. En la tabla 3.12 se muestra la configuración de escoria obtenida, que no es más que la granulometría del árido fino 0/2.

Tabla 3.12

Reproducción granulométrica de la escoria de cobre 0/2 en base a la del árido fino 0/2

Tamiz UNE (mm)	Árido 0/2 Retenido Parcial (gr)	Escoria 0/2 Retenido Parcial (gr)	Retenido %				Pasa acumulado %	
			Parcial	Acumulado	Parcial	Acumulado		
2	30,0	30,0	35,10	35,10	41,70	41,70	58,30	58,30
1	140,0	140,0	33,00	33,00	74,70	74,70	25,30	25,30
0,50	160,0	160,0	13,80	13,80	88,50	88,50	11,50	11,50
0,25	242,0	242,0	6,60	6,60	95,10	95,10	4,90	4,90
0,125	275,0	275,0	3,40	3,40	98,50	98,50	1,50	1,50
0,063	137,8	137,8	0,80	0,80	99,30	99,30	0,70	0,70
Fondo	15,2	15,2	0,70	0,70	100,00	100,00	0,00	0,00
TOTAL	1000,0	1000,0						

3.4 Densidad y absorción de los áridos y la escoria de cobre

Este apartado tiene por objeto determinar la densidad aparente y la absorción de agua tanto de los áridos como de la escoria de cobre empleados en la fabricación de los distintos hormigones de esta tesis. Para la obtención de dichos parámetros se siguen las especificaciones indicadas en la norma UNE-EN 1097-6:2001/A1:2006 [3.12].

Según dicha norma UNE citada anteriormente y dado que se tienen dos conjuntos de áridos con tamaños de partículas bien diferenciados, se aplica el método del picnómetro para partículas de árido comprendidas entre 0,063 mm y 4 mm en el caso del árido fino 0/2, árido intermedio 0/4 y escoria de cobre.

De la misma forma para el árido grueso 4/16 se utilizará el método de la balanza hidrostática como método alternativo al método del picnómetro para partículas de árido comprendidas entre 4 mm y 31,5 mm.

Todas las muestras ensayadas se realizan de conformidad con la norma UNE-EN 932-1:1997 [3.13], reduciéndose las muestras según lo dispuesto en la norma UNE-EN 932-2:1999 [3.3]. En cualquier caso las muestras de ensayo siempre han sido iguales o superiores a 1000 gramos.

Las muestras utilizadas en cada uno de los ensayos se indican en la tabla 3.13.

Tabla 3.13
Muestras empleadas en el ensayo de densidad y absorción

Tipo árido utilizado	Muestra según Norma (gr)	Muestra utilizada (gr)
Árido fino 0/2	1000	1000
Árido intermedio 0/4	1000	1000
Árido grueso 4/16	2000	2000
Escoria de cobre 0/2	1000	1000

La densidad de las partículas se obtiene a partir de la relación entre la masa y el volumen. La masa se determina pesando la muestra de ensayo en condiciones de saturación y pesándola de nuevo tras el proceso de secado en estufa. La determinación del volumen se realiza a partir de la masa de agua desplazada ya sea por la reducción de masa en el método de la balanza hidrostática, o por pesadas según el método del picnómetro.

El valor de la absorción de agua se calculará una vez obtenida la masa del árido saturado con superficie seca y la masa de muestra de ensayo secada en estufa.

Los equipos de uso general que se necesitan para realizar el ensayo por el método del picnómetro y por el método de la balanza hidrostática, son los que se indican a continuación:

1. Estufa ventilada que alcance y mantenga una temperatura de $110^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$.
2. Balanza con precisión de 0,1% de la masa de la muestra de ensayo.

3. Calentamiento al “baño María”, con control termostático de temperatura.
4. Tamices de ensayo de 0,063 mm, 4 mm y 31,5 mm.
5. Termómetro, bandejas de acero inoxidable y paños absorbentes.



Figura 3.11. Equipos generales utilizados en el método del picnómetro y en el método de la balanza hidrostática

Los equipos especiales usados en el método del picnómetro para partículas de árido comprendidas entre 0,063 mm y 4 mm son los siguientes:

1. Picnómetro de 1000 ml de capacidad.
2. Secador de mano.
3. Molde troncocónico metálico y pisón metálico.

Los equipos especiales utilizados en el método de la balanza hidrostática son los siguientes:

1. Cesta perforada con sistema que permita la suspensión de la balanza
2. Depósito que permita albergar agua a una temperatura de $22^{\circ}\pm 3^{\circ}\text{C}$, además de suspender libre y holgadamente la cesta perforada.



Figura 3.12. Equipos especiales utilizados en el método del picnómetro



Figura 3.13. Equipos especiales utilizados en el método de la balanza hidrostática

Para el desarrollo de cada uno de los métodos de ensayo es necesario definir un procedimiento operatorio, el cual nos vaya guiando para la obtención de los parámetros buscados. Seguidamente se indican dichos procedimientos, tanto para el método del picnómetro como para el método de la balanza hidrostática.

Ejecución del método del picnómetro:

1. Se lava la muestra en el tamiz 0,063 mm y de 4 mm. Con ello por un lado se eliminan las partículas más finas y por otro se rechazan las partículas que se han quedado retenidas en el tamiz 4 mm.
2. Se sumerge la muestra preparada en el picnómetro, extrayendo las posibles burbujas de aire.
3. Se coloca el picnómetro al baño María y se mantiene la muestra a $22^{\circ}\pm 3^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas. Tras las 24 horas se extrae el picnómetro del baño.
4. Se enrasa el picnómetro.
5. Se seca exteriormente el picnómetro y se pesa, obteniendo la masa M_2 . Se anota la temperatura del agua en el picnómetro.
6. Se vacía el contenido del picnómetro sobre una bandeja, enjuagando este y vertiendo el contenido del enjuague sobre la misma bandeja.
7. Se llena el picnómetro de agua, se enrasa, se seca exteriormente y se pesa el conjunto, obteniendo la masa M_3 . Se vuelve a anotar la temperatura del agua en el picnómetro.
8. Dado que la muestra depositada en la bandeja tiene gran cantidad de agua, se inclina la bandeja sobre el tamiz 0,063 mm con el fin de eliminar el exceso de agua y retener las posibles partículas en suspensión que fácilmente se reincorporan a la bandeja al quedar retenidas en el tamiz.
9. Se extiende en una sola capa la muestra sin exceso de agua en la bandeja.

10. Se seca la muestra con un secador de mano, moviendo esta para que el secado se realice de forma uniforme hasta la película superficial de agua que recubre las partículas desaparezca.
11. Se valora la eliminación de la película superficial de agua sobre las partículas mediante el molde troncocónico y el pisón metálico. Para ello se llena el molde con la muestra y se compacta esta mediante 25 golpes de pisón, retirando a continuación el molde y observando la tipología de la figura obtenida.
12. Se retira el molde troncocónico y se observa la tipología de la figura obtenida. Dependiendo del tipo de figura se obtendrá:
 - A. Forma del molde: árido húmedo
 - B. Desmoronamiento apreciable: árido ligeramente húmedo.
 - C. Desmoronamiento casi completo pero con pico y pendientes regulares: árido saturado con superficie seca.
 - D. Formas suaves y curvilíneas, no se forma pico: árido seco.

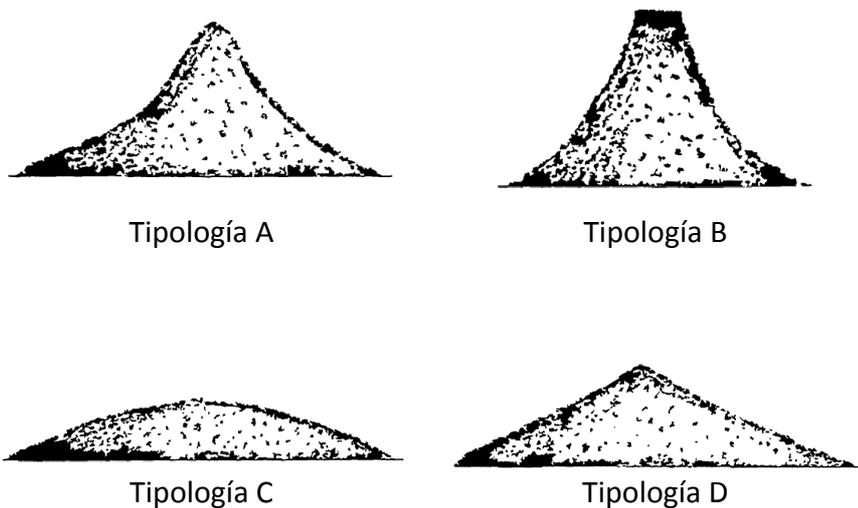


Figura 3.14. Orientaciones sobre condiciones de saturación y superficie seca de los áridos finos. [Fuente: [3.12] UNE-EN 1097-6]

13. Se busca la figura representativa de desmoronamiento total pero con pico y pendientes regulares. Así de esta forma se pesa el árido saturado superficie seca y se obtiene la masa M_1 .
14. Se introduce la muestra en estufa a una temperatura de $110^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta la obtención de masa constante. Una vez obtenida masa constante se obtiene M_4 .

Ejecución del método de la balanza hidrostática:

1. Se lava la muestra en el tamiz 4mm y de 31,5 mm. Con ello por un lado se eliminan las partículas más finas y por otro se rechazan las partículas que se han quedado retenidas en el tamiz 31,5 mm.
2. Se sumerge la muestra preparada en el depósito de agua durante 24 horas. La temperatura del agua será de $22^{\circ}\pm 3^{\circ}\text{C}$.
3. Se sumerge la cesta metálica en el agua y se determina el peso de la cesta sumergida, obteniéndose M_3 .
4. Se introduce el árido ya saturado en el paso 1 en la cesta, con la precaución de eliminar las posibles burbujas de aire. Para ello se deja caer la cesta 25 veces.
5. Se determina el peso sumergido de la cesta con el árido saturado, obteniendo M_2 . Se anota la temperatura del agua.
6. Se extrae la cesta con el árido saturado dejando escurrir el conjunto durante unos minutos.
7. Se deposita el árido saturado sobre los paños absorbentes, procediendo al secado superficial del árido para posteriormente extenderlo al aire hasta que se hayan eliminado todas las películas de agua visibles. De esta forma se pesa el árido obteniendo M_1 .
8. Se introduce la muestra en estufa a una temperatura de $110^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta la obtención de masa constante. Una vez obtenida masa constante se tiene M_4 .

El procedimiento de cálculo para la determinación de la densidad aparente y la absorción de agua (como porcentaje de masa seca) de las partículas tras inmersión de 24 horas, se obtiene de la misma forma tanto para el método del picnómetro como para el método de la balanza hidrostática. La formulación empleada para determinar dichos valores es la siguiente:

$$\text{Densidad aparente de las partículas (t/m}^3\text{)} \quad \rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (3.3)$$

$$\text{Absorción de agua (\%)} \quad A = \frac{100 (M_1 - M_4)}{M_4} \quad (3.4)$$

En las expresiones anteriores:

M_1 masa del árido saturado con superficie seca, en gramos.

M_2 masa del conjunto cesta y los áridos saturados, pesada sumergida, en gramos.

M_3 masa de la cesta vacía, pesada sumergida, en gramos.

M_4 masa del árido seco en estufa, pesada al aire, en gramos.

ρ_w densidad del agua a la temperatura anotada en el momento de determinar M_2 , en toneladas por metro cúbico.

Siguiendo los procedimientos expuestos anteriormente, en la tabla 3.14 se indican los valores de densidad y absorción para cada uno de los áridos y escoria de cobre utilizados.

Tabla 3.14
Densidad y absorción de los áridos y la escoria de cobre

Tipo de árido	Densidad (kg/dm³)	Absorción (%)
Árido fino 0/2	2,72	0,05
Árido intermedio 0/4	2,68	0,10
Árido grueso 4/16	2,70	0,40
Escoria de cobre 0/2	3,69	0,05

3.5 Ensayo de friabilidad del árido fino y escoria de cobre 0/2

Este apartado tiene por objeto determinar el coeficiente de friabilidad tanto del árido fino como de la escoria de cobre 0/2. Para la obtención de dicho coeficiente se siguen las especificaciones indicadas en la norma UNE-83115:1989 [3.14].

El hecho de proponer este ensayo a estos dos materiales está motivado por la necesidad de justificar algunos resultados obtenidos en los ensayos del hormigón en estado endurecido.

El ensayo consiste en medir la evolución granulométrica del árido fino 0/2 y la escoria de cobre 0/2, producida en un cilindro de rotación y en condiciones bien definidas, por fragmentación con la ayuda de una carga de bolas en presencia de agua.

La evolución granulométrica se caracteriza por la cantidad de partículas inferiores a 0,05 mm producidas durante el ensayo.

El coeficiente de friabilidad (F.A.) se calcula mediante la expresión:

$$FA = 100 \frac{m}{M} \quad (3.5)$$

donde:

M masa del material sometido a ensayo, en gramos.

m masa de partículas inferiores a 0,05 mm producidas en el ensayo, en gramos.

Para el ensayo se toma una muestra de 2000 gramos de material. Seguidamente se procede a preparar la muestra de la siguiente forma:

1. Se tamiza por vía húmeda a través de los tamices 0,1 y 2 mm.
2. Se seca la muestra tamizada y retenida entre los tamices 0,1 y 2 mm en estufa a 105°C hasta la obtención de masa constante.
3. Homogeneizar y extraer una cantidad de 500 gramos de la muestra.

4. Se preparan las carga de bolas de acero de la forma siguiente:
 - Tomar 9 bolas de 30 mm de diámetro cuyo peso debe ser de 975 g.
 - Añadir 21 bolas de 18 mm de diámetro cuyo peso debe ser de 490 g.
 - Completar con bolas de 100 mm de diámetro de forma que el peso total de la carga sea de 2500 ± 4 g.

El procedimiento operatorio consiste en:

1. Introducir la muestra de 500 g en el cilindro de ensayo.
2. Se añaden 2,5 litros de agua y se coloca la tapadera.
3. Poner en movimiento el cilindro con velocidad 100 ± 5 r.p.m. durante 1500 vueltas ó 15 minutos. En nuestro caso fueron 1500 vueltas.
4. Se descarga el material y la carga abrasiva sobre un recipiente.
5. Se lava el interior del cilindro y se recoge el agua y las partes de material arrastradas.
6. Se descarga el contenido del recipiente del punto 4 sobre tres tamices superpuestos de 8, 0,2 y 0,05 mm y se lava el conjunto a chorro de agua continuo hasta que el agua salga clara.
7. Se secan los tamices de 0,2 mm y 0,05 mm en estufa a 105°C hasta la obtención de masa constante
8. Se tamiza en seco conjuntamente los rechazos sobre 0,2 mm y 0,05 mm.
9. Se pesa, con precisión de un gramo, el conjunto de los rechazos de los dos tamices y se obtiene el valor m' (masa retenida en el tamiz 0,05 mm), de forma que $m=500-m'$, siendo 500 g el peso de la muestra ensayada.

Una vez realizado el ensayo el peso de la fracción inferior a 0,05 mm (m') se indica en la tabla 3.15.

Tabla 3.15
Masa retenida en el tamiz 0,05 mm

Tipo de árido	Valor m'
Árido fino 0/2	361,5
Escoria de cobre 0/2	461,4

Conocido el peso de la muestra ensayada y el peso de la fracción inferior a 0,05 mm después del ensayo, el valor del coeficiente de friabilidad (F.A.) se obtiene aplicando la ecuación 3.5. En la tabla 3.16 se indican dichos coeficientes.

Tabla 3.16
Coeficiente de friabilidad árido 0/2 y escoria 0/2

Tipo de árido	Coeficiente Friabilidad (%)
Árido fino 0/2	27,7
Escoria de cobre 0/2	7,3

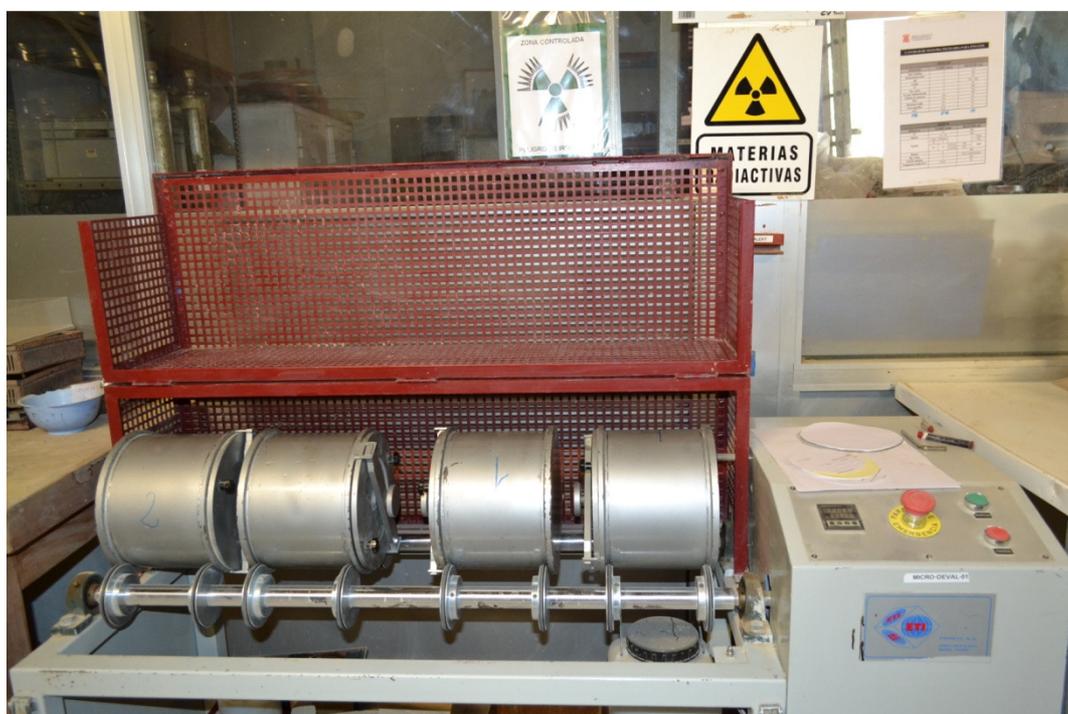


Figura 3.15. Equipo para la elaboración del ensayo de friabilidad

3.6 Otros ensayos realizados a la escoria de cobre

De la empresa Atlantic Copper no sólo se obtuvieron las muestras de escoria de cobre con las que se elaboró esta investigación, también fueron facilitados los resultados de una serie de ensayos [3.15] realizados por el Instituto Técnico de Materiales, Intemac, que facultan a este residuo a su inclusión como componente del hormigón.

Al no disponer el laboratorio de Materiales de Construcción del departamento de Ingeniería Industrial e Ingeniería Civil de la Universidad de Cádiz de la infraestructura necesaria para refrendar los resultados de los ensayos facilitados se solicita a la empresa homologada y certificada Sergeyco su colaboración de manera que se comprueben dichos resultados bajo la metodología de las diferentes normas UNE.

Los ensayos facilitados y refrendados han sido los siguientes:

1. Compuestos totales de azufre.
2. Contenido de sulfatos solubles en ácido.
3. Contenido de cloruros.
4. Contenido de materia orgánica.
5. Reactividad de los áridos con los álcalis del cemento.

3.6.1 Compuestos totales de azufre

Este apartado tiene por objeto determinar los compuestos totales de azufre de la escoria de cobre según las especificaciones indicadas en el artículo 11 de la norma UNE-EN 1744-1:2010+A1:2013 [3.16].

Tabla 3.17

Compuestos totales de azufre de escoria granulada de fundición de cobre

Peso de la muestra (g)	1,0
Peso del crisol vacío (g)	12,4627
Peso del crisol con precipitado de sulfato de bario (g)	12,4475
Compuestos totales de azufre (% SO₃)	0,71

3.6.2 Contenido de sulfatos solubles en ácido

Este apartado tiene por objeto determinar los sulfatos solubles en ácido de la escoria de cobre según las especificaciones indicadas en el artículo 12 de la norma UNE-EN 1744-1:2010+A1:2013 [3.16].

Tabla 3.18

Contenido de sulfatos solubles en ácido de escoria granulada de fundición de cobre

Peso de la muestra (g)	2,0
Peso del crisol vacío (g)	11,7955
Peso del crisol con precipitado de sulfato de bario (g)	11,7997
Compuestos totales de azufre (% SO₃)	0,07

3.6.3 Contenido de cloruros

Este apartado tiene por objeto determinar el contenido de cloruros de la escoria de cobre según las especificaciones indicadas en el artículo 7 de la norma UNE-EN 1744-1:2010+A1:2013

Tabla 3.19

Contenido de cloruros en la escoria granulada de fundición de cobre

Peso de la muestra (g)	500	500
Volumen de disolución de AgNO ₃ (mL)	5,0	5,0
Volumen de disolución de Tiocianato (mL)	4,6	4,6
Contenido de cloruros (%)	Valor medio 0,0007	

3.6.4 Contenido de materia orgánica

Este apartado tiene por objeto determinar la materia orgánica presente en la escoria de cobre según las especificaciones indicadas en el artículo 15 de la norma UNE-EN 1744-1:2010+A1:2013

Tabla 3.20

Contenido de materia orgánica en la escoria granulada de fundición de cobre

Temperatura de secado de la muestra	55
Coloración después de 24 horas en NaOH	Más débil
Contenido de materia orgánica	No posee

3.6.5 Reactividad de los áridos con los álcalis del cemento

Este apartado tiene por objeto determinar la reactividad de la escoria de cobre con los álcalis del cemento según las especificaciones indicadas en la norma UNE 146507-1:1999 EX [3.17].

Tabla 3.21

Reactividad de la escoria de cobre con los álcalis del cemento

Concentración de sílice soluble 72 horas (SiO_2 , en mmol/L)	94,9
Concentración de sodio a las 72 horas (Na_2O , en mmol/L)	425
Reactividad (Zona A, B, C)	No reactivo (A)

3.6.6 Cumplimiento con la EHE-08

En la tabla 3.22 se indica a modo de resumen los resultados obtenidos en los ensayos realizados a la escoria de cobre, así como el valor máximo permitido por la Instrucción de hormigón estructural EHE-08 [3.9] y su grado de cumplimiento.

Tabla 3.22

Contenido de materia orgánica en la escoria granulada de fundición de cobre

Ensayo y Norma	Resultado	Valor Máximo según EHE-08	Cumplimiento				
Compuestos totales de azufre [UNE-EN 1744-1:2010+A1:2013]	0,71%	1%	Si				
Sulfatos solubles en ácido [UNE-EN 1744-1:2010+A1:2013]	0,07	0,8%	Si				
Contenido de cloruros [UNE-EN 1744-1:2010+A1:2013]	0,0007	<table border="0"> <tr> <td>HM/HA</td> <td>0,05%</td> </tr> <tr> <td>HP</td> <td>0,03%</td> </tr> </table>	HM/HA	0,05%	HP	0,03%	Si
HM/HA	0,05%						
HP	0,03%						
Contenido de materia orgánica [UNE-EN 1744-1:2010+A1:2013]	No posee		Si				
Reactividad con álcalis cemento [UNE 146507-1:1999 EX]	No reactivo (Zona A)		Si				

Nota: HM: Hormigón en masa; HA: hormigón armado; HP: hormigón pretensado

3.7 Dosificación del hormigón

3.7.1 Introducción

El hormigón es una mezcla heterogénea formada por un conglomerante hidráulico (cemento), agua, una estructura granular (áridos), aditivos y ciertas adiciones especiales (fibras); dichos materiales deben ser dosificados de forma que se logren hormigones adecuados para los fines de diseño, es decir, que cumplan con las condiciones de carácter resistente, funcional, de durabilidad, estético, etc.; dentro de un margen de economía y de sostenibilidad.

Así pues, la tipología de los materiales que intervienen, las proporciones en las cuales deben introducirse en la mezcla, el proceso de mezclado y amasado, junto con las condiciones de colocación de dicha mezcla y las posteriores condiciones de explotación y mantenimiento, determinarán las características de diseño de las estructuras de hormigón.

En lo referente a la elaboración del hormigón, una vez definida en proyecto la tipología que se requiere, el paso siguiente sería establecer en qué proporción deben mezclarse los materiales para conseguir dicho hormigón. En cualquier proceso los errores en las decisiones más tempranas tendrán una mayor incidencia en el resultado final, pues los errores tienden a multiplicarse por las consecuentes decisiones basadas en dichas hipótesis erróneas; a este hecho, hay que añadirle que las correcciones a realizar serán más traumáticas cuanto más alejado se esté del origen de estas. Resulta entonces evidente la importancia de realizar una dosificación adecuada, pues esta es, junto con la tipificación del hormigón, la base para obtener un desarrollo óptimo [3.18].

Destacar que el proceso de diseño de un hormigón no es tan sencillo como la aplicación de un método, cualquiera que sea este. Cuando se desarrolla un método de dosificación hay que considerar la interrelación entre los distintos factores que influyen en las propiedades y características de la mezcla.

El cálculo de las proporciones de los materiales, no es un proceso automático, pues son varios los factores que condicionan las mismas. La dosificación se hará partiendo

de unos datos iniciales establecidos con base en el proyecto, complementado esto con una revisión de las condiciones de ejecución de la obra, como son: lugar y condiciones de elaboración de la mezcla, condiciones de transporte, ubicación de la obra, forma de aplicación de la mezcla, forma de vibrado, forma de curado, plazos de ejecución, etc.

Una vez definidos y contemplados estos aspectos, el estudio de las proporciones en las que deben combinarse los materiales que componen el hormigón, se realizará mediante un modelo teórico, más concretamente el método de Bolomey [3.8], apoyado en todo momento por la instrucción de hormigón estructural EHE-08 [3.9] y la experiencia derivada del análisis de laboratorio.

3.7.2 Criterios para la dosificación del hormigón de referencia

Previo a la determinación de las proporciones utilizadas en los distintos materiales que conforman el hormigón, se marcan unas hipótesis de partida mínimas, todas ellas fijadas por la instrucción de hormigón estructural EHE-08 en función del tipo de ambiente al que será sometido el hormigón. Estas hipótesis previas serían:

- Clase de exposición: general y específica.
- Tipología y contenido mínimo de cemento.
- Máxima relación agua/cemento.
- Resistencia mínima a compresión.
- Consistencia.

Una vez fijadas las condiciones mínimas de partida se utilizará un método de dosificación para obtener las proporciones de cada uno de los componentes que conforman el hormigón de referencia. Los parámetros que se desarrollan en este apartado son susceptibles de variar durante el proceso de dosificación, pero siempre manteniendo como límite inferior los marcados por la instrucción de hormigón estructural EHE-08.

3.7.2.1 Clases de exposición

Los hormigones a utilizar en esta tesis doctoral se dosificarán para dos tipos de ambientes, los cuales nos determinarán las exposiciones generales y específicas. Las exposiciones previstas serán el resultado de someter a los elementos de hormigón al ambiente marino y a aguas residuales de origen urbano con una alta concentración de ácido sulfhídrico.

Exposiciones generales:

Son las relativas a la corrosión de las armaduras. En nuestro caso se supone un ambiente marino en zona de marea. El tipo de proceso que tiene lugar será una corrosión por cloruros y el hormigón deberá de proporcionar una defensa adecuada frente a la corrosión. Haciendo uso de la tabla 8.2.2 de la instrucción de hormigón estructural EHE-08 [3.9] y vista la clase de exposición general prevista, la designación del tipo de ambiente será **IIIc**.

Tabla 3.23

Clases generales de exposición relativas a la corrosión de las armaduras
[Fuente: EHE-08 tabla 8.2.2]

Clase específica de exposición				Descripción
Clase	Subclase	Design.	Tipo de proceso	
	No agresiva	I	Ninguno	- Interiores de edificios, no sometidos a condensaciones. - Elementos de hormigón en masa.
Normal	Humedad alta	II _a	Corrosión de origen diferente de los cloruros	- Interiores sometidos a humedades relativas medias altas (>65%) o a condensaciones. - Exteriores en ausencia de cloruros, y expuestos a lluvia en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm. - Elementos enterrados o sumergidos.
	Humedad media	II _b	Corrosión de origen diferente de los cloruros	- Exteriores en ausencia de cloruros, sometidos a la acción del agua de lluvia, en zonas de precipitación media anual inferior a 600 mm.
Marina	Aérea	III _a	Corrosión por cloruros	- Elementos de estructuras marinas por encima del nivel de pleamar. - Elementos exteriores de estructuras situadas en las proximidades de la línea costera (a menos de 5 km).
	Sumergida	III _b	Corrosión por cloruros	- Elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente por debajo del nivel mínimo de bajamar.
	En zonas de carrera de mareas y en zonas de salpicadura	III _c	Corrosión por cloruros	- Elementos de estructuras marinas situadas en la zona de salpicaduras o en zona de carrera de mareas.
Con cloruros de origen diferente del medio marino		IV	Corrosión por cloruros	- Instalaciones no impermeabilizadas en contacto con agua que presente un contenido elevado de cloruros no relacionados con el ambiente marino. - Superficies expuestas a sales de deshielo no impermeabilizadas.

Exposiciones específicas:

Son las relativas a otros procesos de deterioro distintos a la corrosión. Un elemento puede estar sometido a ninguna, a una o a varias clases específicas de exposición debidas a procesos distintos a degradación por corrosión.

El entorno de ensayo para los hormigones de estudio serán ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidades medias/fuerte. En tal caso los elementos estructurales se diseñarán para exposiciones específicas correspondientes a ataque químico (clase Q), según los criterios definidos en la tabla 8.2.3a de la instrucción de hormigón estructural EHE-08 [3.9]. Haciendo uso de dicha tabla la clase de exposición específica prevista, será **Qc**.

Tabla 3.24

Clases específicas de exposición relativas a procesos de deterioro distintos de la corrosión
[Fuente: EHE-08 tabla 8.2.3a]

Clase específica de exposición				Descripción
Clase	Subclase	Design.	Tipo de proceso	
Química agresiva	Débil	Q _a	Ataque químico	- Elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad lenta.
	Media	Q _b	Ataque químico	- Elementos en contacto con agua de mar. - Elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad media.
	Fuerte	Q _c	Ataque químico	- Elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad rápida.
Con heladas	Sin sales fundentes	H	Ataque hielo-deshielo	- Elementos situados en contacto frecuente con agua o zonas con humedad relativa media ambiental en invierno superior al 75%, y que tengan una probabilidad anual superior al 50% de alcanzar al menos una vez temperatura por debajo de -5 °C.
	Con sales fundentes	F	Ataque sales fundentes	- Elementos destinados al tráfico de vehículos o peatones en zonas con más de 5 nevadas anuales o con valor medio de la temperatura mínima en los meses de invierno inferior a 0 °C.
Erosión		E	Abrasión cavitación	- Elementos sometidos a desgaste superficial. - Elementos de estructuras hidráulicas en los que la cota piezométrica pueda descender por debajo de la presión de vapor del agua.

Una vez indicadas las clases de exposición general y específica, nuestro hormigón estará sometido a una exposición del tipo **IIIc + Qc**

3.7.2.2 Tipología del cemento utilizado

Se ha optado por un cemento Portland sin adiciones de forma que estas no interfieran o produzcan resultados erróneos en los valores obtenidos en cada uno de los ensayos. Dicho de otro modo; se elimina del sistema la variable “*adiciones del cemento*”.

Como se indicará en el capítulo de conclusiones, las nuevas líneas de investigación propuestas irán encaminadas a estudiar el comportamiento de los diferentes hormigones en ambientes marinos y de aguas residuales, por lo que se ha optado por dosificar un hormigón que utilice un cemento no resistente al agua de mar ni a los sulfatos y así comparar los futuros resultados con los obtenidos en este trabajo. Si se utilizaran cementos del tipo MR o SR se podría enmascarar el comportamiento real que las escorias de cobre presenten ante estos ambientes.

Según se indica en el artículo 26 de la instrucción de hormigón estructural EHE-08 [3.9], el cemento tipo CEM I es compatible para los distintos tipos de hormigón que se indican.

Tabla 3.25

Tipos de cementos utilizables según la instrucción de hormigón estructural EHE-08
[Fuente: EHE-08 tabla 26]

Tipo de hormigón	Tipo de cemento
Hormigón en masa	- Cementos comunes excepto los tipos CEM II/A-Q, CEM II/B-Q, CEM II/A-W, CEM II/B-W, CEM II/A-T, CEM II/B-T y CEM III/C - Cementos para usos especiales ESP VI-1
Hormigón armado	- Cementos comunes excepto los tipos CEM II/A-Q, CEM II/B-Q, CEM II/A-W, CEM II/B-W, CEM II/A-T, CEM II/B-T, CEM III/C y CEM V/B
Hormigón pretensado	- Cementos comunes de los tipos CEM I y CEM II/A-D, CEM II/A-V, CEM II/A-P y CEM II/A-M(V,P)

En consecuencia se utilizará un cemento Portland tipo I, de altas resistencias iniciales y con una resistencia mínima a compresión, a 28 días, de 52,5 N/mm², cuya nomenclatura según la instrucción para la recepción de cementos RC-08 [3.19] es:

EN 197-1 CEM I-52,5R

3.7.2.3 Mínimo contenido de cemento. Máxima relación a/c

Una vez definido el tipo de ambiente según las tablas 3.23 y 3.24, el contenido mínimo de cemento vendrá definido por la tabla 3.26. En ella se observará como para un ambiente tipo IIIc + Qc, el contenido mínimo de cemento debe ser **350 kg/m³**. De la misma forma la máxima relación agua/cemento tiene un valor de **0,45**.

Tabla 3.26

Máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento.
[Fuente: EHE-08 tabla 37.3.2.a]

Parámetro dosificación	Tipo Hormigón	Clase de exposición												
		I	II _a	II _b	III _a	III _b	III _c	IV	Q _a	Q _b	Q _c	H	F	E
Máxima relación agua/cemento	Masa	0,65	---	---	---	---	---	---	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	Armado	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	Pretensado	0,60	0,60	0,55	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,45	0,45	0,55	0,50	0,50
Mínimo contenido de cemento (kg/m ³)	Masa	200	---	---	---	---	---	---	275	300	325	275	300	275
	Armado	250	275	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300
	Pretensado	275	300	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300

3.7.2.4 Resistencia mínima

La resistencia mínima exigible que con carácter general puede esperarse con unos áridos de buena calidad y respetando las especificaciones de durabilidad marcadas por la instrucción de hormigón estructural EHE-08 [3.9], viene marcada en la tabla 3.27. En ella la resistencia mínima para el ambiente IIIc + Qc, será de **35 N/mm²**.

Tabla 3.27

Resistencias mínimas recomendadas en función de los requisitos de durabilidad.
[Fuente: EHE-08 tabla 37.3.2.b]

Parámetro dosificación	Tipo Hormigón	Clase de exposición												
		I	II _a	II _b	III _a	III _b	III _c	IV	Q _a	Q _b	Q _c	H	F	E
Resistencia mínima (N/mm ²)	Masa	20	---	---	---	---	---	---	30	30	35	30	30	30
	Armado	25	25	30	30	30	30	30	30	30	35	30	30	30
	Pretensado	25	25	30	30	35	35	35	30	35	35	30	30	30

3.7.2.5 Docilidad del hormigón

La docilidad del hormigón se define como la facilidad con que cantidades de áridos, cemento y agua se transforman en hormigón y, después este, es manejado, transportado, colocado y compactado en los moldes o encofrados con la mínima pérdida de homogeneidad, es decir, sin que se produzca segregación ni exudación.

La docilidad del hormigón se valora por la determinación de la consistencia, siendo esta la oposición que presenta un hormigón fresco a experimentar deformaciones, siendo, por tanto, una propiedad física inherente del hormigón [3.8].

La determinación de la consistencia se realiza por medio del ensayo de asentamiento, según la norma UNE-EN 12350-2:2009 [3.20].

Dado que la docilidad es una propiedad relativa al hormigón fresco su determinación en cada uno de los hormigones estudiados se realizará en el capítulo 4, si bien es necesaria definirla en el momento de dosificar el hormigón, para determinar el porcentaje de aditivo.

La instrucción de hormigón estructural EHE-08 [3.9] en su artículo 31.5, define las distintas consistencias y los valores límite del asentamiento en el cono de Abrams, según se indica en la tabla 3.28. Igualmente dicha instrucción, en su artículo 86.5.2, define las tolerancias permitidas en la medida de los asentamientos para cada tipo de consistencia. Este margen en los intervalos que definen los asentamientos en el cono de Abrams asegura una mayor flexibilidad a la hora de fijar la cantidad de superplastificante en el hormigón.

Tabla 3.28
Tipos de consistencia y tolerancias
[Fuente: EHE-08 artículos 31.5 y 86.5.2]

Tipo de consistencia	Asentamiento (cm)	Tolerancias (cm)	Intervalo (cm)
Seca (S)	0-2	0	0-2
Plástica (P)	3-5	±1	2-6
Blanda (B)	6-9	±1	5-10
Fluida (F)	10-15	±2	8-17
Líquida (L)	16-20	±2	14-22

En el diseño original de los hormigones desarrollados en esta tesis doctoral, la consistencia prevista era blanda, pero debido a las pruebas realizadas en laboratorio se obtuvieron hormigones, a nuestro juicio, poco trabajables cuando se sustituía la totalidad del árido fino por la escoria de cobre. En consecuencia se optó por aumentar la consistencia a **fluida (F)** para el hormigón de referencia y de esta forma obtener hormigones con escoria de cobre más trabajables.

Para conseguir que el valor del asentamiento correspondiente a dicha consistencia fluida se situara en los valores superiores del intervalo permitido por la instrucción de hormigón estructural EHE-08 [3.9] se utilizó aditivo superplastificante.

El aditivo superplastificante utilizado en todos los hormigones ha sido **GLENIUM ACE-324**, de la marca comercial **BASF**.

3.7.3 Requisitos generales

El proceso de diseño de un hormigón no debe simplificarse a la aplicación de un método de cálculo, sino que se contrastarán y ajustarán las diferentes amasadas de prueba para así comprobar los parámetros iniciales de caracterización además de conformar la relación entre la resistencia y la importantísima relación agua/cemento.

Como primer paso, se han de conocer las características de los materiales a emplear, las condiciones de fabricación del hormigón y de su ejecución en obra.

El objetivo de este apartado es dosificar un hormigón con resistencia característica mínima a 28 días de 35 Mpa, consistencia fluida (F) y tamaño máximo del árido de 16 mm. La nomenclatura según la instrucción de hormigón estructural EHE-08 [3.9] sería:

HM-35/F/16/III_c+Q_c

La consistencia elegida facilitará la puesta en obra del hormigón dado que probablemente se realizará mediante bombeo, además de tratarse de la consistencia

más utilizada en el sector de prefabricados. De la misma forma el tamaño máximo del árido vendrá dado por la forma de puesta en obra, además de evitar oquedades innecesarias que se pudieran formar debidas a un tamaño máximo inadecuado en secciones fuertemente armadas.

Para la dosificación del hormigón se utilizará el método de Bolomey [3.8], si bien será necesario efectuar correcciones en el contenido mínimo de cemento y en el agua por aplicación de la instrucción de hormigón estructural EHE-08 [3.9].

Como sustituto del árido fino 0/2 se emplea escoria de cobre 0/2 de forma que la sustitución se realizará en volumen en proporciones de 20, 40, 60, 80 y 100%.

En consecuencia se estudian seis tipos distintos de hormigones. El primero de ellos será el de referencia, el cual no incorpora escoria de cobre al no existir sustitución del árido fino, el resto de los hormigones serán los correspondientes a sustituir el árido fino por escoria de cobre en los distintos porcentajes anteriormente indicados.

Los parámetros mínimos exigidos por la instrucción de hormigón estructural al hormigón de referencia se definieron en los apartados 3.7.2 al 3.7.6. El parámetro impuesto por criterio propio es la consistencia. En la tabla 3.29 se resumen los parámetros mínimos exigidos al hormigón de referencia.

Tabla 3.29
Parámetros mínimos exigibles al hormigón de referencia

Hormigón de referencia HA-35/F/16/III_c+Q_c	
Parámetros mínimos EHE-08	Valor
Mínimo contenido de cemento, kg/m ³	350
Máxima relación a/c	0,45
Resistencia mínima, N/mm ²	35
Parámetros propios	
Consistencia	Fluida
Asiento medido en Cono de Abrams, cm	8-17

3.7.4 Estimación de la resistencia media de diseño del hormigón

La resistencia es un dato de partida fundamental en el momento de diseñar el hormigón. Esta viene determinada por el proyectista de la obra cumpliendo los valores mínimos especificados en la instrucción de hormigón estructural EHE-08 [3.9].

La resistencia media del hormigón está definida como la suma de las resistencias individuales de cada probeta dividida por el número de probetas ensayadas. El valor así calculado no tiene en cuenta el valor de la dispersión entre los resultados individuales obtenidos. Con el objeto de paliar este problema, surge la resistencia que se basa en un estudio estadístico en base a la distribución normal y que tienen en cuenta la dispersión de los resultados individuales del ensayo.

En consecuencia la resistencia característica se define como el valor de la resistencia por debajo de la cual no se presentarán más de un 5% de roturas, es decir, el 95% de las roturas serán de valor superior a la resistencia característica [3.8].

Lo anteriormente expuesto se definiría matemáticamente como:

$$\text{Prob. } x \leq 0,05 \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^X e^{\left[\frac{R_i - f_{cm}}{2\sigma}\right]} dR_i = 0,05 \quad (3.6)$$

La expresión anterior se simplifica sin más que realizar un cambio de variable, de forma que se facilite la integración. El cambio de variable propuesto sería el que se indica a continuación:

$$\frac{R_i - f_{cm}}{\sigma} = t \quad (3.7)$$

$$dR_i = \sigma dt \quad (3.8)$$

Obteniendo:

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^X e^{\frac{t^2}{2}} dt = 0,05 \quad (3.9)$$

Haciendo uso de los valores de la distribución normal tipificada se obtiene que el valor de la variable es **-1,645** [3.21].

Si se deshace el cambio de variable realizado anteriormente se obtiene:

$$t = -1,645 = \frac{R_i - f_{cm}}{\sigma} \quad (3.10)$$

La relación existente entre la resistencia característica f_{ck} y la resistencia media f_{cm} será:

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,645\sigma \quad (3.11)$$

Si se define el coeficiente de variación como el cociente entre la desviación típica y la media se obtiene:

$$v = \frac{\sigma}{f_{cm}} \quad (3.12)$$

Sustituyendo en la ecuación 3.12, la relación entre resistencia característica, resistencia media y coeficiente de variación sería:

$$f_{cm} = \frac{f_{ck}}{1 - 1,645 v} \quad (3.13)$$

Cuando se analiza la uniformidad de fabricación de los hormigones, se debe tener en cuenta el valor de la desviación típica y del coeficiente de variación simultáneamente. En la tabla 3.30 se indican los valores de ambos parámetros.

Tabla 3.30

Valores de la desviación típica y coeficiente de variación en función de la uniformidad de fabricación del hormigón.

[Fuente: [3.10] Manual de cálculo Procedimientos Integrados S.L.]

Parámetro	Uniformidad de fabricación del hormigón		
	Buena	Regular	Mala
Desviación típica σ	<2,5	2,5 - 4,0	>4,0
Coefficiente de variación v	<0,10	0,10 - 0,15	>0,15

En nuestro caso se tomará como **regular** la uniformidad de la fabricación del hormigón. Dado que estos valores se mueven en un intervalo, se utilizará el valor medio de este de forma que el coeficiente de variación v sea de 0,12.

Para nuestro caso, utilizando la ecuación 3.13, la relación entre resistencia media y característica sería:

$$f_{cm} = 1,245 f_{ck} \quad (3.14)$$

Tanto el Código Modelo CEB-FIP-90 [3.22] como el Código ACI-316-84 [3.23], indican unos valores orientativos de la resistencia media en función de la resistencia característica. Estas relaciones se muestran en la tabla 3.31.

Dado que nuestro hormigón tendrá una resistencia característica de 35 N/mm² comprobamos que la expresión utilizada para relacionar la resistencia característica con la resistencia media se encuentra en los órdenes de magnitud marcados por las expresiones del Código Modelo y el Código ACI.

Tabla 3.31
Valores orientativos entre la resistencia media y característica
[Fuente: [3.11] Jiménez Montoya]

Código	Valor f_{ck} (N/mm ²)	Valor f_{cm} (N/mm ²)
Código Modelo	$f_{ck} \leq 50$	$f_{cm} = f_{ck} + 8,0$
Código ACI	$f_{ck} \leq 50$	$f_{cm} = f_{ck} + 7,0$
	$20 \leq f_{ck} \leq 50$	$f_{cm} = f_{ck} + 8,5$
	$f_{ck} \leq 50$	$f_{cm} = f_{ck} + 10$

Tabla 3.32
Valores de la resistencia media f_{cm} dada la resistencia característica f_{ck}
según distintas fuentes

Fuente	Valor f_{ck} (N/mm ²)	Expresión f_{ck} (N/mm ²)	Valor f_{cm} (N/mm ²)
Código Modelo	35	$f_{cm} = f_{ck} + 8,0$	43,00
Código ACI	35	$f_{cm} = f_{ck} + 8,5$	43,50
Utilizada	35	$f_{cm} = 1,245 f_{ck}$	43,58

3.7.5 Relación agua/cemento. Método de La Peña II

Una vez determinada la relación máxima agua/cemento, la cantidad de cemento mínima y la resistencia mínima del hormigón según las especificaciones de durabilidad marcadas por la instrucción de hormigón estructural EHE-08 [3.9], es necesario realizar una serie de comprobaciones analíticas encaminadas a controlar que los parámetros indicados están dentro de los límites establecidos para conseguir un hormigón de las características deseadas. Si realizadas dichas comprobaciones, estas no fueran satisfactorias se procederá a la modificación de los parámetros de partida hasta ajustarlos a las necesidades buscadas, es decir, se aplicará un proceso iterativo.

El método de La Peña II es un método de dosificación por resistencias que se aplica a hormigones estructurales de edificios, pavimentos, canales, depósitos de agua, puentes, etc., y donde las condiciones de ejecución pueden considerarse como buenas [3.8].

Conociendo la resistencia media, bien directamente o a través de la característica, se determina la relación cemento/agua en peso, por medio de la siguiente formulación [3.10]:

$$Z = K_z \cdot \frac{f_{cm}}{r} + 0,5 \quad (3.15)$$

donde:

Z relación cemento/agua, en peso.

f_{cm} resistencia media del hormigón en kg/cm^2 a 28 días medida en probeta cilíndrica de $15\phi \times 30$.

r resistencia a compresión en kg/cm^2 a 28 días del mortero normalizado y facilitado por el fabricante del cemento [3.24].

K_z parámetro que toma los valores dados en la tabla 3.33, cuando la resistencia está expresada en kg/cm^2 .

Tabla 3.33

Valores del parámetro K_z

[Fuente: [3.10] Procedimientos Integrados S.L]

Tipo y calidad de los áridos empleados en el hormigón								
Rodados			Machacados			Mezcla		
Excelente	Buena	Regular	Excelente	Buena	Regular	Excelente	Buena	Regular
2,20	2,42	2,64	1,60	1,76	1,92	1,90	2,09	2,28

Si damos valores a las variables indicadas en la ecuación 3.15, se obtiene el valor de Z.

$$Z = K_z \cdot \frac{f_{cm}}{r} + 0,5 = 1,76 \cdot \frac{1,245 \times 35}{56} + 0,5 = 1,87$$

Sin más que calcular la inversa de Z, se conocerá el valor de la relación agua/cemento necesaria para obtener un hormigón con la resistencia característica deseada.

$$Z = \frac{\text{cemento}}{\text{agua}} = 1,87 \quad (3.16)$$

$$\frac{1}{Z} = \frac{\text{agua}}{\text{cemento}} = 0,53 \quad (3.17)$$

A la vista del valor obtenido para la relación agua/cemento por aplicación del método de La Peña II, este es superior al mínimo establecido por la instrucción de hormigón estructural, según se justificó en el apartado 3.7.2.3, tabla 3.26 y cuyo valor corresponde a 0,45. La elección de la relación agua/cemento con la que se debe proyectar el hormigón será uno de los dos siguientes valores:

- Valor por el método de La Peña II: 0,53
- Valor según EHE-08:0,45

Tomando el menor de los dos valores anteriores se obtiene la máxima relación agua/cemento posible en la dosificación de los hormigones de esta tesis doctoral:

$$a/c = 0,45$$

3.7.6 Cantidad de agua de amasado

Se entiende por agua de amasado la cantidad de agua total contenida en el hormigón fresco. Esta cantidad es utilizada para el cálculo de la relación agua/cemento.

Es recomendable emplear la menor cantidad de agua posible en el amasado del hormigón debido a que el agua sobrante de la hidratación del cemento se evapora de la masa y genera un producto poroso, permeable, con propiedades mecánicas y resistentes disminuidas.

Es muy importante el papel que desempeña el superplastificante utilizado en la confección del hormigón dado que puede alterar la estrecha relación existente entre la cantidad de cemento y agua. Por ello es imprescindible realizar ensayos previos para determinar la cantidad de aditivo a emplear y que afectará notablemente a la cantidad de agua y en consecuencia a la relación agua/cemento.

El agua de amasado está compuesta por:

- El añadida en la mezcla.
- La humedad de los áridos.
- La cantidad de agua aportada por los aditivos.

El agua de amasado cumple una doble función en la tecnología del hormigón; por un lado permite la hidratación del cemento y por otro es indispensable para asegurar la trabajabilidad y la buena compactación del hormigón.

Para calcular en primera instancia la demanda de agua de amasada para un hormigón con áridos saturados superficie seca se utiliza la formulación de La Peña II [3.10]:

$$W = K_w + 13\sqrt{F} - \sqrt{40 \cdot D} - \frac{A}{2} - K'_w \quad (3.18)$$

En la expresión anterior:

- W litros de agua por metro cúbico de hormigón fresco.
- K_w parámetro según tabla 3.34.
- F asiento en el cono de Abrams, en cm.
- D tamaño máximo del árido, en mm.
- A litros por metro cúbico de aire ocluido en el hormigón.
- K'_w parámetro que depende del aditivo utilizado. Valor entre 10 y 30.

Tabla 3.34

Valores del parámetro K_w

[Fuente: [3.10] Procedimientos Integrados S.L]

CARACTERÍSTICAS DEL ÁRIDO A UTILIZAR			
ORIGEN	Proporción estimada de granos y piedras de mal coeficiente de forma	Tipo de granulometría	
		Continua	Discontinua
Rodado	Prácticamente sin lascas	182	172
	Con algunas lascas	187	177
	Con bastantes lascas	192	182
Machacado	Prácticamente sin lascas	202	192
	Con algunas lascas	207	197
	Con bastantes lascas	212	202
Mezcla	Prácticamente sin lascas	192	182
	Con algunas lascas	197	187
	Con bastantes lascas	202	192

Los valores adoptados para cada una de las variables presentes en la ecuación 18 son los siguientes:

- K_w Dado que se trata de áridos machacados prácticamente sin lascas y la granulometría es del tipo continua, el valor adoptado sería **202**.

- F El valor del asiento del cono de Abrams considerado es 17 cm, valor máximo del intervalo permitido por la instrucción de hormigón estructural EHE-08 [3.9] para una consistencia fluida, una tolerancia de 2 cm.
- D El tamaño máximo del árido tiene un valor de **15,06 mm**, según se indicó en la tabla 3.9.
- A En primera aproximación este parámetro se estimaría en **25 litros**. En los apartados sucesivos se establecerá una medida más exacta de este valor.
- K'_w Dado que el superplastificante utilizado se catalogaría como de alta actividad, es decir, un gran reductor de agua, se considera un valor de **30**.

Sin más que aplicar la expresión dada por la ecuación 3.18 se obtiene:

$$W = 202 + 13\sqrt{17} - \sqrt{40 \cdot 15,08} - \frac{25}{2} - 30 = 188,54 \text{ litros/m}^3$$

A la vista del valor obtenido por aplicación del método de La Peña II, este es superior al establecido por la instrucción de hormigón estructural EHE-08 [3.9]. Según la relación agua/cemento de 0,45 y para un valor mínimo de cemento de 350 kg/m³ fijado según el tipo de ambiente, el agua necesaria vendrá dada por dicha relación agua/cemento, fijada la cantidad de cemento.

3.7.7 Determinación de la composición y proporciones de los materiales del hormigón de referencia

El procedimiento operativo para determinar la composición y proporciones de los materiales en el hormigón de referencia será el que se indica a continuación:

1. Aplicación del método de Fuller [3.8] para calcular la proporción en la que se mezcla el árido fino 0/2 y el árido intermedio 0/4. De esa forma se obtiene un árido mezcla [3.10].

2. Aplicación del método de Bolomey [3.8] utilizando como áridos el árido mezcla calculado por el método de Fuller y el árido grueso 4/16.

Tanto para la aplicación del método de Fuller como para el método de Bolomey es necesario conocer el módulo granulométrico y el tamaño máximo de cada uno de los áridos, los cuales ya han sido calculados en los apartados 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3 y 3.2.5.

Tabla 3.35
Módulo granulométrico y tamaño máximo de los áridos

Árido	Módulo gran.	T _{max} (mm)
Fino 0/2	1,95	1,81
Intermedio 0/4	4,05	4,80
Grueso 4/16	6,51	15,06

3.7.7.1 Cálculo de proporciones de árido fino y árido intermedio

Para el cálculo de las proporciones en la que se han de mezclar los dos tipos de arenas utilizadas en el hormigón de referencia de esta tesis doctoral y así conseguir una arena mezcla, se utiliza el método de Fuller [3.8, 3.18].

En el método de Fuller, la curva de referencia viene definida por la siguiente expresión:

$$y = 100 \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (3.19)$$

en la que:

y tanto por ciento en volumen elemental que pasa por cada tamiz de abertura d.

d abertura de cada uno de los tamices de la serie empleada, en mm.

D tamaño máximo del árido en mm.

Para realizar el ajuste granulométrico de la mezcla de los diferentes áridos a la curva de Fuller puede emplearse un sistema de tanteos o uno basado en los módulos

granulométricos. Dado que el sistema de los módulos granulométricos es más exacto que el de tanteos, nos inclinamos por este a la hora de realizar el ajuste.

Como en nuestro caso se emplean dos fracciones de árido (árido fino 0/2 y árido intermedio 0/4) las proporciones en las que se mezclan estos en volumen para que se ajusten a la curva de referencia, vendrá dado por la resolución del sistema de ecuaciones siguiente:

$$t_1 = 100 \frac{m_2 - mt_2}{m_2 - m_1} \quad (3.20)$$

$$t_2 = 100 - t_1 \quad (3.21)$$

En las ecuaciones anteriores:

- t_1 proporción de árido fino 0/2, en %.
- t_2 proporción de árido intermedio 0/4, en %.
- m_1 módulo granulométrico del árido fino 0/2.
- m_2 módulo granulométrico del árido intermedio 0/4.
- mt_2 módulo granulométrico de la curva de Fuller para la fracción correspondiente al árido intermedio 0/4.

El módulo granulométrico de la curva de Fuller para el árido intermedio 0/4, sabiendo que el tamaño máximo del árido es 4,80 sería:

$$mt_2 = \frac{100 - 100 \sqrt{\frac{d_i}{4,80}}}{100} \quad (3.22)$$

Particularizando para cada tamiz de la serie desde 4,80 mm a 0,125 mm, en la ecuación 3.20 se obtiene:

$$mt_2 = \frac{8,71 + 35,45 + 54,36 + 67,73 + 77,18 + 83,36}{100} = 3,27$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones facilitado por la ecuaciones 3.20 y 3.21, se obtienen las proporciones buscadas.

$$t_1 = 100 \frac{4,05 - 3,27}{4,05 - 1,95} = 37,14 \approx 37\% \text{ árido fino } 0/2$$

$$t_2 = 100 - t_1 = 62,86 \approx 63\% \text{ árido intermedio } 0/4$$

Una vez obtenidas las proporciones en las que se deben mezclar el árido fino y el intermedio, para obtener el árido mezcla, es necesario calcular su granulometría. Para ello basta con multiplicar el porcentaje que pasa acumulado de cada tamiz y árido, por la proporción en la que se deben mezclar estos (37% árido 0/2 y 67% árido 0/4). Seguidamente se suman por tamaños de tamices iguales, el valor obtenido en cada uno de los áridos, resultando de esta forma el porcentaje de pasa acumulado de la mezcla. En la tabla 3.36 se indican los valores obtenidos.

Tabla 3.36
Granulometría de la mezcla árido 0/2 y 0/4 por método de Fuller

Tamiz serie UNE (mm)	% Pasa acumulado		
	Árido 0/2	Árido 0/4	Árido mezcla
20	100,00	100,00	100,00
16	100,00	100,00	100,00
8	100,00	100,00	100,00
4	100,00	93,22	95,73
2	97,00	58,22	72,57
1	83,00	25,22	46,60
0,50	67,00	11,50	32,04
0,25	42,80	4,90	18,92
0,125	15,30	1,50	6,61
0,063	1,52	0,70	1,00
Fondo	0,00	0,00	0,00

El módulo granulométrico tiene un valor de $M.G_{mezcla}=3,28$

Una vez obtenida la granulometría de la mezcla de los áridos en las proporciones anteriormente descritas, se calcula la curva granulométrica de Fuller para el tamaño máximo del árido (en nuestro caso 4,80) sin más que aplicar la ecuación 3.19.

En la tabla 3.37 se indican la granulometría de la mezcla de áridos y la teórica de Fuller.

En la figura 3.16 se representa la curva granulométrica de la arena mezcla y la teórica obtenida por el método de Fuller. Nótese que las áreas por encima y por debajo entre la curva mezcla y curva teórica tienden a compensarse, lo que refleja que se ha realizado un buen ajuste.

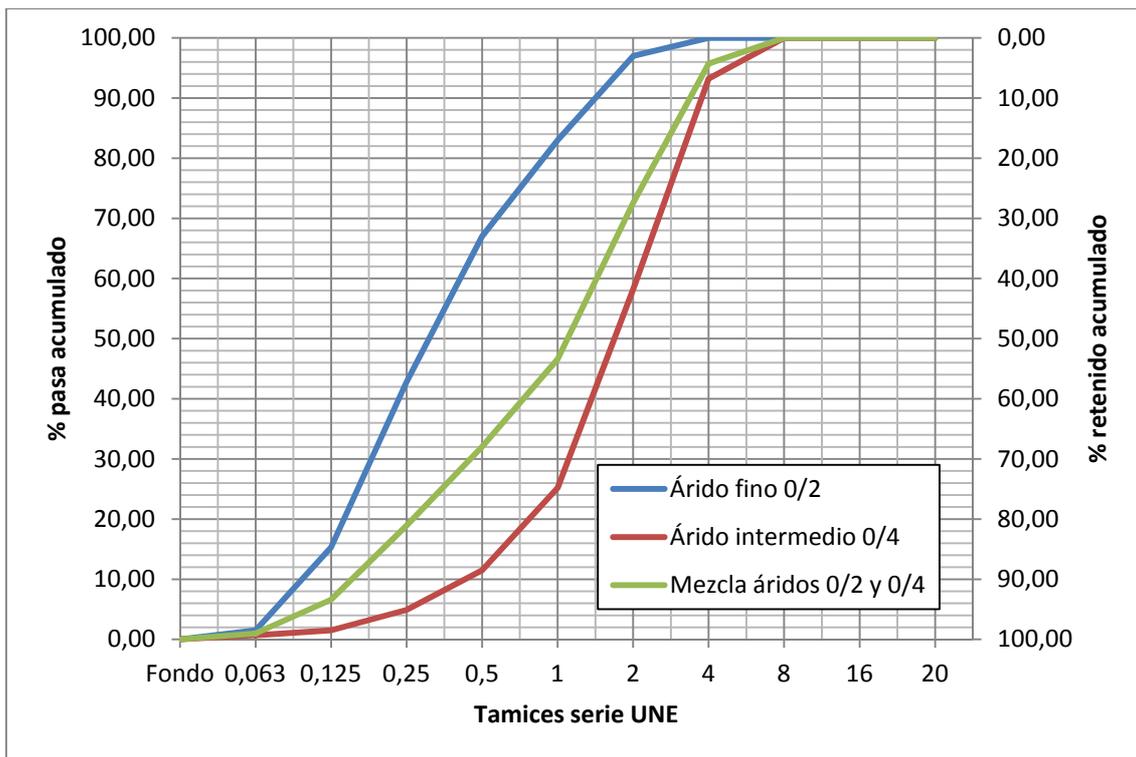


Figura 3.16. Curvas granulométricas del árido fino 0/2, árido intermedio 0/4 y mezcla de ambos según método de Fuller

Tabla 3.37
Granulometría mezcla de áridos y curva teórica de Fuller

Tamiz serie UNE (mm)	% Pasa acumulado	
	Árido mezcla	Curva Fuller
20	100,00	100,00
16	100,00	100,00
8	100,00	100,00
4	100,00	93,22
2	97,00	58,22
1	83,00	25,22
0,50	67,00	11,50
0,25	42,80	4,90
0,125	15,30	1,50
0,063	1,52	0,70
Fondo	0,00	0,00

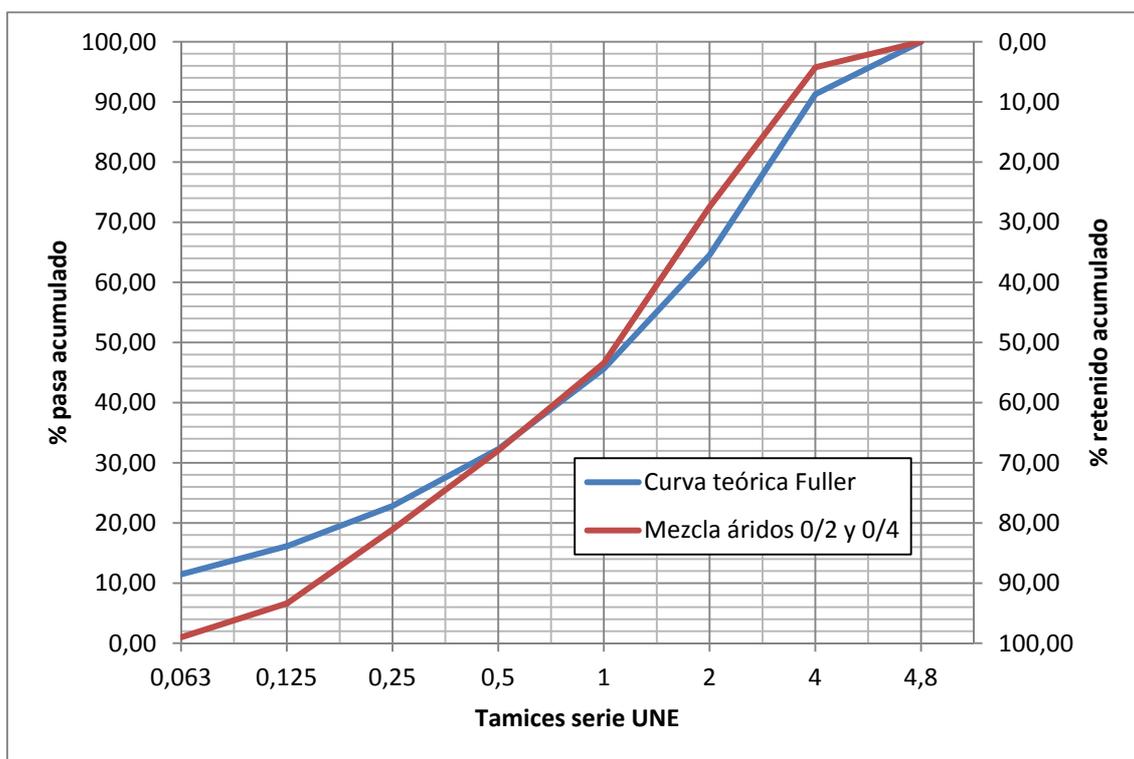


Figura 3.17. Comparativa entre las curvas granulométricas del árido mezcla y la curva teórica de Fuller

3.7.7.2 Dosificación del hormigón. Método de Bolomey

Para obtener la dosificación del hormigón se aplica el método de Bolomey. Este método puede considerarse como un perfeccionamiento del de Fuller, siendo muy útil cuando se conoce la cantidad de cemento a emplear, el tipo, granulometría y tamaño máximo del árido utilizado, así como sistema de compactación [3.8, 3.18].

No olvidemos que la dosificación es un arte por lo que las proporciones de mezcla de los distintos componentes del hormigón, calculados por cualquier método de dosificación, serán comprobadas en laboratorio para realizar los ajustes pertinentes de cara a las características exigidas.

Previamente se realiza un resumen de los parámetros fundamentales necesarios para el desarrollo del método. Tanto los valores como su referencia se indican en la tabla 3.38

Tabla 3.38
Parámetros necesarios en el método de Bolomey

Parámetro		Valor	Ref. Apartado
Cemento (kg/m ³)		350	3.7.2.3
Relación máxima a/c		0,45	3.7.5
Tamaño máximo (mm)	árido fino 0/2	1,81	3.2.5
	árido intermedio 0/4	4,80	
	árido grueso 4/16	15,06	
Módulo granulométrico	árido fino 0/2	1,95	3.2.1
	árido intermedio 0/4	4,05	3.2.2
	árido grueso 4/16	6,51	3.2.3
	mezcla 0/2+0/4	3,28	3.7.7.1
Densidad (kg/dm ³)	árido fino 0/2	2,72	3.4
	árido intermedio 0/4	2,70	
	árido grueso 4/16	2,68	
cemento		3,05	Fabricante [3.24]

Las curvas granulométricas de referencia empleadas en el método vienen definidas por la siguiente expresión:

$$y = a + (100 - a) \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (3.23)$$

donde:

y tanto por ciento en volumen elemental que pasa por cada tamiz de abertura d.

d abertura de cada uno de los tamices de la serie empleada, en mm.

D tamaño máximo del árido, en mm.

a parámetro cuyos valores se indican en la tabla 3.39.

Tabla 3.39
Valores del parámetro a en el método de Bolomey
[Fuente: [3.8] Fernández Cánovas]

Tipo de árido	Consistencia	Valores de a
Rodado	Seco-plástico	10
	Blanda	11
	Fluida	12
Machacado	Seco-plástico	12
	Blanda	13
	Fluida	14

Para realizar el ajuste granulométrico de la mezcla de los diferentes áridos a la curva de Bolomey puede emplearse un sistema de tanteos o uno basado en los módulos granulométricos. Dado que el sistema de los módulos granulométricos es más exacto que el de tanteos, nos inclinamos por este a la hora de realizar el ajuste.

Al utilizar el sistema de los módulos granulométricos para realizar el ajuste, el porcentaje de cemento que entra en la composición del hormigón viene dado por:

$$t_0 = \frac{\frac{\text{peso del cemento por m}^3}{\text{densidad relativa del cemento}} \cdot 100}{\text{volumen total de componentes en m}^3 - \text{volumen de agua por m}^3} \quad (3.24)$$

Teniendo dos fracciones de árido, es decir, el árido mezcla descrita en el apartado 3.7.7.1 y el árido grueso 4/16, y sabiendo que el módulo granulométrico del cemento es nulo por definición [3.8], las proporciones en las que se mezclan los áridos y el cemento vendrán dadas por el siguiente sistema de ecuaciones:

$$t_1 = \frac{100(m_2 - mt_2) - t_0 m_2}{m_2 - m_1} \quad (3.25)$$

$$t_2 = 100 - (t_0 + t_1) \quad (3.26)$$

donde:

- t_1 proporción de árido mezcla, en %.
- t_2 proporción de árido grueso 4/16, en %.
- m_1 módulo granulométrico del árido mezcla.
- m_2 módulo granulométrico del árido grueso 4/16.
- mt_2 módulo granulométrico correspondiente a la curva de Bolomey modificada para el árido grueso 4/16.

La dosificación por metro cúbico de hormigón se determina, al igual que ocurre en otros métodos de dosificación, partiendo de la base de que el volumen de la pasta de cemento es menor que la suma de los volúmenes de cemento y del agua, por lo que resulta preciso mezclar 1.025 dm³ de componentes, debido a la contracción del 2,5 % del hormigón fresco.

Para el cálculo del *parámetro a*, se han de conocer la tipología de los áridos; de machaqueo, y la consistencia del hormigón a utilizar; fluida. Fijando estos dos parámetros y a tenor de lo indicado en la tabla 3.39, el valor de *a* será 14.

Una vez obtenido el valor del parámetro de la curva de Bolomey, la ecuación 3.23 queda como sigue:

$$y = 14 + 86 \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (3.27)$$

Como el árido grueso 4/16 tiene un tamaño máximo de árido de 15,06 mm, según se indicó en la tabla 3.9, el módulo granulométrico de la curva de Bolomey para este árido y $a=14$ será:

$$mt_2 = \frac{\sum_i (100 - (14 + 86 \sqrt{\frac{d_i}{15,06}}))}{100} \quad (3.28)$$

Desarrollando la expresión anterior para la serie de tamices desde 15,06 mm hasta 0,125 mm, se obtiene:

$$mt_2 = \frac{0 + 23,32 + 41,68 + 54,66 + 63,84 + 70,33 + 74,92 + 78,17}{100} = 4,07$$

El porcentaje de cemento que entra en la composición del hormigón viene dado por la ecuación 3.24:

$$t_0 = \frac{\frac{350}{3,05} \cdot 100}{1025 - 350 \cdot 0,45} = 13,23\%$$

Para obtener los porcentajes de los áridos se aplican las ecuaciones 3.25 y 3.26:

$$t_1 = \frac{100 \cdot (6,51 - 4,07) - 13,23 \cdot 6,51}{6,51 - 3,28} = 48,88\%$$

$$t_2 = 100 - (13,23 + 48,88) = 37,89\%$$

La proporción del árido mezcla es de 48,88% y la del árido grueso 4/16 de 37,89%. Como el árido mezcla está formado por un 37% de árido fino 0/2 y un 63% de árido intermedio 0/4, las proporciones teóricas quedan como se indican a continuación:

- Árido fino 0/2: 18,09%
- Árido intermedio 0/4: 30,79%
- Árido grueso 4/16: 37,89%
- Cemento: 13,23%

Conocida la proporción de cada uno de los áridos en el hormigón, se calcula la granulometría del árido compuesto. En la tabla 3.40 se indica el valor de *pasa acumulado* por tamiz para cada uno de los áridos, así como la granulometría del árido compuesto.

Tabla 3.40
Granulometría del árido compuesto aplicando método de Bolomey

Tamiz serie UNE (mm)	% Pasa acumulado				
	Cemento	Árido 0/2	Árido 0/4	Árido 4/16	Árido Compuesto
20	100	100,00	100,00	100,00	100,00
16	100	100,00	100,00	99,83	99,94
8	100	100,00	100,00	44,73	79,06
4	100	100,00	93,22	3,23	61,25
2	100	97,00	58,22	0,77	48,99
1	100	83,00	25,22	0,00	36,01
0,50	100	67,00	11,50	0,00	28,89
0,25	100	42,80	4,90	0,00	22,48
0,125	100	15,30	1,50	0,00	16,46
0,063	100	1,52	0,70	0,00	13,72
Fondo	100	0,00	0,00	0,00	13,23

Para calcular la dosificación en peso del hormigón se debe conocer el volumen ocupado por los áridos, ya que para obtener 1 m³ de hormigón se necesitan mezclar 1025 dm³ de componentes. El volumen de los áridos se conoce por la siguiente expresión:

$$1025 \text{ dm}^3 = V_{\text{agua}} + V_{\text{aridos}} \quad (3.29)$$

Despejando el volumen de los áridos de la ecuación 3.29 se obtiene:

$$V_{\text{aridos}} = 1025 \text{ dm}^3 - V_{\text{agua}} \quad (3.30)$$

Y en consecuencia el volumen ocupado por los áridos sería:

$$V_{\text{aridos}} = 1025 - 350 \times 0,45 = 867,5 \text{ dm}^3$$

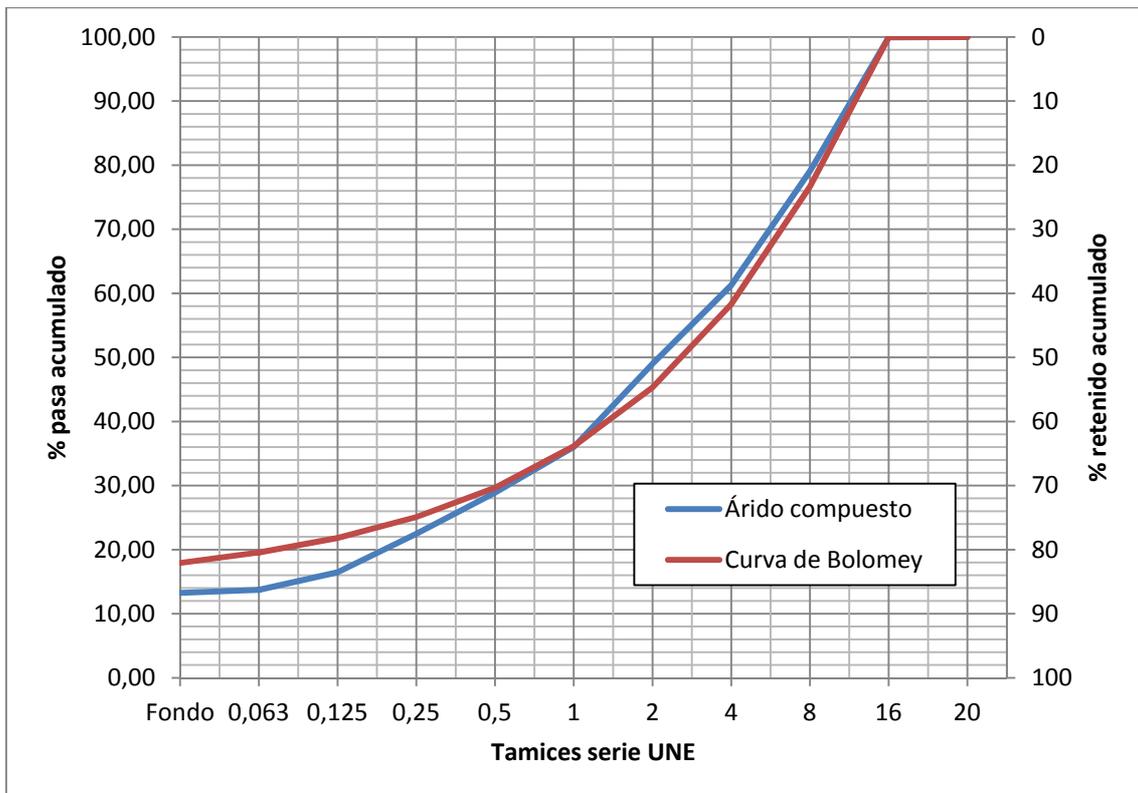


Figura 3.18. Curva granulométrica del árido compuesto y curva de Bolomey

Con las proporciones obtenidas por el ajuste teórico, conocido el volumen y la densidad de los áridos, se establece el cuadro de dosificación del hormigón.

Tabla 3.41

Resumen de dosificación teórica por m³ según el método de Bolomey

Material	Porcentaje %	Volumen por m ³	Densidad (kg/dm ³)	Peso (kg)
Cemento	13,23	114,77	3,05	350,00
Agua		157,50	1,00	157,50
Árido fino 0/2	18,09	156,93	2,72	426,85
Árido intermedio 0/4	30,79	267,10	2,68	715,83
Árido grueso 4/16	37,89	328,70	2,70	887,49
Árido compuesto	100,00	867,50		2380,17
TOTAL		1025		2537,65

En ningún momento se hacen correcciones por humedad debido a que los áridos han sufrido un proceso de secado.

Una vez conseguida la dosificación teórica se realiza en el laboratorio una amasada de prueba de 15 litros, comprobándose lo siguiente:

1. El valor de la consistencia del cono de Abrams es de 3 centímetros cuando lo realmente buscado es una consistencia fluida, es decir, un valor de cono de Abrams de 17 centímetros. Esto conlleva a la necesidad de utilizar superplastificantes debido a que aumentar la cantidad de agua, y así aumentar la consistencia, para mantener fija la relación agua/cemento conlleva aumentar la cantidad de cemento, producto económicamente más caro que el resto de componentes.
2. La resistencia a 7 y 28 días se encuentra dentro de los valores esperados.
3. Se observan valores muy altos de la porosidad del hormigón. Los órdenes de magnitud son del 6%.

4. La penetración de agua bajo presión arroja valores por encima de lo marcado en la instrucción de hormigón estructural para el tipo de ambiente prefijado III_C+Q_C .

3.7.7.3 Correcciones a la dosificación teórica de Bolomey

Una vez obtenidas las proporciones teóricas en la que los áridos intervienen en la mezcla y fijada la relación agua cemento, se realizan las correcciones a la dosificación teórica. Estas correcciones no son más que ajustes prácticos respaldados por la experiencia de los últimos 10 años dedicados al mundo de la dosificación y elaboración del hormigón. Para ello se han recopilado una serie de normas prácticas que a veces no son más que correcciones de otros modelos teóricos de dosificación [3.8], estudios de optimización de mezclas de hormigón [3.25, 3.26] y otras veces simples manuales de trabajo de las propias plantas de hormigonado [3.27].

Las correcciones efectuadas se agrupan en:

Debidas a los áridos

1. Sobre el modelo de ajuste de Bolomey; se procederá a aumentar dos unidades el *parámetro a* sobre el valor teórico.
2. Sobre los porcentajes óptimos del método:
 - 2.1 Si el árido es de machaqueo; aumentar un 4% el árido más fino, restando proporcionalmente dicho porcentaje del resto de los áridos.
 - 2.2 Si el hormigón es vibrado; aumentar en un 4% el árido más grueso, restando proporcionalmente dicho porcentaje del resto de los áridos.
3. Por cada 1% de aire ocluido restar 10 litros del árido más fino.

Debidas al cemento:

1. Por exceso de cemento respecto a 300 kg/m^3 , disminuir el mismo volumen al árido fino.
2. Por defecto de cemento respecto a 300 kg/m^3 , aumentar el mismo volumen al árido fino.

Debidas al empleo de superplastificantes

El empleo de superplastificantes provoca una gran dispersión de las partículas de cemento, impidiendo la floculación de las mismas, consiguiendo reducir mucho el agua intersticial y mejorando notablemente la hidratación del cemento. Se logra así aumentar la plasticidad de la masa con relaciones agua/cemento muy bajas, lo que conduce a obtener hormigones muy trabajables. En nuestro caso se ha empleado el superplastificante GLENIUM ACE-324 de la marca comercial BASF. Según indicaciones del fabricante el empleo del aditivo será sobre peso de cemento en proporciones que oscilan entre el 1% y el 2,5%. La densidad es de $1,042 \text{ kg/dm}^3$ y la proporción de agua es del 85%, valor a tener en cuenta para no alterar la relación agua/cemento del hormigón [3.28].

El primer cálculo a realizar será el de los nuevos porcentajes teóricos cambiando el *parámetro a* del modelo de ajuste; método de Bolomey. Según la tabla 3.39 el valor de *a* para consistencia fluida es 14. Si este valor lo aumentamos en 2 unidades el nuevo valor de *a* será 16.

Haciendo uso de la ecuación 3.23 la nueva curva granulométrica de referencia viene definida por la siguiente expresión:

$$y = 16 + 84 \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (3.31)$$

Como los diámetros máximos de los áridos no han variado, el valor *D* continua siendo 15,08 mm y la expresión anterior queda como:

$$y = 16 + 84 \sqrt{\frac{d}{15,08}} \quad (3.32)$$

El módulo granulométrico de la curva de Bolomey será:

$$mt_2 = \frac{\sum_i (100 - (16 + 84 \sqrt{\frac{d_i}{15,08}}))}{100} \quad (3.33)$$

Desarrollando la expresión para la serie de tamices desde 15,06 mm hasta 0,125 mm, se obtiene:

$$mt_2 = \frac{0 + 22,78 + 40,71 + 53,39 + 62,36 + 68,69 + 73,18 + 76,35}{100} = 3,98$$

El porcentaje de cemento que entra en la composición del hormigón viene dado por la ecuación 3.24 y este en principio es el mismo dado que a priori no se modifica la cantidad de cemento:

$$t_0 = \frac{\frac{350}{3,05} \cdot 100}{1025 - 350 \cdot 0,45} = 13,23\%$$

Para obtener los porcentajes de los áridos aplicamos las ecuaciones 3.25 y 3.26:

$$t_1 = \frac{100 \cdot (6,51 - 3,98) - 13,23 \cdot 6,51}{6,51 - 3,28} = 51,66\%$$

$$t_2 = 100 - (13,23 + 51,66) = 35,11\%$$

La proporción de árido mezcla corresponde a un 51,66% y la del árido grueso 4/16 un 35,11%. Como el árido mezcla está formado por un 37% de árido fino 0/2 y un 63% de árido intermedio 0/4, las proporciones teóricas quedan como se indican a continuación:

- Árido fino 0/2: 19,11%
- Árido intermedio 0/4: 32,55%
- Árido grueso 4/16: 35,11%
- Cemento: 13,23%

Conocida la proporción de cada uno de los áridos en el hormigón, se calcula la granulometría del árido compuesto. En la tabla 3.42 se indican el valor de *pasa acumulado* por tamiz para cada uno de los áridos, así como la granulometría del árido compuesto.

Tabla 3.42
Granulometría del árido compuesto aplicando el método de Bolomey corregido, a=16

Tamiz serie UNE (mm)	% Pasa acumulado				
	Cemento	Árido 0/2	Árido 0/4	Árido 4/16	Árido Compuesto
20	100	100,00	100,00	100,00	100,00
16	100	100,00	100,00	99,83	99,94
8	100	100,00	100,00	44,73	80,59
4	100	100,00	93,22	3,23	63,82
2	100	97,00	58,22	0,77	50,99
1	100	83,00	25,22	0,00	37,30
0,50	100	67,00	11,50	0,00	29,78
0,25	100	42,80	4,90	0,00	23,00
0,125	100	15,30	1,50	0,00	16,64
0,063	100	1,52	0,70	0,00	13,75
Fondo	100	0,00	0,00	0,00	13,23

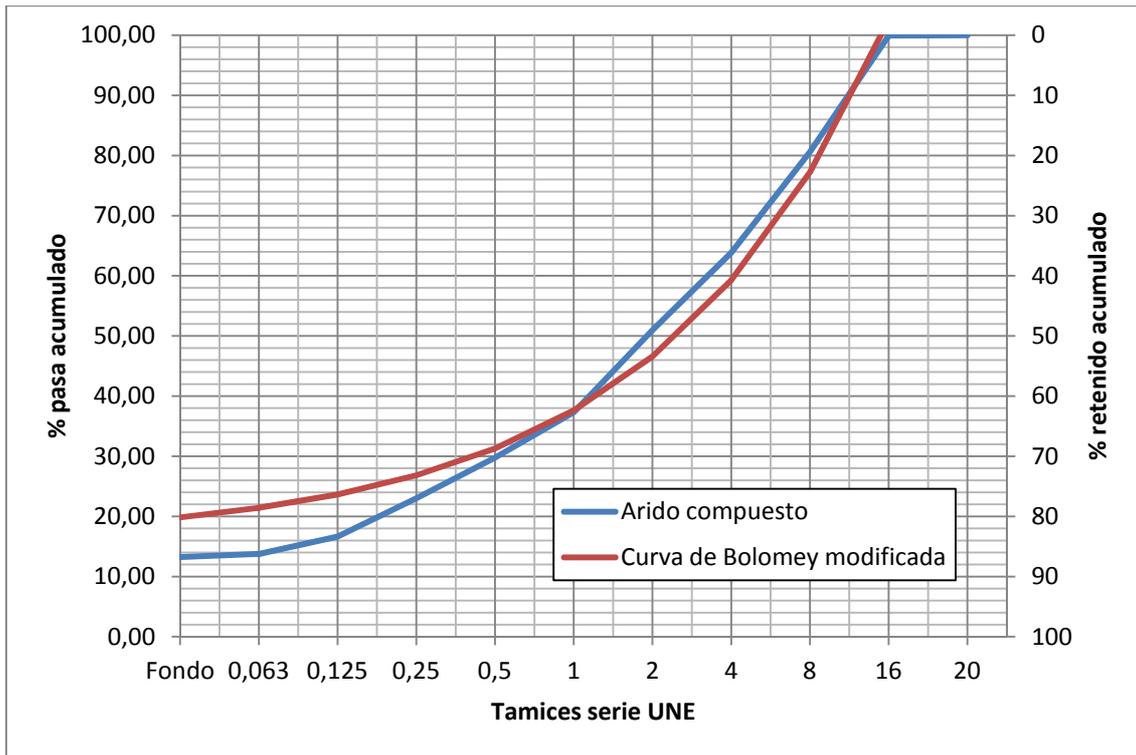


Figura 3.19. Curva granulométrica del árido compuesto y curva de Bolomey modificada

Realizadas las correcciones sobre el método de Bolomey y calculados de esta forma los nuevos porcentajes óptimos, se continúa con la corrección de estos.

Por ser áridos de machaqueo; se aumenta un 4% el árido más fino a costa del resto de los áridos (proporcionalmente). Recordar que a efectos de cálculo solo se tienen dos áridos, el árido mezcla (compuesto por árido 0/2 y 0/4) y el árido grueso 4/16.

$$\text{Árido mezcla} = 51,66 + 4 = 55,66\%$$

$$\text{Árido grueso} = 35,11 - \frac{4 \times 35,11}{35,11} = 31,11\%$$

Se ha indicado explícitamente la disminución del árido grueso como una proporción debido a que no existen más áridos a lo que afecte el aumento del árido mezcla.

Debido a que se trata de un hormigón vibrado la siguiente corrección será aumentar el árido grueso un 4% disminuyendo el resto de los áridos (proporcionalmente).

$$\text{Árido grueso} = 31,11 + 4 = 35,11\%$$

$$\text{Árido mezcla} = 55,66 - \frac{4 \times 55,66}{55,66} = 51,66\%$$

Dado que a efectos de cálculo solo existen dos áridos, el hecho de aumentar un 4% el árido fino con la primera corrección y un 4% el árido grueso con la segunda corrección, los porcentajes originales no se ven modificados. Esto evidentemente no sería así si se tuvieran tres o más áridos.

Como última corrección debida a los áridos se tendrá en cuenta el aire ocluido en la masa de hormigón. En la tabla 3.43 se indican los contenidos de aire ocluido en la masa de hormigón según el método ACI para la dosificación de un hormigón convencional [3.23].

Tabla 3.43

Contenido de aire ocluido para distintos tamaños del árido

[Fuente: Método ACI para la dosificación de hormigones convencionales]

	Tamaño máximo del árido (mm)							
	9,5	12,7	19,0	25,4	38,1	50,8	76,2	152,4
Aire ocluido en la masa de hormigón, %	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5	0,3	0,2

Como el tamaño máximo del árido grueso es de 15,08 mm, se procede a interpolar entre el tamaño 12,7 mm y 19,0 mm. Para ello operamos como sigue:

$$\frac{19 - 12,7}{2,0 - 2,5} = \frac{15,08 - 12,7}{A - 2,5} \rightarrow A = 2,31\%$$

Una vez estimado el valor del aire ocluido, se debe restar 10 litros de árido fino, en nuestro caso árido mezcla, por cada 1% de aire ocluido, es decir, se disminuye el volumen de este árido en 23,1 litros.

El volumen ocupado por los áridos según la ecuación 3.30 es de $867,5 \text{ dm}^3$ al no variarse la relación agua/cemento en ninguna de las correcciones. Siendo el porcentaje de árido mezcla de un 51,66%, el volumen que corresponde a este árido es de $448,15 \text{ dm}^3$, que aplicándole la corrección anterior será de:

$$448,15 - 23,1 = 425,05 \text{ dm}^3$$

Una vez finalizadas todas las correcciones sobre los áridos se realizan las correcciones debidas al cemento. El peso del cemento por metro cúbico de hormigón es de 350 kg, por lo que existe un exceso de 50 kg respecto a 300 kg. La corrección será disminuir el árido fino, en nuestro caso árido mezcla, en el mismo volumen ocupado por el exceso de cemento.

El volumen ocupado por el exceso de cemento es:

$$\frac{50}{3,05} = 16,39 \text{ dm}^3$$

Corrigiendo el árido fino se obtiene:

$$425,05 - 16,39 = 408,66 \text{ dm}^3$$

Como el árido fino, que a efectos prácticos es nuestro árido mezcla, está formado por un 37% de árido fino 0/2 y un 63% de árido intermedio 0/4, los volúmenes de ambos quedarían como:

- Árido fino 0/2: $151,20 \text{ dm}^3$
- Árido intermedio 0/4: $257,46 \text{ dm}^3$

Sobre el empleo de superplastificante, en primera aproximación se añade a la masa de hormigón un 1% según peso de cemento (s.p.c). Conocida la densidad del aditivo y sabiendo que su composición el 85% es agua, se calcula el aporte extra de agua que se introduce en la mezcla de hormigón para no variar la relación agua/cemento.

En la tabla 3.44 se indican los pequeños cálculos realizados para obtener el agua incorporada por el aditivo superplastificante.

Tabla 3.44

Agua debida al superplastificante en función del porcentaje según peso cemento

CEMENTO: CEM I 52,5R, 350 kg/m³		ADITIVO: BASF GLENIUM ACE-324		
Porcentaje (s.p.c)	Peso (kg)	Densidad (kg/dm ³)	Volumen (litros)	Aporte agua (litros) (85% volumen)
1,0	3,50	1,042	3,36	2,86

Con las proporciones obtenidas tras los procesos de corrección, en la tabla 3.45 se indica el cuadro de *dosificación-1* del hormigón de referencia.

Tabla 3.45

Resumen de dosificación-1 del hormigón de referencia por m³

Material	Cantidad	Unidad
Cemento	350,00	Kg.
Superplastificante: 1% s.p.c	3,36	litros
Agua total (amasado+aditivo)	157,50	litros
Agua amasado	154,64	litros
Relación agua/cemento	0,45	---
Aire ocluido	2,31	litros
Árido fino 0/2	411,26	Kg.
Árido intermedio 0/4	690,00	Kg.
Árido grueso 4/16	822,36	Kg.

Para comprobar la *dosificación-1* se prepara en laboratorio una amasada de 15 litros y con ello se comprueba la resistencia, densidad, porosidad y cono de Abrams. Los resultados obtenidos son:

1. El valor de la consistencia del cono de Abrams es de 9 centímetros cuando lo que se quería conseguir era una consistencia fluida, es decir, un valor de cono de Abrams de 17 centímetros. Esto conllevará a aumentar el porcentaje de

superplastificante, a la vez que se aumenta la cantidad de agua de amasado. El hecho de aumentar el agua de amasado hará que tengamos que aumentar la cantidad de cemento para mantener la relación agua/cemento y no superar el valor de 0,45.

2. La resistencia a 7 y 28 días se encuentra dentro de los valores esperados.
3. La porosidad del hormigón ha disminuido a valores del 4%.
4. La penetración de agua bajo presión continua siendo superior a los valores marcados por instrucción de hormigón estructural para el tipo de ambiente prefijado III_C+Q_C.

Con la siguiente dosificación se intentan corregir los desajustes anteriores. Para ello se aumenta la cantidad de superplastificante, el cemento y en consecuencia el agua para mantener la relación agua/cemento. Operando de la misma forma anteriormente expuesta, se obtienen los valores reflejados en la tabla 3.46.

Tabla 3.46
Resumen de dosificación-2 del hormigón de referencia por m³

Material	Cantidad	Unidad
Cemento	360,00	Kg.
Superplastificante: 1,2% s.p.c	4,15	litros
Agua total (amasado+aditivo)	162,00	litros
Agua amasado	158,47	litros
Relación agua/cemento	0,45	---
Aire ocluido	2,31	litros
Árido fino 0/2	373,67	Kg.
Árido intermedio 0/4	626,93	Kg.
Árido grueso 4/16	893,81	Kg.

Para comprobar la *dosificación-2* se prepara en laboratorio una amasada de 15 litros para comprobar resistencia, densidad, porosidad y cono de Abrams. Los resultados obtenidos son:

1. El valor de la consistencia del cono de Abrams es de 12 centímetros, dentro del intervalo aceptado por la Instrucción de hormigón estructural EHE-08 [3.9]. No obstante se ajustará la consistencia al valor máximo del intervalo, es decir, 17 centímetros.
2. La resistencia a 7 y 28 días se encuentra dentro de los valores esperados.
3. La porosidad del hormigón ha disminuido a valores del 3,5%.
4. La penetración de agua bajo presión arroja valores ligeramente por encima de los marcados en la instrucción de hormigón estructural para el tipo de ambiente prefijado III_c+Q_c.

Con la siguiente dosificación se corrigen los desajustes anteriores. Para ello aumentamos la cantidad de superplastificante, el cemento y el agua. Operando de la misma forma anteriormente expuesta, se obtienen los valores reflejados en la tabla 3.47.

Tabla 3.47
Resumen de dosificación-3 del hormigón de referencia por m³

Material	Cantidad	Unidad
Cemento	375,00	Kg.
Superplastificante, 1,3% s.p.c	4,68	litros
Agua de amasado	164,77	litros
Agua total (amasado+aditivo)	168,75	litros
Relación agua/cemento	0,45	---
Aire ocluido	2,31	litros
Árido fino 0/2	353,46	Kg.
Árido intermedio 0/4	593,00	Kg.
Árido grueso 4/16	902,31	Kg.

Para comprobar la *dosificación-3* se prepara en laboratorio una amasada de 15 litros para comprobar resistencia, densidad, porosidad y cono de Abrams. Los resultados obtenidos son:

1. El valor de del cono de Abrams es de 18, valor que consideramos óptimo, para la consistencia del hormigón de referencia, a pesar de estar ligeramente por encima del intervalo máximo fijado por la instrucción EHE-08 [3.9].
2. La resistencia a 7 y 28 días se encuentra dentro de los valores esperados.
3. La porosidad del hormigón ha disminuido a valores del 2,75%
4. La penetración de agua bajo presión arroja valores aceptados por la instrucción de hormigón estructural para el tipo de ambiente prefijado III_c+Q_c.

Una vez obtenida la dosificación definitiva para nuestro hormigón de referencia, indicamos en la tabla 3.48 la granulometría del árido compuesto. En la figura 3.20 se representa el ajuste entre la curva del árido compuesto para la dosificación-3 y la curva de Bolomey modificada con un valor del *parámetro a* de 16.

Tabla 3.48
Granulometría del árido compuesto para la dosificación-3

Tamiz serie UNE (mm)	% Pasa acumulado				
	Cemento	Árido 0/2	Árido 0/4	Árido 4/16	Árido Compuesto
20	100	100,00	100,00	100,00	100,00
16	100	100,00	100,00	99,83	99,93
8	100	100,00	100,00	44,73	78,42
4	100	100,00	93,22	3,23	60,23
2	100	97,00	58,22	0,77	48,47
1	100	83,00	25,22	0,00	36,08
0,50	100	67,00	11,50	0,00	29,29
0,25	100	42,80	4,90	0,00	23,18
0,125	100	15,30	1,50	0,00	17,44
0,063	100	1,52	0,70	0,00	14,83
Fondo	100	0,00	0,00	0,00	14,36

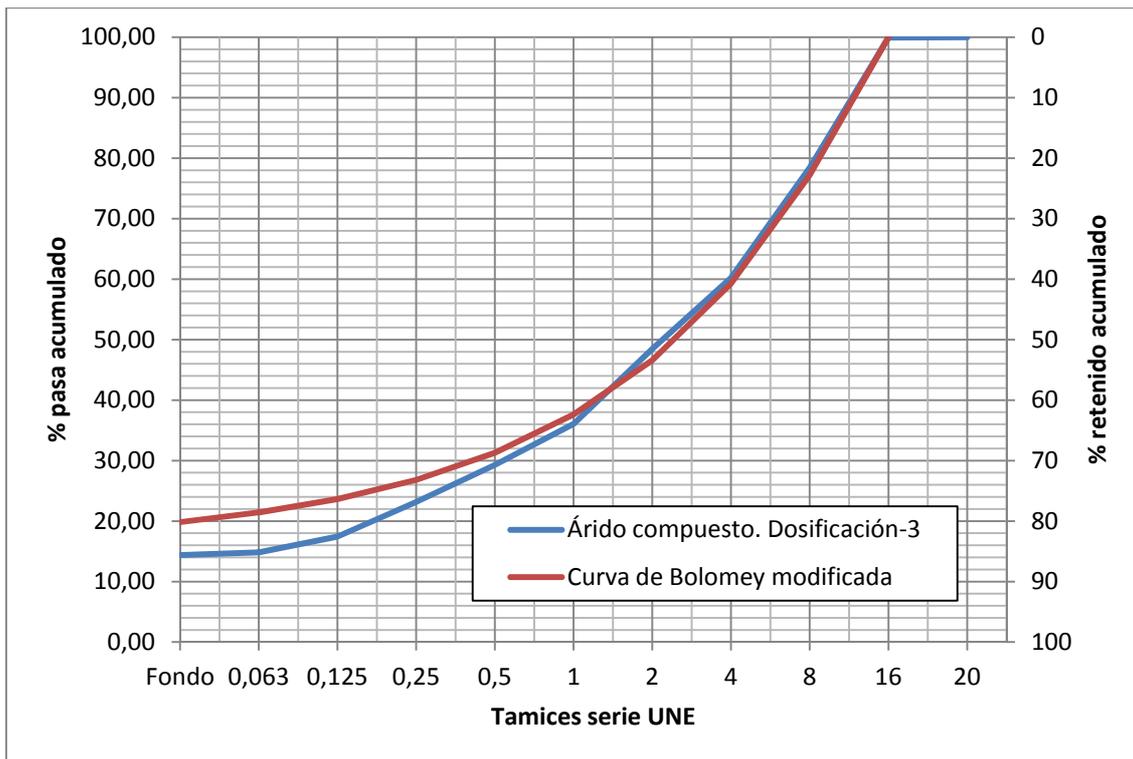


Figura 3.20. Curva granulométrica del árido compuesto para la dosificación-3 y curva de Bolomey modificada

3.8 Hormigones con sustitución del árido fino por escoria de cobre

Una vez obtenida la dosificación del hormigón de referencia, se calculan los distintos hormigones que serán objeto de análisis en esta tesis doctoral. Los hormigones a estudiar serán los resultantes de realizar una sustitución en volumen del árido fino 0/2 por escoria de cobre 0/2 en distintos porcentajes. El resto de los componentes; esto es, árido intermedio 0/4, árido grueso 4/16, cemento, agua, relación agua/cemento y porcentaje de aditivo superplastificante se mantienen invariantes.

Las sustituciones en volumen estudiadas son 0, 20, 40, 60, 80 y 100% del árido fino.

La nomenclatura que reciben los hormigones se realiza en función del porcentaje de escoria de cobre que poseen. En la tabla 3.49 se indica la nomenclatura adoptada para cada uno de los hormigones empleados, así como los porcentajes de escoria 0/2 y árido fino 0/2.

Tabla 3.49

Nomenclatura y porcentaje de escoria de cobre en los distintos hormigones empleados

Nomenclatura	Escoria de cobre 0/2, %	Árido fino 0/2, %
HSA	0	100
HEC-20	20	80
HEC-40	40	60
HEC-60	60	40
HEC-80	80	20
HEC-100	100	0

Para definir las dosificaciones de los distintos hormigones es necesario conocer el volumen que ocupa el árido fino 0/2. Para ello basta con consultar la dosificación del hormigón de referencia en la tabla 3.47. El peso del árido fino 0/2 es de 353,46 kg y su densidad 2,72 kg/dm³, por lo que el volumen ocupado sería de 129,95 dm³.

Otro valor necesario sería la densidad de la escoria de cobre 0/2, para una vez determinado el volumen a sustituir, obtener el peso de la misma. La densidad de la escoria 0/2 se obtuvo en el apartado 3.4, siendo su valor 3,69 kg/dm³.

Las dosificaciones de los distintos hormigones utilizados se indican en la tabla 3.50.

Tabla 3.50

Dosificación por metro cúbico de los distintos hormigones empleados

Material	TIPOLOGÍA DE HORMIGONES EMPLEADOS						Ud.
	HSA	HEC-20	HEC-40	HEC-60	HEC-80	HEC-100	
Cemento	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	Kg
Superplastificante, 1,3% s.p.c	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68	L
Agua de amasado	163,12	164,77	164,77	164,77	164,77	164,77	L
Relación agua/cemento	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	---
Aire ocluido	2,31	2,31	2,31	2,31	2,31	2,31	L
Árido fino 0/2	353,46	282,77	212,08	141,39	70,69	0,00	Kg
Escoria de cobre 0/2	0,00	95,65	191,81	287,71	383,61	479,52	Kg
Árido intermedio 0/4	593,00	593,00	593,00	593,00	593,00	593,00	Kg
Árido grueso 4/16	902,31	902,31	902,31	902,31	902,31	902,31	Kg

3.9 Fabricación del hormigón

La fabricación del hormigón es una etapa determinante del trabajo, debido a su influencia en el comportamiento del hormigón tanto en estado fresco como en el estado endurecido. De hecho, la calidad final de un hormigón se ve drásticamente afectada si el amasado no se realiza de forma que la mezcla obtenida sea homogénea y se logre en ella la adecuada dispersión de las partículas de cemento y de todas aquellas adiciones sólidas que lo compongan.

La fabricación de todos los hormigones se ha realizado en el laboratorio de Materiales de Construcción del departamento de Ingeniería Industrial e Ingeniería Civil de la Universidad de Cádiz. Para la fabricación se utilizaron dos tipos de mezcladoras de eje vertical. La primera de ellas se utilizó para hacer las diferentes comprobaciones de dosificación y valorar los condicionantes impuestos en la dosificación. La segunda mezcladora se utilizó para la elaboración de los hormigones que posteriormente serían objeto de los diferentes ensayos realizados en esta tesis doctoral.

Con el fin de eliminar posibles errores en el proceso de fabricación y para conseguir una mezcla lo más homogénea posible, se siguió un estricto protocolo de elaboración en todas las amasadas efectuadas. El proceso seguido es el siguiente:

1. Se humedece ligeramente el interior de la hormigonera procurando que no queden acumulaciones que puedan alterar la relación agua/cemento de la dosificación.
2. Se introducen las dos fracciones de árido mayor; árido grueso 4/16 y árido intermedio 0/4. Se pone en marcha la hormigonera para homogeneizar la mezcla durante 1 minuto, para posteriormente realizar su parada.
3. Se vierte el árido fino 0/2 y la escoria de cobre 0/2, procediendo a la mezcla con el resto de los áridos durante un tiempo de 1 minuto.
4. Con la hormigonera en marcha se añade el 50% del agua de amasado. Tiempo de mezcla 1 minuto. Parada de la hormigonera para que se produzca la hidratación de los áridos. Reposo 1 minuto.

5. Se adiciona el cemento y se pone de nuevo en funcionamiento la hormigonera. Tiempo 1 minuto.
6. Con la hormigonera en funcionamiento se incorpora el superplastificante con el resto del agua de amasado. Tiempo 3 minutos.

Finalizada cada amasada se observa si se producen fenómenos de exudación o segregación de la mezcla, así como se juzga de manera visual el aspecto del hormigón y si la mezcla está lo suficientemente amasada.



Figura 3.21. Hormigonera utilizada en la fabricación de probetas

3.10 Moldes y probetas

A lo largo del desarrollo de este trabajo se fabricaron cuatro tipos de probetas. La forma, medidas y otras características de las probetas y moldes se ajustan a lo indicado en la norma UNE-EN 12390-1:2013 [3.29]. Los distintos tipos de moldes para la confección de las probetas son los siguientes:

- Molde cilíndrico 15 cm de diámetro y 30 cm de altura.
- Cúbicos de 10 cm de arista.
- Cúbicos de 15 cm de arista.
- Prismáticos de 15 cm de arista y 60 cm de longitud.

En todos los casos los moldes utilizados son del tipo metálico y de polipropileno, lo cual garantiza la estanqueidad y la no absorción.



Figura 3.22. Moldes utilizados para la fabricación de probetas

La ventaja de las probetas cúbicas frente a las cilíndricas es que no requieren la aplicación de la capa de refrentado para la ejecución de los ensayos de compresión, al mismo tiempo y debido a sus dimensiones requieren menor cantidad de material.

En todas las probetas de ensayo, la dimensión de la arista, (10 ó 15 cm según el molde) es mayor al menos tres veces y media el diámetro nominal del árido del hormigón.

Dicho diámetro nominal corresponde al valor de 16 mm correspondiente al árido grueso empleado.

3.11 Fabricación de probetas

Para la fabricación y curado de las probetas se ha seguido el proceso establecido a la norma UNE-EN 12390-2:2009 [3.30].

Previamente al llenado de los moldes se impregna el interior de estos con una película de desencofrante no reactivo para evitar que el hormigón se adhiera al molde y se facilite las labores de desmoldado de las probetas.

El llenado de los moldes se realizó en varias capas para alcanzar la compactación completa. El proceso de vibrado se realizó mediante mesa vibrante y se inicia inmediatamente después de su vertido en el molde, de forma que se obtenga una compactación completa del hormigón sin una excesiva segregación o aparición de flujo de lechada.



Figura 3.23. Mesa vibrante para el compactado de probetas

Una vez concluido el proceso de fabricación el hormigón residual depositado sobre el borde superior de los moldes se retira mediante el uso de una llana, nivelando cuidadosamente la superficie.

Las probetas se mantienen en el molde 24 horas en las mismas condiciones de humedad y temperatura hasta el momento del proceso de desmoldado. En todo momento estarán protegidas de impactos, vibraciones y deshidratación.



Figura 3.24. Fracción de probetas en estado fresco tras el proceso de fabricación

3.12 Desmoldado y curado de probetas

Una vez transcurridas 24 horas de la fabricación se procede a desmoldar las probetas, procediendo seguidamente a su identificación. Una vez desmoldadas y marcadas, las probetas se curan hasta inmediatamente antes del ensayo. En nuestro caso el método de curado se realiza bajo agua. Para ello se utiliza un baño de curado donde el agua se mantiene a una temperatura de $20^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$.

3.13 Bibliografía

- [3.1] IRAM 1627:1997: *Granulometría de agregados para hormigones*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación IRAM, 1997.

- [3.2] UNE-EN 933-1:2012: *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2012.

- [3.3] UNE-EN 932-2:1999: *Ensayos para la determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 2: Métodos para la reducción de las muestras de laboratorio*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 1999.

- [3.4] UNE-EN 933-2: 1996: *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 1996.

- [3.5] ISO 3310-1:2000: *Test sieves. Technical requeriments and testing. Part 1: Test sieves of metal wire cloth*. ISO, 2000

- [3.6] ISO 3310-2:2013: *Test sieves. Technical requeriments and testing. Part 2: Test sieves of perforated metal plate*. ISO, 2013.

- [3.7] UNE 7050-3:1997: *Tamices y tamizado de ensayo. Parte 3: Exigencias técnicas y verificaciones de los tamices de ensayo de tela metálica*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 1997.

- [3.8] Fernández Cánovas M. (2007): *Hormigón*. 10 edición, Ed. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

- [3.9] EHE-08: *Instrucción de Hormigón Estructural*. Serie Normativas, Ministerio de Fomento. 2ª edición, Ed. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento, febrero 2009.
- [3.10] Procedimientos Integrados S.L. (2013): *Módulo de cálculo para el diseño de fórmulas de hormigón*. Madrid.
- [3.11] Jiménez Montoya P., García Meseguer A., Morán Cabré F. (2000): *Hormigón armado*. 14ª edición basada en la EHE, ajustada al código modelo y al eurocódigo. Ed. Gustavo Gili.
- [3.12] UNE-EN 1097-6:2001/A1:2006: *Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2006.
- [3.13] UNE-EN 932-1:1997: *Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 1: Métodos de muestreo*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 1997
- [3.14] UNE 83115:1989 EX: *Áridos para hormigones. Medida del coeficiente de friabilidad de las arenas*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 1989.
- [3.15] Atlantic Copper (2003): *Informe de resultados de los ensayos efectuados sobre una muestra de material granular de escoria granulada de fundición de cobre*. Instituto técnico de materiales y construcciones (INTEMAC). Madrid
- [3.16] UNE-EN 1744-1:2010+A1:2013: *Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2013.

- [3.17] UNE 146507-1:1999 EX: *Determinación de la reactividad potencial de los áridos. Método químico. Parte 1: Determinación de la reactividad álcali-sílice y álcali-silicato*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 1999.
- [3.18] Correa Camargo, D. (2011): *Dosificación Ponderal para hormigones de alta y baja densidad*. Tesis de Master. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [3.19] RC-08: *Instrucción para la Recepción de Cementos*. Serie Normativas, Ministerio de Fomento. 2ª edición, Ed. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento, 2009.
- [3.20] UNE-EN 12350-2:2009: *Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009.
- [3.21] Murray R, Spiegel (1988): *Estadística*. Serie Schaum. McGraw Hill, p. 343.
- [3.22] CEB-FIP (1990): *Código Modelo CEB-FIP 1990 para hormigón estructural*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. GEHO-CEB y ATEP, Madrid.
- [3.23] ACI 316-84: *Building Code Requirements for structural concrete*. American Concrete Institute (ACI), 1984.
- [3.24] Ficha de características técnicas *del* cemento CEM I 52,5R. Holcim España, 2013
- [3.25] Kosmatka S.H., Panarese W.C., Kerkhoff B. (2002): *Design and control of concrete mixtures*. Portland Cement Association.
- [3.26] Richardson D.N (2005): *Aggregate Gradation Optimization*. University of Missouri-Rolla. Departament of Civil, Architectural and Environmental Engineering. Rolla, Missouri.

- [3.27] Holcim España. *Fichas de dosificación para hormigones*, 2013.
- [3.28] Basf España. *Ficha técnica superplastificante Glenium ACE-324*.
- [3.29] UNE-EN 12390-1:2013: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, medidas y otras características de las probetas y moldes*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2013.
- [3.30] UNE-EN 12390-2:2009: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009.

CAPÍTULO 4

ESTUDIO REOLÓGICO DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO

4.1 Introducción

El término Reología fue sugerido en 1929 por Eugene Cook Bingham para definir la rama de la Física que tiene por objeto el estudio de la deformación y el flujo de la materia [4.1]. Estrictamente hablando, todos los materiales muestran comportamientos reológicos. Las técnicas reométricas son utilizadas en la industria para optimizar la formulación de nuevos materiales, mejorar los procesos de fabricación y la calidad final de los productos [4.2, 4.3]. En esta línea, desde hace tiempo, se conoce que la Reología aplicada a materiales cementos es una herramienta fundamental para comprender su comportamiento en estado fresco, así como para el desarrollo de nuevas formulaciones [4.4].

El estudio reológico de los materiales cementosos conlleva una serie de dificultades inherentes a la propia naturaleza del material. Este hecho es debido a que se trata de suspensiones muy concentradas y consistentes, que pueden contener áridos y que, además, se están hidratando de forma permanente, por lo que la estructura química del sistema experimenta cambios mientras perdura su estado fresco.

Por lo tanto resulta imprescindible determinar el periodo de tiempo durante el cual los cambios químicos resultantes de la hidratación del cemento no dominan sobre las interacciones de origen coloidal, brownianas e hidrodinámicas, que determinarán la respuesta reológica del sistema.

En este capítulo se estudia la influencia de la sustitución, en diferentes porcentajes volumétricos, del árido fino por escoria de cobre en el comportamiento de flujo en estado fresco de los morteros equivalentes de cada uno de los hormigones obtenidos tras el citado proceso de sustitución del árido. En un estudio previo realizado en la Universidad de Málaga, se ha podido comprobar que con el uso de un reómetro de esfuerzo controlado se pueden correlacionar las propiedades reológicas de los morteros equivalentes con las de sus correspondientes hormigones [4.5].

4.2 Fundamentos teóricos. Reología y reometría

4.2.1 Reología

La Reología tiene como objetivo el estudio del comportamiento de la materia cuando fluye y/o se deforma. Los materiales que son tratados por esta disciplina científica muestran comportamientos no-Newtonianos y no-Hookeanos.

En 1678 Hooke sentó las bases de la Teoría de la Elasticidad indicando que la deformación es proporcional al esfuerzo:

$$\tau = E \gamma \quad (4.1)$$

donde τ es el esfuerzo (Pa), γ es la deformación (adimensional) y E es el módulo de elasticidad (Pa). Cuando el esfuerzo aplicado deja de actuar sobre el sólido, de manera reversible, este recupera su forma original.

En 1687, Newton definiría el líquido viscoso (posteriormente conocido como Newtoniano), como aquel que al fluir muestra una resistencia que se produce como consecuencia de la falta de deslizamiento entre las partes del mismo. Dicha resistencia es proporcional a la velocidad con la cual dichas partes se separan las unas de las otras. La energía suministrada al sistema se disipa en forma de calor. El fluido no recupera, ni siquiera parcialmente, su forma original cuando cesa el esfuerzo. Así pues, al duplicar el esfuerzo se duplica el gradiente de velocidad ($\dot{\gamma}$), estando ambas magnitudes relacionadas por una constante (para una temperatura dada) denominada viscosidad (η) que está relacionada con la fricción interna del material. Matemáticamente hablando se expresaría como:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (4.2)$$

donde τ es el esfuerzo de cizalla y se mide en Pascales (Pa), $\dot{\gamma}$ es la velocidad de cizalla, que se mide en 1/segundo (1/s) y η es la viscosidad del líquido, cuyas unidades son Pascales por segundo (Pa·s). A esta ecuación se le denomina Ley de Newton y, por tanto, todos los materiales que se comportan según esta sencilla relación se denominan fluidos newtonianos. En este caso si se representa la respuesta del

esfuerzo del material en función de la velocidad de deformación de cizalla aplicada en estado estacionario, lo que se denomina curva de flujo, se obtendría una línea recta que pasa por el origen de coordenadas y cuya pendiente sería, precisamente, su viscosidad.

En 1835, Weber observó un comportamiento intermedio entre los dos descritos anteriormente cuando sometió a esfuerzos fibras de seda. La respuesta de las fibras de seda no podía ser descrita ni por la ley de Hooke ni por la de Newton. El material parecía almacenar solo parte de la energía mecánica que se le suministraba y, al mismo tiempo, mostraba cierto retraso al adoptar la deformación final cuando se le aplicaba un esfuerzo y también al tender a recuperar su forma primitiva cuando este cesaba.

En 1867, Maxwell propuso un modelo matemático capaz de describir el comportamiento de fluidos con propiedades elásticas. Se empezó a utilizar el término “viscoelasticidad” para describir los comportamientos observados en materiales que, como la seda, encajarían entre los extremos ideales del sólido de Hooke y el líquido de Newton.

Los fluidos que no cumplen la anteriormente descrita Ley de Newton y por tanto, presentan una curva de flujo que, o bien, es no lineal, o bien no pasa por el origen de coordenadas, es decir, su viscosidad aparente, el cociente entre el esfuerzo y la velocidad de cizalla aplicadas ($\eta = \tau/\dot{\gamma}$), no es constante para una temperatura y presión dadas porque depende de la velocidad de cizalla, se dicen que tienen un comportamiento viscoso no-newtoniano. Los comportamientos viscosos no-Newtonianos conocidos son:

- Comportamiento Reo-fluidizante (shear-thinning): Materiales puramente viscosos que fluyen de acuerdo con una ley no-lineal. Su viscosidad aparente decrece al aumentar la velocidad de cizalla.

- Comportamiento Reo-espesante (shear-thickening): Materiales puramente viscosos que fluyen de acuerdo con una ley no-lineal. Su viscosidad aparente aumenta al aumentar la velocidad de cizalla.
- Comportamiento Viscoplastico: Este es el comportamiento típico de los sistemas cementosos [4.4, 4.6]. En este caso se precisa alcanzar un cierto valor mínimo de esfuerzo para que el sistema empiece a fluir. A ese valor de esfuerzo crítico se le denomina límite de fluencia. Por debajo de este valor, el material se comporta como un sólido elástico y, una vez superado, empieza a fluir, pudiéndolo hacer siguiendo una ley lineal, caso que se denomina plástico de Bingham, o no, por lo que habría que ajustar la curva a un modelo que tenga en cuenta la evolución no lineal del sistema, como por ejemplo el modelo de Bingham Modificado o el modelo de Herschel-Bulkley [4.7].

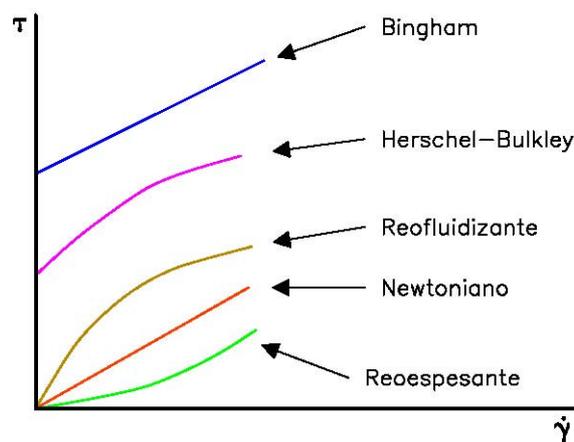


Figura 4.1. Flujos no newtonianos. Se incluye el comportamiento Newtoniano por comparación

En la figura 4.1 se muestran las posibles respuestas de flujo experimentalmente observadas cuando un material es forzado a fluir. Se ha incluido, por comparación, la respuesta Newtoniana, caracterizada por la proporcionalidad directa entre esfuerzo y velocidad de deformación, y por el hecho de cortar el sistema de ejes por el origen, es decir, un material Newtoniano fluirá por pequeño que sea el esfuerzo ejercido sobre él.

La respuesta de flujo de los materiales cementosos es, normalmente, tal como se ha indicado anteriormente, viscoplástica. Esto significa que siempre será necesario aplicar un esfuerzo mínimo para conseguir que el material empiece a fluir de manera observable en nuestra escala de tiempo. Posteriormente, dependiendo del tipo de interacción dominante entre partículas de cemento, el material cumplirá con una ley que podrá ser o no lineal [4.8, 4.9].

En la figura 4.2 se representa gráficamente la deformación experimentada por un elemento de un material sometido a la componente tangencial de una fuerza. En el caso de que dicho elemento fuera un sólido elástico ideal, la relación entre el esfuerzo de cizalla τ y la deformación de cizalla γ viene dada por la expresión:

$$\frac{F}{A} = \tau = E \frac{dx}{dy} = E \gamma \quad (4.3)$$

Por otro lado, si se trata de un líquido viscoso ideal la expresión sería:

$$\frac{F}{A} = \tau = \eta \left(\frac{dV_x}{dy} \right) = \eta \dot{\gamma} = \eta \left(\frac{dx}{dy dt} \right) = \eta \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dy} \right) = \eta \dot{\gamma} \quad (4.4)$$

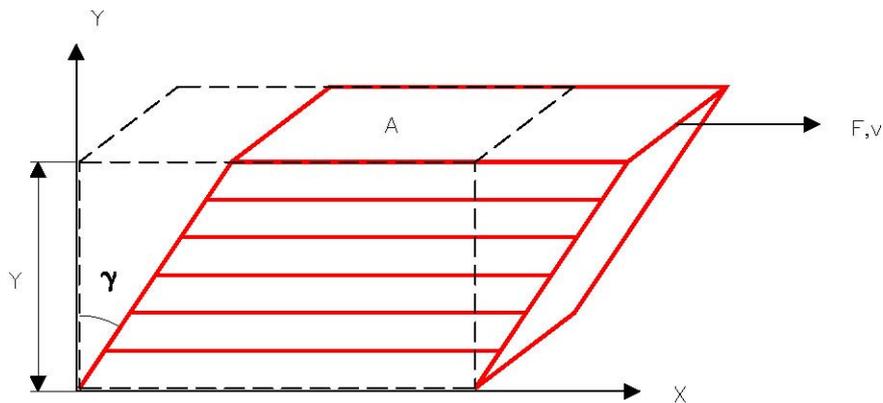


Figura 4.2. Deformación experimentada por un elemento de un material sometido a la acción de la componente tangencial de una fuerza

Previamente al análisis reológico de los morteros equivalentes, se describirán las magnitudes que intervienen cuando sometemos a los materiales a un flujo de cizalla. En este tipo de flujos únicamente una componente extra-diagonal de las magnitudes

tensoriales (esfuerzo, velocidad de deformación) es no nula, por lo que las ecuaciones constitutivas tensoriales se convierten en expresiones escalares. Para la definición de las magnitudes se sigue el esquema representado en la figura 4.2:

- Esfuerzo de cizalla, τ_{xy} :

Es la componente tangencial del tensor de esfuerzos que se aplica al material o con el que este se opone a ser deformado. Coincide con la fuerza aplicada F_x por unidad de área A_y , en dirección tangencial a la superficie sobre la que actúa.

$$\tau_{xy} = \frac{F_x}{A_y} \quad (4.5)$$

Su unidad es el Pascal (Pa). En los ensayos, realizados con un reómetro de esfuerzo controlado, representa la fuerza que la muestra ejerce sobre la geometría utilizada dividida por la superficie lateral de dicha geometría, oponiéndose a la velocidad de deformación a la que es sometida.

- Límite de fluencia, τ_0 :

Es el valor del esfuerzo que delimita el comportamiento elástico y el comportamiento viscoso de la pasta de cemento. Dicho de otro modo, sería el esfuerzo tangencial mínimo que hay que aplicar a un material para que comience a fluir. Su unidad de medida es el Pascal (Pa).

- Velocidad de cizalla, $\dot{\gamma}$:

Es la velocidad con la que el material se deforma cuando fluye.

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \quad (4.6)$$

Su unidad es el segundo elevado a menos uno (s^{-1}). En la práctica, un hormigón durante su transporte y vertido, se ve sometido a velocidades de cizalla comprendidas entre 10 y 50 s^{-1} que, convertidas a la velocidad de cizalla

equivalente sobre los morteros equivalentes, supone un valor entre 20 y 100 s⁻¹ [4.10, 4.11].

- Viscosidad aparente η :

Es la magnitud física que representa la propiedad que tienen los fluidos para oponerse a la deformación tangencial.

$$\eta = \frac{\tau_{xy}}{\dot{\gamma}} \quad (4.7)$$

Se mide en Pascales por segundo (Pa·s). La viscosidad de un material depende de varios factores. Si únicamente depende de la temperatura y de la presión, el material muestra un comportamiento de flujo Newtoniano; si, además, depende de la velocidad de cizalla a la que es sometido, se dice que su respuesta es viscosa no-Newtoniana. En el caso que estudiaremos la velocidad de cizalla y la temperatura han sido controladas. La presión ha sido siempre la atmosférica y, por lo tanto, se ha considerado constante, siendo así su influencia despreciable. Para evitar la influencia del instante en el que se toma una medida de una magnitud (posible comportamiento tixotrópico), se han considerado únicamente resultados obtenidos cuando el sistema ha alcanzado el estado estacionario.

4.2.2 Reometría

La Reometría es el conjunto de todas las técnicas y tecnologías empleadas por la Reología para obtener datos reológicos de un sistema material. Por lo tanto, la reometría se centra en los tipos de dispositivos existentes así como en los distintos tipos de ensayos que se pueden utilizar para obtener las funciones del material [4.12].

En este estudio, para determinar el comportamiento reológico de los morteros, se han obtenido curvas de flujo, que consisten, como ya se ha indicado anteriormente, en la representación de la respuesta en esfuerzo (τ) de la muestra frente a la velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$) que se le aplica. Los parámetros reológicos que se obtienen a partir de este

ensayo reológico son la viscosidad plástica y el límite de fluencia. Con la primera se cuantifica la resistencia frente a la segregación del material cementoso, con la segunda se determina el esfuerzo mínimo que es necesario aplicar a dicho material para que empiece a fluir.

Considerando que los materiales cementosos, en general, muestran respuesta dependiente del tiempo (viscoelasticidad y tixotropía) como consecuencia del desarrollo de cierto nivel estructural [4.13], resulta necesario aplicarles una precizalla antes de comenzar con la obtención de la curva de flujo propiamente dicha. De esta forma se eliminarán los efectos aleatorios que resultan del vertido de la muestra en el sensor de medida. Adicionalmente, la aplicación de la fase de precizalla permite unificar el estado inicial de las diferentes muestras de una misma formulación, lo que permitirá asegurar que se está trabajando siempre con el mismo sistema físico. Posteriormente, se procede a realizar la medida de la respuesta del material en un intervalo de velocidades de cizalla adecuado. Para evitar efectos transitorios que falseen la medida, el reómetro está programado para que cuando alcance una determinada velocidad, la aplique durante el tiempo necesario para que la respuesta del material sea estacionaria [4.14]. Una vez alcanzado este valor estacionario, salta a la siguiente velocidad, y así sucesivamente.

La figura 4.3 muestra la cinemática aplicada a los morteros para obtener las respectivas curvas de flujo estacionario.

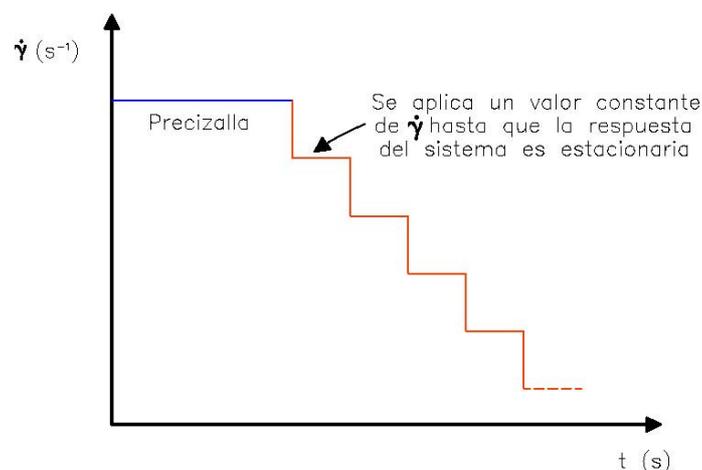


Figura 4.3. Cinemática empleada para obtener la curva de flujo estacionario

4.3 Modelos reológicos

Considerando que se ha limitado a estudiar la respuesta puramente viscosa de los morteros equivalentes, la ecuación constitutiva que resulta apropiada es la del fluido newtoniano generalizado:

$$\tilde{\tau} = \eta(\dot{\gamma}) \tilde{\gamma} \quad (4.8)$$

En dicha expresión se relaciona el tensor de esfuerzos ($\tilde{\tau}$) con el tensor velocidad de deformación ($\tilde{\gamma}$) mediante la función viscosidad, que lo es de la velocidad de cizalla (módulo del tensor $\tilde{\gamma}$). Existen muchas propuestas en la literatura reológica para la función $\eta(\dot{\gamma})$. En nuestro caso, dado el comportamiento observado en los materiales cementosos, la elección adecuada debe asumir comportamiento viscoplástico. Se han propuesto varios modelos para describir el comportamiento viscoplástico de los materiales.

Una vez obtenida la curva de flujo, se deben ajustar los resultados experimentales al modelo reológico que proporcione el mejor ajuste y que permita una interpretación física de los parámetros del modelo. Si la respuesta es lineal el modelo de Bingham es adecuado. Sin embargo, cuando la respuesta es no lineal, una vez superado el límite de fluencia, este modelo no tiene la capacidad de caracterizar el fluido y en consecuencia debe extenderse el análisis a otros modelos reológicos. Para el desarrollo de esta tesis doctoral se han considerado los modelos de Bingham Modificado y Herschel-Bulkley.

4.3.1 Modelo de Bingham

El modelo de Bingham, viene definido por la siguiente expresión [4.1]:

$$\tau = \begin{cases} 0, & \tau < \tau_B \\ \tau_B + \eta_p \dot{\gamma}, & \tau \geq \tau_B \end{cases} \quad (4.9)$$

de donde se obtiene que cuando el sistema fluye, la viscosidad aparente del sistema será:

$$\eta = \eta_0 + \frac{\tau_B}{\dot{\gamma}} \quad (4.10)$$

En estas expresiones:

τ_B límite de fluencia, en Pa

η_p viscosidad plástica, en Pa·s

Como se deduce de la ecuación anterior un fluido Bingham no comienza a fluir hasta que el esfuerzo de corte aplicado exceda del valor mínimo τ_0 . A partir de este punto el cambio en el esfuerzo de corte es proporcional a la tasa de corte y la constante de proporcionalidad es la viscosidad plástica η_p .

4.3.2 Modelo de Bingham modificado

En la actualidad, debido a que muchas formulaciones de última generación presentan un comportamiento viscoplástico no-lineal [4.15], el modelo de Bingham resulta inapropiado para describirlas. El problema se resuelve de forma natural introduciendo un término de segundo orden, y pasando a denominarse modelo de Bingham Modificado:

$$\tau = \begin{cases} 0, & \tau < \tau_{BM} \\ \tau_{BM} + \eta_p \dot{\gamma} + c \dot{\gamma}^2, & \tau \geq \tau_{BM} \end{cases} \quad (4.11)$$

ó:

$$\eta = c \dot{\gamma} + \eta_p + \frac{\tau_{BM}}{\dot{\gamma}} \quad (4.12)$$

Se observa que el límite de altas velocidades de cizalla se cumple que:

$$\lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \eta = c \dot{\gamma} + \eta_p \quad (4.13)$$

Luego $c > 0$ implica un comportamiento reo-espesante en dicha región, mientras que $c < 0$ representa un comportamiento reo-fluidizante.

En las expresiones anteriores:

τ_{BM} límite de fluencia, en Pa

4.3.3 Modelo de Herschel-Bulkley

Es uno de los más utilizados para fluidos no newtonianos, explicando el comportamiento newtoniano y no newtoniano. El modelo viene definido matemáticamente por la siguiente expresión [4.1]:

$$\tau = \begin{cases} 0, & \tau < \tau_{HB} \\ \tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n, & \tau \geq \tau_{HB} \end{cases} \quad (4.14)$$

ó:

$$\eta = \frac{\tau_{HB}}{\dot{\gamma}} + K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (4.15)$$

En las expresiones anteriores:

n índice de flujo. Según su valor:

- $n < 1$ → una vez superado el límite de fluencia el material fluirá con un comportamiento reo-fluidizante.
- $n = 1$ → este caso sería igual al modelo plástico de Bingham.
- $n > 1$ → el material fluirá con un comportamiento reo-espesante.

Una de las desventajas de este modelo radica en la predicción de viscosidades muy elevadas a bajas velocidades de cizalla, lo cual podría suponer una drástica sobrevaloración en situaciones de flujo en las que la velocidad de deformación es muy baja. Adicionalmente el modelo de Herschel-Bulkley predice, en el caso $n < 1$, que la viscosidad aparente tiende a cero en el límite de altas velocidades de cizalla, lo cual es físicamente irreal, es decir:

$$\lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \eta = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad \text{si } n \geq 1 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Bingham (n = 1)} \\ \text{Reo - espesante (n > 1)} \end{array} \right. \quad (4.16)$$

$$\lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \eta = 0 \quad \text{si } n < 1 \quad \text{¡ Absurdo !} \quad (4.17)$$

4.3.4 Comparativa de los modelos Bingham y Herschel-Bulkley

Observando dichos métodos se destaca que, aunque las dimensiones del índice de consistencia K , no permiten la comparación entre diferentes tipos de materiales, su significado físico recuerda al de la viscosidad.

Por otra parte, un índice de flujo n , en el modelo de Herschel-Bulkley, de valor unidad da lugar a un comportamiento que se ajusta al modelo de Bingham.

Los parámetros de estos dos modelos son el límite de fluencia (τ_B y τ_{MB}) y la viscosidad plástica (η_p) o el índice de consistencia (K) y el índice de flujo (n), dependiendo de si se ha utilizado, en el análisis de los datos, el modelo de Bingham o el de Herschel-Bulkley. Estos parámetros permiten evaluar la calidad del hormigón. El límite de fluencia indica cual es el esfuerzo mínimo necesario que hay que aplicar al sistema para que empiece a fluir, por lo tanto, cuanto más pequeño sea el valor de dicho parámetro, el hormigón fluirá con más facilidad bajo la acción de su propio peso [4.5]. Aunque, a nivel teórico se puede dudar de que el límite de fluencia sea una función material y no sea más que una consecuencia de las limitaciones técnicas de los reómetros para medir la zona de velocidades de cizalla extremadamente pequeñas [4.16], experimentalmente, y desde el punto de vista práctico, es un parámetro muy importante para caracterizar y clasificar el material, especialmente en el caso de los materiales cementosos [4.3]. Por otro lado, el índice de consistencia y la viscosidad plástica dan una idea de la resistencia a la segregación, de forma que, a mayor valor de dichos parámetros, la consistencia del material será mayor y, por tanto, será capaz de mantener con más facilidad la suspensión del árido grueso, evitando así problemas de segregación [4.3, 4.17, 4.18]

En el caso de utilizar el modelo de Bingham modificado, el parámetro de segundo orden (C) indicará las propiedades autocompactantes que posee el hormigón, de forma que, a valores positivos y a su vez mayores, mayor será la capacidad que posea el hormigón de ser autocompacto [4.15].

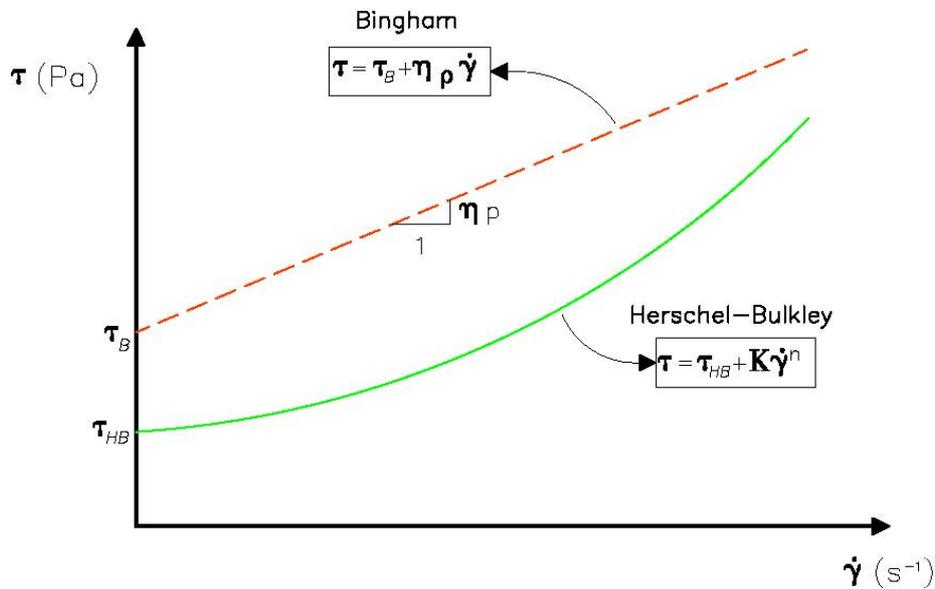


Figura 4.4. Diferencia del comportamiento viscoplástico entre los modelos de Bingham y Herschel-Bulkley

4.4 Protocolo experimental y descripción del sistema

El protocolo seguido durante la fase experimental que ha conducido a los resultados de esta investigación ha consistido, básicamente, en pesar, en primer lugar, las cantidades necesarias de los componentes de la formulación a estudiar, cantidades que fueron determinadas haciendo uso de la hipótesis del mortero equivalente, que será descrita oportunamente, con el fin de obtener un volumen final de muestra de 300 mL. Una vez pesados y homogeneizados todos los componentes, se mezclan en el agitador según el protocolo dispuesto para cada formulación (explicados en los capítulos dedicados a cada una de ellas) y finalmente se vierte sobre la geometría, procediéndose a realizar el ensayo reológico correspondiente.

4.4.1 Condiciones de contorno y fuentes de incertidumbre

El tratamiento matemático del problema físico general de un fluido que está siendo deformado bajo la acción de fuerzas de cizalla, implica ecuaciones diferenciales no lineales. El problema sólo puede llevar a una solución analítica cuando las condiciones del ensayo se mantienen dentro de determinadas restricciones físicas y matemáticas (condiciones de contorno). Las medidas de viscosidad y otras funciones del material requieren de las siguientes condiciones experimentales, para obtener resultados precisos y reproducibles [4.19, 4.20]:

- Flujo laminar

La cizalla aplicada sobre la muestra sólo debe de hacer fluir al material en este régimen de flujo. La imposición del régimen laminar previene el intercambio de elementos de volumen entre capas, por lo que las muestras deben de ser totalmente homogéneas justo al empezar el experimento.

Por otro lado, este requisito impide usar agitadores y mezcladores como sensores de medida de viscosidad absoluta. Las mezcladoras y demás dispositivos de procesado con sus respectivos rotores y estatores, están diseñados para crear la máxima turbulencia posible, con el fin de entremezclar íntimamente todos los elementos fluidos componentes de la muestra. Se requiere mucha más energía para mantener el régimen turbulento que, simplemente, el laminar, por lo que el torque medido no es en absoluto proporcional a la viscosidad verdadera de la muestra. Permitiendo el flujo turbulento en las medidas de viscosidad se introducirían errores del 50 ó el 100% o, incluso, más [4.4]. Esto explica por qué los primeros reómetros de hormigón, y la mayoría de los existentes, sólo pueden obtener resultados relativos referidos al torque o velocidad de giro del sensor y no a valores absolutos de esfuerzo y viscosidad de la muestra, ya que muchos de ellos toman como base de diseño a mezcladoras industriales [4.7].

- Flujo en régimen estacionario

El esfuerzo de cizalla obtenido tiene el significado del esfuerzo necesario para mantener un cierto nivel de deformación constante en el material (una cierta

tasa de flujo). La energía adicional requerida para acelerar o desacelerar no puede ser tenida en cuenta por la ecuación de Newton, que es la que se utiliza para calcular dicha magnitud.

- No deslizamiento

El esfuerzo de cizalla aplicado debe de ser transmitido desde el elemento móvil de la geometría de medición, a través de la capa límite de líquido, a todo el volumen de muestra. En el caso en el que esa adherencia sea insuficiente para transmitir dicho esfuerzo (la parte móvil de la geometría, normalmente el sensor, desliza o patina sobre la parte no móvil de la muestra) los resultados obtenidos no serán significativos/representativos.

- Muestras homogéneas

Con este requisito se impone que toda la muestra deba reaccionar uniformemente a la cizalla aplicada. Si la muestra es una pasta de cemento o un mortero equivalente, todos los ingredientes, incluido el árido, deben de ser, relativamente hablando, mucho más pequeños que el espesor de material que es cizallado (gap) y deben de estar perfecta y homogéneamente distribuidos.

En reometría es extraño encontrarse con muestras que sean totalmente homogéneas. Aunque la dispersión, pasta o mortero, sea considerada homogénea porque en cada pequeño elemento de volumen de muestra todos sus ingredientes se encuentran sometidos a la misma velocidad de deformación, pueden surgir problemas cuando se incrementa la velocidad de cizalla y se induce algún fenómeno de separación de fases. En tales casos, la muestra se separa en una delgada capa de líquido en las inmediaciones del rotor y el resto de la muestra se convierte en un sólido estancado.

Bajo esas condiciones el flujo viscoso sólo existe en esa pequeña capa de espesor desconocido y el resultado no estará abierto a ningún tipo de interpretación reológica cuando esta separación de fases haya ocurrido. Simplemente, esperando a que el rotor alcance una velocidad nula, no se

reconstruirá el estado inicial de la muestra. Se debe de programar pues un nuevo ensayo con una nueva muestra para parar justo antes de que la velocidad de cizalla alcance ese valor crítico para el que se produce esa separación de fases.

- Sin cambios físicos y químicos durante los ensayos

Cambios debidos a procesos químicos tales como el endurecimiento, curado o degradación de la muestra deben ser evitados en los ensayos reológicos, ya que estos fenómenos suelen tener una influencia directa sobre la viscosidad de la muestra, además de que supone una evolución temporal de la estructura de la misma, por lo que no tendría sentido el análisis posterior de los resultados. Esto debe ser evitado en los ensayos reológicos, salvo en aquellos casos en los que justo esos cambios son el objetivo principal del estudio. Esto supone una de las grandes dificultades en el estudio reológico de materiales cementosos, ya que, el cemento, inmediatamente después de ponerse en contacto con el agua, comienza a reaccionar dando lugar a productos de hidratación que, con el paso del tiempo, le darán al material su aspecto y resistencia características.

Obviamente, cualquier circunstancia que aleje ligeramente las condiciones de experimentación de los requisitos anteriormente enumerados, supondrá una fuente de error o incertidumbre que habrá que trata de eliminar o minimizar lo máximo posible.

Las principales fuentes de error que pueden aparecer durante la medida de las propiedades reológicas de materiales cementosos, además de las mencionadas anteriormente, son [4.21]:

- Errores en la preparación de la muestra, ya sea, o bien pesando mal los constituyentes de la mezcla, o bien no respetando los tiempos establecidos por el protocolo de amasado de cada formulación.
- Geometría utilizada, “gap” utilizado y fricción superficial del sensor de medida.

- Sedimentación de las muestras.
- Cambios químicos en la muestra.

El primer factor que se indica, no tiene nada de especial y está dentro de los errores habituales cuando se manipula cualquier tipo de muestra en un laboratorio. Estableciendo un protocolo fijo para todas las muestras y siendo escrupulosos en su seguimiento, estos problemas pueden ser fácilmente minimizados.

Respecto al segundo factor, los problemas de deslizamiento, utilizando la geometría adecuada con un acabado superficial conveniente, como la geometría de vanos empleada en este trabajo, quedan prácticamente descartados. Aún así, hay que prestar especial cuidado, porque este tipo de error es fuente de discrepancias entre los resultados obtenidos entre distintos autores, aun habiendo utilizado procedimientos y formulaciones muy parecidas [4.22].

La aparición de la sedimentación de partículas sólidas durante el ensayo reológico es función de la viscosidad del líquido, tamaño de partícula, así como de la densidad, forma y fracción en volumen de las mismas. Se constata experimentalmente que los problemas de sedimentación son mayores en geometrías de plato-plato que en las de cilindros concéntricos. La consecuencia de este efecto suele ser un torque menor del esperado, por lo que se obtienen resultados inferiores/rebajados respecto a los correspondientes reales. En el caso de la geometría como la usada, se recomienda que la relación agua/cemento no sea nunca superior a 0,4 para evitar un gradiente de partículas en sentido vertical [4.4].

Por último, una fuente de error importante y que hay que controlar muy bien es el cambio de estructura irreversible que experimentan las muestras debido a las reacciones de hidratación del cemento. Este cambio estructural lleva asociado consigo un progresivo endurecimiento de la muestra, por lo que si los

experimentos tienen una duración muy larga, no sólo puede que la muestra esté muy cambiada, sino que, además, el reómetro encuentre una gran resistencia a la hora de tratar de cizallarla.

Prueba de ello es que si se aplica una velocidad de cizalla constante a una muestra y se observa cómo varía la repuesta en esfuerzo con el tiempo, se puede observar la influencia de cada etapa de la hidratación en la respuesta del material y como este va aumentando progresivamente, tal y como se muestra en la figura 4.5 [4.23].

Se observa que durante la etapa inicial, donde las velocidades de las reacciones incipientes son muy altas haciendo que la muestra se endurezca hasta un cierto nivel en un intervalo muy pequeño de tiempo, el esfuerzo crece rápidamente con el paso del tiempo. Sin embargo, al alcanzar la etapa de latencia o inducción, las velocidades de reacción disminuyen drásticamente, aunque no se hacen nulas, por lo que la variación en la respuesta en esfuerzo del material es muy pequeña. Esto hace que esta etapa sea la ideal para medir las propiedades reológicas de los materiales cementosos. Además, si se procura que la duración de los experimentos sea muy pequeña, aproximadamente de unos 30 minutos como máximo, con respecto a la duración total de esta etapa (≈ 4 horas), se pueden considerar despreciables los efectos de la hidratación [4.24-4.26].

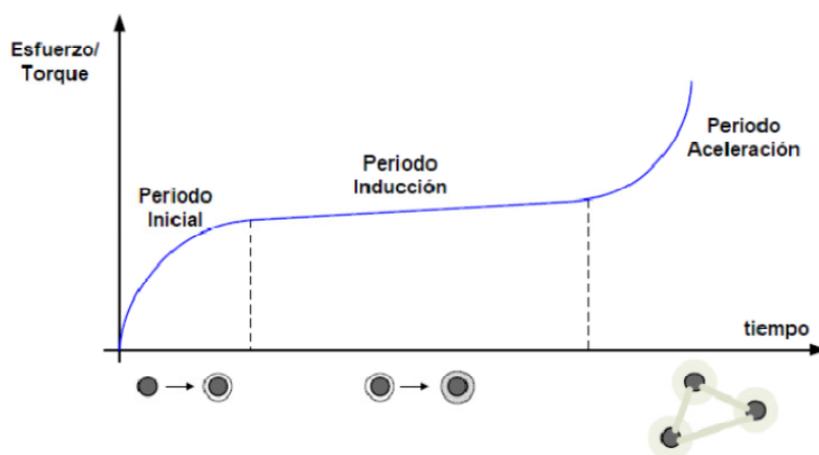


Figura 4.5 Evolución del torque y de la estructura de la muestra con el tiempo
[Fuente: [4.5] Velázquez Navarro]

4.4.2 Rango de velocidades de cizalla

Es importante conocer las velocidades de cizalla representativas de los procesos en los que intervienen este tipo de materiales a la hora de diseñar los ensayos que permitan determinar las propiedades reológicas del material. Hay una diversidad de valores de velocidad de cizalla de interés en el estudio de los materiales cementosos, ya que existen muchas formas de trabajar, bombear y colocar el hormigón. Por ejemplo, si se considera el hormigón fluyendo por un canal desde un camión hormigonera, una operación sencilla y cotidiana a pie de obra, tomando como espesor del hormigón aproximadamente, 0,1m y la velocidad en su superficie, de alrededor de 1m/s, la velocidad de cizalla máxima a la que se verá sometido el material será de alrededor de 10 s^{-1} [4.25]. Pero el material no fluye por el canal con la misma velocidad y, por tanto, con la misma velocidad de cizalla, en toda la sección. Esta será mínima cerca de la superficie inferior de metal del canal y máxima en la superficie libre del hormigón.

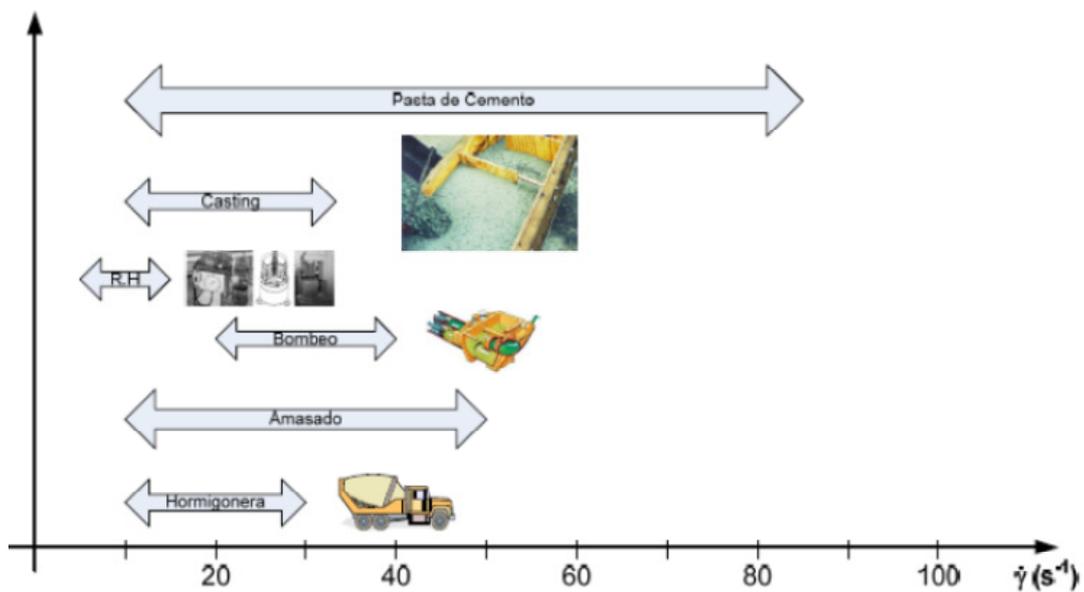


Figura 4.6. Rango de velocidades de cizalla a las que se ve sometido el hormigón
[Fuente: [4.5] Velázquez Navarro]

También hay que tener en cuenta que la velocidad de cizalla a la que se ve sometida la matriz (pasta de cemento) es mucho mayor que la del hormigón fluyendo, ya que aquella se encuentra doblemente cizallada, por un lado, por la propia deformación de flujo y por otro, por la acción de los áridos suspendidos por la matriz. Se estima que la

velocidad de cizalla máxima a la que se ve sometida la pasta de cemento en el hormigón es del orden de $70-80 \text{ s}^{-1}$ durante el mezclado y su colocación [4.27].

Es interesante hacer notar que a velocidades de cizalla muy altas (superiores a los 100 s^{-1}) se producen normalmente inestabilidades de flujo, alejándose el comportamiento del material del régimen laminar exigido por la técnica reométrica. Además, esto genera una estructura interna diferente en el material a la que se tiene cuando este es colocado, que tiene como consecuencia capas con una alta concentración de partículas y, entre ellas, capas que contendrán en mayor parte fase líquida [4.4].

Todos los fenómenos interesantes que afectan a la preparación y puesta en obra del hormigón ocurren a pequeñas velocidades de cizalla. De hecho, la velocidad de deformación estimada que ocurre durante la colocación del hormigón es del orden de 3 a 20 s^{-1} [4.25]. La figura 4.6 recoge las velocidades de cizalla máximas a las que se ve sometido el hormigón durante su vida útil en estado fresco.

A la vista de esto, la velocidad máxima a la que van a ser sometidas las muestras, se fijará en 100 s^{-1} , abarcando así todas las situaciones de flujo a las que se puede ver sometido el material.

4.5 Instrumentos y métodos de medida

4.5.1 Reómetro rotacional

Para la realización de las medidas reológicas con los morteros equivalentes se utiliza un reómetro rotacional Gemini 150 de la firma comercial Malvern Instruments. La ventaja principal de este aparato radica en el bajo momento de inercia del motor, debido a que su eje está suspendido sobre un cojinete de aire comprimido. Este hecho hace que la fricción por transmisión de momento a la muestra sea prácticamente nula. Debido a esta característica es posible medir con precisión a velocidades de deformación muy altas y muy bajas, tanto es así que el rango efectivo de torque aplicado va desde los $0,05 \mu\text{N}\cdot\text{m}$ hasta los $200 \text{ mN}\cdot\text{m}$ [4.14]. Las especificaciones técnicas de este aparato de medida se indican en la tabla 4.1.

Tabla 4.1
Especificaciones técnicas del reómetro Malvern Gemini 150

Parámetros	Mínimo	Máximo
Resolución angular (μrad)	0,05	---
Velocidad angular en modo CR (rpm)	$9,55 \cdot 10^{-5}$	5729,58
Velocidad angular en modo CS (rpm)	$9,55 \cdot 10^{-8}$	5729,58
Par en el eje (N·m)	$5,00 \cdot 10^{-8}$	0,15
Frecuencia de oscilación (Hz)	$1,00 \cdot 10^{-6}$	150

Este dispositivo dispone de tres modos de medida:

- CR: (control rate) que permite controlar la velocidad de giro, o lo que es lo mismo, la velocidad de cizalla aplicada a la muestra.
- CD: (control strain) que permite controlar el ángulo de rotación, es decir, la deformación aplicada.
- CS: (control stress) que controla el momento o torque, es decir el esfuerzo de cizalla aplicado.

Por consiguiente, los ensayos que se pueden realizar con el reómetro son múltiples, entre ellos: curvas de relajación, “creep”, rampas, lazos, curvas de flujo, saltos múltiples, ensayos oscilantes con barridos de frecuencia o amplitud, etc., proporcionando datos con una alta precisión [4.28]. Además, permite controlar la temperatura con gran velocidad y exactitud gracias a un sistema Peltier, cuyo rango efectivo de trabajo es de -20°C a 180°C .

El reómetro posee, básicamente, tres elementos funcionales, como se observa en la figura 4.7:

1. Rotor ajustable en altura con eje de acople de rosca con presilla.
2. Copa de medición, donde se deposita la muestra.

3. Soporte de medición, que es donde se conecta la unidad de control de la temperatura.

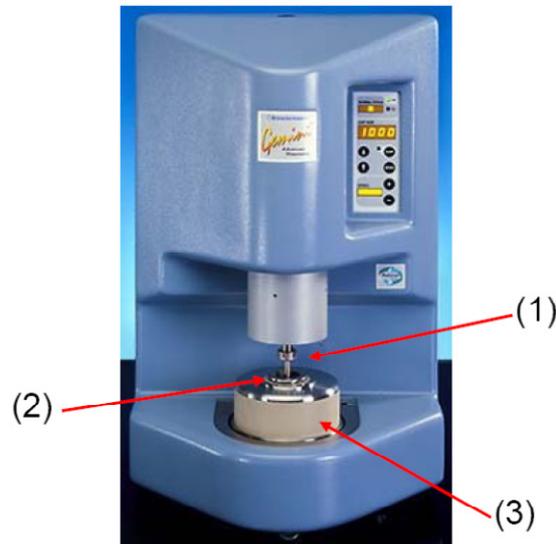


Figura 4.7. Reómetro Malvern Gemini 150 utilizado

Los pasos a seguir para llevar a cabo el proceso de medición de una muestra en el reómetro son:

1. Hacer el cero. Una vez colocada la geometría elegida sobre los soportes correspondientes, el reómetro baja el rotor de vanos (que es el que actúa como sensor de medida en nuestro caso) hasta que toque el fondo de la copa de muestra (que sirve como soporte de la muestra y es el encargado de atemperar el sistema) para determinar así el punto de distancia cero entre ambos elementos. Este punto le sirve de referencia al reómetro para controlar el espaciado con el fondo en todo momento. Este paso debe de hacerse con la presilla de seguridad puesta.
2. Se separan ambos elementos hasta una distancia suficiente que permita colocar la muestra en la copa de medición con comodidad.
3. Una vez colocada la muestra, el aparato va a la posición de medición, acercando el rotor a la copa. Al principio baja con una cierta velocidad, pero

cuando llega a 8 mm de distancia respecto al fondo de la copa disminuye su velocidad hasta 0.1 mm/s y continua hasta alcanzar el espaciado correspondiente a la geometría utilizada siempre y cuando el sistema de control de esfuerzo normal, que mide las tensiones que se producen en dirección perpendicular al plano de medida, no alcance un valor demasiado alto. Entonces espera para medir hasta que dicho esfuerzo normal sea nulo. Esto evita que se destruya la estructura interna del material.

4. Una vez que ha terminado el paso anterior, el reómetro muestra una señal de OK mediante un “led” verde en la consola de mando. Entonces se debe retirar la presilla de seguridad para que el sensor pueda girar libremente.
5. Se procede entonces a ejecutar el protocolo de medida que se haya programado. El software que acompaña al reómetro permite el control del mismo desde un ordenador.
6. Finalmente, se procede al análisis de los resultados obtenidos.

4.5.2 Geometría de vanos

La geometría utilizada para realizar los ensayos reológicos sobre los morteros equivalentes fue la de vanos, cuyas principales características geométricas se muestran en la figura 4.8.

Dicha geometría consta de un eje central al que se la han soldado cuatro vanos. Los vanos poseen un acabado superficial especial, para mejorar las propiedades de adherencia del material del que están contruidos, minimizando así los problemas de deslizamiento que pudieran surgir.

Aunque el reómetro empleado es un reómetro absoluto, no mide directamente ni la velocidad de cizalla ni el esfuerzo. Lo que mide realmente es el torque y la velocidad

angular aplicados y a partir de las siguientes expresiones, se obtienen los valores de los parámetros reológicos absolutos:

$$\tau = C_1 \cdot \text{Torque} \quad (4.18)$$

$$\dot{\gamma} = C_2 \cdot \frac{\text{Velocidad angular}}{C_3} \quad (4.19)$$

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (4.20)$$

Los valores de las constantes C_1 , C_2 y C_3 , que se denominan constantes características de la geometría, se obtienen a través de la calibración de la misma utilizando, para ello, una muestra patrón suministrada por el fabricante. Sus valores se recogen en la tabla 4.2.

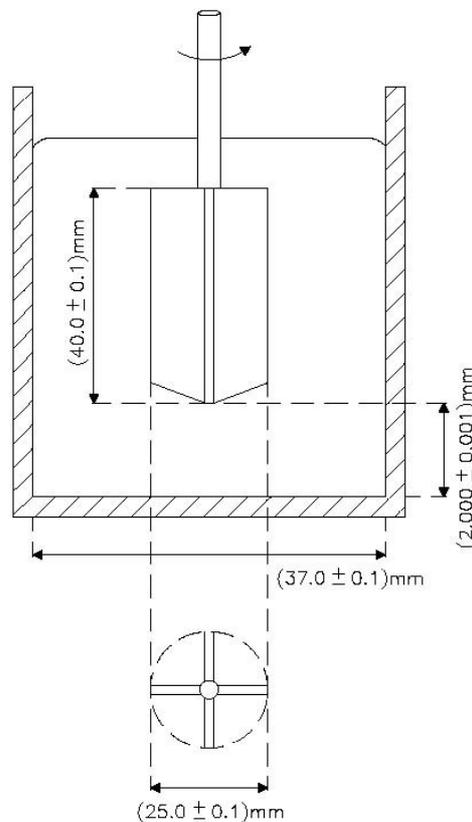


Figura 4.8. Esquema de la geometría de vanos utilizada en los ensayos reométricos

Tabla 4.2

Constantes características de la geometría de vanos empleada en este estudio
[Fuente: Malvern Instruments]

Parámetro	Descripción	Unidades	Valores
C ₁	Factor de conversión entre el torque y el esfuerzo de cizalla	Pa/ N·m	88224
C ₂	Factor de conversión entre la velocidad angular y la velocidad de cizalla	rad ⁻¹	10,452
C ₃	Representa el espaciado con el fondo	mm	2
C ₄	Representa el momento de inercia de la geometría.	kg·m ²	1,3·10 ⁻⁶

El uso de la geometría de vanos para el estudio de las propiedades de materiales cuyo comportamiento se aleja mucho del newtoniano, ha visto incrementada su popularidad en los últimos años [4.29-4.36]. Originalmente, este tipo de geometrías eran usadas para determinar el límite de fluencia aparente de suspensiones coloidales inorgánicas [4.37] pero, actualmente, se utilizan también para medir otros parámetros reológicos. Entre estos, se incluyen los módulos de almacenamiento y pérdida del material, y los resultantes de las curvas de flujo estacionarias de fluidos estructurados. Las ventajas particulares de esta geometría son su facilidad de fabricación, facilidad de limpieza y, sobre todo, la posibilidad de eliminar los indeseables efectos de deslizamiento con la pared. De ahí su éxito y su amplitud de aplicaciones: alimentos, dispersiones coloidales concentradas, materiales cementosos, productos biotecnológicos, etc. [4.38].

Finalmente entre sus principales ventajas, cabe destacar:

1. Además de su capacidad para evitar los efectos de deslizamiento, permite medir muestras que, en geometrías convencionales con paredes lisas, no podrían ser adecuadamente caracterizadas. También ofrece una manera de introducir un sensor de medida (un vano metálico muy delgado) dentro de un líquido estructurado con la mínima cantidad de perturbación de la muestra, haciéndola muy adecuada para materiales como geles, pastas y similares. Con

la introducción de una pared exterior, a veces rugosa, o adecuadamente modificadas, la geometría de vanos es también muy útil como una manera general de realizar medidas de viscosidad en líquidos muy difíciles, especialmente combinada con reómetros de esfuerzo controlado de última generación.

2. Permite medir dispersiones con tamaños de partículas relativamente grandes, así como muestras con estructuras tridimensionales, como por ejemplo, polímeros fundidos, pastas de cemento, elastómeros, geles, etc.
3. Fácil de limpiar después de cada test.
4. Requiere de una cantidad relativamente pequeña de muestra.

Por otra parte, sus principales inconvenientes son:

1. Debido a que el extremo superior de la muestra se encuentra expuesto a la atmósfera, se puede formar costra exterior endurecida de muestra, creando así una resistencia adicional que puede falsear los resultados obtenidos.
2. Si se agranda el espaciado con el fondo demasiado puede ocurrir que aparezca un gradiente de temperatura, por lo que no sería constante en todo el volumen de muestra.



Figura 4.9. Geometría de vanos utilizada en este estudio

4.5.3 Agitador de laboratorio

Se utilizó una mezcladora RZR1 de Heidolph Instruments (Alemania) con paletas de agitación. Este dispositivo dispone además de una reductora y de un selector de velocidades para escoger la velocidad deseada dentro de dos rangos distintos, uno de baja velocidad (de 50rpm a 120rpm) y otro de alta velocidad (de 100 a 2000 rpm.).

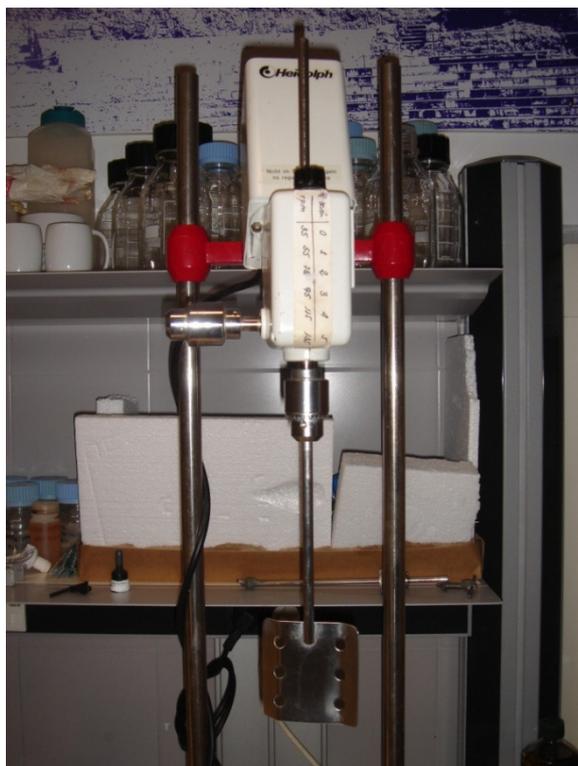


Figura 4.10. Mezcladora con paletas de agitación

4.5.4 Otros aparatos utilizados

También merecen ser citados, aunque sólo sea de pasada, todos aquellos aparatos que fueron utilizados para la preparación de las muestras y que son comunes de cualquier laboratorio. Entre ellos:

1. Balanzas
2. Pipetas
3. Matraces aforados

4.6 Diseño del mortero equivalente

4.6.1 Fundamentos

La metodología para el diseño de un mortero equivalente, a partir de una determinada composición de hormigón, se fundamenta en obtener un mortero cuyas propiedades reológicas tengan una correlación directa con el hormigón de referencia [4.5, 4.39, 4.40].

Schwartzentruber y Catherine [4.39] diseñaron un mortero equivalente al hormigón basándose en dos hipótesis:

1. Se supone que los productos de hidratación se forman principalmente en la interfase pasta de cemento/agregados.
2. Todos los fenómenos de fricción tienen lugar en dicha interfase, por lo que desde un punto de vista reológico, el área específica total de los agregados es la variable fundamental para comprender el nivel de docilidad del hormigón.

Para obtener el mortero equivalente, el árido grueso del hormigón es sustituido por arena de granulometría 0/1, en cantidad suficiente como para desarrollar el mismo área específica que en el caso de referencia. La curva granulométrica resultante se reduce, pero la distancia intergranular media aumenta. Como el tamaño de partícula de la arena es menor que el de las gravas y demás áridos gruesos, la cantidad total de árido necesaria es menor. Consecuencia de esto: la inercia química del mortero equivalente suele ser menor que la del hormigón correspondiente, lo que supone otra ventaja de este método, dado que de esta forma el período de inducción será más largo y, por consiguiente, la vida útil de las muestras mayor [4.41].

La relación directa entre las propiedades reológicas y mecánicas del mortero equivalente, y las del hormigón de referencia, se consiguen manteniendo unas condiciones específicas determinadas. Los condicionantes que se han de cumplir en todo momento son los siguientes [4.40]:

1. Se mantendrán los orígenes y las proporciones del cemento y los áridos.

2. La relación efectiva agua/cemento será idéntica.
3. Igual proporción de aditivos y método de mezcla.
4. Se utilizará la cantidad necesaria de áridos finos para obtener una superficie específica igual a la superficie total del árido grueso y así de esta forma poder sustituir este último en base a la proporción en el hormigón de referencia.

De acuerdo con las condiciones anteriores, existen dos puntos críticos en el diseño. El primero de ellos es el cálculo de las superficies específicas de los áridos presentes en el hormigón de referencia. La segunda correspondería a determinar la cantidad de agua en base a la relación agua/cemento.

Debido al tipo de reómetro utilizado en los ensayos, la granulometría de los morteros equivalentes será 0/1, es decir, ninguno de los áridos empleados en su fabricación debe de tener una granulometría superior a 1 mm. Esto conlleva al tamizado de los áridos, desechando todas las partículas que queden retenidas en el tamiz de 1 mm.

Como se definió en el capítulo 3, correspondiente al diseño de los hormigones de esta tesis doctoral, se emplean tres tipos de áridos; fino, intermedio y grueso, todos ellos de naturaleza caliza, además de escoria de cobre. El árido intermedio y el árido grueso proceden de la misma cantera, no ocurriendo lo mismo con el árido fino y la escoria de cobre. Esta singularidad en la procedencia hace que tengamos tantas sustituciones como orígenes distintos en los materiales. En nuestro caso se tienen tres orígenes distintos; dos canteras diferentes y origen industrial.

Tamizado el árido fino 0/2, el árido intermedio 0/4 y la escoria de cobre 0/2, y eliminadas las fracciones superiores a 1 mm, se procederá al cálculo de las densidades y coeficientes de absorción de cada uno de ellos.

4.6.2 Granulometría 0/1 de áridos y escoria de cobre

A la vista del apartado anterior, el mortero equivalente a diseñar estará formado por dos tipos de áridos, además de por escoria de cobre en el caso de que se proceda a la sustitución del árido fino. Se recuerda que los áridos grueso e intermedio no intervienen como tal en el diseño del mortero equivalente, dado que son sustituidos por el árido fino de su misma naturaleza, de forma que la cantidad de árido fino añadida tendrá una superficie específica igual a la superficie total de los áridos grueso e intermedio.

En consecuencia se han definido dos nuevos áridos 0/1 y escoria de cobre 0/1. En la tabla 4.3 se han definido el origen y la nomenclatura asignada a cada uno de los áridos necesarios para la dosificación del mortero equivalente.

Tabla 4.3
Nomenclatura áridos 0/1

Nomenclatura	Origen por tamizado
Árido fino 0/1	Árido fino 0/2
Árido intermedio 0/1	Árido intermedio 0/4
Escoria de cobre 0/1	Escoria de cobre 0/2

Siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 3.2 del capítulo 3, se obtienen las granulometrías de los áridos 0/1 y de la escoria de cobre 0/1. Debido a que se realiza una sustitución en volumen del árido fino por la escoria de cobre, la granulometría de de ambos materiales debe ser idéntica para que no se produzcan cambios en la dosificación de los morteros y hormigones, dosificaciones, que en todo momento, se fundamentan en el estudio granulométrico de los áridos.

En las tablas 4.4 y 4.5 se indican las granulometrías de los áridos y de la escoria de cobre empleada en el diseño del mortero equivalente.

De la misma forma en la figura 4.11 se representan las curvas granulométricas de dichos materiales. En dicha figura se observa como el árido fino 0/1 y la escoria de cobre 0/1 poseen la misma granulometría. El proceso seguido para el encaje de la

granulometría de ambos materiales ha sido el mismo que el descrito en el apartado 3.3 del capítulo 3.

Tabla 4.4
Granulometría del árido fino 0/1 y la escoria de cobre 0/1

Tamiz serie UNE (mm)	Retenido Parcial (g)	Retenido %		Pasa acumulado %
		Parcial	Acumulado	
1	0,0	0,00	0,00	100,00
0,50	192,8	19,28	19,28	80,72
0,25	291,6	29,16	48,43	51,57
0,125	331,3	33,13	81,57	18,43
0,063	166,0	16,60	98,17	1,83
Fondo	18,30	1,83	100,00	0,00
TOTAL	1000,0			

Tabla 4.5
Granulometría del árido intermedio 0/1

Tamiz serie UNE (mm)	Retenido Parcial (g)	Retenido %		Pasa acumulado %
		Parcial	Acumulado	
1	0,0	0,00	0,00	100,00
0,50	544,0	54,40	54,40	45,60
0,25	261,7	26,17	80,57	19,43
0,125	134,8	13,48	94,05	5,95
0,063	31,7	3,17	97,22	2,78
Fondo	27,8	2,78	100	0,00
TOTAL	1000,0			

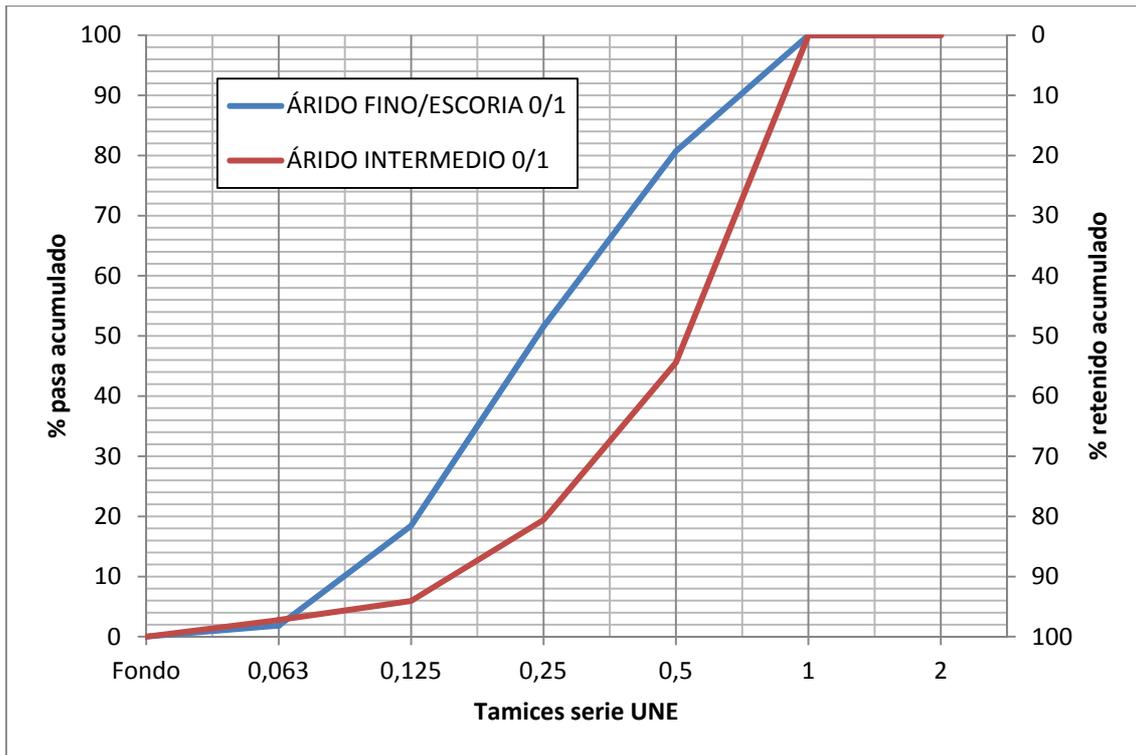


Figura 4.11. Curva granulométrica de los áridos 0/1 y escoria de cobre 0/1

4.6.3 Densidad y absorción de los áridos 0/1 y escoria 0/1

Para determinar la densidad y la absorción de los áridos 0/1 y de la escoria de cobre 0/1, se ha seguido el mismo procedimiento descrito en el apartado 3.4 del capítulo 3. Los valores de densidad y absorción de los materiales indicados se representan en la tabla 4.6.

Tabla 4.6
Densidad y absorción de los áridos 0/1 y escoria de cobre 0/1

Material	Densidad (kg/dm ³)	Absorción (%)
Árido fino 0/1	2,69	0,05
Árido intermedio 0/1	2,63	0,10
Escoria de cobre 0/1	3,77	0,05

4.6.4 Superficie específica de los áridos 0/1 y escoria 0/1

Previamente a la dosificación del mortero equivalente se necesitan conocer las superficies específicas de todos y cada uno de los áridos que componen el hormigón,

así como la de los áridos 0/1. De la misma forma se ha de determinar la superficie específica de la escoria de cobre 0/2 y 0/1, al ser esta la que sustituye al árido fino en los hormigones que de esa forma se diseñen.

El procedimiento para determinar la superficie específica de un árido se indica a continuación [4.40]:

1. Cálculo de la densidad del árido.
2. Cálculo del diámetro de partícula equivalente, D, de cada tamiz. Este será la media del tamaño de dos tamices consecutivos, excepto para el primer y último tamiz de la serie, que serán 0,063/2 y 250 mm, respectivamente.
3. Cálculo del volumen porcentual ocupado por las partículas de cada uno de los diámetros equivalentes. Estos valores coincidirán con los porcentajes retenidos de cada tamiz.
4. Cálculo del número de partículas por kilogramo de árido. La formulación aplicada es la siguiente:

$$N = \frac{\text{Volumen total}}{\text{Volumen partícula}} = \frac{1}{\frac{\text{densidad árido}}{\frac{4}{3}\pi \left(\frac{\text{Diámetro equivalente de partícula}}{2}\right)^3}} \quad (4.21)$$

5. Cálculo de la superficie específica correspondiente a cada tamaño de partícula. El valor se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$S = N \pi D^2 \quad (4.22)$$

6. La suma de la superficie ponderada para cada tamaño de partícula, será finalmente la superficie ponderada del árido. Las unidades serán m²/kg.

Operando de la forma anteriormente descrita, se desarrolla en la tabla 4.7 el cálculo de la superficie específica del árido fino 0/2.

Siguiendo el mismo procedimiento anterior, en la tabla 4.8 se indican las superficies específicas de los áridos y la escoria de cobre, partícipes en el diseño del mortero equivalente.

Tabla 4.7

Cálculo de la superficie específica del árido fino 0/2

Tamiz (mm)	Retenido parcial (g)	Retenido Parcial %	Diámetro equivalente	volumen %	Número partículas, N	Sup. (m ²)	Superficie específica (m ² /kg)
<0,063	15,2	1,52	0,0315	1,52	22464709777	70,03	1,06
0,063	137,8	13,78	0,094	13,78	845374051	23,47	3,23
0,125	275,0	27,50	0,1875	27,50	106519387	11,76	3,24
0,25	242,0	24,20	0,375	24,20	13314923	5,88	1,42
0,5	160,0	16,00	0,75	16,00	1664365	2,94	0,47
1	140,0	14,00	1,5	14,00	208046	1,47	0,21
2	30,00	3,00	3	3,00	26006	0,74	0,02
4	0,00	0,00	6	0,00	3251	0,37	0,00
8	0,00	0,00	12	0,00	406	0,18	0,00
16	0,00	0,00	18	0,00	120	0,12	0,00
20	0,00	0,00	26	0,00	40	0,08	0,00
32	0,00	0,00	36	0,00	15	0,06	0,00
40	0,00	0,00	82,5	0,00	1	0,03	0,00
125	0,00	0,00	187,5	0,00	0	0,01	0,00
250	0,00	0,00	250	0,00	0	0,01	0,00
TOTAL	1000,0					SUMA	9,66

DENSIDAD: 2,72 Kg/dm³

Tabla 4.8

Superficies específicas de los áridos y la escoria de cobre

Material	Sup. Específica (m ² /kg)
Árido fino 0/2	9,66
Árido intermedio 0/4	2,68
Árido grueso 4/16	0,29
Escoria de cobre 0/2	7,02
Árido fino 0/1	11,49
Árido intermedio 0/1	7,67
Escoria de cobre 0/1	8,20

4.6.5 Nomenclatura

La nomenclatura que reciben los morteros equivalentes se propone en función del porcentaje de escoria que poseen. En la tabla 4.9 se indica la nomenclatura de cada uno de los morteros empleados así como los porcentajes de escoria y árido fino sustituido.

Tabla 4.9

Nomenclatura y porcentaje de escoria de cobre en los morteros equivalentes

Nomenclatura mortero equivalente	Hormigón de referencia	Escoria de cobre, %	Árido fino, %
MEQ-0	HSA	0	100
MEQ-20	HEC-20	20	80
MEQ-40	HEC-40	40	60
MEQ-60	HEC-60	60	40
MEQ-80	HEC-80	80	20
MEQ-100	HEC-100	100	0

4.6.6 Formulación

El fundamento del diseño del mortero equivalente radica en sustituir todos los áridos de la misma naturaleza por arena de granulometría 0/1. En nuestro caso y como bien se ha descrito anteriormente, los hormigones estudiados en esta tesis doctoral están compuestos de tres áridos, de los cuales, el árido intermedio y grueso pertenecen a una misma cantera, no ocurriendo lo mismo con el árido fino, el cual pertenece a otra distinta, y a la escoria de cobre, cuyo origen es metalúrgico.

Debido a ello tendremos dos masas de arena 0/1 que sustituya a los áridos, es decir, la arena₁ 0/1 calculada con la masa de árido fino 0/2, y otra arena₂ 0/1 calculada con la masa del árido intermedio 0/4 y árido grueso 4/16, así como la escoria 0/1 calculada con la masa de escoria de cobre que sustituya al árido fino.

En consecuencia los pasos y la formulación empleada para el cálculo del mortero equivalente serán los siguientes:

1. Cálculo de la masa húmeda de arena 0/1 que reemplaza a los áridos

Si llamamos $M_{0/1}$, a la masa de arena₁ 0/1 que corresponde a la sustitución del árido fino 0/2, y $M'_{0/1}$, a la masa de arena₂ 0/1 que corresponde a la sustitución del árido intermedio 0/4 y el árido grueso 4/16, la formulación que determina dichas masas son:

$$M_{0/1} = \frac{M_{0/2} \cdot S_{0/2}}{S_{0/1}} \quad (4.23)$$

$$M'_{0/1} = \frac{M_{0/4} \cdot S_{0/4} + M_{4/16} \cdot S_{4/16}}{S'_{0/1}} \quad (4.24)$$

donde $M_{0/2}$, $M_{0/4}$ y $M_{4/16}$ son las masas de árido fino, intermedio y grueso respectivamente en el hormigón de referencia, así como $S_{0/2}$, $S_{0/4}$ y $S_{4/16}$ sus superficies específicas. Las superficies específicas $S_{0/1}$ y $S'_{0/1}$ corresponden a cada una de las arenas 0/1.

Por otro lado si llamamos $E_{0/1}$ a la masa de escoria de cobre 0/1 que corresponde al reemplazo de la escoria de cobre 0/2, dicha masa sería:

$$E_{0/1} = \frac{E_{0/2} \cdot SE_{0/2}}{SE_{0/1}} \quad (4.25)$$

donde $E_{0/2}$, es la masa de escoria de cobre 0/2 en el hormigón de referencia, así como $SE_{0/2}$, su superficie específica. La superficie específica $SE_{0/1}$ corresponde a la escoria de cobre de granulometría 0/1.

2. Cálculo de la masa seca de las arenas 0/1

Las masas secas de las diferentes arenas 0/1 y de la escoria de cobre 0/1, se determinarán mediante el coeficiente de absorción de cada uno de ellos, los cuales se indicaron en la tabla 4.6. La formulación sería:

$$M_{\text{seca } 0/1} = \frac{M_{0/1}}{1 + \frac{CA}{100}} \quad (4.26)$$

$$M'_{\text{seca } 0/1} = \frac{M'_{0/1}}{1 + \frac{CA'}{100}} \quad (4.27)$$

$$E_{\text{seca } 0/1} = \frac{E_{0/1}}{1 + \frac{CA_{\text{escoria } 0/1}}{100}} \quad (4.28)$$

3. Cálculo de la masa de agua

La cantidad de agua necesaria en el mortero equivalente será la suma de tres factores. El primero de ellos corresponde al agua eficaz, que la definiremos como aquella cantidad de agua necesaria para hidratar el cemento. Se ha de prestar especial atención al cálculo de esta masa de agua dado que la relación agua/cemento indicada en los hormigones y según el artículo 71.3.2.4 de la instrucción de hormigón estructural EHE-08 [4.42], no solamente indica el agua que hidrata al cemento, sino que, además, incluye el agua absorbida por los áridos y la aportada por los aditivos. Esto conlleva a que las relaciones agua/cemento eficaces en los hormigones son inferiores a las realmente indicadas.

La formulación utilizada para calcular el agua a emplear en el mortero equivalente viene determinada por la siguiente expresión:

$$M_{\text{agua}} = M_{\text{agua eficaz a/c}} + M_{\text{agua ab. áridos}} + M_{\text{agua ab. escoria}} - M_{\text{agua aditivo}} \quad (4.29)$$

Cada término se calcula como sigue:

$$M_{\text{agua eficaz a/c}} = \frac{\bar{w}}{c} \cdot M_{\text{cemento}} \quad (4.30)$$

$$M_{\text{agua absorbida áridos}} = M_{\text{seca 0/1}} \cdot \frac{CA}{100} + M'_{\text{seca 0/1}} \cdot \frac{CA'}{100} \quad (4.31)$$

$$M_{\text{agua absorbida escoria}} = E_{\text{seca 0/1}} \cdot \frac{CA_{\text{escoria 0/1}}}{100} \quad (4.32)$$

$$M_{\text{agua aditivo}} = M_{\text{aditivo}} \cdot \frac{100 - \% \text{ Residuo seco}}{100} \quad (4.33)$$

4.6.7 Dosificación y preparación del mortero equivalente de referencia

Una vez descrito el procedimiento necesario para obtener el mortero equivalente, se procederá a dosificar el mortero de referencia y a describir su protocolo de fabricación. Para ello se necesita conocer la dosificación del hormigón de referencia, la cual se calculó en el capítulo 3 y se indica a continuación en la tabla 4.10.

Tabla 4.10
Dosificación del hormigón de referencia por m³

Material	Cantidad	Unidad
Cemento	375,00	kg
Superplastificante, 1,3% s.p.c	4,68	L
Agua de amasado	164,77	L
Agua total (amasado+aditivo)	168,75	L
Relación agua/cemento	0,45	---
Aire ocluido	2,31	L
Árido fino 0/2	361,00	kg
Árido intermedio 0/4	605,60	kg
Árido grueso 4/16	882,67	kg

Dado que se parte de áridos totalmente secos, no se tienen en cuenta las expresiones 4.26, 4.27 y 4.28, al obtenerse directamente las masas secas de los áridos 0/1. En

consecuencia, la formulación aplicada para obtener la masa de los áridos y la escoria de cobre vendrán definidas por las expresiones 4.23, 4.24 y 4.25, es decir:

$$M_{0/1} = \frac{M_{0/2} \cdot S_{0/2}}{S_{0/1}} = \frac{361,00 \cdot 9,66}{11,49} = 303,50 \text{ kg}$$

$$M'_{0/1} = \frac{M_{0/4} \cdot S_{0/4} + M_{4/16} \cdot S_{4/16}}{S'_{0/1}} = \frac{605,60 \cdot 2,68 + 882,67 \cdot 0,29}{7,67} = 244,98 \text{ kg}$$

$$E_{0/1} = \frac{E_{0/2} \cdot SE_{0/2}}{SE_{0/1}} = 0$$

$$M_{\text{agua según a/c}} = \frac{a}{c} \cdot M_{\text{cemento}} = 0,45 \cdot 375,00 = 168,75 \text{ L}$$

$$M_{\text{agua absorbida áridos}} = M_{\text{seca } 0/1} \cdot \frac{CA}{100} + M'_{\text{seca } 0/1} \cdot \frac{CA'}{100} = 0,397 \text{ L}$$

$$M_{\text{agua aditivo}} = M_{\text{aditivo}} \cdot \frac{100 - \text{Residuo seco}}{100} = 3,98 \text{ L}$$

$$M_{\text{agua}} = M_{\text{agua según a/c}} + M_{\text{agua ab. áridos}} + M_{\text{agua ab. escoria}} - M_{\text{agua aditivo}} = 165,17 \text{ L}$$

De esta forma el mortero equivalente de referencia utilizado en este trabajo sería el que se indica en la tabla 4.11.

Para los ensayos del mortero equivalente se necesita un volumen de 300 mL, por lo que la dosificación para esta cantidad se refleja en la tabla 4.12.

Tabla 4.11

Dosificación del mortero equivalente de referencia por m³

Material	Cantidad	Unidad
Cemento	375,00	kg
Superplastificante, 1,3% s.p.c	4,88	kg
Agua de amasado	165,17	L
Árido M _{0/1}	303,50	kg
Árido M' _{0/1}	244,98	kg

Tabla 4.12

Dosificación del mortero equivalente de referencia para 300 mL

Material	Cantidad	Unidad
Cemento	112,50	g
Superplastificante	1,46	g
Agua de amasado	49,55	mL
Árido M _{0/1}	91,05	g
Árido M' _{0/1}	73,49	g

El protocolo de preparación del mortero equivalente ha sido el siguiente:

1. Se mezclan los áridos 0/1. Tiempo 30 s.
2. Se añade el 50% del agua total y se mezcla. Tiempo 60 s.
3. Reposo para la hidratación de la mezcla. Tiempo 60 s.
4. Se añade el cemento, procediendo al mezclado. Tiempo 30 s.
5. Sin parar el procedimiento de mezclado anterior, se incorpora el resto del agua y el superplastificante. Tiempo 180 s.

El tiempo total de amasado ha sido de 6 minutos.

4.6.8 Morteros equivalentes con sustitución del árido fino por escoria de cobre

Una vez obtenida la dosificación del mortero equivalente de referencia en base a la dosificación del hormigón, se calculan las dosificaciones de los distintos morteros equivalentes que serán objeto de análisis en esta tesis doctoral.

Los morteros equivalentes a estudiar serán los resultantes de realizar en el hormigón de referencia una sustitución en volumen del árido fino 0/2 por escoria de cobre 0/2 en distintos porcentajes. El resto de los componentes; esto es, árido intermedio 0/4, árido grueso 4/16, cemento, agua, relación agua/cemento y porcentaje de aditivo superplastificante se mantienen invariantes.

Al igual que ocurría con los hormigones, las sustituciones en volumen para el mortero equivalente se realizarán en los siguientes porcentajes de árido fino: 0, 20, 40, 60, 80 y 100%.

Siguiendo el mismo procedimiento de dosificación descrito en apartados anteriores, las dosificaciones de los distintos morteros equivalentes quedan como se indican en la tabla 4.13.

Tabla 4.13
Dosificación de los distintos morteros equivalentes empleados por m³

Material	TIPOLOGÍA DE MORTEROS EQUIVALENTES EMPLEADOS						Ud.
	MEQ-0	MEQ-20	MEQ-40	MEQ-60	MEQ-80	MEQ-100	
Cemento	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	kg
Superplastificante	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	kg
Agua de amasado	165,17	165,17	165,17	165,17	165,17	165,17	L
Masa arena ₁ 0/1	303,50	242,80	182,10	121,40	60,70	0,00	kg
Masa escoria cobre 0/1	0,00	84,95	169,89	254,84	339,79	424,73	kg
Masa arena ₂ 0/1	244,98	244,98	244,98	244,98	244,98	244,98	kg

El tiempo de preparación y la cantidad de muestra son idénticos a los indicados anteriormente, es decir, 6 minutos y 300 mL respectivamente.

Tabla 4.14

Dosificación de los distintos morteros equivalentes empleados para muestras de 300 mL

Material	TIPOLOGÍA DE MORTEROS EQUIVALENTES EMPLEADOS						Ud.
	MEQ-0	MEQ-20	MEQ-40	MEQ-60	MEQ-80	MEQ-100	
Cemento	112,50	112,50	112,50	112,50	112,50	112,50	g
Superplasti- ficante	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	g
Agua de amasado	49,55	49,55	49,55	49,55	49,55	49,55	mL
Masa arena ₁ 0/1	91,05	72,84	54,63	36,42	18,21	0,00	g
Masa escoria cobre 0/1	0,00	25,49	50,97	76,45	101,94	127,42	g
Masa arena ₂ 0/1	73,49	73,49	73,49	73,49	73,49	73,49	g

4.7 Ensayo de asentamiento del hormigón

4.7.1 Introducción

El ensayo de asentamiento consiste en determinar la consistencia de un hormigón fresco por medio del cono de Abrams. Este ensayo es un medio de control muy útil debido a que permite detectar fácilmente cambios entre masas, bien sean debidos a variaciones de agua de amasado, en humedad de los áridos e incluso en la granulometría de estos, especialmente en las arenas, siendo, por consiguiente, un ensayo que permite verificar la regularidad del material. Con áridos de cantos rodados el cono es muy sensible y da un índice excelente de la cantidad de agua de amasado.

El cono de Abrams da resultados poco indicativos en el caso de hormigones con asientos inferiores a 1 cm, en los excesivamente fluidos y en los reforzados con fibras; su sensibilidad es menor en hormigones de áridos machacados que en los de áridos de cantos rodados.

La instrucción de hormigón estructural EHE-08 [4.42] en su artículo 31.5, define las distintas consistencias y los valores límite del asentamiento en el cono de Abrams, según se indica en la tabla 4.15. Igualmente dicha instrucción, en su artículo 86.5.2, define las tolerancias permitidas en la medida de los asentamientos para cada tipo de consistencia. Este margen en los intervalos que definen los asentamientos en el cono de Abrams asegura una mayor flexibilidad a la hora de fijar la cantidad de agua y superplastificante en el hormigón.

Si bien en el diseño original de los hormigones desarrollados en esta tesis doctoral, la consistencia prevista era blanda, y debido a que en las pruebas realizadas se obtenían hormigones, a nuestro juicio, muy secos cuando se sustituía la totalidad del árido fino por la escoria de cobre, se optó por aumentar la consistencia a fluída para el hormigón de referencia y de esta forma obtener hormigones más trabajables.

Tabla 4.15

Tipos de consistencia y tolerancias
[Fuente: EHE-08 artículos 31.5 y 86.5.2]

Tipo de consistencia	Asentamiento (cm)	Tolerancias (cm)	Intervalo (cm)
Seca (S)	0-2	0	0-2
Plástica (P)	3-5	±1	2-6
Blanda (B)	6-9	±1	5-10
Fluída (F)	10-15	±2	8-17
Líquida (L)	16-20	±2	14-22

4.7.2 Proceso de elaboración del ensayo

El objetivo del ensayo es determinar la consistencia de un hormigón en estado fresco mediante el ensayo de asentamiento, según la norma UNE-EN 12350-2:2009 [4.43].

La medida del cono de Abrams indica la docilidad del hormigón, es decir, la trabajabilidad de este en estado fresco.

En este ensayo el hormigón se coloca en un molde metálico troncocónico de 30 cm de altura y 10 y 20 cm de diámetro, superior e inferior respectivamente. El hormigón se

vierte en tres capas que se compactan mediante 25 golpes efectuados con una barra de 16 mm de diámetro terminada en una punta cónica rematada por un casquete esférico. Antes de llenar el molde es preciso humedecerlo interiormente para evitar el rozamiento del hormigón con la superficie del mismo. Durante la operación de llenado y picado con la barra, el molde debe mantenerse fuertemente apoyado contra una base plana lográndose esto por medio de unos soportes adosados al molde y sobre los que se apoyan los pies del personal que realiza el ensayo.

Una vez lleno y enrasada la cara superior del hormigón se eleva el molde verticalmente y con precaución, midiéndose el descenso experimentado por la cara superior del mismo. Si este desciende de una forma uniforme se tiene un cono válido, pero hay veces en que la mitad del cono desliza a lo largo de un plano inclinado obteniéndose un asiento oblicuo provocado por una deformación por cortante; en este caso debe repetirse el ensayo. En el caso de los hormigones ensayados todos los conos obtenidos fueron válidos no observándose deformaciones por cortante.

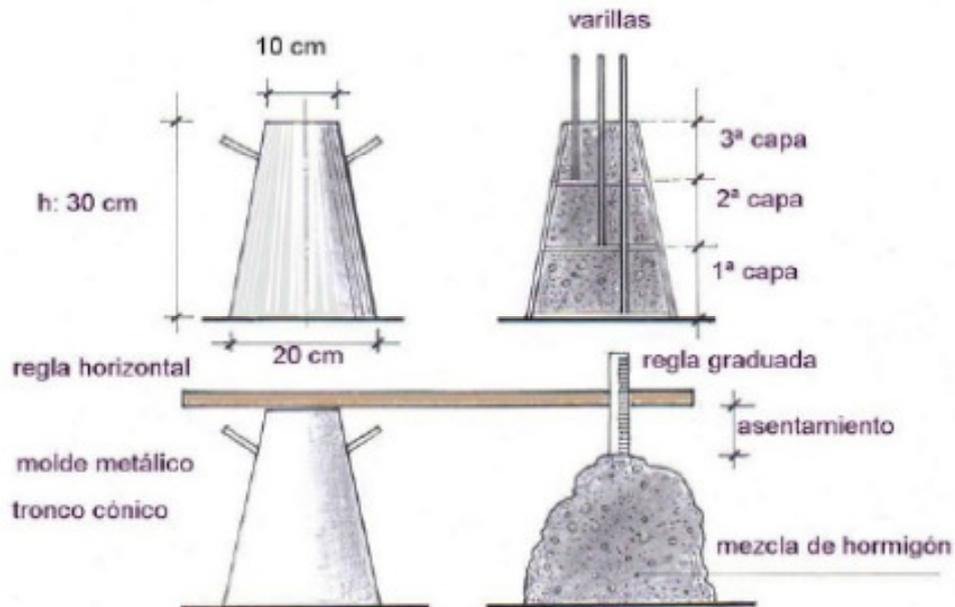


Figura 4.12. Ensayo completo del Cono de Abrams
[Fuente: Centro de Investigaciones viales LEMaC]

4.7.3 Resultados y discusión

En la tabla 4.16 se detallan los valores obtenidos del asentamiento, así como el tipo de consistencia para cada uno de los hormigones elaborados.

Tabla 4.16
Resultados del ensayo del cono de Abrams

Tipología hormigón	Asentamiento (cm)	Consistencia
HSA	19	Líquida
HEC-20	19	Líquida
HEC-40	18	Líquida
HEC-60	16	Fluida
HEC-80	14	Fluida
HEC-100	12	Fluida



Figura 4.13. Resultado del cono de de Abrams para el hormigón tipo HSA

A raíz de los resultados obtenidos, se observa una ligera disminución del asentamiento a medida que se aumenta el porcentaje de escoria de cobre en el hormigón, es decir, a

medida que se incrementa el porcentaje de escoria se obtienen hormigones menos dóciles; disminuye su trabajabilidad.

Uno de los factores más importantes que afectan a la trabajabilidad del hormigón es el contenido de agua. En un primer momento parece lógico pensar que la disminución de la docilidad estaría motivada por una mayor absorción de agua por parte de la escoria o un aumento de la superficie específica de esta. Sin embargo esta hipótesis queda descartada debido a que el coeficiente de absorción de la escoria de cobre y del árido fino, en este caso son idénticas, además de que la superficie específica de la escoria de cobre es menor que la de la arena y por lo tanto la superficie a mojar resulta menor.

Para explicar este comportamiento es necesario conocer la geometría y textura de las partículas de árido fino y la escoria de cobre. Para ello en las figuras 4.14 a 4.17 se representa la microscopía electrónica de las partículas de ambos materiales. En ellas se observa que las partículas de árido fino son de geometría cúbica/prismática y con bordes muy angulosos. Sin embargo la escoria de cobre presenta una geometría de partículas con formas más redondeadas y sus bordes no son tan angulosos como es el caso del árido fino. Igualmente las partículas de escoria de cobre tendrían una textura superficial más rugosa que el árido fino, el cual presenta una textura superficial más lisa.

En un principio puede pensarse que cuanto mayor sea la concentración de escorias de cobre en el hormigón mayor será la trabajabilidad debido a la geometría más redondeada de la escoria de cobre que funciona como verdaderos rodamientos dentro de la masa del hormigón en estado fresco. Lo observado demuestra que esto no ocurre así y a medida que aumenta la concentración de escorias se obtienen hormigones menos trabajables.

Parece razonable que la pérdida de trabajabilidad, o disminución de la docilidad, estará motivada posiblemente por la textura superficial de las partículas. Los granos de árido fino al tener una textura superficial más lisa, lo que implica que existe menor rozamiento interno con el resto de elementos dentro del hormigón en estado fresco, mejoran su trabajabilidad. La textura superficial del grano de escoria de cobre al ser

más rugosa produce una mayor fricción con el resto de las partículas sólidas de la mezcla, reduciendo de esta forma la deformabilidad del hormigón en estado fresco.

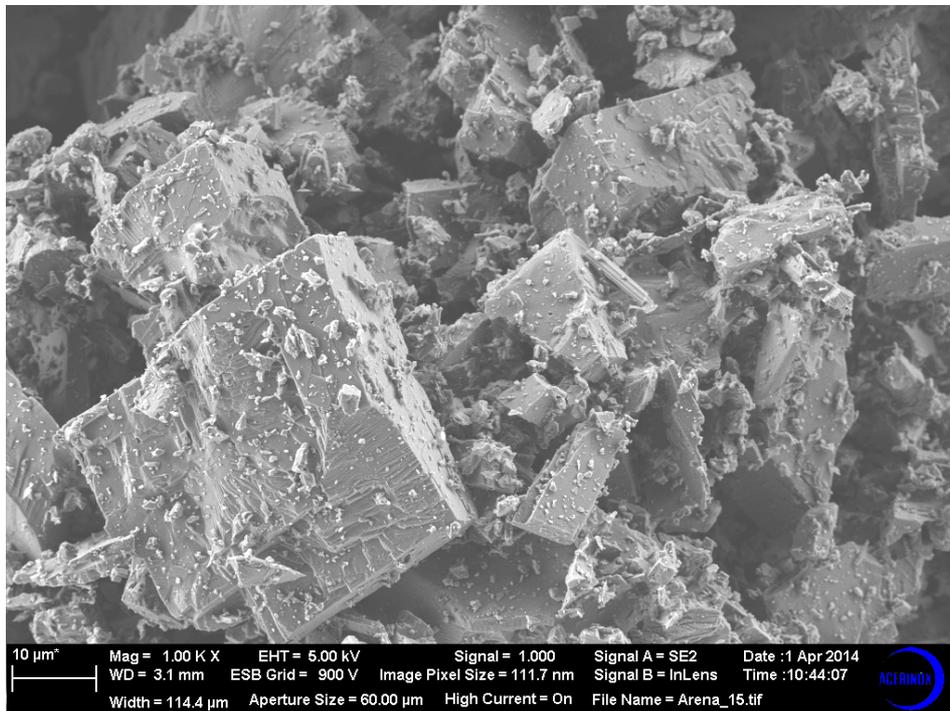


Figura 4.14. Microscopía electrónica de las partículas de árido fino
[Fuente: Laboratorio de Control de Calidad. ACERINOX]

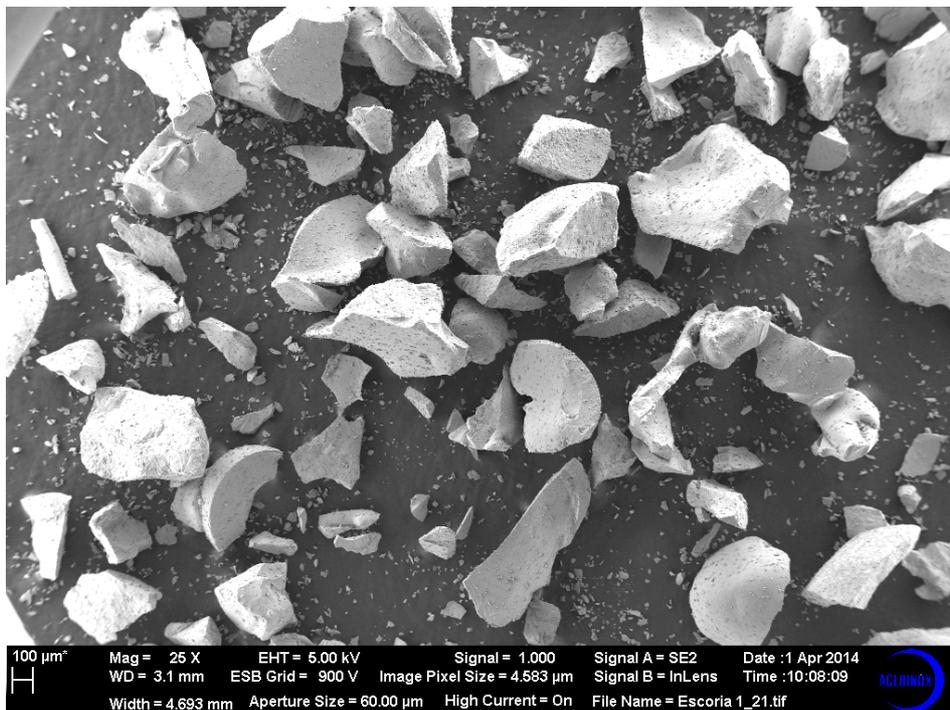


Figura 4.15. Microscopía electrónica de las partículas de escoria de cobre
[Fuente: Laboratorio de Control de Calidad. ACERINOX]

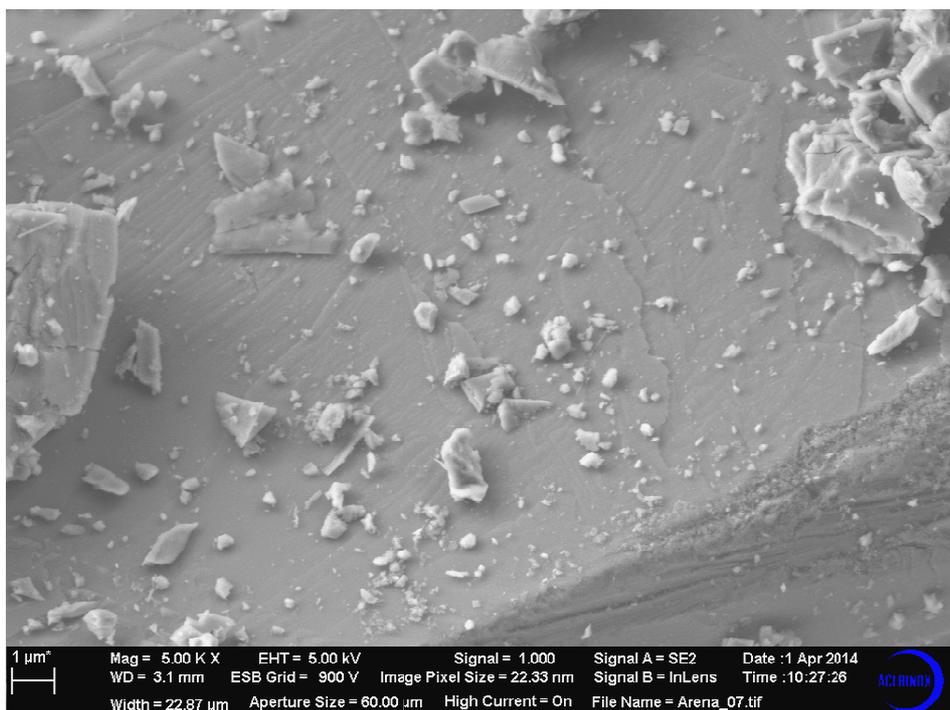


Figura 4.16. Microscopía electrónica de la superficie de partículas de árido fino
[Fuente: Laboratorio de Control de Calidad. ACERINOX]

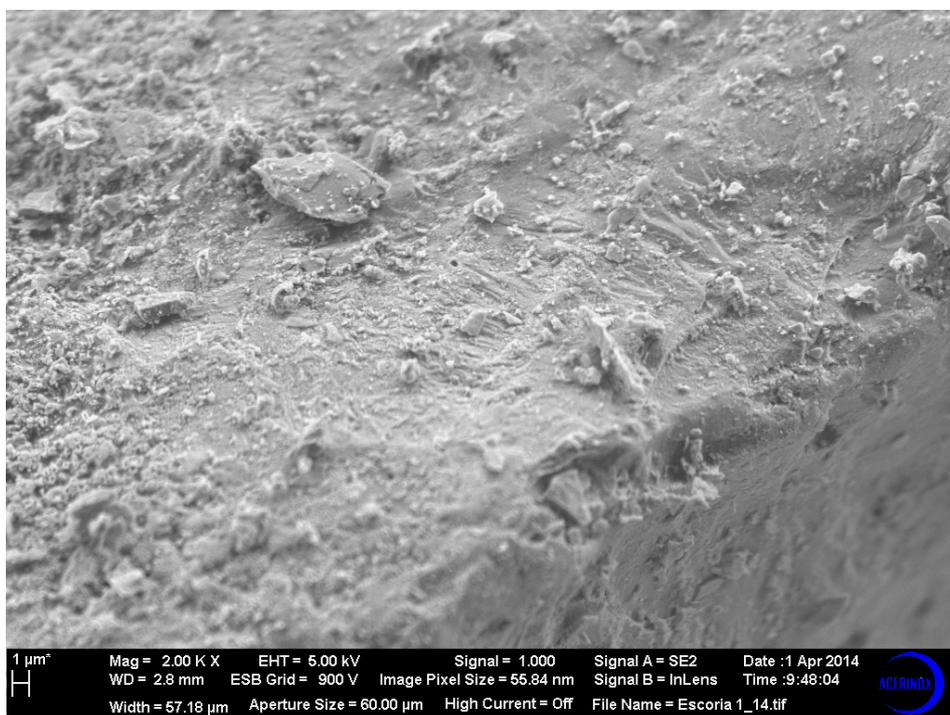


Figura 4.17. Microscopía electrónica de la superficie de partículas de escoria
[Fuente: Laboratorio de Control de Calidad. ACERINOX]

4.7.4 Modelización

Los resultados experimentales mostrados en la figura 4.18 han sido ajustados con un polinomio de segundo grado. De esta forma es posible predecir el valor del asentamiento para una concentración de escoria dada.

$$y = A x^2 + B x + C \quad (4.34)$$

donde:

y valor del asentamiento, en cm

x: porcentaje de escoria de cobre, %

A, B, C constantes a determinar

El resultado obtenido se indica a continuación:

$$y = -6,25 \cdot 10^{-4} x^2 - 1,18 \cdot 10^{-2} x + 19,20 \quad (4.35)$$

El valor del coeficiente de determinación sería $R^2=0,991$.

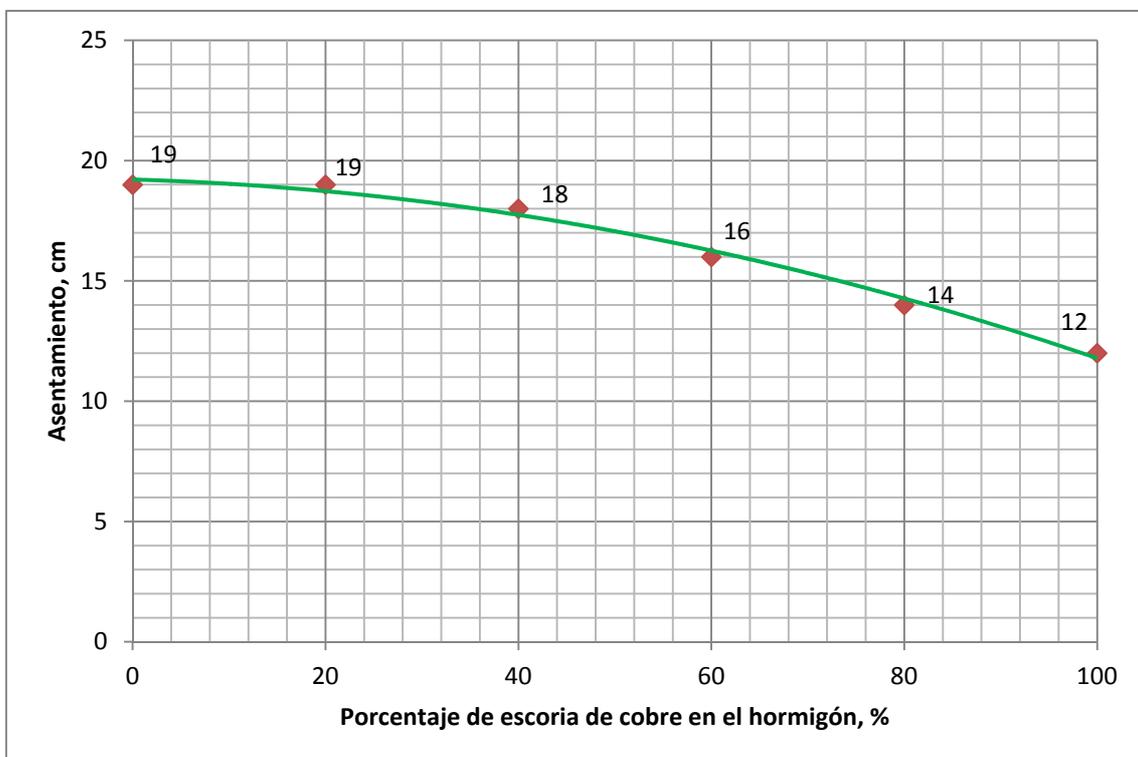


Figura 4.18. Resultado y modelización del ensayo de asentamiento

4.8 Ensayo de mini-cono aplicado a los morteros equivalentes

4.8.1 Introducción

El objetivo de este ensayo es evaluar la habilidad o facilidad de fluir que posee el mortero equivalente, es decir, mide la fluidez del mortero. También se puede valorar cualitativamente, en términos visuales, la presencia de segregación y exudación que se presenta, por la presencia de una aureola de agua alrededor del perímetro de la extensión del flujo [4.44].

Las medidas del mini-cono son un diámetro inferior de 50 mm, un diámetro superior de 35 mm y una altura de 50 mm, y no es más que una versión reducida del cono de Abrams.

La fluidez del mortero se determina mediante el promedio de los diámetros de escurrimiento, medidos sobre una chapa metálica horizontal o similar, en función de los parámetros de composición; relación agua/cemento, superplastificante, naturaleza de los áridos.

Además, en este caso la altura del asentamiento no constituye una medida representativa, siendo la medida de los diámetros de escurrimiento la medida fundamental.

La principal ventaja de este ensayo es la facilidad de realizarlo puesto que es necesaria poca preparación y una pequeña cantidad de material (volumen inferior a 75 mL).

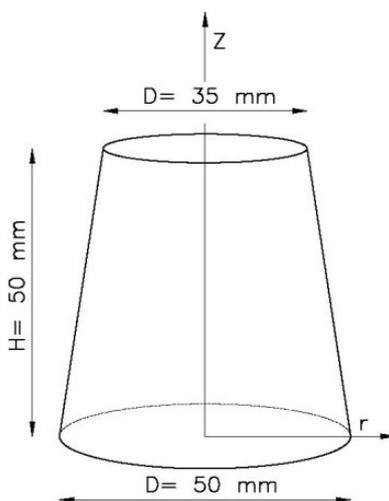


Figura 4.19. Geometría del mini-cono

4.8.2 Proceso de elaboración del ensayo

Para la determinación del diámetro de escurrimiento medio se han ensayado 3 muestras por cada uno de los morteros equivalentes dosificados en esta tesis doctoral.

El procedimiento para la realización del ensayo es el siguiente:

1. Se coloca el mini-cono sobre una superficie lisa y nivelada, previamente humedecida que en nuestro caso ha sido una placa de plástico pulida y no absorbente.
2. Se llena el mini-cono con el mortero y lo enrasamos, sin ningún tipo de compactación.
3. Se levanta el cono, dejando que fluya el mortero sobre la superficie.
4. Cuando el mortero ya no presente movimiento, se efectúan dos mediciones diametrales a 90 grados.
5. Se calcula el promedio de las dos mediciones anteriores, obteniendo el diámetro de escurrimiento medio.

Además se determina, en términos visuales, la presencia de segregación y exudación.

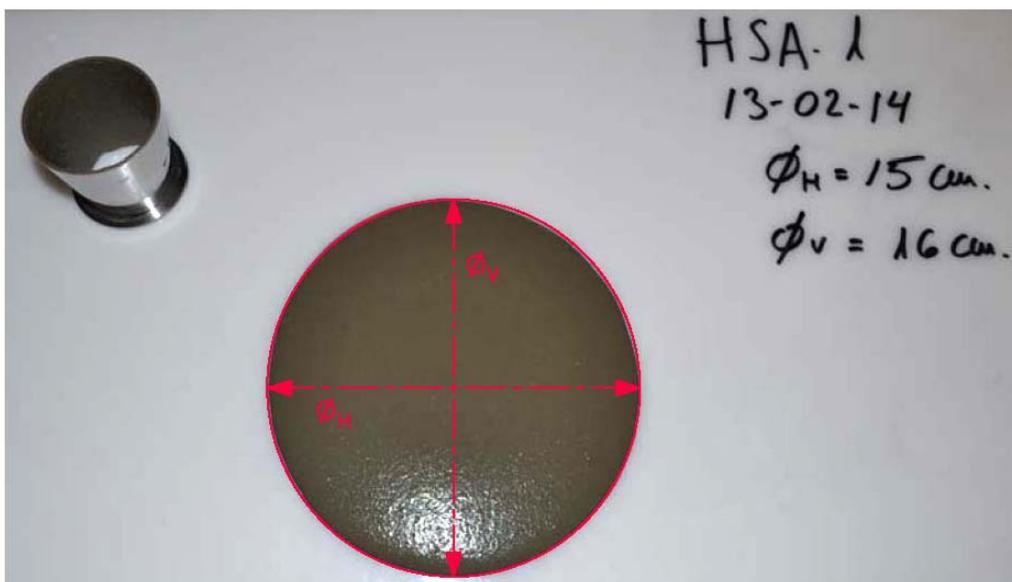


Figura 4.20. Resultado del ensayo del mini-cono y medición de los diámetros de escurrimiento en un mortero equivalente

4.8.3 Resultados y discusión

En la tabla 4.17 se detallan los valores experimentales obtenidos en el ensayo del mini-cono.

Tabla 4.17
Resultados del diámetro de escurrimiento en el ensayo del mini-cono

Tipología mortero	$\phi_{\text{horizontal}}$ (mm)	ϕ_{vertical} (mm)	$\phi_{\text{escurrimiento}}$ (mm)
MEQ-0	146,0	154,0	150,0
MEQ-20	140,0	144,5	142,3
MEQ-40	139,0	141,7	140,3
MEQ-60	119,3	122,3	120,8
MEQ-80	113,3	118,3	115,8
MEQ-100	112,7	114,0	113,3

Tras analizar los resultados obtenidos en el ensayo de cada uno de los morteros equivalentes (figura 4.21), se observa una disminución del diámetro de escurrimiento a medida que se aumenta el porcentaje de escoria de cobre en el mortero. Al igual que ocurría en el ensayo del cono de Abrams, a medida que se incrementa el porcentaje de escoria obtenemos morteros menos dóciles; disminuye su trabajabilidad. En consecuencia tanto el ensayo del mini-cono como el ensayo del cono de Abrams muestran la misma tendencia, pudiendo concluir que los resultados obtenidos con el mortero equivalente y con el hormigón están correlacionados.

De la misma forma que en los resultados obtenidos en el ensayo del cono de Abrams, la pérdida de trabajabilidad, o disminución de la docilidad en los morteros, estará motivada posiblemente por la textura superficial de las partículas de escoria. Como se comentó anteriormente, la pérdida de trabajabilidad, o disminución de la docilidad, estaría motivada posiblemente por la textura superficial de las partículas (figuras 4.16 y 4.17). Las partículas de árido fino tendría una textura superficial más lisa, lo que implica que actuarían como verdaderos rodamientos dentro del hormigón en estado fresco, mejorando su trabajabilidad. La textura superficial de las partículas de escoria

sería más rugosa produciendo una mayor fricción con el resto de las partículas sólidas de la mezcla, reduciendo de esta forma la deformabilidad del hormigón.

Se observa que existe un ligero cambio de pendiente entre los puntos correspondientes a 40% y 60% de concentración de escorias (figura 4.19). Este salto pudiera estar motivado por la rotura del equilibrio entre la fricción de las partículas de árido fino y escoria, de manera que entre 0% y 40% las fricciones dominantes son las del árido fino para posteriormente ser las de la escoria con valores superiores al 60%. Este comportamiento no es observable en los hormigones de referencia cuando se ensayan en el cono de Abrams, debido a la existencia del árido grueso, el cual sería el responsable de que el sistema hiciera transiciones más suaves hacia estados de menor docilidad.

En cualquier caso, independientemente de la eventualidad señalada, el sistema tiende a una disminución de la docilidad (trabajabilidad) a medida que se incrementa el porcentaje de escoria en el mortero.

4.8.4 Modelización

A la vista de la representación gráfica de los resultados obtenidos en los ensayos, se propone ajustar los puntos experimentales con una recta de regresión resuelta por el método de los mínimos cuadrados. Dada la distribución de los resultados, el hecho de plantear otros modelos analíticos basados en curvas polinómicas, conllevaría a unos valores del coeficiente de correlación muy parecidos a los obtenidos mediante aproximación lineal.

La expresión del modelo analítico planteado sería:

$$y = A x + B \quad (4.36)$$

donde:

y diámetro de escurrimiento, en mm

x porcentaje de escoria de cobre, %

A, B constantes a determinar

El resultado obtenido se indica a continuación:

$$y = -0,403 x + 150,50 \quad (4.37)$$

El valor del coeficiente de determinación sería $R^2=0,933$.

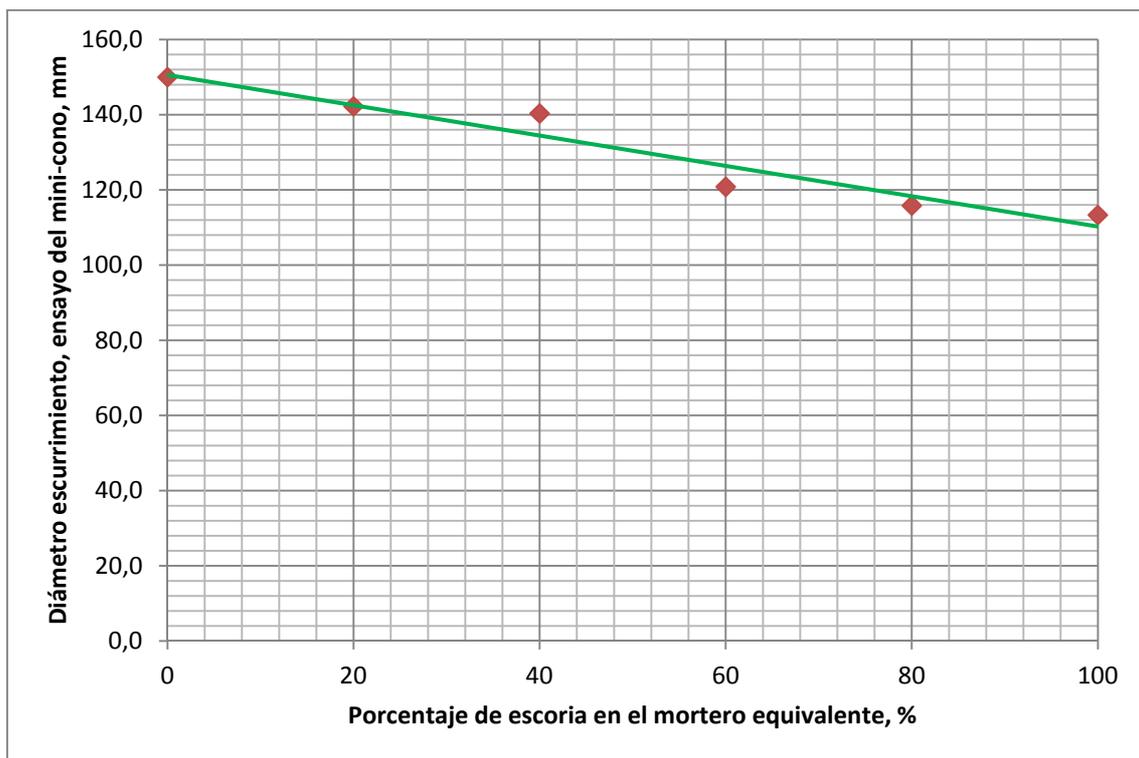


Figura 4.21. Resultado y modelización del ensayo de escurrimiento del mini-cono

4.9 Resultados y discusión de los ensayos reológicos

Para la determinación de los ensayos reológicos se han utilizado tres muestras de cada uno de los morteros equivalentes dosificados en esta tesis doctoral. La reología de los morteros se estudia en función de las proporciones de escoria de cobre que sustituye al árido fino.

Dichos ensayos se realizan estudiando la relación existente entre la velocidad de cizalla y el esfuerzo, así como entre la velocidad de cizalla y la viscosidad de cada uno de los sistemas.

4.9.1 Curvas de flujo

Una curva de flujo estacionaria es la representación del esfuerzo (τ) estacionario frente a la velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$), independientemente de que, por el modo de funcionamiento del reómetro, se aplique a la muestra una velocidad de cizalla y se mida el esfuerzo con el que responde, o que se le aplique un esfuerzo y se mida la velocidad de cizalla resultante. Esta curva de flujo permite caracterizar el comportamiento en estado fresco de una formulación y compararlo con el de otras, permitiendo distinguir entre comportamientos viscosos Newtoniano o no Newtoniano.

En la figura 4.22 se muestra la curva de flujo obtenida para el mortero equivalente sin incorporación de escoria de cobre, es decir, el tipo MEQ-0 o mortero de referencia. Según se observa, a medida que aumenta la velocidad de cizalla, el esfuerzo dibuja una curva decreciente, marcando un mínimo, para seguidamente cambiar la tendencia a creciente. Esta situación no tiene sentido y es debida a que a velocidades de cizalla bajas el cemento empieza a hidratarse y los valores obtenidos son resultado de una inestabilidad del sistema. Por ello se eliminan estos valores de forma que la curva de flujo será asintótica en el punto mínimo de esta.

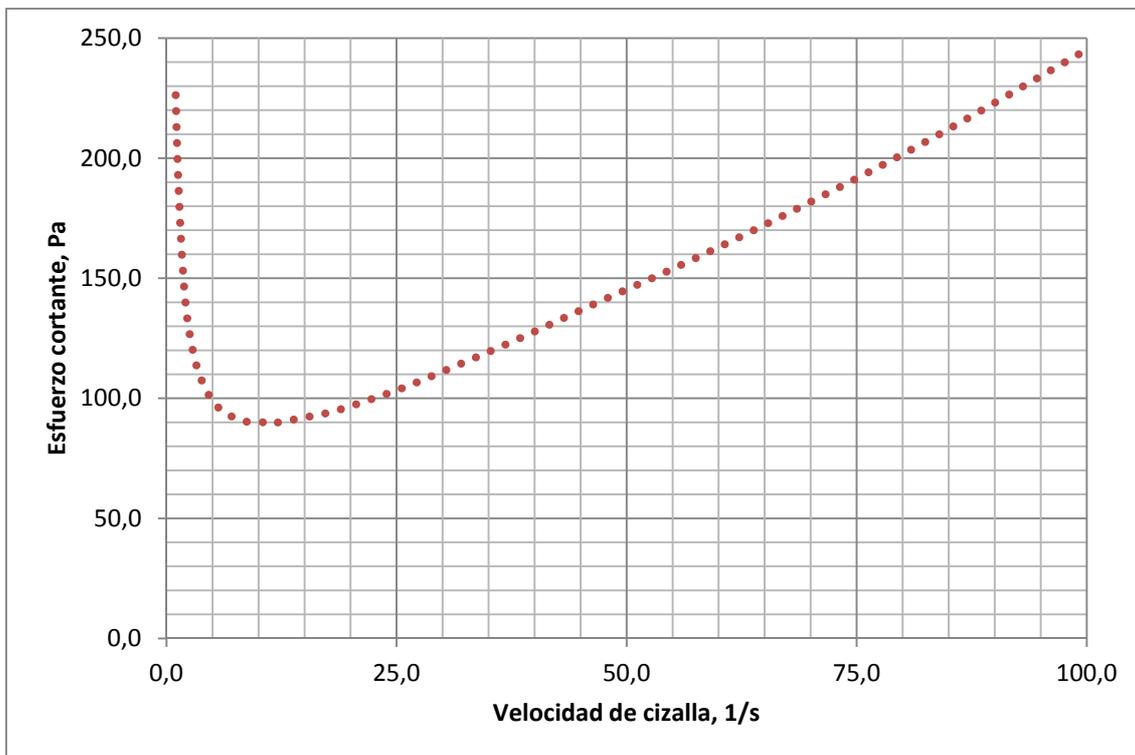


Figura 4.22. Curva de flujo del mortero equivalente de referencia, MEQ-0

En la figura 4.23 se muestran las curvas de flujo para cada uno de los morteros equivalentes, donde ya se ha eliminado la parte correspondiente a la inestabilidad del sistema y se han marcado las asíntotas correspondientes de cada curva.

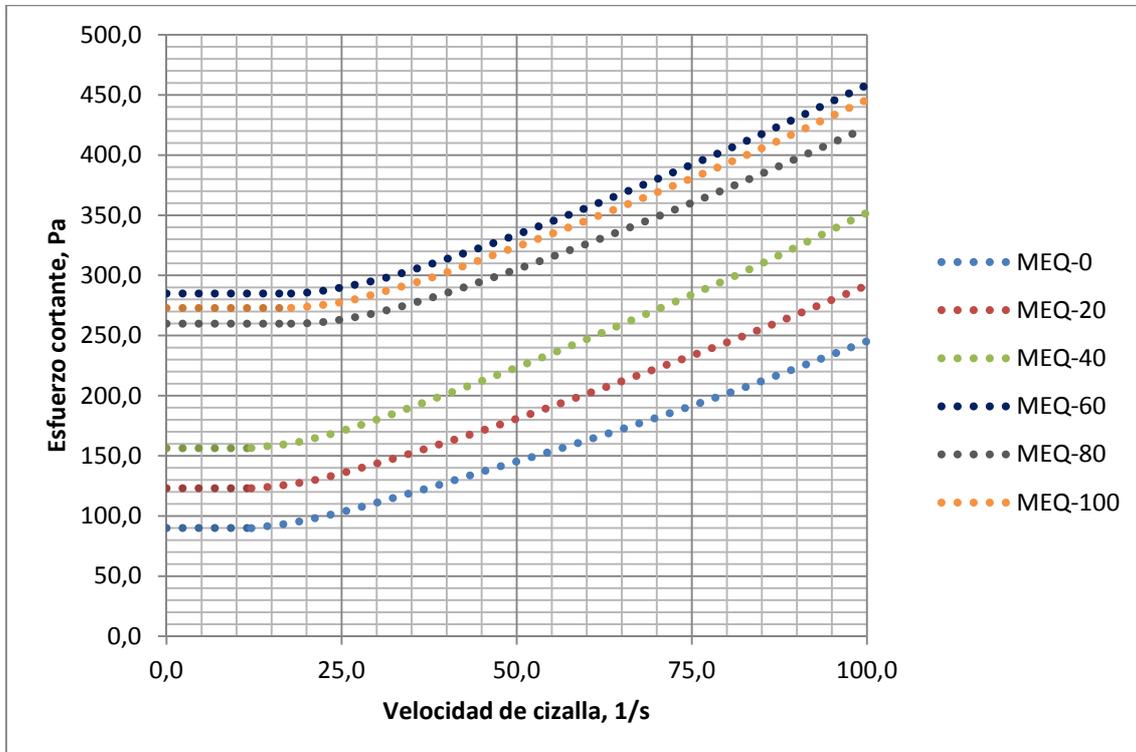


Figura 4.23. Curvas de flujo de los morteros equivalentes

Según la información obtenida de las curvas de flujo representadas en las figuras anteriores, en todos los morteros equivalentes ensayados se observa un comportamiento viscoplastico, es decir, los sistemas presentan un comportamiento de sólido mientras el esfuerzo de corte no supere un valor de fluencia τ_0 , denominado umbral o límite de fluencia.

En la tabla 4.18 se indican los valores del límite de fluencia asíntotico ($\tau_{0 \text{ asíntotico}}$), obtenidos directamente de los valores asíntotico de las curvas de flujo de la figura 4.23, para cada uno de los morteros equivalentes.

Tabla 4.18
Límite de fluencia por observación directa

Tipología de mortero equivalente	Límite fluencia, τ_0 asintóticos (Pa)
MEQ-0	90,0
MEQ-20	123,0
MEQ-40	156,4
MEQ-60	284,9
MEQ-80	259,8
MEQ-100	272,9

De la representación gráfica de las curvas de flujo se observa claramente que a medida que se aumenta la concentración de escorias, el límite de fluencia de los morteros equivalentes aumenta, es decir, los morteros se hacen menos trabajables.

Igualmente, las curvas de flujo indican límites de fluencia aproximadamente equidistantes para los morteros con concentraciones de escoria entre 0% y 40%. A partir de este punto se produce un salto en las curvas de flujo, lo cual indica que existe una singularidad claramente definida para concentraciones superiores al 40%.

Las curvas de los morteros con concentraciones de escoria de valor 60, 80 y 100%, arrojan valores del límite de fluencia muy parecidos, los cuales se pueden interpretar como pertenecientes a la incertidumbre experimental, es decir, el comportamiento de los morteros con concentraciones iguales o superiores al 60% de escoria, son prácticamente iguales.

El hecho de que se produzca una meseta en la concentración 60%, estará motivada, al igual que ocurría en los ensayos del cono de Abrams y el mini-cono, por la rotura del equilibrio entre las fuerzas de fricción de los áridos, dominadas por el árido fino en los casos de concentraciones comprendidas entre 0% y 40%, y por la escoria de cobre para concentraciones iguales o superiores al 60%. Este cambio en las fuerzas de fricción dentro del mortero estaría motivada por la textura superficial de las partículas de árido fino y escoria de cobre (figuras 4.16 y 4.17). Los granos de árido fino tendrían una

textura superficial más lisa, lo que implica que actuarían como verdaderos rodamientos dentro del hormigón en estado fresco. La textura superficial del grano de escoria sería más rugosa produciendo una fricción mayor con el resto de las partículas sólidas de la mezcla, dificultando el movimiento relativo entre partículas y haciendo más difícil deshacer la estructura del sistema. De esa forma aumentaría el valor mínimo del esfuerzo para que el sistema empiece a fluir y se incrementaría el límite de fluencia.

4.9.2 Ajuste de puntos según el modelo reológico de Bingham modificado

Tal y como se indicó en apartados anteriores se utilizará el modelo de Bingham modificado para estimar el límite de fluencia de cada mortero equivalente. Para ello una vez obtenida las curvas de flujo y eliminada la parte correspondiente a la inestabilidad del sistema por efecto de la hidratación del cemento a velocidades de cizalla bajas, se ajustarán los datos experimentales al modelo propuesto.

El modelo de Bingham modificado ha demostrado ser muy práctico para caracterizar el comportamiento del hormigón en estado fresco. En función de los parámetros del modelo para cada uno de los morteros equivalentes, se pueden relacionar una serie de propiedades básicas en el comportamiento del hormigón en estado fresco y poder comparar así el desempeño de distintas formulaciones. Por un lado, el límite de fluencia τ_y está relacionado con la docilidad del material. Por otro lado la viscosidad plástica η_p está relacionada con la resistencia a la segregación del material, de forma que si este valor es pequeño los áridos gruesos tenderán a separarse, lo que es algo totalmente indeseable porque haría al material muy frágil en estado endurecido. Por último el parámetro de segundo orden C está relacionado con las propiedades autocompactantes del material, de forma que, para valores positivos, mayor será la capacidad de autocompactación cuanto mayor sea dicho valor [4.8, 4.15].

Los valores de los parámetros de modelo de Bingham modificado obtenidos tras el ajuste de los resultados experimentales de los morteros equivalentes, se indican en la tabla 4.19.

Tabla 4.19
Parámetros del modelo de Bingham modificado

Tipología de mortero	Porcentaje de escorias	Parámetros		
		τ_0	η_p	C
MEQ-0	0	73,23	1,12	0,006
MEQ-20	20	104,6	1,131	0,007
MEQ-40	40	135,5	1,297	0,008
MEQ-60	60	261,9	0,897	0,010
MEQ-80	80	248,1	1,091	0,010
MEQ-100	100	248,1	1,01	0,009

No se considera el modelo de Herschel-Bulkley en esta tesis doctoral debido a que las unidades del índice de consistencia (K), son del todo "extrañas" ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$), así que no es posible comparar consistencias de materiales diferentes, puesto que el otro índice, el de flujo (n) también es distinto para cada material en general. Únicamente cuando la velocidad de cizalla es 1 s^{-1} es posible comparar distintos materiales, además del valor del límite de fluencia, ya que, ciertamente, en ese único caso, el índice de consistencia se convierte en viscosidad a cizalla 1 s^{-1} .

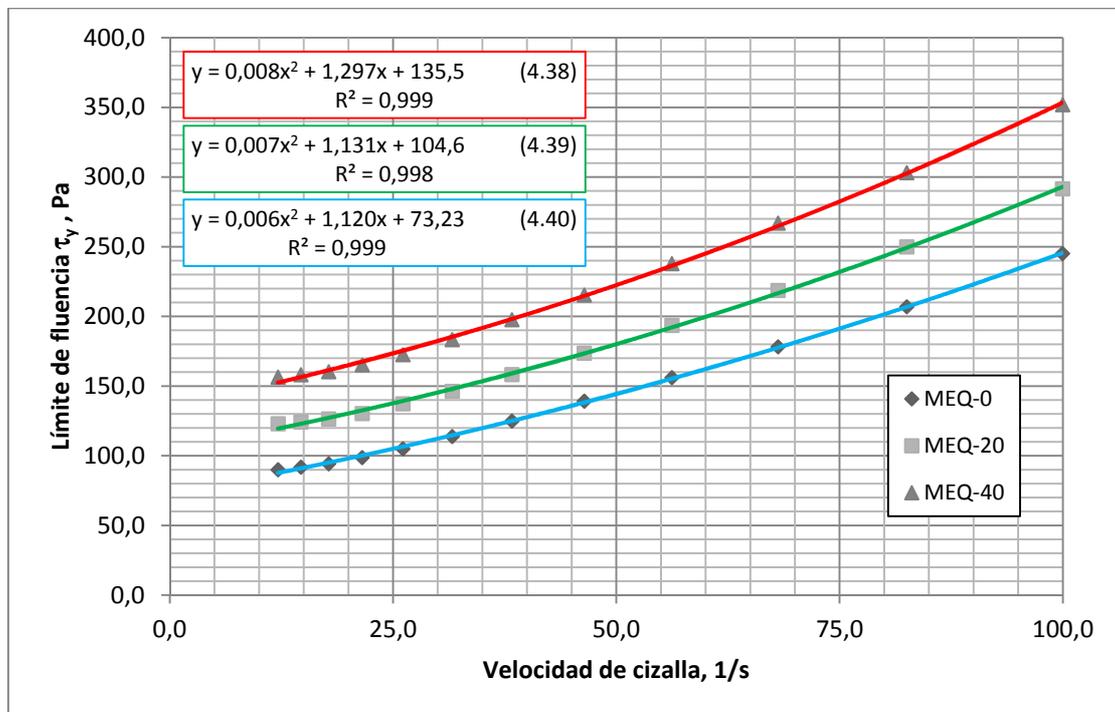


Figura 4.24. Ajuste según modelo de Bingham Modificado para morteros con concentración de escorias 0, 20 y 40%

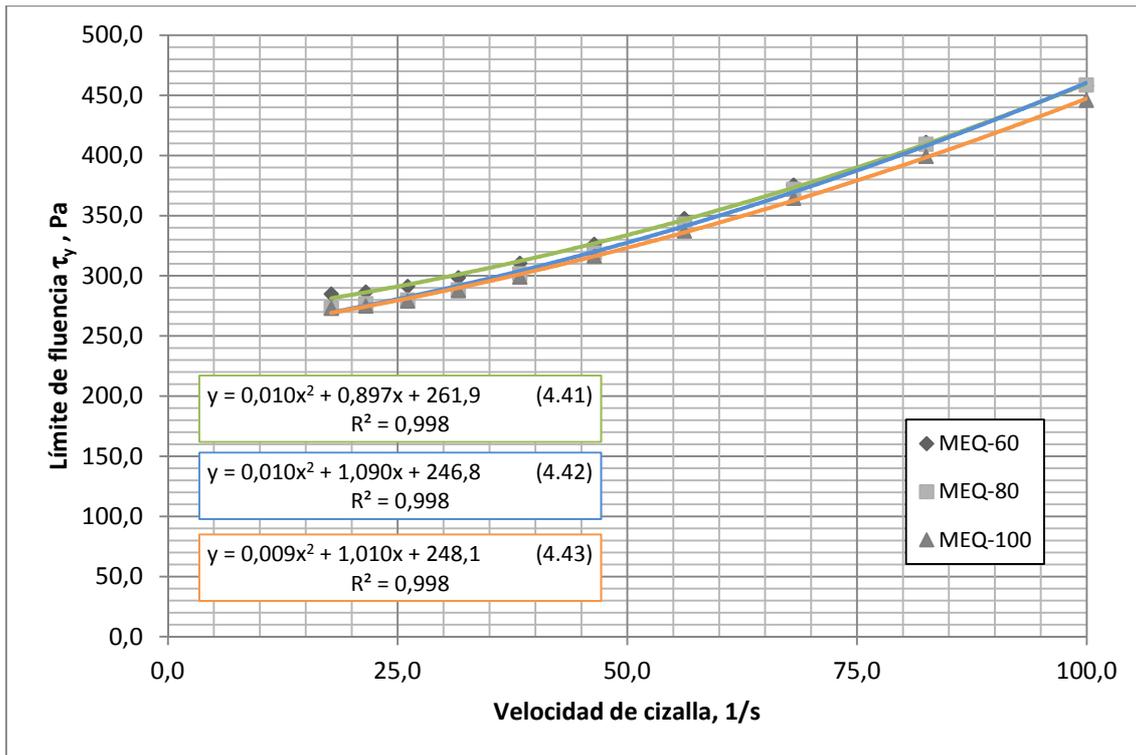


Figura 4.25. Ajuste según modelo de Bingham Modificado para morteros con concentración de escorias 60, 80 y 100%

Las figuras 4.24 y 4.25 se indican los ajustes realizados con el modelo de Bingham modificado para los morteros equivalentes con concentraciones de escorias comprendidos entre 0%-40% y 60%-80% respectivamente.

A continuación se analizan los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros del modelo de Bingham modificado:

Límite de fluencia

Dado que el límite de fluencia τ_y está relacionado con la docilidad del material en estado fresco [4.8], sería muy útil representar los valores del límite de fluencia obtenido por el modelo de Bingham modificado en función de la concentración de escorias presente en cada uno de los morteros equivalentes.

En la figura 4.26 se representa la evolución del límite de fluencia con la proporción de escorias. Se destaca el hecho de que a medida que se incrementa el porcentaje de

escoria de cobre en el mortero equivalente aumenta el límite de fluencia hasta alcanzar un punto de concentración de valor 60%. En este punto se alcanza una meseta, de forma que no se aprecia un aumento del límite de fluencia con un incremento del porcentaje de escoria.

Como el límite de fluencia está relacionado directamente con la docilidad del material, se obtendrán morteros menos dóciles al aumentar el porcentaje de escorias, es decir, existe una disminución de la trabajabilidad a medida que se incrementa el porcentaje de escorias. Este hecho ya se pone de manifiesto cuando se analizan los resultados del test de mini-cono, donde se observaba que los diámetros de escurrimiento disminuían a medida que aumentaba la presencia de escoria en el mortero, y cuando se comparan con los resultados del cono de Abrams aplicado a los hormigones, también se observó que el asentamiento del cono era menor al aumentar la concentración de escorias. Por lo tanto, podemos concluir que existe cierta correlación entre los valores del límite de fluencia obtenido reométricamente con los morteros equivalentes y los valores de escurrimiento y de asentamiento obtenidos, respectivamente, con el mini-cono aplicado a los morteros equivalentes y el cono de Abrams aplicado a los hormigones.

Para el ajuste de los puntos se plantea un modelo analítico basado en un polinomio de segundo grado, cuya expresión es:

$$y = A x^2 + B x + C \quad (4.34)$$

donde:

y límite de fluencia, en Pa

x porcentaje de escoria de cobre, %

A, B, C constantes a determinar

El resultado obtenido se indica a continuación:

$$y = -1,49 \cdot 10^{-2} x^2 + 3,53 x + 56,50 \quad (4.44)$$

El valor del coeficiente de determinación sería $R^2=0,873$.

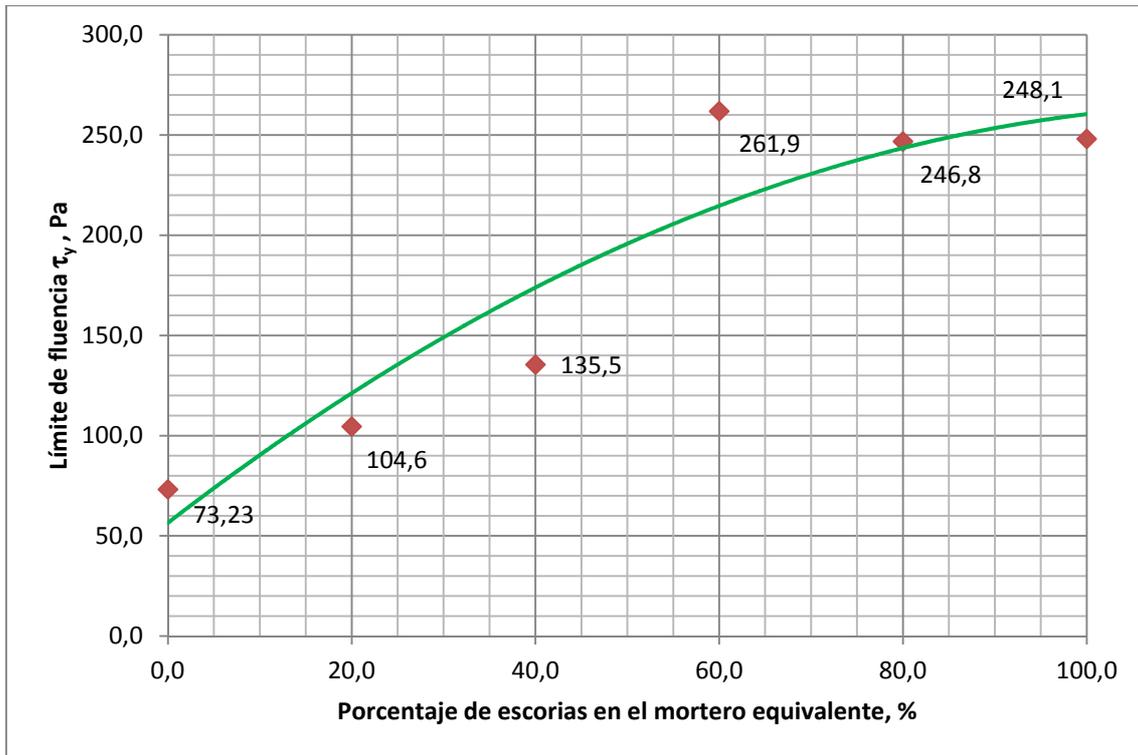


Figura 4.26. Límite de fluencia según la concentración de escorias en el mortero equivalente

Tras analizar los resultados y ajustar el modelo, se observa que existe una clara tendencia al incremento del límite de fluencia a medida que aumenta la concentración de escoria de cobre.

Viscosidad plástica

La viscosidad plástica η_p está relacionada con la resistencia a la segregación del material, de forma que si este valor es pequeño existirá una tendencia a la separación de los componentes una vez realizado el amasado, provocando que la mezcla en estado fresco presente una distribución no uniforme de sus partículas [4.8].

Los problemas de la segregación del hormigón surgen con los trabajos de colocación y compactación, con el resultado de estructuras con defectos como poros y coqueas.

En la figura 4.27 se representa la evolución de la viscosidad plástica en función de la concentración de escoria en el mortero equivalente. Del análisis de los resultados se

observa como los valores de la viscosidad plástica se mantienen sin grandes cambios a medida que se incrementa el porcentaje de escoria, disminuyendo ligeramente (1,12-1,01 Pa·s) a medida que aumenta la concentración de escorias. Dicho de otra forma, la resistencia frente a la segregación del material no se ve afectada por la presencia de escoria en la composición del material. Este resultado confirma el hecho de que no se detectaran síntomas de segregación en los ensayos de minicono y de cono de Abrams.

En este caso se ha optado por un modelo analítico basado en una recta de regresión cuya expresión es:

$$y = A x + B \quad (4.36)$$

donde:

y viscosidad plástica, Pa·s

x porcentaje de escoria de cobre, %

A, B constantes a determinar

El resultado obtenido se indica a continuación:

$$y = -1,53 \cdot 10^{-3} x + 1,17 \quad (4.45)$$

El valor del coeficiente de determinación sería $R^2=0,185$.

El valor del coeficiente de correlación es pequeño, influenciado por el desajuste existente entre el modelo y los valores experimentales en los puntos 40% y 60% de concentración de escorias.

Según la representación gráfica de la figura 4.27, y a pesar del bajo valor del coeficiente de correlación del modelo, existe una ligera tendencia a la disminución de la viscosidad plástica a medida que se incrementa la concentración de escoria de cobre.

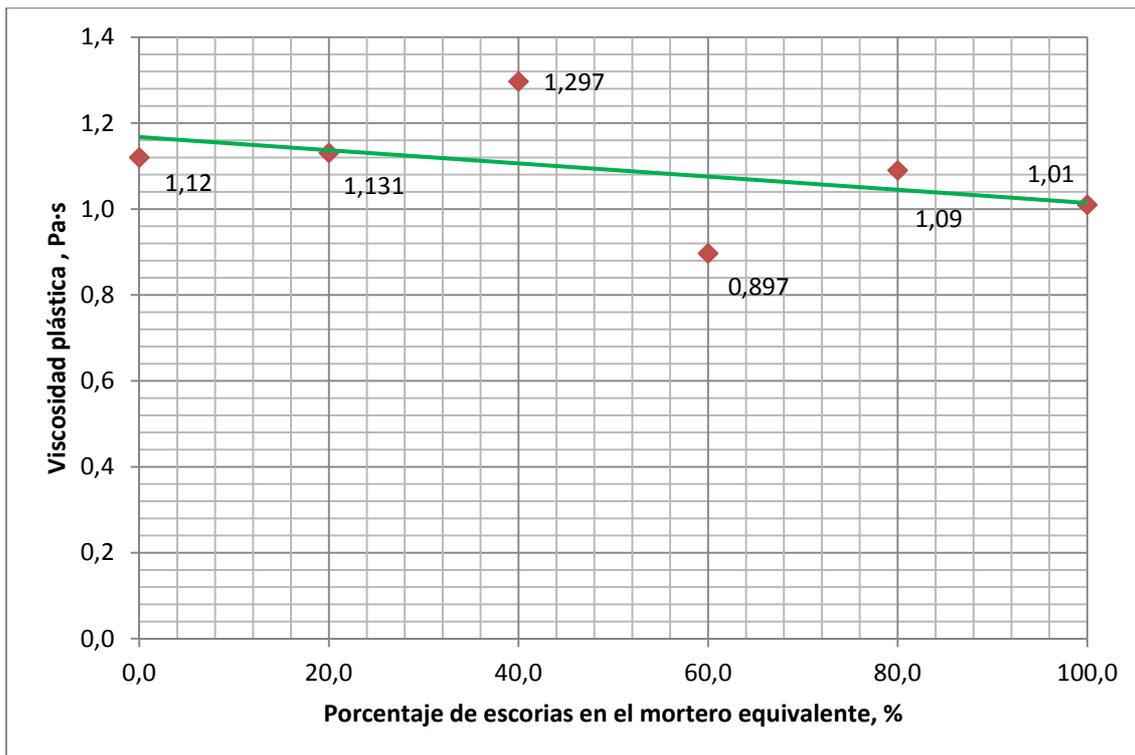


Figura 4.27. Viscosidad plástica según la concentración de escorias en el mortero equivalente

Parámetro de segundo orden, C

El parámetro de segundo orden C está relacionado con las propiedades autocompactantes del material, de forma que, para valores positivos, mayor será la capacidad de autocompactación cuanto mayor sea dicho valor [4.8].

En la figura 4.28 se representa la evolución del parámetro C en función de la concentración de escoria en el mortero equivalente. En el gráfico se observa como a medida que se incrementa el porcentaje de escoria aumentan las propiedades autocompactantes, si bien a partir de concentraciones del 60% estas son prácticamente constantes.

Este es un resultado interesante pues indica que la presencia de una cierta cantidad de escoria favorece una respuesta de alto interés tecnológico como es la autocompactante.

Para el ajuste de los puntos se plantea un modelo analítico basado en un polinomio de segundo grado, cuya expresión es:

$$y = A x^2 + B x + C \quad (4.34)$$

donde:

y parámetro C (capacidad de autocompactación), adimensional

x porcentaje de escoria de cobre, %

A, B, C constantes a determinar

El resultado obtenido se indica a continuación:

$$y = 10^{-3}(-6,25 \cdot 10^{-4} x^2 + 9,96 \cdot 10^{-2} x + 5,64) \quad (4.46)$$

El valor del coeficiente de determinación sería $R^2=0,899$.

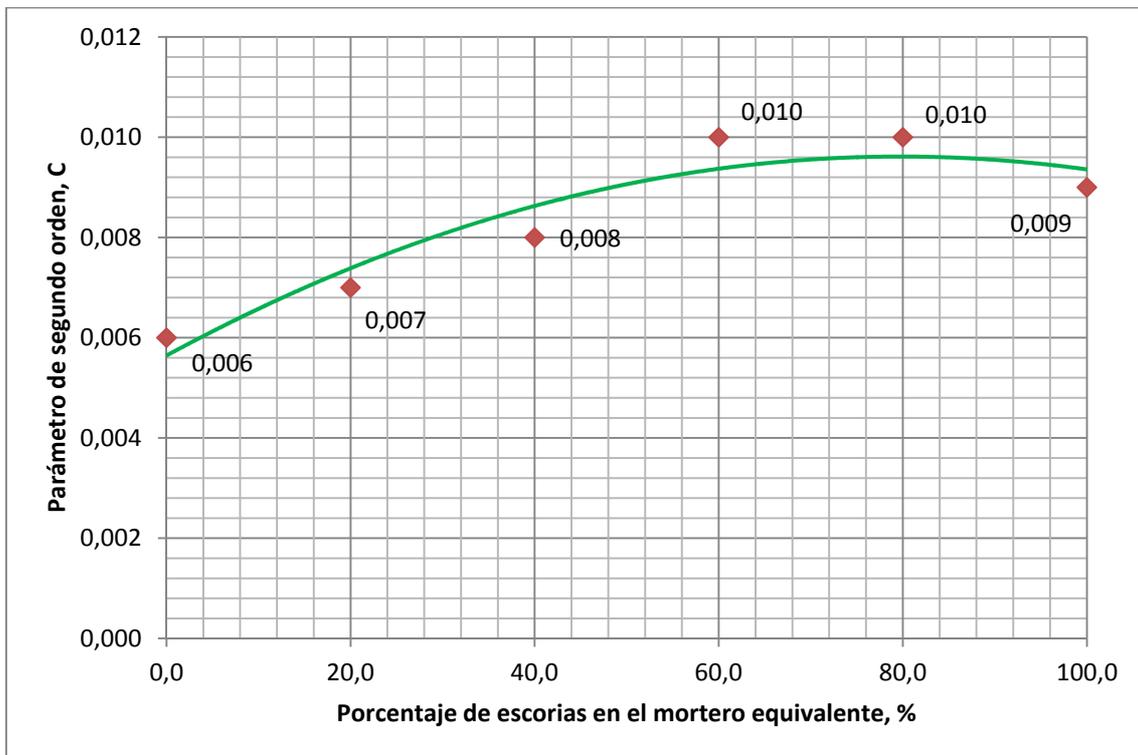


Figura 4.28. Parámetro de segundo orden C, según la concentración de escorias en el mortero equivalente

4.10 Conclusiones

Las conclusiones de este capítulo son las siguientes:

- Un aumento del porcentaje de escoria de cobre en el hormigón provoca una disminución de la docilidad y en consecuencia de la trabajabilidad. Debido a ello, para obtener materiales con la misma docilidad se debería de aumentar el porcentaje de superplastificante o aumentar la cantidad de agua en la masa, variando en consecuencia, la relación agua/cemento.
- En el caso de los morteros equivalentes estudiados, al igual que en el caso de los hormigones, el comportamiento es análogo; se observa una disminución de la docilidad a medida que se incrementa la escoria de cobre, si bien, en este caso, existe un comportamiento similar para concentraciones iguales o superiores al 60%.
- Un aumento del porcentaje de escoria de cobre en la composición de los morteros equivalentes, provoca una transición del material hacia valores más elevados del límite de fluencia, tendiendo a una meseta de estabilidad para concentraciones iguales o superiores al 60%. Este hecho viene a reforzar el punto anterior.
- La presencia de escorias de cobre en los morteros equivalentes no influye en la viscosidad plástica y, por ello, la tendencia a la segregación del material es prácticamente independiente de la sustitución de árido por escoria.
- De los estudios realizados con el mortero equivalente, se deduce que la presencia de escoria de cobre en la formulación dota de respuesta autocompactante al correspondiente hormigón, si bien a partir de concentraciones superiores al 60%, la respuesta autocompactante es similar.

4.11 Bibliografía

- [4.1] Barnes H. A., Hutton J.F., Walters K. (1989): *An Introduction to Rheology*. Ed. Elsevier.
- [4.2] Chhabra R.P., Richardson J.F (1999): *Non-Newtonian flow in the Process Industries*. Ed. Butterworth-Heinemann
- [4.3] Newman J. (2002): *Advance Concrete Technology Set*. Ed. Elsevier.
- [4.4] Tattersall G. H., Banfill P.F.G (1983): *The Rheology of Fresh Concrete*. Ed. Pitman Publishing.
- [4.5] Velázquez Navarro J. (2009): *Reología de pastas y morteros equivalentes de hormigones autocompactables*. Tesis doctoral Universidad de Málaga.
- [4.6] Wallevik J.E. (2009): *Rheological properties of cement paste: Thixotropic behaviour and structural breakdown*. Cement and Concrete Research, **39**, pp. 14-29.
- [4.7] Nehdi M., Rahman M.A. (2004): *Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological model for different test geometry, gap and surface friction*. Cement and Concrete Research, **34**, pp. 1993-2007.
- [4.8] Feys D., Verhoeven R., De Schutter G. (2009): *Why is fresh self-compacting concrete shear thickening?* Cement and Concrete Research, **39**, pp. 510-523.
- [4.9] Rubio-Hernández F.J., J.F. Velázquez-Navarro, Galindo-Rosales F.J. (2009): *Rheological characterization of a time dependent fresh cement paste*. Mechanics of Time-Dependent Materials, **13**, pp. 199-206.
- [4.10] Tadros, Th. F. (1987): *Solid/Liquid Dispersions*. Ed. Academic Press.

- [4.11] Roussel N. (2006): *A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications*. Cement and Concrete Research, **36**, pp. 1797-1806.
- [4.12] Mezger T.G. (2002): *The rheology handbook. For the users of rotational and oscillatory rheometers*. Ed. Ulrich Zorll.
- [4.13] Galindo-Rosales F.J., Rubio-Hernández F.J., Velazquez-Navarro J.F, Gomez-Merino A.I. (2010): *Structural level of silica-fumed aqueous suspensions*. The Bulletin of the American Ceramic Society, **90**, pp. 1641-1643.
- [4.14] Malvern Instruments (2005): *Gemini 150/200/HR nano*. Malvern Manuals.
- [4.15] Feys D., Verhoeven R., De Schutter G. (2008): *Fresh Self-Compacting Concrete, a shear thickening material*. Cement and Concrete Research, **38**, pp. 920-929.
- [4.16] Barnes H.A. (1999): *The yield stress – a review or παντα ρει - everything flows?* Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, **81**, pp. 133-178.
- [4.17] Larrard F. de, Ferraris C.F., Sedran T. (1998): *Fresh Concrete: A Herschel-Bulkley material*. Materials and Structures, **31**, pp. 494-498.
- [4.18] Wallevick O.H. (2004): *IBRI at our Service; Rheological Measurements on cement paste, Mortar and Concrete by use of a Coaxial Cylinder Viscometer*. IBRI (Icelanding Building Research Institute).
- [4.19] Arnaud L. y Dierkens M. (2007): *Setting and Hardening of cement based materials: which differences between mortars and concretes*. Advanced in Construction Materials, Part VI, Springer Berlin Heidelberg.
- [4.20] Schram G. (2000): *A practical Approach to Rheology and Rheometry*. Haake.
- [4.21] Shaughnessy III, R., Clark P.E. (1988): *The Rheological Behaviour of Fresh Cement Pastes*. Cement and Concrete Research, **3**, pp. 327-341.

- [4.22] Bhatti, J.I. (1987): *The effect of retarding admixtures on the structural development of continuously sheared cement pastes*. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, **9**, pp. 137-144.
- [4.23] Petit J.-Y., Wirquin E., Vanhove Y. y Khayat K. (2007): *Yield stress and viscosity equations for mortars and self-consolidating concrete*. Cement and Concrete Research, **37**, pp. 655-670.
- [4.24] Jarny S., Roussel N., Le Roy R. y Coussot P. (2008): *Modelling thixotropic behaviour of fresh cement pastes from MRI measurements*. Cement and Concrete Research, **38**, pp. 616-623.
- [4.25] Roussel N. (2006): *A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications*. Cement and Concrete Research, **36**, pp. 1797-1806.
- [4.26] Rubio Hernández F.J., Morales Alcalde J.M., Gomez Merino A.I. (2013): *Limestone filler cement ratio effect on the flow behavior of a SCC cement paste*. Advances in Cement Research, **25**, pp.262-272
- [4.27] Ferraris C.F. (2009): *Measurement of the rheological properties of Cement Pastes: a new approach. Proceedings of Role of Admixtures in High Performance Concrete*. RILEM International Symposium, Moterrey, México, pp. 1999.
- [4.28] Barnes H.A (2000): *A handbook of elementary rheology*. University of Wales. Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Aberystwyth.
- [4.29] Krulis M., Rohm H. (2004): *Adaptation of a vane tool for the viscosity determination of flavoured yoghurt*. European Food Research Technology, **218**, pp. 598-601
- [4.30] Meeten G.H. (2008): *Squeeze-flow and vane rheometry of a gas-liquid foam*. Rheologica Acta, **47**, pp. 883-894.

- [4.31] Bayod E., Mansson P., Innings F., Bergenstahl B., Tornberg E. (2007): *Low shear rheology of concentrated tomato products. Effect of particle size and time*. Food Biophysics, **2**, pp. 146-157.
- [4.32] Derakhshandeh B., Hatzikiriakos S.G., Bennington C.P.S. (2010): *Rheology of pulp suspensions using ultrasonic Doppler velocimetry*. Rheologica Acta, **49**, pp. 1127-1140.
- [4.33] Elaty M.A.A., Ghazy M.F. (2012): *Flow properties of fresh concrete by using modified geotechnical vane shear test*. HBRC Journal, **8**, pp. 159-169.
- [4.34] Martinez Padilla L.P., Rivera Vargas C. (2006): *Flow behavior of Mexican sauces using a vane in a large cup rheometer*. Journal of food Engineering, **72**, pp. 181-196.
- [4.35] Laskar A.I., Bhattacharjee R. (2011): *Torque-speed relationship in a concrete rheometer with vane geometry*. Construction and Building Materials, **25**, pp. 3443-3449.
- [4.36] Bauer E., de Sousa J.G.G., Guimaraes E.A., Silva F.G.S. (2007): *Study of the laboratory vane test on mortars*. Building and Environment, **42**, pp. 86-92.
- [4.37] Liddell P.V., Borger D.V. (1996): *Yield stress measurements with the vane*. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanier, **63**, pp. 235-261.
- [4.38] Barnes H.A., Nguyen Q.D. (2001): *Rotating vane geometry. A review*. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanier, **98**, pp. 1-14.
- [4.39] Schwartzentruber A. y Catherine C. (2000): *Method of the concrete equivalent mortar (CEM): A new tool to design concrete containing admixture*. Materials and Structures, **33**, pp. 475-782.

- [4.40] Rubio-Hernández F.J., Velázquez-Navarro J.F., Ordoñez-Belloc L.M. (2012): *Rheology of concrete: a study case based upon the use of the concrete equivalent mortar*. Materials and Structures, DOI 10.1317/s11527-012-9915-1
- [4.41] Wallevik J.E (2003): *Rheology of Particle Suspensions: Fresh Concrete, Mortar and Cement Pastewith various types of Lignosulfonates*. Tesis Doctoral. Department of Structural Engineering. The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- [4.42] EHE-08: *Instrucción de Hormigón Estructural*. Serie Normativas, Ministerio de Fomento. 2ª edición, Ed. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento, febrero 2009.
- [4.43] UNE-EN 12350-2:2009: *Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009
- [4.44] Bouvet A., Ghorbel E., Bennacer R. (2010): *The mini-conical slump flow test: Analysis and numerical study*. Cement and Concrete Research, **40**, pp. 1517-1523.

CAPÍTULO 5

ESTUDIO MECÁNICO DEL HORMIGÓN ENDURECIDO

5.1 Introducción

En este capítulo se desarrollan los ensayos a los que se someten los diferentes hormigones en estado endurecido. Se han realizado un total de doce ensayos, los cuales se indican a continuación:

1. Densidad, absorción y porosidad
2. Succión
3. Permeabilidad
4. Resistencia a compresión
5. Resistencia a tracción indirecta (ensayo brasileño)
6. Resistencia a flexotracción
7. Módulo de elasticidad
8. Resistencia a la abrasión superficial
9. Resistencia al desgaste mediante ensayo Cántabro modificado
10. Esclerómetro (índice de rebote)
11. Ultrasonidos
12. Carbonatación

El esquema básico de cada uno de los ensayos realizados es el siguiente, si bien este puede variar sensiblemente dependiendo del ensayo que se describa:

1. Introducción. Marco teórico

Se realiza una descripción general del ensayo indicando el fundamento y las bases teóricas del mismo.

2. Proceso de elaboración

Descripción de los pasos seguidos en la realización del ensayo, normas utilizadas, dimensiones y número de probetas, maquinaria empleada, etc.

3. Resultados y discusión

Se presentan los resultados obtenidos en el ensayo para proceder seguidamente a realizar una interpretación de los mismos.

4. Modelización

Dado que la metodología empleada es del todo experimental y los patrones de muestra son del todo limitados se realizan ajustes por regresión para verificar que los datos obtenidos no son probabilísticos, sino que tienen cierta firmeza. Como los resultados obtenidos a veces no presentan una uniformidad o esta no es la deseada debido a diferentes factores tales como; las condiciones de curado, temperatura ambiente, probetas, etc. y con el objeto de obtener una mayor fiabilidad en los resultados, reduciendo así la falta de uniformidad, se proponen unos modelos analíticos fundamentados en curvas y rectas de regresión que facilitan la toma de decisiones así como el resultado teórico de aquellos ensayos no realizados.

5. Conclusiones del ensayo

Se obtienen las correspondientes conclusiones una vez conocidos los resultados y discusión de los valores obtenidos en el ensayo.

5.2 Ensayo de densidad, porosidad y absorción

5.2.1 Introducción

5.2.1.1 Densidad

Se define la densidad de un hormigón en estado endurecido como la relación que existe entre la masa de este y el volumen conocido del recipiente que lo contiene.

La densidad depende de muchos factores, destacando principalmente la naturaleza de los áridos, la proporción de cada uno de los diferentes materiales que conforman el

hormigón y el método de compactación empleado. Cuanto mayor sea la densidad de los áridos utilizados y mayor sea la cantidad de árido grueso, bien clasificado, mayor será la densidad del hormigón. De la misma forma cuanto mejor se haya compactado el hormigón mayor será la densidad [5.1].

Según el Código Técnico de la Edificación [5.2], las variaciones de densidad del hormigón son pequeñas, tomándose en los cálculos el valor 2.400 kg/m^3 para los hormigones en masa y 2.500 kg/m^3 para los armados.

Para los hormigones convencionales formados por materiales granulares provenientes de rocas no mineralizadas de la corteza terrestre su valor oscila entre 2,35 y 2,55 kg/dm^3 [5.3].

La densidad del hormigón está relacionada con otras propiedades, en particular con su resistencia, con el aislamiento térmico y acústico, así como con la capacidad de contribuir a impedir el paso de radiaciones. Por lo anterior, es posible variar la densidad del hormigón artificialmente, ya sea por encima o por debajo de los valores de un hormigón convencional, constituyendo los denominados hormigones pesados o livianos, respectivamente.

Los hormigones pesados fabricados con áridos de barita o metálicos, tienen densidades de 3.000 a 3.500 kg/m^3 , incluso más, empleándose en protecciones contra radiaciones. Los hormigones ligeros, fabricados con piedra pómez, áridos a base de arcillas o escorias expandidas u otros áridos de pequeña masa específica, tienen densidades del orden de 1.300 kg/m^3 e incluso inferiores a mil [5.1, 5.3, 5.4].

Schmitt y Heene [5.5], proponen una clasificación de los hormigones según las densidades que posean. Esta clasificación sería:

- Hormigón ligero, con una densidad máxima de 2 t/m^3 . Además de áridos ligeros como piedra pómez, las arcillas expandidas y las escorias, también se emplean productores de poros o materiales espumantes.

- Hormigón normal, con una densidad comprendida entre 2 t/m^3 y $2,8 \text{ t/m}^3$ con arena y grava como áridos.
- Hormigón pesado o de alta densidad, con una densidad superior a $2,8 \text{ t/m}^3$. Los áridos normalmente empleados son áridos de barita, magnetita o metálicos.

5.2.1.2 Porosidad

En los materiales se distingue entre la porosidad absoluta o real y la porosidad relativa o aparente, que es también la porosidad referida a los poros accesibles o abiertos al exterior. La porosidad absoluta es el valor de la relación entre el volumen de huecos en un material y el volumen total del mismo. Esta porosidad es muy difícil de medir directamente, ya que al no ser todos los huecos o poros accesibles desde el exterior, para determinar su volumen, hay que triturar completamente el material o realizar complejas observaciones, empleando métodos de adsorción con gas, porosímetros de mercurio y mediciones a escala microscópica. La porosidad abierta es de fácil determinación y se suele medir directamente mediante ensayos de absorción de agua [5.6].

La porosidad del hormigón es uno de los parámetros que más importantes en el mecanismo del transporte de los agentes agresivos hacia el interior de la estructura. La porosidad efectiva, es decir, la porosidad interconectada y conectada a su vez con el medio exterior, tiene una influencia decisiva en el intercambio de humedad con el entorno y por lo tanto en los mecanismos de transporte de los agentes agresivos del medio hacia el interior del núcleo de hormigón [5.7]. La medida de la porosidad efectiva del hormigón es una medida del grado de durabilidad de las estructuras de hormigón frente a los agentes agresivos del medio en el cual se encuentran expuestas.

La porosidad constituye una de las principales causas del deterioro del hormigón. Esto es debido a que un alto porcentaje del agua que se utiliza para la fabricación del hormigón, por razones de fluidez, no se requiere en el proceso de hidratación del

cemento y acaba dejando una red de poros que pueden estar interconectados o no. Esta red de poros será determinante en la permeabilidad del hormigón.

Según Hummel [5.8], en el hormigón no puede esperarse una compacidad total, debido a que está formado por materiales granulares y pulverulentos que, estos a su vez, ya poseen una porosidad propia. Consecuencia de ello, puede afirmarse que no existen hormigones sin poros.

A pesar de que se haya cuidado enormemente el proceso de compactación y posterior curado del hormigón, siempre es posible encontrar poros en la masa del hormigón. Estos poros generalmente tienen forma esférica y pueden estar ocupados en mayor o menor medida por agua o aire. En el caso de los poros de aire, estos se han podido producir de forma accidental o intencionada. De forma accidental porque se ha impedido que salga el aire de la mezcla durante la operación de amasado y puesta en obra. En el caso que sea de forma intencionada será debido a la adición de aditivos aireantes que atrapan y distribuyen el aire en pequeñas burbujas.

A la hora de medir los poros en el hormigón deben contarse con los áridos, dado que estos tienen una porosidad propia. Este aspecto es sumamente importante dado que los áridos representan el 75% del volumen del hormigón. Cuanto más poroso es un árido, lo que se caracteriza por una elevada absorción de agua, mayor es la porosidad y permeabilidad del hormigón del cual forma parte.

No solamente se debe de contar con la aportación de la porosidad de los áridos, dado que la pasta de cemento del hormigón incluye una red de poros. Esta porosidad de la pasta de cemento disminuye con el tiempo debido a los procesos de hidratación. Sin embargo, el volumen de vacíos sigue existiendo en el material, y la distribución de tamaños y la conectividad van a influir en la transferencia de materia en el medio poroso.

Según el modelo de Powers [5.9] los poros de la pasta de cemento endurecida se clasifican en dos grupos distintos que se diferencian según el tamaño de los poros:

- Poros de gel (CSH)

Los espacios interlaminares se denominan poros de gel y constituyen una porosidad intrínseca del gel que representa del orden del 28% del volumen. Además, al ser los poros de gel intrínsecos a la estructura de la pasta, su volumen absoluto aumenta a medida que crece el de los productos de hidratación, es decir, el grado de hidratación contrariamente a lo que sucede con los poros capilares [5.10, 5.11].

- Poros capilares

Los poros capilares se corresponden con la fracción del espacio total (volumen de cemento y agua) no ocupada por la suma del volumen de los productos de hidratación y del volumen de cemento que permanezcan en estado anhidro. Por ello, el volumen y tamaño de los poros capilares dependerá de la relación agua cemento y del grado de hidratación del cemento.

Los poros capilares son los más importantes desde el punto de vista de la durabilidad ya que controlan el transporte de materia en el interior del hormigón debido a las fuerzas capilares y a la tensión superficial de estos huecos y también porque penetran y difunden los agresivos externos. Existen además, los poros de aire y, eventualmente, los macroporos atribuibles a defectos de compactación [5.12].

Cuando el hormigón fragua se forma una estructura de poros que definirá el comportamiento de ese hormigón con la agresividad del medio. Dicha porosidad es sumamente importante no solo por el tamaño y distribución de los poros, sino por la conexión que exista entre ellos. Según la distribución y la conexión que exista entre los poros, es posible clasificar la porosidad en [5.13]:

- Porosidad total

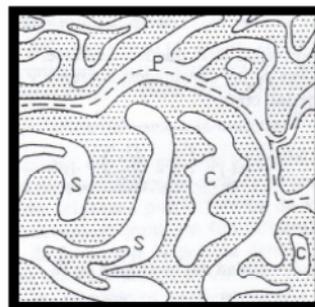
Es la relación entre el volumen de poros y el volumen total de la muestra.

- Porosidad abierta

Es la porosidad que se refiere a los poros conectados con el exterior.

- Porosidad permeable
Parte de la porosidad abierta que corresponde a los poros intercomunicados entre sí, permitiendo el paso de un fluido al interior del hormigón.
- Porosidad superficial en fondo de saco
Corresponde a una parte de la porosidad abierta, cuyos poros no están comunicados entre sí.
- Porosidad cerrada
Incluye los poros no conectados con el exterior.

En la figura 5.1 se muestran los tipos de porosidad que existen en una matriz cementante en relación a sus conexiones con el medio exterior.



P = Porosidad permeable
C = Porosidad cerrada
S = Porosidad superficial de fondo de saco
 Pasta de cemento

Figura 5.1. Tipos de poros en una matriz cementante
[Fuente: [5.13] Gómez Cano]

Los diferentes poros que se forman dentro de la masa de hormigón son debido a diferentes factores. A continuación se citan algunos de ellos [5.14]:

- La estructura interna de los granos de cemento
- El aire que se incorpore a la mezcla debido al efecto de los aireantes
- La tipología y estructura interna de los áridos

- Evaporación del agua que no interviene en la hidratación del cemento.
- Capilares que se forman entre los diferentes componentes.

Torres Agredo [5.15] establece un criterio de evaluación de la calidad del hormigón en función de la porosidad total. Dicha evaluación se indica en la tabla 5.1.

Tabla 5.1
Calidad del hormigón según su porosidad
[Fuente: [5.15] Torres Agredo]

Porosidad total, %	Evaluación
≤ 10%	Buena calidad y compacidad
10% - 15%	Moderada calidad
> 15%	Durabilidad inadecuada

5.2.1.3 Absorción

La absorción se define como el volumen del espacio ocupado por los poros en el hormigón. Normalmente la medida de la absorción se realiza secando una muestra hasta masa constante, sumergiéndola en agua y midiendo el aumento de masa como un porcentaje de masa seca.

La absorción es un indicador de la porosidad, por lo que la relación existente entre la absorción del hormigón y su porosidad no cabe discutirla, aunque pueda variar en función de los métodos utilizados para establecer los valores de ambas.

Es necesario distinguir entre permeabilidad y absorción del hormigón dado que normalmente es objeto de confusión. Mientras que la absorción generalmente está representada por la capacidad máxima del hormigón de contener agua en relación con una condición de sequedad predeterminada, la permeabilidad está relacionada con la circulación del agua a través de la masa, es decir, la facilidad con la cual un fluido penetraría en dicha masa.

Al igual que ocurría con la porosidad, la absorción del hormigón está íntimamente relacionada con la durabilidad, de ahí que sea un factor clave en la consideración de los criterios de durabilidad.

Algunos factores que influyen en los valores de la absorción del hormigón serían:

- Curado
- Absorción de los áridos
- Proceso de fabricación
- Contenido de cemento

5.2.2 Elaboración del ensayo

Para la determinación de la densidad, porosidad y absorción de agua, se ensayaron 3 probetas cúbicas de dimensiones 10x10x10 cm para cada tipo de hormigón endurecido. Cada una de las probetas ha sido curada bajo agua a $20^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$ garantizando de esa forma la saturación. La determinación de los parámetros indicados se ha realizado a 28 días de edad.

Para la realización del ensayo se han seguido las especificaciones indicadas en la norma UNE-EN 12390-7:2009 [5.16].

Ha sido necesaria la utilización de una balanza hidrostática a la que se le acopla un cesto donde se introduce la probeta a ensayar. De esta forma obtenemos el peso de la muestra sumergida. La obtención de los parámetros se realiza procediendo a la medición de 3 pesos distintos para cada una de las probetas.

Los pasos necesarios para la obtención de cada una de las mediciones han sido:

1. Obtención del peso mediante la balanza hidrostática, colocándose la muestra totalmente sumergida. Antes de proceder a realizar la medición se ha tener la

certeza que las probetas deben de haber alcanzado la saturación, hecho que se garantiza debido a que el curado de las probetas se ha realizado sumergiendo estas en agua durante 28 días. De esta forma obtenemos el peso sumergido P_{sum} .

2. Se procede al secado superficial de las caras de las probetas del paso primero con un trapo húmedo, de forma que retiremos el agua superficial. De esta forma obtenemos el peso saturado superficie seca P_{sss} .
3. Obtención del peso seco de las muestras. Para ello se procede al secado en estufa durante al menos durante 24 horas a una temperatura de $105^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$. Una vez que no se observen variaciones en la medida, es decir, se obtenga peso constante, habrá concluido el proceso de secado. El peso obtenido es el peso seco P_s .

A partir de los datos de pesadas anteriores, se determinan los parámetros de densidad, absorción y porosidad en función de las siguientes relaciones:

$$\text{Densidad} \quad D = \frac{P_s}{P_{sss} - P_{sum}} \quad (5.1)$$

$$\text{Absorción} \quad A = 100 \frac{P_{sss} - P_{sum}}{P_s} \quad (5.2)$$

$$\text{Porosidad} \quad P = 100 \frac{P_{sss} - P_s}{P_{sss} - P_{sum}} \quad (5.3)$$

5.2.3 Resultados y discusión

Una vez efectuados los ensayos, los valores obtenidos de densidad, porosidad y absorción según los diferentes tipos de hormigones estudiados se indican en la tabla 5.2.

Tabla 5.2
Valores medios de densidad, porosidad y absorción

Tipología hormigón	Densidad Kg/dm³	Porosidad %	Absorción %
HSA	2,44	2,77	1,14
HEC-20	2,46	2,86	1,16
HEC-40	2,47	3,05	1,24
HEC-60	2,51	2,97	1,18
HEC-80	2,55	2,79	1,09
HEC-100	2,57	2,26	0,88

En la figura 5.2 se aprecia como existe un claro aumento de la densidad del hormigón a medida que se aumenta el porcentaje de sustitución del árido 0/2 por la escoria de cobre. Este comportamiento es perfectamente lógico debido a que la densidad de la escoria de cobre es mayor que la densidad del árido 0/2.

De la misma forma y analizados los valores correspondientes a los ensayos de porosidad (figura 5.3) y absorción (figura 5.4), se observa que existen dos zonas bien diferenciadas. La primera de ellas corresponde a una zona de crecimiento para valores comprendidos entre 0% y 40% de concentración de escorias, y la segunda a una zona de decrecimiento para valores superiores al 40%.

Una geometría de partículas del tipo cúbica/prismática producirá sistemas más compactos que una geometría esférica debido a que el encaje de las primeras en el esqueleto granular es mucho mejor. Como se indicó en el capítulo 4 (figuras 4.14 y 4.15), los granos de árido fino son de geometría cúbica/prismática frente a una geometría más esférica de los granos de escoria de cobre. Esta diferencia de geometría en las partículas de ambos materiales, pone de manifiesto que la sustitución de árido fino por escoria de cobre provoca una pérdida de compacidad y, en consecuencia, un sistema más poroso. Este comportamiento se representa claramente en la curva de porosidad, donde en el momento en el cual se empieza a sustituir el árido fino aumenta la porosidad, hasta el 40% donde existe un claro cambio de tendencia.

El decrecimiento tanto de la curva de porosidad como de la de absorción, correspondientes a valores superiores al 40% de escoria, sería debido a que esta, como material puzolánico adicionado al hormigón, reacciona con la portlandita del cemento, formando nuevos silicatos de calcio hidratados. Estos silicatos contribuyen a densificar la microestructura del hormigón, disminuyendo los poros capilares y la interconexión entre ellos, compensando de forma eficaz la pérdida de compacidad del sistema al ir desapareciendo el árido fino. Este hecho no ocurre en la zona de crecimiento de la curva, dado que la concentración de escoria no es suficiente como para que la actividad puzolánica sea representativa. Igualmente, a medida que se sustituye árido fino por escoria, la superficie específica es menor, por lo que existe una mayor cantidad de pasta de cemento disponible destinada a cerrar huecos intergranulares y disminuir la porosidad.

5.2.4 Modelización de los parámetros

Para el ajuste de los puntos se plantea un modelo analítico basado en un polinomio de segundo grado. Esta expresión analítica facilita el valor de la densidad, porosidad y absorción más cercano al valor verdadero en función del porcentaje árido fino 0/2 que se sustituye por escoria de cobre, a la vez que nos indica a través del coeficiente de determinación R^2 la bondad del ajuste.

La expresión del modelo analítico sería:

$$y = A x^2 + B x + C \quad (5.4)$$

donde:

y: densidad, absorción o porosidad, según el caso

x: porcentaje de escoria de cobre, %

A, B, C constantes a determinar

El resultado de los modelos analíticos de cada uno de los parámetros estudiados se indica en la tabla 5.3. Igualmente en las figuras 5.2, 5.3 y 5.4 se representan los valores obtenidos en cada uno de los ensayos, así como la modelización de los mismos.

En todos los modelos propuestos el coeficiente de determinación indican que los valores obtenidos no son probabilísticos, sino que tienen cierta firmeza y por lo tanto la toma de decisiones basadas en la modelización será muy acertada.

Tabla 5.3

Modelos analíticos propuestos para la determinación de la densidad, porosidad y absorción del hormigón

Parámetro	Modelo analítico propuesto	R ²
Densidad (kg/dm ³)	$y = 7,40 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 + 6,67 \cdot 10^{-4} \cdot x + 2,44$ (5.5)	0,985
Porosidad (%)	$y = 2,03 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 + 1,62 \cdot 10^{-2} \cdot x + 2,72$ (5.6)	0,944
Absorción (%)	$y = 8,33 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 6,10 \cdot 10^{-3} \cdot x + 1,12$ (5.7)	0,961

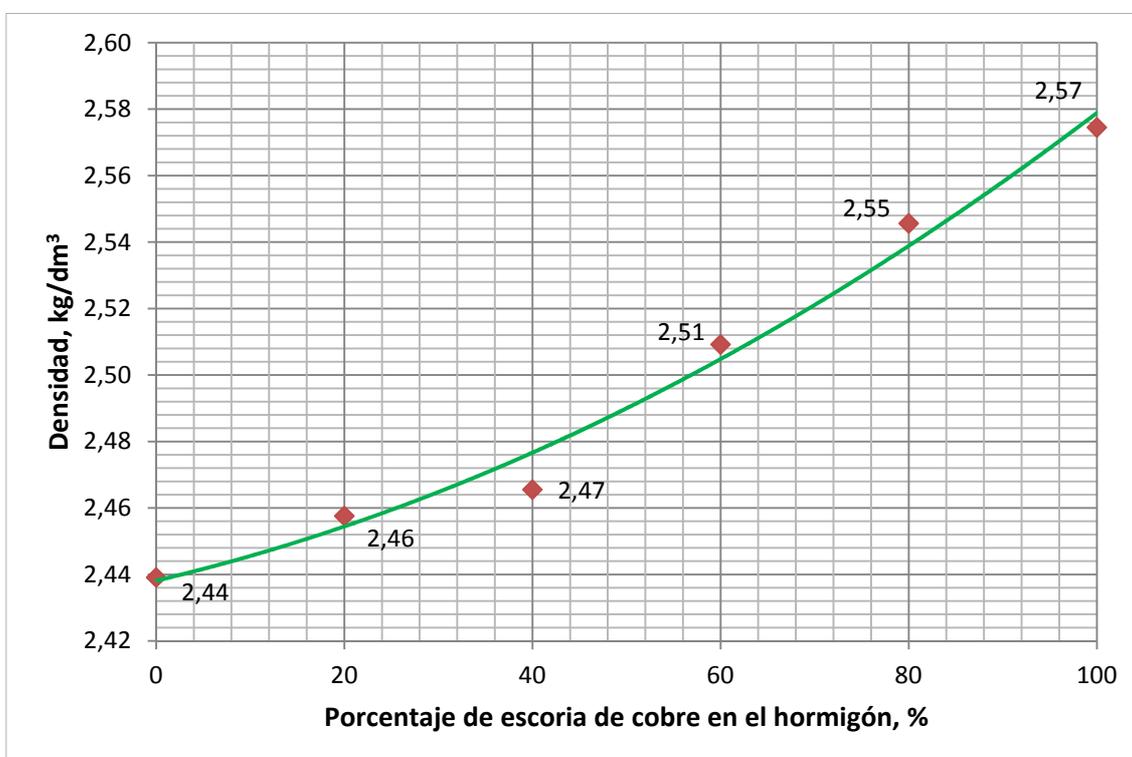


Figura 5.2. Resultado y modelización del ensayo de densidad del hormigón según el porcentaje de escoria de cobre

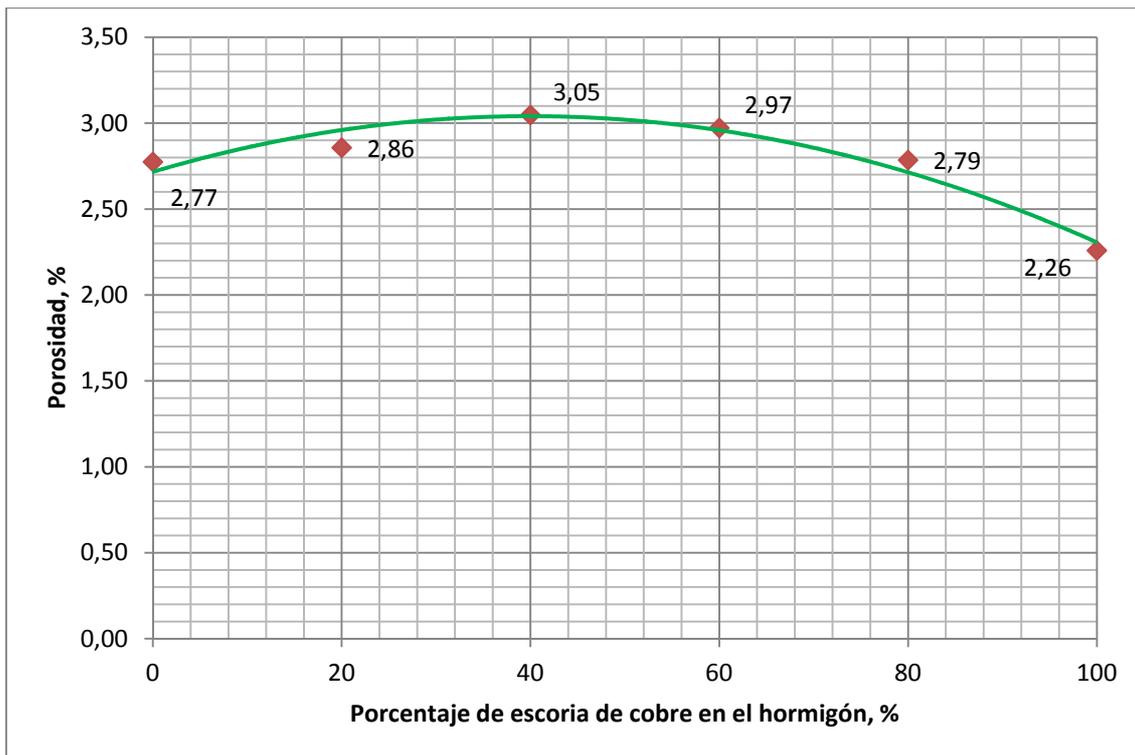


Figura 5.3. Resultados y modelización del ensayo de absorción del hormigón según el porcentaje de escoria de cobre

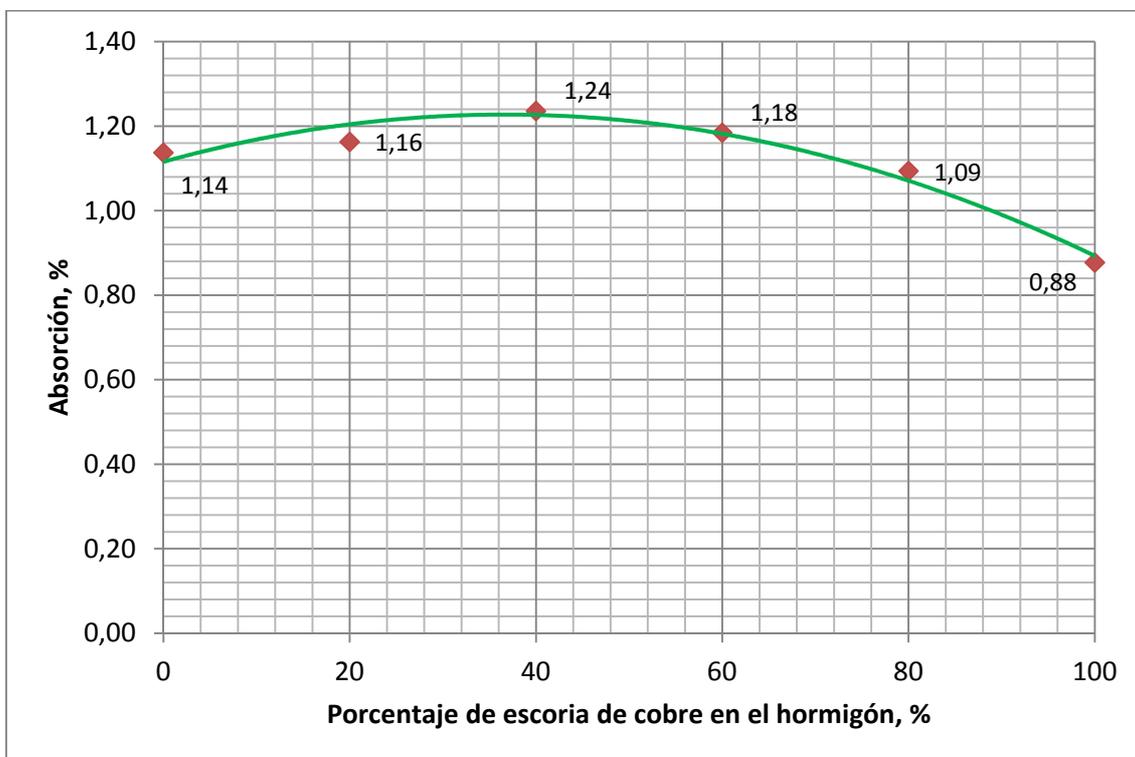


Figura 5.4. Resultados y modelización del ensayo de porosidad del hormigón según el porcentaje de escoria de cobre

5.2.5 Conclusiones

A continuación se describen las conclusiones más relevantes que se derivan de los distintos ensayos de laboratorio realizados:

- Para todos los hormigones fabricados, a medida que se incrementa la sustitución de árido fino 0/2 por escoria de cobre, la densidad aumenta. En consecuencia a mayor porcentaje de escoria de cobre mayor densidad, es decir, hormigones más pesados.
- Para concentraciones de escoria comprendidas entre 0% y 40%, la absorción y la porosidad de los hormigones aumenta, existiendo una pérdida de compacidad del sistema y no siendo representativa la acción puzolánica a estas concentraciones.
- Para concentraciones superiores al 40% de escoria, se produce una disminución de la porosidad y la absorción de los hormigones, mejorándose la durabilidad. la pequeña actividad puzolánica de la escoria es capaz de empezar a producir suficientes silicatos como para comenzar a densificar y cerrar la red de poros.

5.3 Ensayo para la determinación de la succión

5.3.1 Introducción

La succión capilar es un caso especial de transporte cuya fuerza impulsora la constituye la tensión superficial del agua actuante sobre la red de capilares del hormigón. Se trata de un fenómeno que se produce en las estructuras parcialmente saturadas sometidas a ciclos de humedecimiento y secado, como por ejemplo estructuras expuestas al agua de lluvia, carreras de marea o en contacto frecuente con agua. Este mecanismo de transporte está directamente vinculado con la estructura porosa del hormigón, más específicamente con la distribución y conexión de los poros capilares [5.17].

La capacidad y la velocidad de succión del hormigón y en particular la del hormigón que recubre las armaduras, el llamado recubrimiento, es un parámetro asociado estrechamente a la durabilidad del hormigón.

Al poner una muestra de hormigón seco en contacto con el agua se produce un gradiente de presión entre el exterior y el interior, induciendo una succión capilar que conduce el líquido desde las partes más húmedas hacia las más secas. Este movimiento se ve influenciado por las características del líquido (viscosidad, densidad y tensión superficial) y por las características del sólido poroso (permeabilidad, estructura de poros y energía superficial) [5.18].

El coeficiente de succión se determina según su definición, mediante la relación entre el volumen de agua absorbido por unidad de área y la raíz cuadrada del tiempo [5.19]:

$$\frac{1}{\theta} \int F dt = S \cdot \sqrt{t} \quad (5.8)$$

siendo (S) el coeficiente de succión capilar.

Si suponemos que el área de la probeta es constante y el volumen de agua absorbida por la misma es constante en un tiempo t , la ecuación (5.8) se expresará como:

$$\frac{W}{A} = S \times \sqrt{t} \quad (5.9)$$

donde:

- W peso del agua succionada
- A superficie en contacto con el agua
- T tiempo
- S coeficiente de succión

La suposición efectuada es totalmente válida dado que en todo momento se conoce la superficie de la probeta expuesta al agua, la cual es constante, y el volumen en un instante t de medida, que igualmente también será constante.

5.3.2 Proceso de elaboración del ensayo

El ensayo tiene como objetivo determinar dos parámetros característicos del hormigón; la capacidad de succión capilar (C) y el coeficiente de succión (S). El primer parámetro (C), representa la cantidad de agua por unidad de área que es capaz de absorber la muestra del ensayo hasta llegar a una masa constante, y el segundo parámetro (S), indica la rapidez a la cual el agua penetra en la estructura porosa del hormigón. Al parámetro (S) también se le conoce por velocidad de succión.

El valor del coeficiente de succión indicará el orden de magnitud de la porosidad del hormigón objeto del ensayo.

Dado que no existe una normativa española para la determinación de la capacidad de succión y el coeficiente de succión, el ensayo se fundamenta en la norma Argentina, IRAM 1871 [5.20], adaptándola a los criterios propios del laboratorio de Hormigones y Materiales de la Escuela Politécnica Superior de Algeciras, modificando la geometría de las probetas. La norma indica que las probetas serán de 100 mm de diámetro para hormigones donde el tamaño máximo del árido pase en su totalidad por el tamiz 26,5 mm, y una altura de 50 mm.

Se utilizaron probetas cúbicas de 10 cm de arista, dado que en el laboratorio no dispone de probetas de diámetro 100 mm ni de la maquinaria necesaria para aserrar estas. Entendemos que el cambio de geometría no influirá en el procedimiento debido a que la formulación utilizada en el ensayo permite introducir el valor de la superficie de la probeta en contacto con el agua. De la misma forma, la altura de la probeta no forma parte de la formulación, influyendo únicamente en un aumento del tiempo necesario para establecer el equilibrio entre la cara de la probeta en contacto con el agua y la opuesta. Este hecho se traduce en que las curvas de capacidad de succión estarán formadas por una pequeña zona parabólica al inicio del ensayo debido a que la succión es elevada, para luego convertirse en una línea recta a medida que la succión disminuye. Dada la altura de la probeta utilizada no se observan tendencias asintóticas de la capacidad de succión para los tiempos de ensayo utilizados.

Para la realización del ensayo, se utilizan 3 probetas cúbicas de dimensiones 10x10x10 cm para cada tipo de hormigón endurecido. Cada una de las probetas ha sido curada bajo agua a $20^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$. La determinación de los parámetros indicados se realiza a 28 días de edad.

El ensayo consiste en sumergir cada una de las probetas en agua de manera que esta solo pueda ser absorbida por la parte inferior de la probeta. Para ello se impermeabilizan 2 cm de la parte inferior de las caras laterales. El nivel de agua debe ser de 5 mm superior a la superficie de hormigón en contacto con el agua, tal y como queda ilustrado en la figura 5.5.

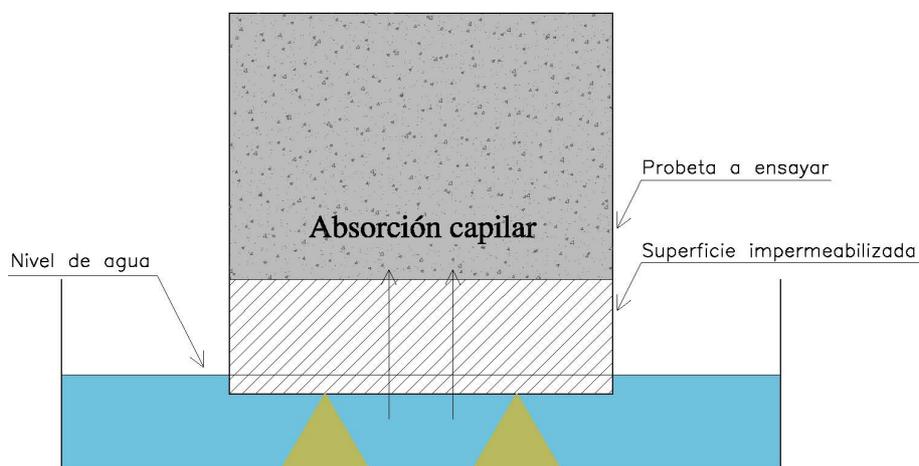


Figura 5.5. Esquema del ensayo de succión capilar

Para la superficie de absorción se utilizó una de las caras de la probeta en contacto con el encofrado liso de modo que en todo momento se han evitado coqueras, exfoliaciones, textura rugosa o alta porosidad.

Inicialmente y dado que las probetas se curan durante 28 días sumergidas en agua, se procede a secarlas completamente. Para ello se introducen en una estufa a $50^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante, en nuestro caso 4 días. De esta forma el proceso de secado es lento y no produce fisuras que podrían arrojar resultados erróneos en el ensayo.

Una vez acabado el proceso de secado se introducen las probetas en una doble bolsa de polietileno, dejándolas enfriar hasta temperatura ambiente durante 24 horas.

Realizada esta operación se procede al pesado de las probetas, obteniendo el peso seco de la muestra, M_s .

Seguidamente se introducen las probetas en el recipiente con agua, de forma inclinada para facilitar la humectación de la superficie y con el objeto de evitar formación de burbujas de aire. El recipiente del ensayo se tapa para procurar alcanzar una humedad de equilibrio del aire mayor al 95% y para reducir la evaporación por las bases de las probetas.

En los tiempos de 0 (inicio del ensayo), 5, 10, 30, 60, 90 min, 2, 3, 12, 24, 48 y 72 horas (final del ensayo), se retiraron cuidadosamente cada una de las probetas del recipiente y se procedió al secado con un paño escurrido y húmedo de la base de absorción y las superficies laterales impermeabilizadas. Seguidamente se pesaron para determinar la masa húmeda M_{ht} . Se realizaron más medidas que las estrictamente indicadas por la norma de forma que hemos aumentado el número de puntos para calcular los parámetros del ensayo.

Para cada una de las probetas en el instante de lectura t , se determina el incremento de masa por unidad de superficie C_t , mediante la siguiente expresión:

$$C_t = \frac{M_{ht} - M_s}{A} \quad (5.10)$$

siendo:

C_t incremento de masa por unidad de área de la sección transversal de la probeta en el instante de lectura t , en gramos/m².

M_{ht} masa húmeda de la probeta en el instante de lectura t , en gramos.

M_s masa seca de la probeta, en gramos.

A superficie de la sección transversal de la probeta en contacto con el agua, en m².

La capacidad de succión capilar de cada probeta, es el valor del incremento de masa por unidad de superficie de la sección transversal dicha probeta, en el instante de medida t , determinado según la ecuación (5.10).

La velocidad de succión capilar vendrá determinada por la pendiente de la recta obtenida mediante el ajuste por mínimos cuadrados de los valores de la capacidad de succión capilar relativa a los datos obtenidos durante las 72 horas que dura el ensayo.



Figura 5.6. Probetas en contacto con agua durante el ensayo de succión



Figura 5.7. Impermeabilización de caras laterales en el ensayo de succión

5.3.3 Resultados y discusión

En la tabla 5.4 se indican los valores obtenidos de la capacidad de succión capilar para cada tipo de hormigón.

Tabla 5.4
Valores medios de la capacidad de succión capilar

T	Tipología de hormigón					
	HSA	HEC-20	HEC-40	HEC-60	HEC-80	HEC-100
0'	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5'	0,007	0,005	0,008	0,011	0,007	0,007
10'	0,009	0,008	0,010	0,014	0,009	0,009
30'	0,014	0,010	0,014	0,019	0,012	0,011
60'	0,018	0,014	0,018	0,024	0,015	0,014
90'	0,020	0,016	0,020	0,026	0,017	0,016
2 h	0,023	0,019	0,023	0,029	0,019	0,017
3 h	0,026	0,022	0,026	0,032	0,022	0,020
12 h	0,045	0,040	0,046	0,050	0,039	0,035
24 h	0,060	0,054	0,062	0,066	0,053	0,047
48 h	0,078	0,072	0,080	0,085	0,071	0,063
72 h	0,093	0,085	0,091	0,102	0,085	0,073

En la figura 5.8 se representan las curvas de la capacidad de succión capilar en función del tiempo, para cada uno de los hormigones. En todos los casos estudiados, los hormigones presentan una evolución de la capacidad de succión muy similar, siendo las curvas de succión-tiempo crecientes. Las curvas de succión deberían de estar formadas por una línea recta para tiempos inferiores a 120 minutos, para posteriormente tender a formas parabólicas a medida que avanza el ensayo, debido al equilibrio con la cara opuesta en contacto con el agua. En nuestro caso todos los tramos son rectos, no observándose zona parabólica, dado que no se alcanza el equilibrio entre la cara en contacto con el agua y su opuesta, como consecuencia de la altura de probeta utilizada y de los tiempos de ensayo utilizados. Debido a que los poros de las probetas se van saturando a medida que se incrementa el tiempo, las rectas tienen mayor pendiente al inicio del ensayo.

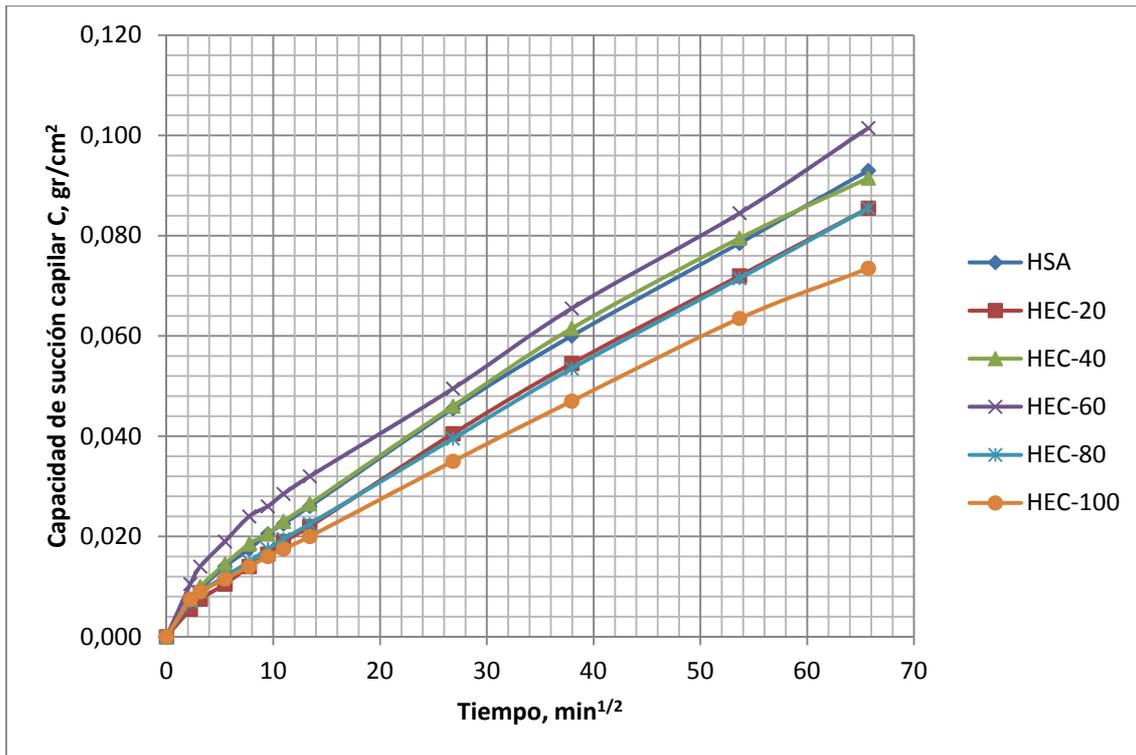


Figura 5.8. Capacidad de succión capilar de los diferentes hormigones estudiados

El coeficiente de succión para cada tipo de hormigón vendrá determinado por la pendiente de la recta de regresión relativa a los datos obtenidos durante las 72 horas que dura el ensayo. En la figura 5.9 se representa gráficamente los valores de la capacidad de succión con su recta de regresión para el caso del hormigón sin escorias de cobre, HSA.

Realizando el mismo proceso de ajuste de los datos experimentales obtenidos durante el tiempo de ensayo para cada uno de los hormigones restantes, en la tabla 5.5 se detallan las expresiones de las rectas de regresión ajustada a los valores de la capacidad de succión para un periodo de 72 horas. Igualmente se indica el valor del coeficiente de succión para cada tipo de hormigón.

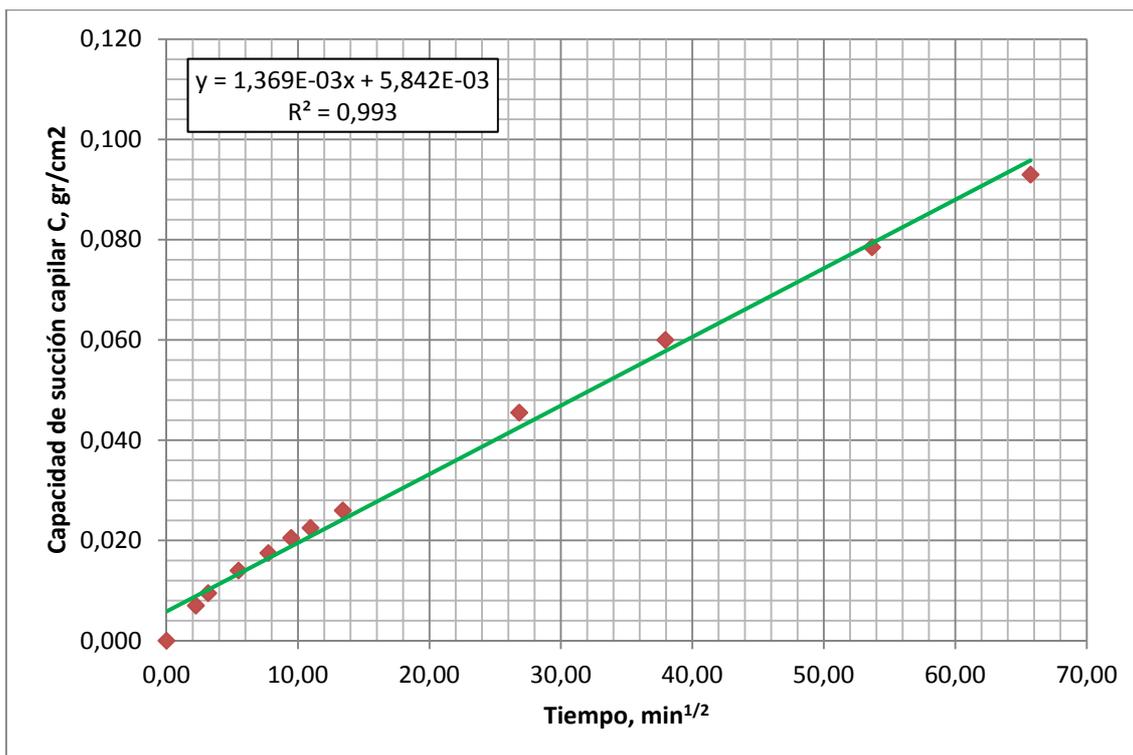


Figura 5.9. Recta de regresión del hormigón tipo HSA ajustada a los valores de capacidad de succión para un periodo de 72 horas

Tabla 5.5

Coeficientes de succión de los hormigones estudiados

Tipología hormigón	Ecuación de recta		Coef. de succión, S (mm/min ^{1/2})
HSA	$y = (1,369 \cdot x + 5,84) \cdot 10^{-3}$	(5.11)	0,001369
HEC-20	$y = (1,281 \cdot x + 3,69) \cdot 10^{-3}$	(5.12)	0,001281
HEC-40	$y = (1,359 \cdot x + 6,44) \cdot 10^{-3}$	(5.13)	0,001359
HEC-60	$y = (1,425 \cdot x + 9,82) \cdot 10^{-3}$	(5.14)	0,001425
HEC-80	$y = (1,253 \cdot x + 4,66) \cdot 10^{-3}$	(5.15)	0,001253
HEC-100	$y = (1,077 \cdot x + 4,97) \cdot 10^{-3}$	(5.16)	0,001077

En la figura 5.10 se representan gráficamente los valores correspondientes al coeficiente de succión en función del porcentaje de escoria de cobre presente en el hormigón. En ella se observa como a medida que aumenta la sustitución de árido fino 0/2 por escoria de cobre la tendencia del coeficiente de succión es a decrecer, para

posteriormente crecer ligeramente y finalmente para concentraciones superiores al 60%, disminuir rápidamente.

Para valores comprendidos entre 0% y 20% de escoria, el coeficiente de succión disminuye, para posteriormente crecer hasta el punto 60%. Esta tendencia, si bien parece contradecir lo observado durante el ensayo de porosidad en el mismo intervalo, donde existía un crecimiento de la misma, es perfectamente posible, dado que una succión baja a pesar de una porosidad alta indica que los poros existentes son discontinuos, inefectivos o están mínimamente interconectados.

Para valores superiores al 60% de escoria el coeficiente de succión y la porosidad anteriormente descrita, evolucionan de forma similar, es decir, decrecen debido a que la escoria como material puzolánico, reacciona con la portlandita del cemento, formando nuevos silicatos de calcio hidratados, contribuyendo a densificar la microestructura del hormigón, disminuyendo los poros capilares de la pasta de cemento y la interconexión entre ellos. Debido a que la porosidad y la succión decrecen a la vez, claramente indica que los poros son discontinuos e inefectivos.

5.3.4 Modelización

Para el ajuste de los puntos se planteado un modelo analítico basado en un polinomio de tercer grado, cuya expresión es:

$$y = A x^3 + B x^2 + C x + D \quad (5.17)$$

donde:

y coeficiente de succión, en mm/min^{1/2}

x porcentaje de escoria de cobre, %

A, B, C, D constantes a determinar

Con los valores obtenidos en el laboratorio y realizado el ajuste, se obtiene:

$$y = (-1,77 \cdot 10^{-6} x^3 + 2,01 \cdot 10^{-4} x^2 - 5,37 \cdot 10^{-3} x + 1,36) \cdot 10^{-3} \quad (5.18)$$

El coeficiente de determinación tiene un valor de $R^2=0,907$.

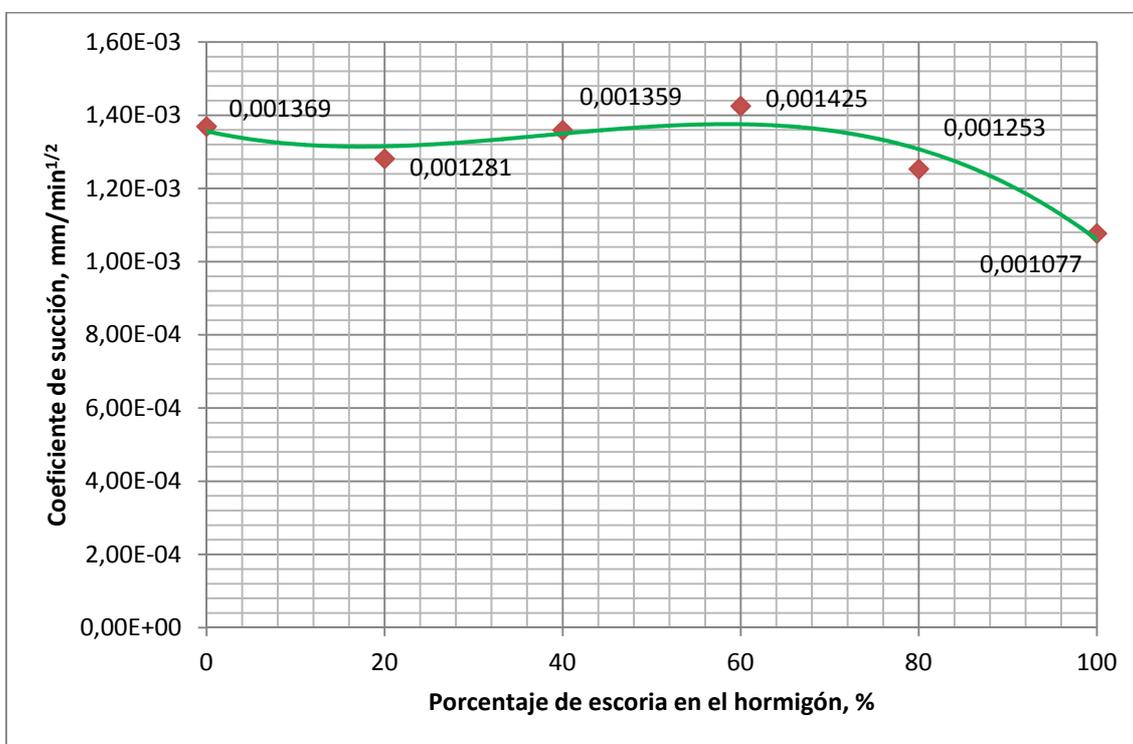


Figura 5.10. Resultados y modelización del coeficiente de succión (S), según el porcentaje de escoria de cobre

5.3.5 Conclusiones

A continuación se describen las conclusiones más relevantes que se derivan del ensayo de succión de agua:

- En general existe una tendencia a la disminución de la capacidad de succión a medida que se incrementa el porcentaje de escoria, obteniéndose coeficientes de succión inferiores a los del hormigón de referencia, es decir, se obtienen hormigones que se comportan mejor frente a los agentes externos del medio.
- La escoria de cobre mejora notablemente la durabilidad del hormigón al disminuir el acceso de los agentes agresivos, eliminando o retardando el ataque sobre las armaduras y la degradación interna del hormigón.

5.4 Ensayo de permeabilidad al agua bajo presión

5.4.1 Introducción

El ensayo se fundamenta en introducir agua en la masa de hormigón induciendo una gradiente de presión. Este gradiente de presión es perfectamente conocido al ser un parámetro fijado por el usuario.

Para la determinación de la penetración del agua existen dos métodos de valoración. El primero de ellos viene dado por la ASTM D 6527-00 [5.21] y el sistema para separar el agua introducida en la masa de hormigón se realiza mediante la aplicación de una fuerza centrífuga. En el segundo método se determina la profundidad de penetración del agua en la masa de hormigón y en el caso de España viene determinada por la norma UNE-EN 12390-8:2009 [5.22].

Existen estudios donde es posible estimar el coeficiente de permeabilidad una vez conocido la profundidad de penetración del agua en el hormigón. Uno de esos estudios fue desarrollado por Valenta [5.23], el cual propone la siguiente expresión:

$$K = \frac{e^2 \cdot v}{2 \cdot h \cdot t} \quad (5.19)$$

donde:

- K coeficiente de permeabilidad, en m/s
- e profundidad de penetración, en metros
- h presión hidráulica, en metros
- t tiempo bajo presión, en segundos
- v fracción de volumen de hormigón ocupado por los poros. Este valor normalmente oscila entre 0,02 y 0,06.

La determinación del valor del coeficiente de permeabilidad permite evaluar la permeabilidad del hormigón y su durabilidad en el ambiente de exposición [5.23].

La impermeabilidad al agua del hormigón es una condición necesaria, aunque no suficiente, para lograr un comportamiento adecuado frente a los ataques agresivos. Por otro lado, la permeabilidad no es el único mecanismo que interviene en los procesos de degradación del hormigón, ya que existen otros ligados al fenómeno de absorción de agua y de difusión de gases e iones [5.24].

Una forma de garantizar la durabilidad del hormigón, así como su colaboración en la protección de las armaduras frente a la corrosión, consiste en obtener un hormigón con una permeabilidad reducida. Para obtenerla son decisivas la elección de una relación agua/cemento suficientemente baja, la compactación idónea del hormigón, un contenido adecuado de cemento y la hidratación suficiente de este, conseguida con un cuidadoso curado.

En el caso de ensayos realizados con valores de presión superiores a 2,75 MPa existe la posibilidad de que se produzcan alteraciones en la microestructura del hormigón [5.11]. Estas alteraciones producirían el bloqueo de los poros por sedimentación y/o la hidratación de partículas de cemento que se encuentren deshidratadas. Dichas alteraciones en la microestructura se denomina autosellado y produce una disminución de la permeabilidad con el tiempo. Diferentes estudios realizados por la Universidad de Toronto [5.25] demuestran que a pesar de que no existan partículas de cemento por rehidratar se produce el fenómeno de autosellado, fundamentando el fenómeno en las disoluciones o redistribuciones del hidróxido de calcio.

Existen una serie de factores que influyen en los valores de penetración del agua en la masa de hormigón. Algunos de estos factores se indican a continuación:

- Relación agua/cemento
- Curado
- Compactación
- Fisuración

- Heterogeneidades

La forma más adecuada de reducir los ataques al hormigón es conseguir que sus poros ocupen el menor volumen posible y formen una red capilar poco intercomunicada [5.24]. Este es el objetivo que se pretende conseguir cuidando cada uno de los factores anteriormente indicados.

La durabilidad del hormigón está íntimamente ligada, entre otros factores, al grado de impermeabilidad que posea para hacer frente a la protección de las armaduras. Debido a ello se debe estudiar la permeabilidad de un hormigón sobre todo en el caso donde el medio sea de una agresividad especial.

La instrucción de hormigón estructural EHE-08 [5.24] en su artículo 37.3.3 establece las dos condiciones simultáneas que debe cumplir un hormigón para considerarlo suficientemente impermeable. Estas condiciones en función de la clase de exposición ambiental se indican en la tabla 5.6.

Tabla 5.6

Profundidad de penetración máxima y media según la EHE-08

Clase de exposición ambiental	Profundidad máxima	Profundidad media
III _a , III _b , IV, Q _a , E, H, F, Q _b (en el caso de elementos en masa o armados)	50 mm	30 mm
III _c , Q _c , Q _b (solo en el caso de elementos pretensados)	30 mm	20 mm

Dado que los hormigones objeto de este trabajo se dosifican para ambientes del tipo III_c+Q_c, las profundidades máximas y medias de penetración según la instrucción de hormigón estructural EHE-08 serían:

- Profundidad máxima de penetración 30 mm
- Profundidad media de penetración 20 mm

5.4.2 Proceso de elaboración del ensayo

El ensayo tiene como objetivo determinar la profundidad de penetración de agua bajo presión en la masa de hormigón endurecido. Para ello se realizó la medición sobre 3 probetas diferentes para cada tipo de hormigón endurecido, pero siempre fabricadas en la misma amasada.

Las probetas utilizadas en el ensayo tienen geometría cilíndrica $\phi 15 \times 30$ cm. Cada una de las probetas han sido curadas bajo agua a una temperatura de $20^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C}$. La determinación del parámetro indicado se ha realizado a 28 días de edad.

Para la elaboración del ensayo se siguieron las especificaciones indicadas en la norma UNE-EN 12390-8:2009 [5.22].

Inicialmente y dado que las probetas se han curado durante 28 días sumergidas en agua, se las somete a un proceso de secado. Para ello se introducen en una estufa a $50^{\circ} \text{C} \pm 2^{\circ} \text{C}$ hasta masa constante, que en nuestro caso han sido 4 días. De esta forma el proceso de secado es lento y no produce fisuras que podrían arrojar resultados erróneos en el ensayo.

Una vez secas las probetas, se colocan en el equipo de ensayo mostrado en la figura 5.13, de forma que no se aplique el agua a presión sobre la cara fratasada de estas. Una vez colocada de forma correcta se aplica agua a una presión de 500 ± 50 kPa durante un tiempo de 72 ± 2 h. Periódicamente se observan las superficies de la probeta no expuestas al agua a presión para identificar la posible presencia de agua. En todos los casos no se observó presencia de agua por lo que los ensayos fueron válidos.

Después de aplicar la presión durante el tiempo especificado se retira la probeta del equipo de ensayo, se limpia la cara a la que se aplicó la presión de agua y se rompe en dos mitades perpendicularmente a la cara en la que se aplica la presión de agua.



Figura 5.11. Detalle de probeta montada en equipo durante el ensayo de permeabilidad al agua bajo presión

Una vez rota la probeta en dos mitades se marca en una de ellas el frente de penetración. Dicho frente se calca en papel milimetrado y se realizan las mediciones de la profundidad de penetración máxima y media redondeada al milímetro más próximo.

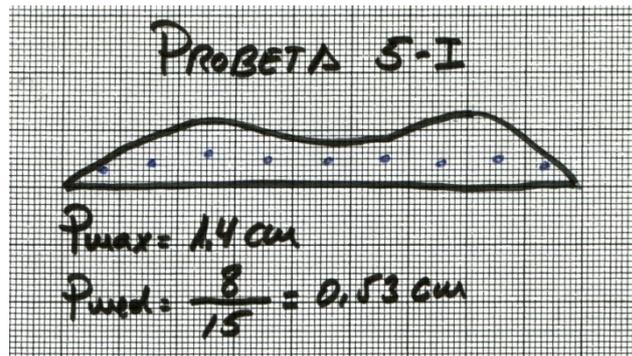


Figura 5.12. Frente de penetración de agua y calca sobre papel milimetrado para determinar la penetración máxima y media del hormigón

5.4.3 Resultados y discusión

En la tabla 5.7 se detallan los valores obtenidos en el ensayo de permeabilidad al agua bajo presión para cada tipo de hormigón.

Tabla 5.7
Valores medios de permeabilidad al agua bajo presión

Tipología hormigón	Penetración (mm)	
	Máxima	Media
HSA	18,5	8,8
HEC-20	14,0	6,3
HEC-40	13,0	6,2
HEC-60	17,5	6,5
HEC-80	17,0	6,5
HEC-100	15,0	6,3

Aplicando la expresión dada por Valenta (ecuación 5.13), se obtienen los coeficientes de permeabilidad conocida la penetración. En nuestro caso se utilizan los valores de penetración máxima dado que de esta forma los coeficientes obtenidos estarán del lado de la seguridad.

Tabla 5.8
Coeficientes de permeabilidad según Valenta

Tipología hormigón	Coefficiente de permeabilidad $\times 10^{-11}$ (cm/s)
HSA	5,181
HEC-20	2,967
HEC-40	2,558
HEC-60	4,636
HEC-80	4,375
HEC-100	3,406

En las figuras 5.13 y 5.14 se representan los valores de la penetración máxima y media respectivamente en función de los distintos porcentajes de escoria presente en cada uno de los hormigones estudiados.

Los resultados obtenidos en el ensayo cumplen con los requisitos exigidos por la instrucción de hormigón estructural EHE-08 [5.24] para el tipo de exposición III_c + Q_c, donde se limita la profundidad máxima de penetración a 30 mm y la profundidad media a 20 mm según se indicó en la tabla 5.6.

Tanto la curva de penetración máxima (figura 5.13) como media (figura 5.14) presentan una zona de decrecimiento entre porcentajes de escoria comprendidos entre 0%-40%. Esta tendencia, al igual que ocurría con la succión, difiere de la observada en la curva de porosidad (figura 5.3). Este hecho ratifica que en nuestro caso, una porosidad alta indica que los poros existentes son discontinuos, inefectivos o están mínimamente interconectados, por lo que una alta porosidad no significa una alta permeabilidad.

Para valores comprendidos entre 40% y 60% de concentración de escorias, se observa un crecimiento de la penetración de agua, posiblemente motivado por la pérdida de compacidad del sistema al no producirse un encaje del todo óptimo entre la escoria y el árido fino debido a que existe una concentración insuficiente de este último.

Para valores superiores al 60% de escoria, la evolución de la penetración de agua es similar al coeficiente de succión y a la porosidad anteriormente descrita, decreciendo debido a que la escoria como material puzolánico, reacciona con la portlandita del cemento, formando nuevos silicatos de calcio hidratados, contribuyendo a densificar la microestructura del hormigón, disminuyendo los poros y la interconexión entre ellos.

La curva de penetración media (figura 5.16) presenta un trazo más suavizado como consecuencia de que se toman unos valores que representan el centro de gravedad del área de la huella del frente de penetración.

5.4.4 Modelización de los parámetros

Los resultados experimentales mostrados en las figuras 5.13 y 5.14 han sido ajustados con un polinomio de tercer grado. De esta forma es posible predecir el valor de la penetración máxima y media para una concentración de escoria dada.

La expresión del modelo analítico empleado sería:

$$y = A x^3 + B x^2 + C x + D \quad (5.17)$$

donde:

y: penetración de agua, en mm

x porcentaje de escoria de cobre, %

A, B, C, D constantes a determinar

El resultado obtenido para el modelo analítico de la penetración máxima sería:

$$y = -6,54 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 1,05 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 - 4,29 \cdot x + 18,6 \quad (5.20)$$

El coeficiente de determinación tiene un valor de $R^2=0,877$.

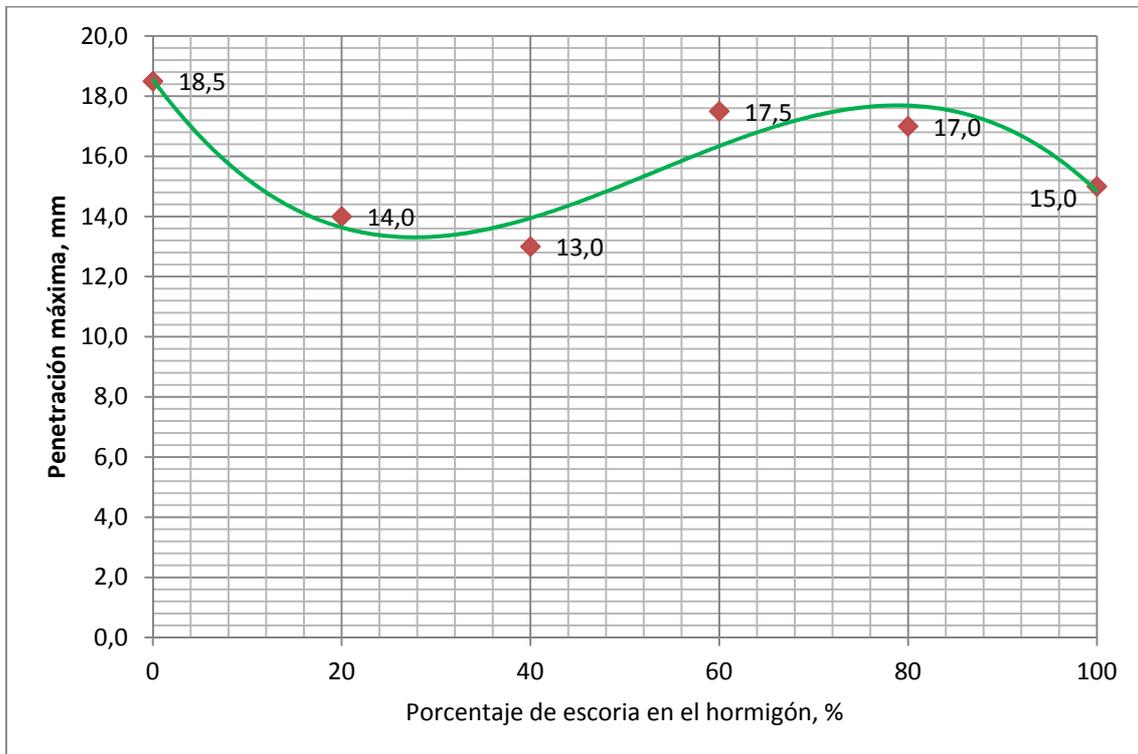


Figura 5.13. Resultado y modelización de la penetración media del agua a presión según el porcentaje de escoria de cobre

En el caso de la penetración media el resultado del modelo analítico es el siguiente:

$$y = -1,66 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 3,01 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 - 0,16 \cdot x + 8,71 \quad (5.21)$$

El coeficiente de determinación tiene un valor de $R^2=0,956$

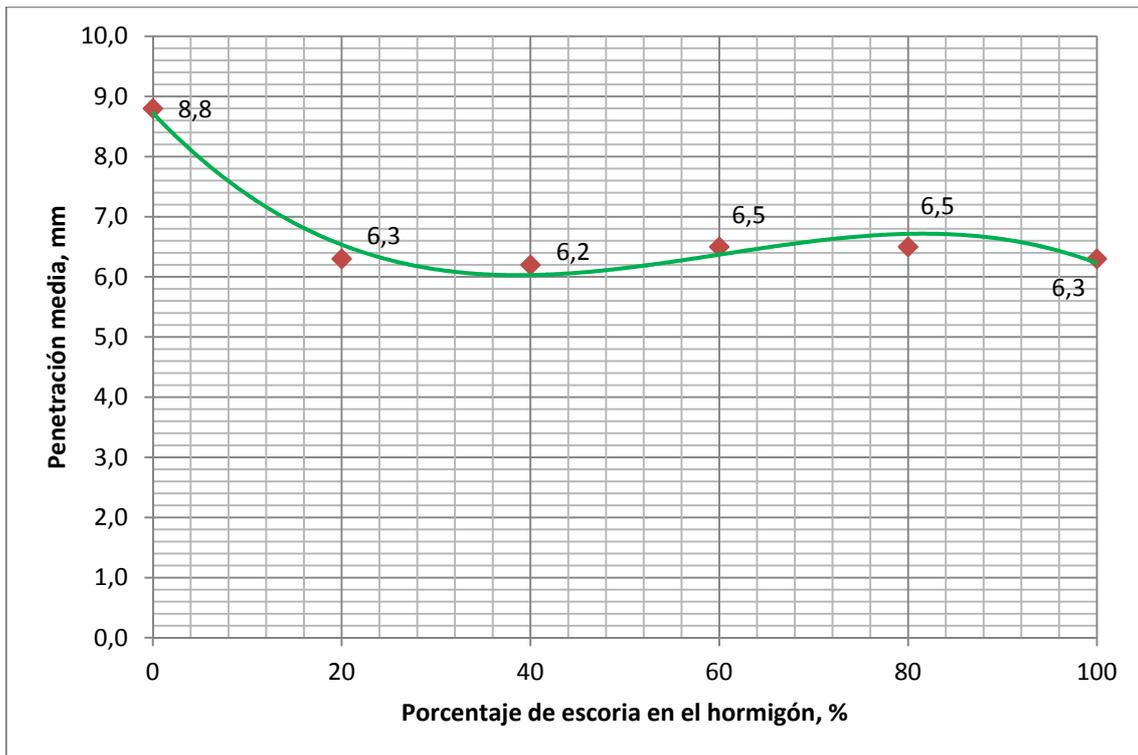


Figura 5.14. Resultado y modelización de la penetración máxima del agua a presión según el porcentaje de escoria de cobre

5.4.5 Conclusiones

A continuación se describen las conclusiones más relevantes que se derivan del ensayo de penetración de agua bajo presión:

- En todos los casos existe una mejora del comportamiento de la permeabilidad de los hormigones cuando se incrementa el porcentaje de escoria de cobre, lo que pone de manifiesto que la escoria de cobre se comporta de forma óptima ante el diseño de hormigones impermeables.

- La penetración máxima presenta cambios importantes frente a la penetración media donde las variaciones son relativamente pequeñas, para concentraciones de escoria superiores al 60%. Este hecho pone de manifiesto que un parámetro de diseño importante sería el tipo de penetración de agua a considerar en el diseño, dado que ello conlleva utilizar unos porcentajes de escoria u otros. Optar por la penetración media conlleva a que es prácticamente indiferente utilizar porcentajes de escoria por encima del 60%, no ocurriendo lo mismo si se opta por la penetración máxima como parámetro de diseño.

5.5 Resistencia a compresión

5.5.1 Introducción

La resistencia a compresión es la característica mecánica principal del hormigón y se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área. De entre todas las sollicitaciones a las que el hormigón hace frente, la resistencia que presenta frente a los esfuerzos de compresión es la más elevada de todas. Debido a ello es esta característica la que presenta un mayor interés en su determinación dado que, la mayor parte de las aplicaciones del hormigón, hace uso de esa capacidad resistente, además de ser un índice de magnitud de otras propiedades del mismo [5.26].

Determinar esta propiedad del hormigón es el objeto principal en la mayoría de los estudios, debido a que en la mayor parte de las aplicaciones se hace uso y se relaciona de alguna forma la capacidad resistente frente a esfuerzos de compresión con cualquier otra propiedad objeto de investigación.

Las resistencias mecánicas del hormigón están influenciadas por un gran conjunto de factores, pero fundamentalmente depende de [5.11, 5.26-5.28]:

- Materiales
El tipo y la categoría del cemento deber ser los adecuados. Los áridos se elegirán sabiendo que el hormigón no pueden tener una resistencia mayor a los que poseen estos, dado que rompería antes el árido que el hormigón.

- Cantidad de cemento

A mayor cantidad de cemento, mayor será la cantidad de pasta y, en consecuencia, la docilidad también lo será, dando lugar a menos huecos y por tanto a una mayor resistencia.

- Relación agua/cemento

La relación agua/cemento es posiblemente el factor que más influencia tiene en la resistencia de un hormigón. Aquellos hormigones en los que la relación agua/cemento es baja, la ganancia de resistencia crece más rápidamente que en el caso de altos valores de esa relación. Este fenómeno es consecuencia de que cuanto más baja es la relación agua/cemento, más próximos se encuentran los granos de cemento y al hidratarse, el gel formado puede crear con mayor rapidez un sistema estable.

Por otro lado, relaciones agua/cemento altas, darán lugar a resistencias menores, pero si esa relación es demasiado baja, posiblemente se tendrá dificultad para compactar adecuadamente el hormigón por ser este demasiado seco, quedando en su masa un gran volumen de huecos, reduciendo la resistencia a compresión.

A igualdad de relación agua/cemento y contenido de este último, las resistencias dependen del grado de hidratación del cemento, de sus propiedades químicas y físicas, de su temperatura de hidratación e incluso, de las posibles fisuras que se hayan formado por efecto de la exudación.

- Influencia del tamaño máximo del árido

En un principio parece lógico pensar que cuanto mayor sea el tamaño máximo del árido menor será la superficie específica que presente y menor la cantidad de agua necesaria para su mojado y, por consiguiente, mayor la resistencia obtenida en el hormigón. Según se desprende de la experiencia eso no ocurre de esa forma sino que, dependiendo de la relación agua/cemento, existe una influencia más o menos negativa del tamaño del árido en el sentido de que cuanto mayor sea este menor será la resistencia del hormigón. Este efecto es

debido a que a mayor tamaño de árido menor superficie adherente existirá entre la pasta y él, y por otra parte, a que la pasta poseerá menos libertad para experimentar deformaciones sin que sufra una microfisuración que debilite la resistencia.

El módulo granulométrico del árido compuesto tiene por otra parte una gran influencia en las resistencias, tal y como se observa en la figura 5.15.



Figura 5.15. Influencia del módulo granulométrico del árido en la resistencia relativa a compresión [Fuente: [5.26] Fernández Cánovas]

- Influencia de la forma, dimensiones de las probetas y la ejecución del ensayo
La resistencia a compresión de un hormigón determinada por medio de la rotura de una probeta sometida a una carga axial sufriría alteraciones como consecuencia de diferentes factores, como son: la dureza de los platos, el efecto probeta-plato, velocidad de aplicación de las cargas, tamaño y esbeltez de las probetas e incluso el propio diseño de la máquina. Aparte de estos factores hay que tener en cuenta otros que son comunes para todos los ensayos, como: falta de paralelismo entre las caras de la probeta sobre las que se realiza el ensayo, descentrado de la probeta, deficiente acabado de las caras sobre las que se ejerce la carga, el que las probetas estén húmedas o secas, etc.

Las dimensiones de las probetas también influyen en la resistencia a compresión. Si bien todos los métodos de cálculo y las especificaciones de la instrucción de hormigón estructural EHE-08 [5.24] se refieren a características del hormigón endurecido obtenidos mediante ensayos en probetas cilíndricas $\phi 15 \times 30$ cm es posible realizar conversiones a probetas cúbicas de 15 cm de arista según el artículo 86.3.2 de la citada instrucción. La expresión utilizada para realizar la conversión es la siguiente:

$$f_c = \lambda_{\text{cil,cub } 15} \cdot f_{c,\text{cúbica}} \quad (5.22)$$

donde:

f_c : Resistencia a compresión, en N/mm^2 , referida a probeta cilíndrica de $\phi 15 \times 30$ cm.

$f_{c,\text{cúbica}}$: Resistencia a compresión, en N/mm^2 , obtenida a partir de ensayos realizados en probetas cúbicas de 15 cm de arista.

$\lambda_{\text{cil,cub } 15}$: Coeficiente de conversión, según la tabla 5.9.

Tabla 5.9

Coeficientes de conversión.

[Fuente: [5.24] EHE-08 artículo 86.3.2]

Resistencia probeta cúbica f_c (N/mm^2)	$\lambda_{\text{cil,cub } 15}$
$f_c < 60$	0,90
$60 \leq f_c < 80$	0,95
$f_c \geq 80$	1,00

- Temperatura

Según investigaciones realizadas por Carino [5.29], el curado a temperaturas más altas presenta resistencias a compresión menores para tiempos de curado superiores a 3 días, sin embargo las probetas curadas a temperaturas bajas tienen un comportamiento contrario, con bajas resistencias de compresión a

edades tempranas, que aumentan de manera exponencial hasta obtener mayores valores a tiempo de curados más largos.

- Influencia de la edad del hormigón

El hormigón experimenta una ganancia de resistencias con el tiempo dependiendo del tipo y categoría de cemento empleado, de la relación agua/cemento con que se haya fabricado aquel y de la temperatura a que esté sometido.

El conocimiento de la evolución de las resistencias de un hormigón con el tiempo es de suma utilidad puesto que permite predecir la resistencia que tendría un hormigón a 28 días en función de la que posea a 7 días e incluso a menor edad. No es posible determinar una regla fija para la evolución de las resistencias con la edad, debido a las muchas variables que intervienen en ella.

5.5.2 Proceso de elaboración del ensayo

El ensayo tiene como objetivo evaluar la resistencia a compresión del hormigón endurecido a diferentes edades. Para ello se realizó la medición sobre 6 probetas diferentes para uno de los distintos tipos de hormigón diseñados en este trabajo. En todos los casos las probetas estudiadas han sido fabricadas en la misma amasada de forma que se disminuyan los posibles errores.

La geometría de las probetas utilizada han sido cúbicas de dimensiones 15x15x15 cm. El motivo de utilizar esta geometría en lugar de cilíndricas $\phi 15 \times 30$ cm ha sido: el ahorro de material en la fabricación, el menor espacio ocupado durante el proceso de curado, además de que no ha sido necesario el refrentado de probetas.

Cada una de las probetas han sido curadas bajo agua a $20^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C}$. La determinación del parámetro indicado se ha realizado a las edades de 7, 28, 90 y 150 días. En todos los casos las probetas han permanecido bajo agua hasta su rotura.

Para la realización del ensayo se han seguido las especificaciones indicadas en la norma UNE-EN 12390-3:2009/AC:2011 [5.30].

Este ensayo requiere de maquinaria provista de un sistema de regulación de forma que estas puedan aumentarse de forma continua y sin saltos bruscos. La máquina ha de disponer de dos platos de acero con caras planas. El espesor de los platos debe asegurar la indeformabilidad de los mismos durante el tiempo del ensayo. La maquinaria utilizada cumple con las especificaciones de la norma UNE-EN 12390-4:2001 [5.31]. En la figura 5.18 se ilustra la prensa de rotura utilizada.



Figura 5.16. Prensa de rotura utilizada en el ensayo

Las probetas se comprimen hasta la rotura en la máquina de ensayos, registrando la máxima carga alcanzada por la probeta y calculando la resistencia a compresión del hormigón.

El procedimiento seguido para la determinación de los valores de ensayo han sido los siguientes:

1. Preparación y posicionamiento de la probetas

Se limpian los platos de carga de la máquina, eliminando cualquier resto de material en las superficies de la probeta que han de estar en contacto con dichos platos.

Se seca el exceso de humedad de la superficie de la probeta antes de ponerla en la máquina de ensayos. Posteriormente se coloca la probeta cúbica de forma que la carga se aplique perpendicularmente a la dirección de hormigonado.

2. Carga

Se selecciona una velocidad de carga constante dentro del rango $0,6 \pm 0,2$ Mpa/s. Se aplica la carga inicial, que aproximadamente es el 30% de la carga de rotura. Después de esto, se aplica la carga a la probeta suavemente y se incrementa continuamente, a la velocidad seleccionada $\pm 10\%$, hasta que no soporte más. A continuación se registra la carga máxima indicada en kN.

3. Valoración del tipo de rotura

En la figura 5.17 se dan ejemplos de tipos de rotura satisfactorios durante el ensayo de resistencia a compresión.

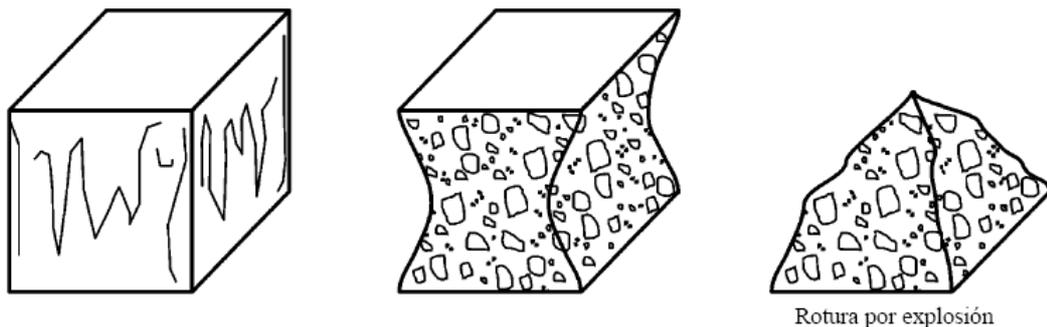


Figura 5.17. Roturas satisfactorias en probetas cúbicas
[Fuente: [5.30] UNE 12390-3:2009/AC:2011]

4. Expresión de los resultados

La resistencia a compresión vendrá dada por la siguiente ecuación:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (5.23)$$

donde:

f_c resistencia a compresión, en Mpa (N/mm^2)

F carga máxima de rotura, en N

A_c área transversal de la probeta sobre la actúa la fuerza de compresión, calculada a partir de las dimensiones normalizadas de la probeta.

En las figuras 5.20 y 5.21 se muestran el tipo normal de rotura ocurrido durante los ensayos. En todos los casos la tipología de rotura fue satisfactoria.



Figura 5.18. Rotura en forma de hiperboloide



Figura 5.19. Rotura por explosión

5.5.3 Resultados y discusión

En la tabla 5.10 se indican para cada uno de los hormigones estudiados las cargas máximas de rotura y las resistencias medias a compresión obtenidas en probetas 15x15x15 cm para las edades de 7, 28, 90, 150 días. En la figura 5.20 se representan los valores de resistencia media a compresión.

Tabla 5.10

Carga de rotura y resistencia media a compresión en probetas cúbicas 15x15x15 cm

Tipología hormigón	7 días		28 días		90 días		150 días	
	F	f _c	F	f _c	F	f _c	F	f _c
HSA	1121	49,82	1158	51,47	1263	56,12	1285	57,10
HEC-20	1172	52,09	1185	52,67	1286	57,17	1342	59,63
HEC-40	1164	51,74	1166	51,82	1347	59,86	1364	60,61
HEC-60	1113	49,48	1139	50,62	1381	61,37	1451	64,50
HEC-80	1107	49,22	1159	51,51	1395	61,99	1535	68,23
HEC-100	1055	46,87	1141	50,71	1463	65,00	1598	71,04

f_c: resistencia media a compresión, en MPa

F: carga máxima de rotura, en kN

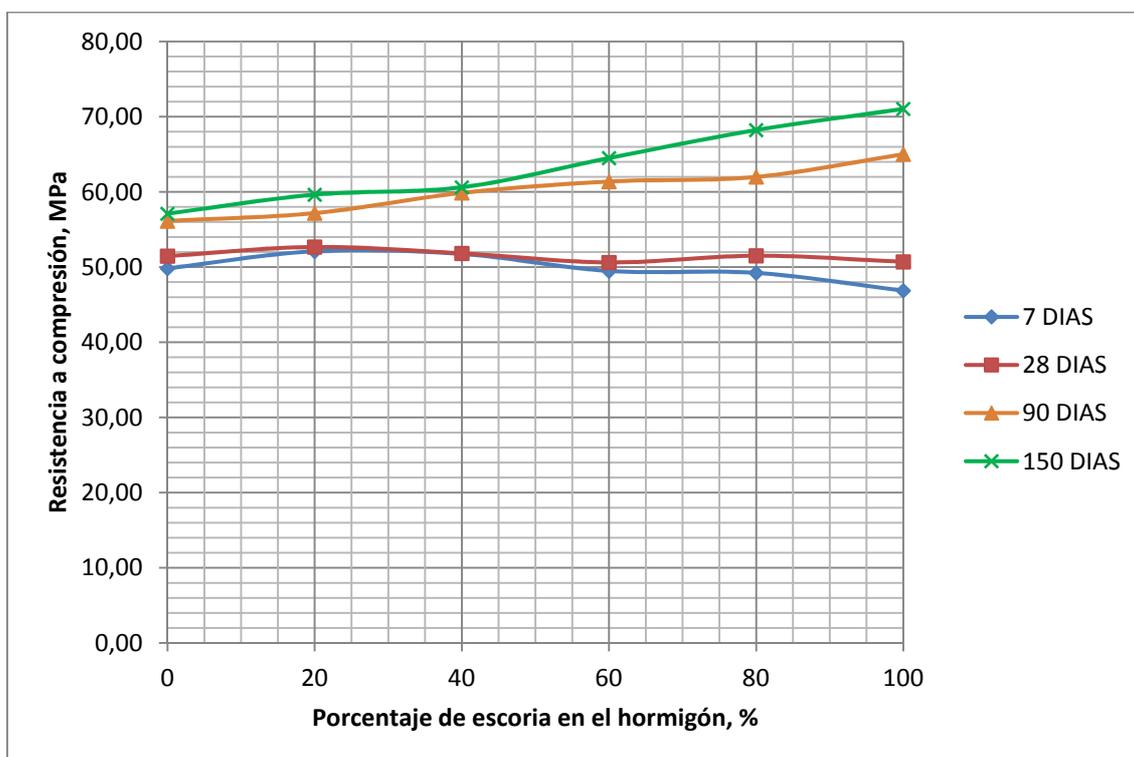


Figura 5.20. Resistencia a compresión para diferentes edades

Analizando la información representada en la figura 5.20, se aprecia como los valores de resistencia a 7 días son prácticamente similares en todos los hormigones, al igual que ocurre con los valores obtenidos para 28 días. La evolución de las resistencias a las edades de 7 y 28 días es similar, no observándose influencia de la adición de la escoria de cobre. El hecho de que las resistencias a 7 y 28 días sea similar, vendría justificado por la utilización de cemento de altas resistencias iniciales en la fabricación de l hormigón.

A la edad de 90 días existe un aumento de la resistencia a compresión en toda la tipología de hormigones estudiados, siendo el incremento mayor en concentraciones superiores al 40%.

A la edad de 150 días se producen aumentos de resistencia suaves para concentraciones comprendidas entre 0% y 40%, siendo mínima para hormigones sin escoria de cobre. Para concentraciones superiores al 40% existe un cambio importante de tendencia, produciéndose importantes incrementos de resistencia a media que aumentan la concentración de escoria de cobre en el hormigón.

Los incrementos de resistencia a edades de 90 y 150 días pone de manifiesto la actividad puzolánica de la escoria de cobre, formando nuevos silicatos y haciendo el sistema más compacto.

5.5.4 Modelización

A la vista de la representación gráfica de los resultados obtenidos en los ensayos, se propone ajustar los puntos experimentales con una recta de regresión resuelta por mínimos cuadrados.

$$y = A x + B \quad (5.24)$$

donde:

y resistencia a compresión, en MPa

x porcentaje de escoria de cobre, %

A, B constantes a determinar

Con los valores obtenidos en el laboratorio y realizado el ajuste, se obtienen los siguientes expresiones de los modelos.

Tabla 5.11

Rectas de regresión para modelos de resistencia a compresión

Edad del hormigón	Modelo analítico propuesto	R ²
7 días	$y = -0,036 \cdot x + 51,70$ (5.25)	0,521
28 días	$y = -0,012 \cdot x + 52,07$ (5.26)	0,359
90 días	$y = 0,086 \cdot x + 55,93$ (5.27)	0,972
150 días	$y = 0,142 \cdot x + 56,41$ (5.28)	0,976

En las figuras 5.21 a 5.24 se representan las rectas de regresión de los modelos analíticos planteados para la estimación de la resistencia a compresión del hormigón.

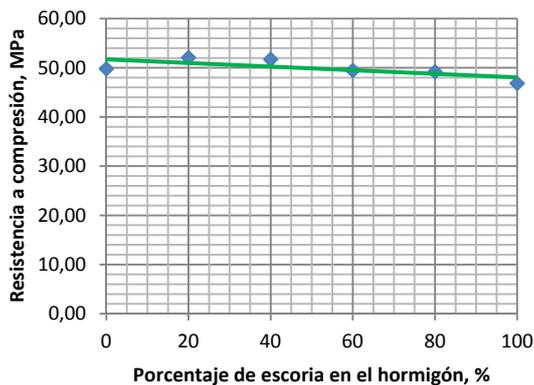


Figura 5.21. Modelización de resistencia a 7 días

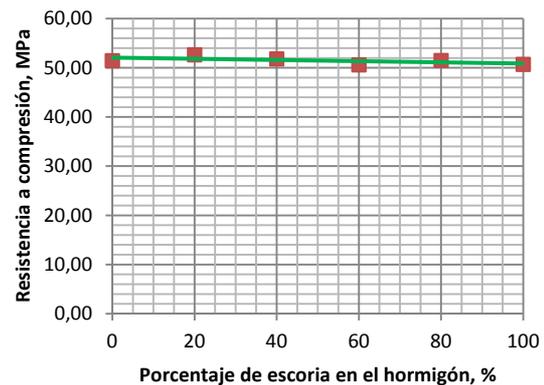


Figura 5.22. Modelización de resistencia a 28 días

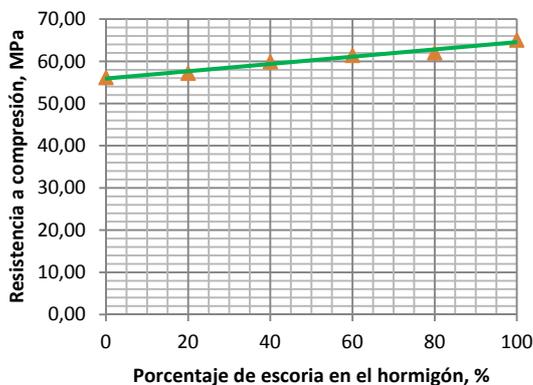


Figura 5.23. Modelización de resistencia a 90 días

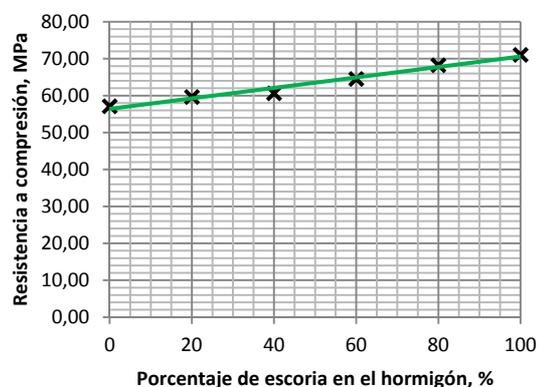


Figura 5.24. Modelización de resistencia a 150 días

5.5.5 Conclusiones

A continuación se describen las conclusiones más relevantes que se derivan de los resultados obtenidos en el ensayo de compresión:

- La evolución de la resistencia a compresión para hormigones jóvenes (7 y 28 días) no se ve alterada por la adición de escoria de cobre. La escoria de cobre se comporta como un árido sin capacidad puzolánica significativa a esas edades.
- Para edades del hormigón de 90 y 150 días la capacidad puzolánica de la escoria de cobre se pone de manifiesto y la resistencia a compresión aumenta en función de la concentración de escoria de cobre presente en el hormigón en todos los casos estudiados.
- Los mayores incrementos de resistencia a compresión se obtienen para edades de 150 días y con concentraciones de escoria de cobre superiores al 40%.

5.6 Resistencia a tracción indirecta. Ensayo Brasileño

5.6.1 Introducción

El hormigón es un material que se comporta de forma adecuada frente a los esfuerzos de compresión pero no tiene un buen comportamiento frente a los esfuerzos de tracción, siendo su resistencia a tracción aproximadamente el 10% de su resistencia a compresión.

En la resistencia a la tracción tienen una gran influencia la naturaleza, procedencia y tamaño máximo del árido, de forma que áridos procedentes de machaqueo y de menor tamaño dan valores más altos de resistencia a tracción. También influyen el contenido de cemento y la edad del hormigón [5.26].

La determinación de la resistencia a tracción pura de un hormigón es muy difícil de determinar debido a las tensiones secundarias que suelen introducirse al realizar los ensayos y aunque con el empleo de elementos de anclaje formados por cabezas unidas

con resina epoxi al hormigón y dotadas de barras articuladas pueden conseguirse valores bastantes fiables, el sistema es lento y costoso [5.26].

A fin de evitar estos inconvenientes se emplean otros ensayos que permiten la determinación del valor de la resistencia a la tracción. Uno de los ensayos alternativos comúnmente utilizados es el llamado ensayo de tracción indirecta o ensayo brasileño, en honor al ingeniero brasileño autor del ensayo, Lobo Carneiro.

Este método consiste en la rotura de la probeta, generalmente cilíndrica, mediante la aplicación de una carga de compresión en dos generatrices diametralmente opuestas. Debido a este estado tensional la rotura se produce por tracción cuando las tensiones que aparecen en el plano de aplicación de la carga alcanzan el valor de la resistencia a tracción del hormigón, comenzando su fractura y propagándose esta por el plano diametral. El estado tensional de la probeta no es uniaxial tal y como se indica en las figuras 5.25 y 5.26, soportando el hormigón tensiones de compresión que son perpendiculares a las tensiones de tracción. En el momento de la fractura se alcanzan en valores absolutos, tensiones hasta tres veces superiores a la resistencia a la tracción [5.26].

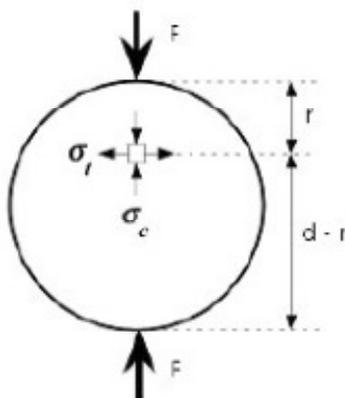


Figura 5.25. Tensiones aplicadas en el ensayo brasileño

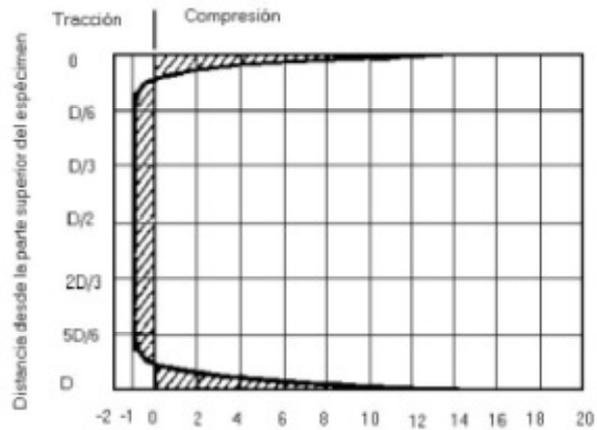


Figura 5.26. Distribución de tensiones en el ensayo brasileño

[Fuente: [5.26] Fernández Cánovas]

Debido a que el hormigón posee una relación de resistencias a compresión/tracción alta, la fractura que se produce en las probetas durante el ensayo es debida a las tensiones de tracción.

Para la determinación del valor de la resistencia a la tracción indirecta se emplea la siguiente formulación:

$$f_{ti} = \frac{2 P}{\pi L \phi} \quad (5.29)$$

siendo:

f_{ti} resistencia a tracción indirecta, en N/mm^2

P carga de rotura de la probeta en el ensayo, en N

L longitud de la línea de contacto con la probeta, en mm

ϕ dimensión de la sección transversal de la probeta, en mm

Tanto el Eurocódigo 2 [5.32], el Código Modelo CEB-FIP-90 [5.33] y la EHE-08 [5.24], establecen la relación existente entre la tracción pura del hormigón, conocido el valor de la tracción indirecta. Esta relación se refleja en la siguiente expresión:

$$f_{ct} = 0,90 \cdot f_{cti} \quad (5.30)$$

siendo:

f_{ct} resistencia a tracción pura, en N/mm^2

f_{cti} resistencia a tracción indirecta, en N/mm^2

Otra aplicación, aunque menos extendida del ensayo de tracción indirecta fue propuesta por Sedran y De Larrand [5.34]. Esta aplicación consiste en romper la probeta cilíndrica y analizar la distribución de áridos en el interior de la misma para analizar la segregación del hormigón en estado endurecido. Estos autores consideran que se produce segregación cuando la distancia desde el borde superior de la probeta y el primer árido de tamaño superior a 8 mm es mayor que 5 mm.

5.6.2 Proceso de elaboración del ensayo

El ensayo tiene como objetivo determinar la resistencia a la tracción indirecta. Para ello se utiliza la medición sobre 3 probetas diferentes para los distintos tipos de hormigón endurecido, pero siempre fabricadas en la misma amasada.

Las probetas utilizadas en el ensayo tienen geometría cilíndrica $\phi 15 \times 30$ cm. Cada una de las probetas han sido curadas bajo agua a $20^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C}$. La determinación del parámetro indicado se ha realizado a 28 y 90 días de edad.

Para la elaboración del ensayo se han seguido las especificaciones indicadas en la norma UNE-EN 12390-6:2010 [5.35].

Previamente a la colocación de las probetas en la máquina de ensayo se elimina el exceso de humedad dado estas han sido curadas bajo agua. Para la realización del ensayo colocamos las probetas en el equipo mostrado en la figura 5.27, de forma que estas se colocan centradas en la prensa, utilizando para ello soportes temporales. Se vigiló en todo momento que durante la carga el plato superior fuese paralelo al inferior.

Una vez colocada la probeta se aplica un incremento de tensión comprendido entre 0,04 Mpa/s y 0,06 Mpa/s, que en nuestro caso tomamos 0,05 Mpa/s. La carga fue aplicada de forma suave, sin brusquedades, incrementándose a la velocidad de carga seleccionada $\pm 10\%$, hasta que la probeta no soporte más carga y rompa por su plano diametral.

La velocidad de carga requerida viene dada por la expresión:

$$R = \frac{s \cdot \pi \cdot L \cdot d}{2} \quad (5.31)$$

siendo:

R velocidad de carga requerida, en N/s

L longitud de la probeta en mm

- d: dimensión de la sección transversal, en mm
- s: incremento de tensión, en Mpa/s

En nuestro caso la velocidad de carga R tiene un valor de 23,56 N/s.



Figura 5.27. Probeta colocada en prensa de rotura con adaptador para la realización del ensayo brasileño

Introduciendo en la ecuación 5.29 los valores de la longitud y diámetro (300 mm y 150 mm respectivamente), se obtiene la expresión que determina la resistencia a la tracción indirecta conocida la carga de rotura:

$$f_{ti} = \frac{2 P}{\pi \cdot 300 \cdot 150} = 0,01415 P \quad (5.32)$$

donde:

f_{ti} resistencia a tracción indirecta, en N/mm^2

P carga de rotura, en kN

Una vez realizado el ensayo y obtenidas las dos secciones de la probeta es posible observar la distribución de los áridos y analizar si ha existido segregación del hormigón aplicando un simple criterio visual o el propuesto por Sedran y De Larrand [5.34]. En el caso de la figura 5.28 existe una distribución uniforme de los diferentes tamaños de áridos en la masa de la probeta, por lo que no se observan fenómenos de segregación del hormigón.



Figura 5.28. Secciones de probeta tras el ensayo brasileño

5.6.3 Resultados y discusión

En la tabla 5.12 se indica para cada uno de los hormigones estudiados la resistencia a tracción indirecta obtenidos en el laboratorio tras la elaboración del ensayo Brasileño. El valor de la resistencia a la tracción indirecta se determina según la ecuación 5.29. Igualmente se indican los valores de la tracción pura obtenidos mediante la ecuación 5.30, que relaciona la tracción indirecta y la tracción pura. De la misma forma en la figura 5.29 se representan los valores de tracción pura para edades de 90 y 150 días.

Tabla 5.12

Valores de carga de rotura en el ensayo Brasileño. Valores de tracción indirecta y pura

Tipología hormigón	Carga de rotura, kN		Tracción (N/mm ²)			
	28 días	90 días	28 días		90 días	
			Indirecta f _{cti}	Pura f _{ct}	Indirecta f _{cti}	Pura f _{ct}
HSA	315,8	332,9	4,47	4,02	4,71	4,24
HEC-20	322,2	339,2	4,56	4,10	4,80	4,32
HEC-40	321,0	341,3	4,54	4,09	4,83	4,35
HEC-60	318,3	354,8	4,50	4,05	5,02	4,52
HEC-80	319,6	358,3	4,52	4,07	5,07	4,56
HEC-100	326,2	368,9	4,61	4,15	5,22	4,70

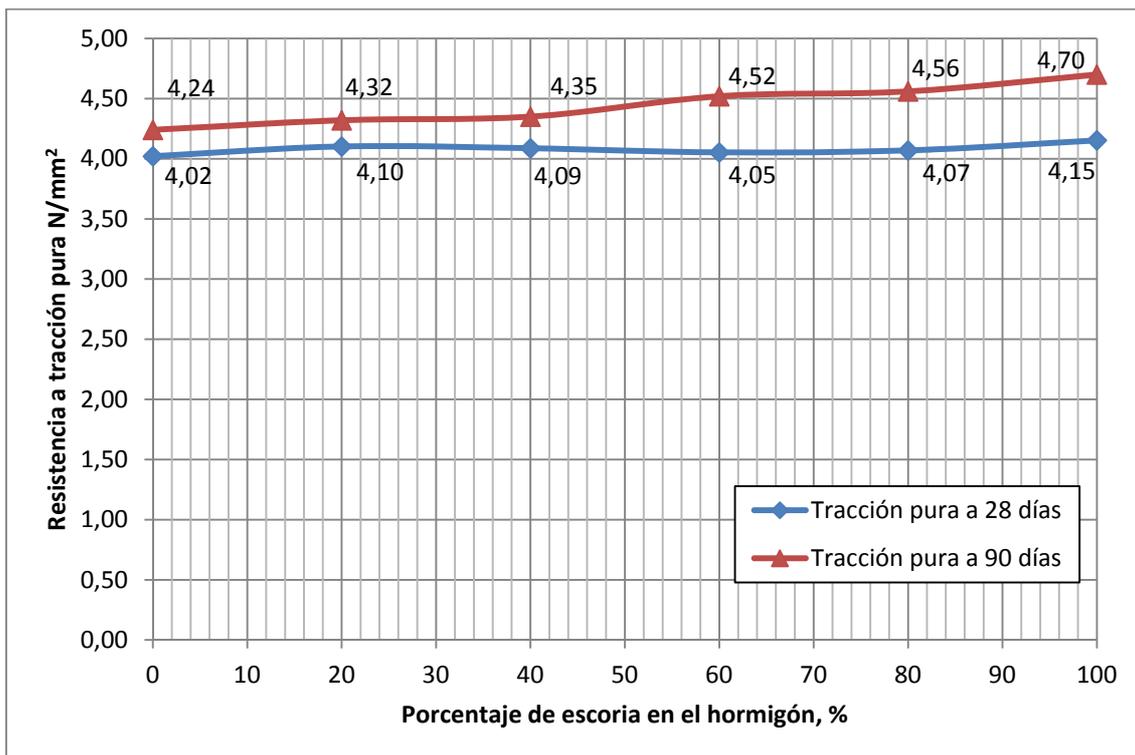


Figura 5.29. Resistencia a tracción pura según el ensayo Brasileño

Las mediciones obtenidas del ensayo brasileño, reflejan que los valores de tracción pura para hormigones con 28 días de edad son prácticamente similares, no observándose cambios en la respuesta mecánica a tracción por el hecho de sustituir el

árido fino por la escoria de cobre. Los valores obtenidos son muy estables y las pequeñas variaciones observadas son perfectamente atribuibles a la incertidumbre experimental.

A la edad de 90 días la resistencia a tracción se incrementa en relación a la obtenida a 28 días. Este incremento es muy similar para concentraciones de escoria entre el 0% y 40%, produciéndose un cambio de crecimiento para valores superiores a este último, alcanzando la máxima resistencia para concentraciones del 100% de escoria, es decir, en ausencia de árido fino.

Al igual que ocurría con la resistencia a compresión, la actividad puzolánica de la escoria de cobre se pone de manifiesto a la edad de 90 días, produciendo importantes incrementos de resistencia a tracción.

En cada una de las secciones de las probetas ensayadas se realiza una inspección visual de la distribución de los áridos, no observándose fenómenos de segregación. Igualmente y aplicando el criterio de Sedran y De Larrand [5.34] no se detectan fenómenos de segregación en ninguno de los hormigones estudiados.

5.6.4 Modelización de los parámetros

A la vista de la representación gráfica de los resultados obtenidos en los ensayos, se propone ajustar los puntos experimentales con una recta de regresión resuelta por el método de los mínimos cuadrados.

$$y = A x + B \quad (5.24)$$

donde:

y resistencia a tracción pura, en N/mm^2

x porcentaje de escoria de cobre, %

A, B constantes a determinar

En la tabla 5.13 se indican las ecuaciones del modelo analítico de resistencia a tracción pura para hormigones con edades de 28 y 90 días.

Tabla 5.13

Ecuaciones del modelo analítico de resistencia a tracción pura

Edad del hormigón	Modelo analítico propuesto	R ²
28 días	$y = 7,55 \cdot 10^{-4} x + 4,04$ (5.33)	0,388
90 días	$y = 4,56 \cdot 10^{-3} x + 4,22$ (5.34)	0,966

Según la representación gráfica de los modelos analíticos y a pesar del coeficiente de correlación del modelo para la edad de 28 días, existe una tendencia muy definida al incremento de la resistencia a la tracción a medida que se aumenta la concentración de escorias de cobre.

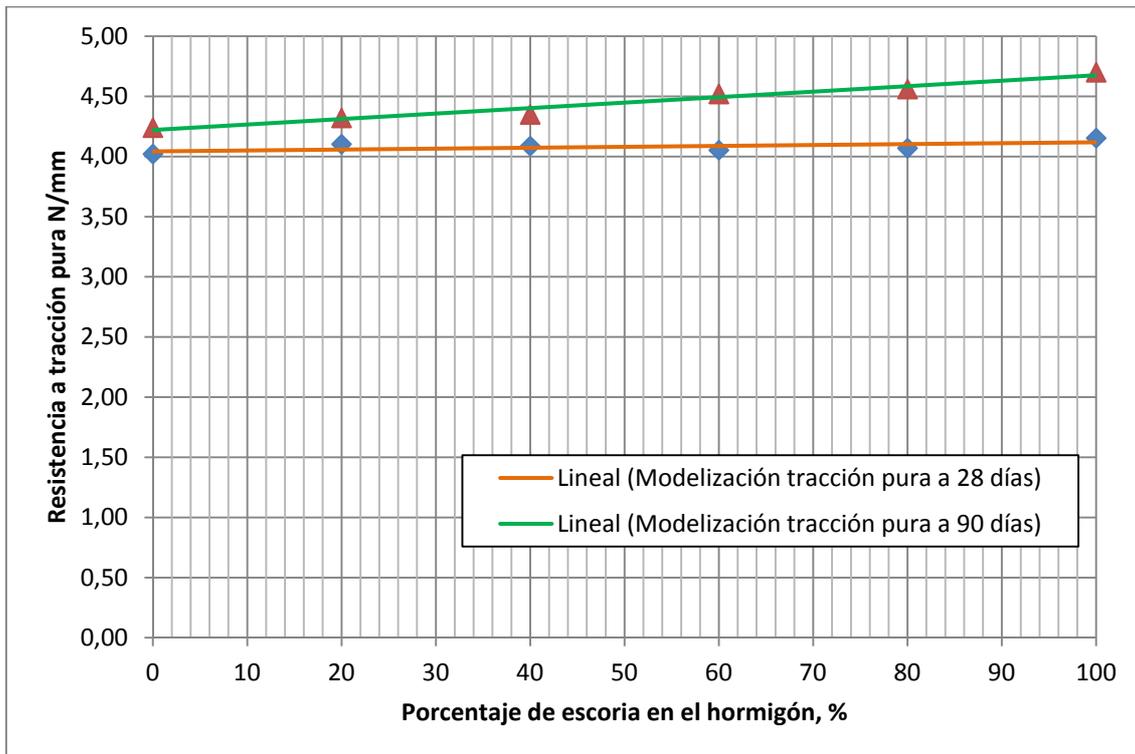


Figura 5.30. Modelización de la resistencia a tracción pura para edades de 28 y 90 días

5.6.5 Conclusiones

A continuación se describen las conclusiones más relevantes que se derivan de los resultados obtenidos del ensayo brasileño:

- No se observa una mejora de la resistencia a tracción para edades del hormigón a 28 días, siendo la respuesta similar a la de un hormigón convencional.
- Para edades del hormigón de 90 días la resistencia a tracción aumenta en todos los casos estudiados en función de la concentración de escoria de cobre presente en el hormigón, obteniéndose los mayores incrementos de resistencia para concentraciones superiores al 40%.

5.7 Resistencia a flexotracción

5.7.1 Introducción

Para evaluar la resistencia a flexotracción se dispone de dos configuraciones de montaje de la probeta. En ambas configuraciones la probeta prismática se apoya sobre rodillos separados tres veces la arista de esta. La diferencia entre las dos configuraciones consiste en que en el primer caso la carga se ejerce sobre un rodillo centrado entre los apoyos (figura 5.31) y en el segundo caso la carga se ejerce sobre dos rodillos situados a un tercio de la luz (figura 5.32) [5.36].

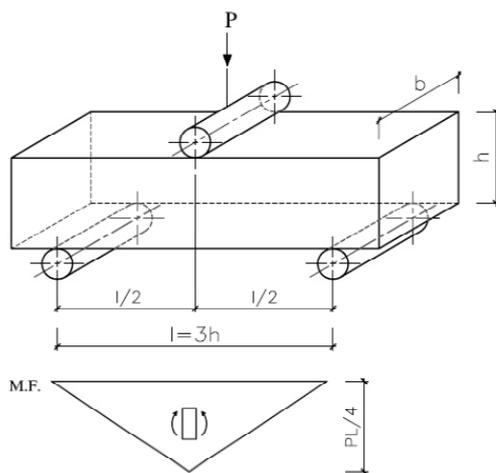


Fig. 5.31. Ensayo con carga centrada

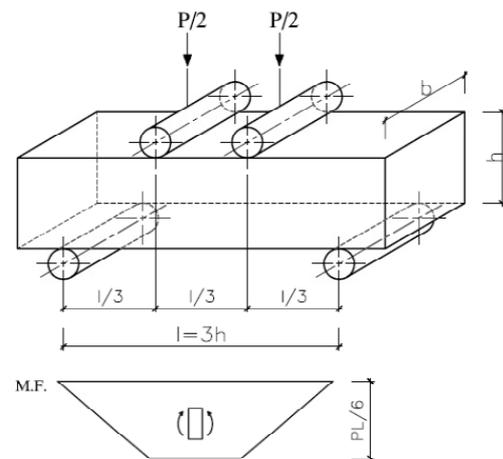


Fig. 5.32. Ensayo con carga a un tercio

En la primera configuración (figura 5.31) la ley de momentos flectores indica que el momento flector máximo se corresponde con la vertical que pasa por el punto de aplicación de la carga, afectando solo al hormigón situado en esa vertical.

En la segunda configuración (figura 5.32) la ley de momentos flectores es constante entre las líneas verticales que pasan por el punto de aplicación de las cargas, por consiguiente la rotura se producirá por el hormigón más débil de dicha zona.

A la vista de las dos posibles configuraciones, para un mismo hormigón, generalmente se obtienen valores de resistencia inferiores cuando el ensayo se realiza con la configuración de cargas situadas a un tercio [5.26].

La resistencia a flexotracción de las probetas prismáticas se calculan mediante la expresión:

$$f_{cf} = \frac{M_r}{W} = \frac{M_r}{\frac{1}{6}bh^2} \quad (5.35)$$

donde:

M_r momento de rotura

W módulo resistente de la sección

b base de la sección transversal

h canto de la sección transversal

Para un mismo tipo de probeta, el momento resistente de la sección vendrá dado por la ley de momento flectores de la configuración del ensayo se utilice, tal y como se indica en las figuras 5.31 y 5.32.

La tensión teórica a flexotracción del hormigón viene dada por la fibra más alejada de la fibra neutra. Utilizando probetas con secciones transversales cuadradas ($b=h$) y en el caso de configuraciones con rodillo centrado, la resistencia a flexotracción se obtiene por:

$$f_{cf} = \frac{9P}{2a^2} \quad (5.36)$$

Por otro lado, si la configuración obedece a rodillos situados a un tercio de la luz la resistencia a flexotracción se obtiene por:

$$f_{cf} = \frac{3P}{a^2} \quad (5.37)$$

En ambos casos:

f_{cf} resistencia a la flexotracción, en N/mm^2

P carga aplicada, en N

a arista de la probeta, en mm

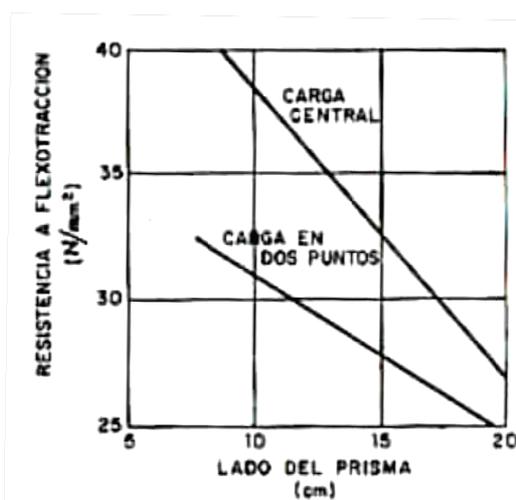


Figura 5.33. Diferencia entre los resultados obtenidos en flexotracción con carga centrada y a un tercio de la luz [Fuente: [5.26] Fernández Cánovas]

La influencia de las dimensiones de las probetas es significativa de modo que a mayor tamaño de estas, menos resistencia se obtiene tal y como se aprecia en el gráfico de la figura 5.33 [5.26].

Comparando el valor obtenido en el ensayo a tracción indirecta (ensayo brasileño) con el determinado a flexotracción, los de tracción indirecta son aproximadamente un 40% menores que los de flexotracción. Esto es debido a que, en la aplicación de la fórmula

se considera una distribución de tensiones lineal con la fibra neutra en el centro de la probeta (figura 5.34); sin embargo, cuando se va alcanzando la rotura, el diagrama de tensiones cambia de la recta AA' a la curva AA₁ de forma que $O'A_1 \approx 0,6 O'A'$; aunque el coeficiente multiplicador de $O'A'$ varía en función de las dimensiones de la probeta [5.26].

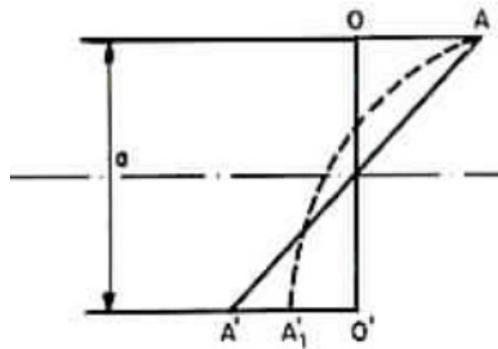


Figura 5.34. Distribución de tensiones en el ensayo de flexotracción
[Fuente: [5.26] Fernández Cánovas]

La relación entre resistencias a flexotracción y tracción se indica en la figura 5.35:

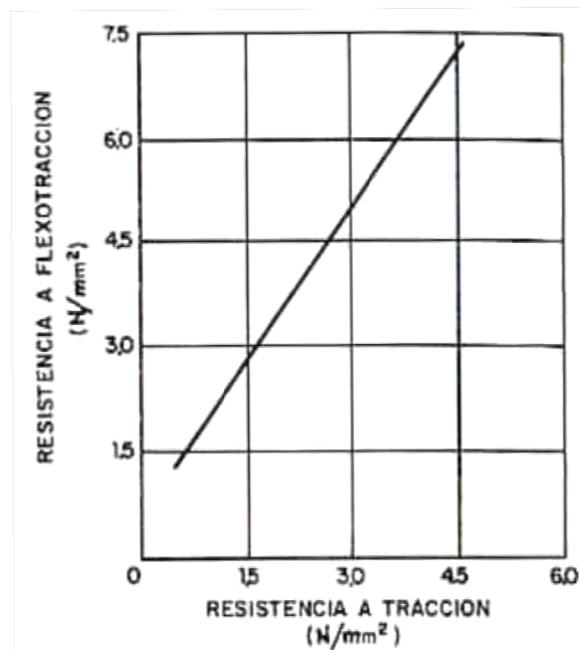


Figura 5.35. Relación entre resistencias a flexotracción y tracción pura
[Fuente: [5.26] Fernández Cánovas]

El Eurocódigo 2 [5.32] relaciona la resistencia a tracción pura con la resistencia a flexotracción mediante la expresión:

$$f_{ct} = 0,50 f_{ctf} \quad (5.38)$$

siendo:

f_{ct} resistencia a tracción pura

f_{ctf} resistencia a flexotracción

5.7.2 Proceso de elaboración del ensayo

Para evaluar la resistencia a flexotracción se realiza la medición sobre 3 probetas diferentes para cada tipo de hormigón endurecido, pero siempre fabricadas en la misma amasada.

Las probetas utilizadas en el ensayo tienen geometría prismática de dimensiones 15x15x60 cm. Cada una de ellas ha sido curada bajo agua a $20^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$. La determinación del parámetro indicado se ha realizado a 28 días de edad.

Para la realización del ensayo se siguen las especificaciones indicadas en la norma UNE-EN 12390-5:2009 [5.36]. De las dos configuraciones posibles para la evaluación del ensayo se utiliza aquella donde la carga se ejerce sobre dos rodillos a un tercio de la luz. La distancia entre apoyos será la correspondiente a tres veces el canto de la probeta. El esquema del ensayo se indica en la figura 5.36.

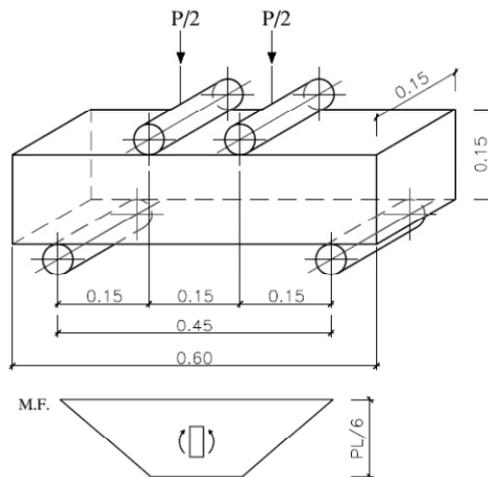


Figura 5.36. Ensayo de flexotracción carga a un tercio

El ensayo consiste en aplicar carga a la probeta hasta la rotura, utilizando el equipo indicado en la figura 5.37.



Figura 5.37. Equipo utilizado en el ensayo de flexotracción

Previamente a la colocación de las probetas en la máquina de ensayo se elimina el exceso de humedad dado que estas han sido curadas bajo agua. No fue necesario proceder al refrentado o pulimentado de las probetas debido a que el contacto de la prensa con la probeta se hizo eligiendo dos caras opuestas perfectamente planas, quedando la única cara rugosa en uno de los laterales.

Se coloca la probeta en el dispositivo de ensayo, correctamente centrada con su eje longitudinal en ángulo recto con los ejes longitudinales de los rodillos superiores e inferiores. Se comprueba que la dirección de referencia de la carga es perpendicular a la dirección de hormigonado de la probeta, dado que la dirección de carga con respecto a la dirección de hormigonado puede afectar a los resultados.

Una vez colocada la probeta se aplica un incremento de tensión constante dentro del rango de 0,04 MPa/s a 0,06 MPa/s, que en nuestro caso 0,05 Mpa/s. Tras aplicarse la carga inicial, que no debe de exceder aproximadamente el 20% de la carga de rotura,

se aplica la carga de forma continua y sin brusquedades con el incremento constante seleccionado $\pm 10\%$, hasta que la probeta no soporte una carga mayor.



Figura 5.38. Probeta colocada en el equipo de ensayo de flexotracción



Figura 5.39. Rotura de probeta finalizado el ensayo de flexotracción

5.7.3 Resultados y discusión

En la tabla 5.14 se detallan los valores de la carga de rotura obtenidos del ensayo de flexotracción, así como la resistencia a flexotracción aplicando la ecuación 5.37, para cada tipo de hormigón estudiado

Tabla 5.14
Valores de carga de rotura y resistencia a flexotracción

Tipología hormigón	Carga Rotura, kgf	Res. Flexotracción, N/mm ²
HSA	7288	9,53
HEC-20	7669	10,03
HEC-40	7736	10,12
HEC-60	8058	10,54
HEC-80	8397	11,00
HEC-100	8503	11,12

Tal y como se observa en la figura 5.40, la evolución de la resistencia a flexotracción se ve afectada por el incremento de escoria de cobre en el hormigón. A diferencia de la resistencia a tracción, no se han realizado ensayos a 90 días, dado que a 28 días existe una tendencia perfectamente definida; la resistencia a flexotracción aumenta con la concentración de escoria de cobre.

Es posible diferenciar dos tramos perfectamente definidos en la evolución de la resistencia a flexotracción. El primero de ellos corresponde a concentraciones comprendidas en 0% y 40%, donde los incrementos de resistencia aumentan ligeramente a medida que aumenta el porcentaje de escoria de cobre presente en el hormigón. El segundo de ellos corresponde a concentraciones de escoria superiores al 40%, donde la resistencia a flexotracción aumenta más rápidamente a medida que se incrementa la presencia de escoria en el hormigón.

Estos comportamientos se justifican básicamente por dos motivos; puzolanidad y textura de los granos de escoria y árido fino. En relación a la puzolanidad de la escoria quizás la edad a la que se realiza el ensayo será mínima para que se manifieste, pero entendemos que existirá algún tipo de actividad por pequeña que esta sea. Con respecto a la textura de los granos, la escoria de cobre presenta una textura rugosa

frente a la textura lisa del árido fino, tal y como se indicó en el capítulo 4 (figuras 4.14 y 4.15). Esto motiva que en presencia de escoria de cobre aumente la superficie adherente con la pasta de cemento, confiriendo mayores resistencias al hormigón.

5.7.4 Modelización

A la vista de la representación gráfica de los resultados obtenidos en los ensayos, se propone ajustar los puntos experimentales con una recta de regresión:

$$y = A x + B \quad (5.24)$$

donde:

y resistencia a flexotracción, en N/mm^2

x porcentaje de escoria de cobre, %

A, B constantes a determinar

$$y = 0,016 x + 9,585 \quad (5.39)$$

El coeficiente de determinación tiene un valor de $R^2=0,972$

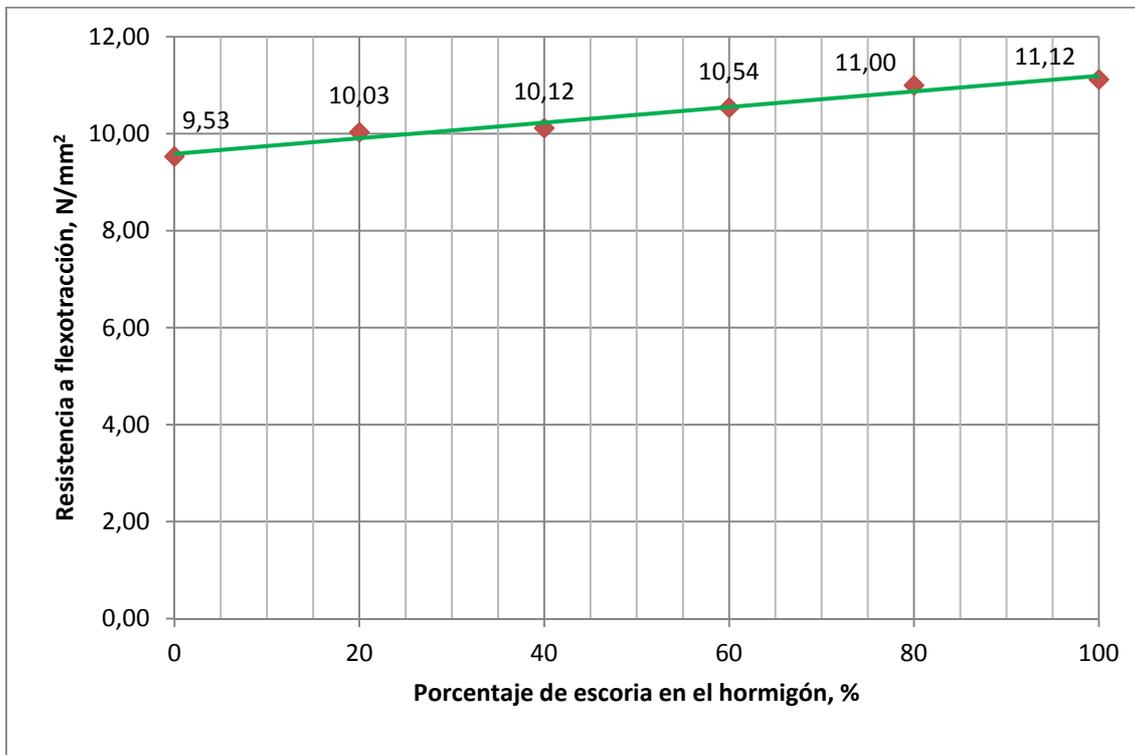


Figura 5.40. Modelización y resultados del ensayo de flexotracción

5.7.5 Conclusiones

A continuación se describen las conclusiones más relevantes que se derivan de los resultados obtenidos en el ensayo de flexotracción:

- La resistencia a flexotracción aumenta en todos los casos estudiados en función de la concentración de escoria de cobre presente en el hormigón.
- Para concentraciones de escoria de cobre comprendidas entre el 0% y 40% no existe un aumento significativo de la resistencia a flexotracción.
- Los mayores incrementos de la resistencia a flexotracción corresponden a concentraciones de escoria de cobre superiores al 40%.

5.8 Módulo de elasticidad en compresión

5.8.1 Introducción

El módulo de elasticidad o módulo de Young de un material es un parámetro fundamental para determinar las relaciones tensión-deformación. Conocido este valor se conocerá la forma de trabajar, que el material de estudio, tiene en las estructuras de las que va a formar parte.

Para un material sometido a compresión, el módulo de elasticidad viene determinado por la pendiente de la curva tensión (σ)-deformación (ϵ), en el campo uniaxial de tensiones [5.37, 5.38]. Al no ser el hormigón un cuerpo elástico es necesario definir el módulo de elasticidad como módulo de deformación longitudinal no teniendo un valor constante en el diagrama tensión-deformación dada la curvatura del mismo, tal y como se observa en la figura 5.40. No obstante, debido a que esta gráfica es no lineal, existen varios métodos para cálculo de este módulo.

Como se indica en la figura 5.41, el módulo de Young E , así determinado y conocido como módulo de elasticidad estático, no tiene por tanto un valor único sino que depende de las consideraciones que se hagan en su determinación y así sucede para considerar un módulo tangente en el origen E_0 , un módulo tangente en un punto

cualquiera de la curva correspondiente a una tensión f_{cA} , y válido cuando las oscilaciones de carga $\pm\Delta f_{cA}$ sean muy pequeñas, y un módulo secante E_s definida por la recta que une el origen con el punto correspondiente a una fracción de la tensión de rotura; este último es el más empleado y variará con la fracción de carga de rotura que se haya considerado, aunque generalmente se toma del 40 al 50 por ciento de esta [5.26].

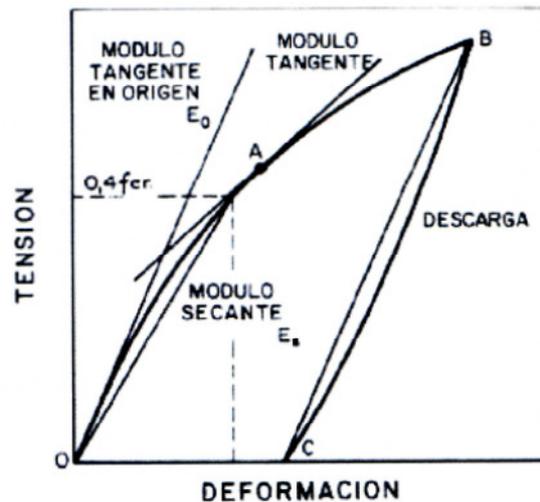


Figura 5.41. Módulos de elasticidad de un hormigón
[Fuente: [5.26] Fernández Cánovas]

Mediante la realización de ensayos muy lentos en el laboratorio a deformación constante es posible determinar la curva tensión deformación hasta rotura del hormigón. La velocidad con que se realice la determinación de la curva tensión-deformación tiene una gran repercusión en la forma de la misma y en el valor del módulo determinado. Si la aplicación de la carga es muy rápida las deformaciones son muy reducidas y en consecuencia el módulo de elasticidad es muy elevado; si, por el contrario, la duración con que se hace el ensayo es más lenta y superior a dos minutos, la deformaciones son más elevadas y en consecuencia los módulos determinados más bajos. Estas diferencias encuentran su explicación en el fenómeno de la fluencia que acompaña a la deformación elástica que se obtiene con una carga muy rápida.

Los componentes del hormigón, considerados aisladamente, tienen módulos de elasticidad muy diferentes, así el de los áridos es más elevado que del hormigón

dependiendo de la naturaleza de estos, mientras que el de la pasta de cemento es más bajo que este como se indica en la figura 5.42

El comportamiento del conjunto está muy influenciado por las microfisuras que aparecen en las interfases pasta-árido al cargar el hormigón y hacen que la curva deje de ser lineal, dando lugar a que el hormigón se comporte como un material pseudo-sólido [5.26, 5.28].

El valor del módulo de deformación utilizado en el cálculo de estructuras de hormigón en general, es estimado a partir de relaciones empíricas en las que se asume dependencia directa entre el módulo de deformación, la resistencia a compresión y la densidad del hormigón. Esto sucede porque todos vienen influidos por la porosidad de las fases constituyentes aunque no en el mismo grado [5.37].

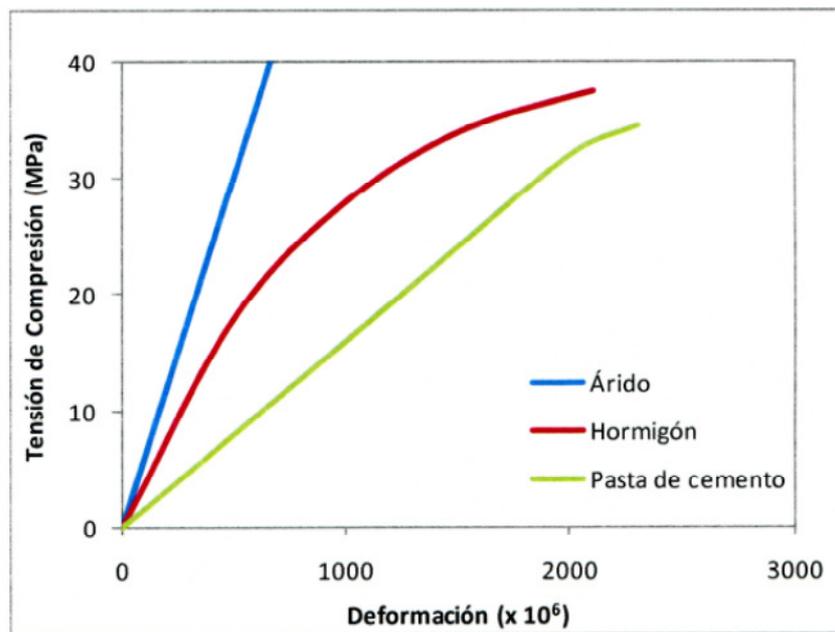


Figura 5.42. Módulo de elasticidad de la pasta, áridos y hormigón
[Fuente: [5.28] Rebolledo Ramos]

Entre los factores que determinan la evolución de las propiedades elásticas cabe destacar [5.26, 5.28]:

- Edad del hormigón: El módulo de elasticidad es tanto mayor cuanto mayor es la edad del hormigón, aumentando más rápidamente con la edad que la resistencia a compresión.
- Forma y textura superficial del árido grueso: A mayores tamaños del árido grueso, mayor será el módulo de elasticidad.
- Módulo de elasticidad de los áridos: Cuanto mayor es el módulo de elasticidad de los áridos y mayor la proporción en que entran en el hormigón, mayor es el módulo de elasticidad de este.
- Grado de saturación: Los valores del módulo de elasticidad obtenidos en ensayos de probetas de un mismo hormigón en estado húmedo y en seco, dan valores inferiores para el caso del estado húmedo.
- Condiciones de carga: Para aplicaciones de carga muy rápidas se obtienen módulos de elasticidad muy elevados en comparación con aplicaciones de carga lenta, donde los módulos son más bajos.
- Módulo de elasticidad de la matriz cementicia: Cuanto mayor es el módulo de elasticidad de la matriz cementicia, mayor es el módulo de elasticidad del hormigón.
- Porosidad y composición de la zona interfacial de la transición: Cuanto mayor es la porosidad de la zona interfacial, menor será el módulo de elasticidad.

Diferentes autores han relacionado el módulo de elasticidad con otras propiedades del hormigón, siendo la resistencia a compresión la más utilizada. Cabe destacar los estudios realizados por Takizaki [5.39], donde se relaciona el módulo de elasticidad con la densidad y resistencia a compresión del hormigón según la expresión:

$$E_c = 2,1 \cdot \left(\frac{d_s}{2,3}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{f_c}{200}\right)^{0,5} \quad (5.40)$$

siendo:

E_c módulo de elasticidad estimado del hormigón, MPa

d_s densidad del hormigón, en kg/m^3

f_c resistencia a compresión del hormigón, en MPa

5.8.2 Proceso de elaboración del ensayo

El ensayo tiene como objetivo determinar el módulo de elasticidad estático de los distintos hormigones planteados en este trabajo. Para ello se ha realizado la medición sobre 3 probetas diferentes en cada tipo de hormigón endurecido, pero siempre fabricadas en la misma amasada.

Las probetas utilizadas en el ensayo tienen geometría cilíndrica $\phi 15 \times 30$ cm y todas ellas han sido curadas bajo agua a $20^\circ \pm 2^\circ \text{C}$. La determinación del parámetro indicado se ha realizado a 28 días de edad.

Para la realización del ensayo se han seguido las especificaciones indicadas en la norma UNE-83316:1996 [5.40].

Inicialmente y dado que las probetas se han curado durante 28 días sumergidas en agua, se procede a secar las muestras completamente. Para ello se introducen en una estufa a $50^\circ \text{C} \pm 2^\circ \text{C}$ hasta masa constante, que en nuestro caso han sido 4 días. De esta forma el proceso de secado es lento y no produce fisuras en la masa de hormigón.

EL procedimiento seguido para la elaboración del ensayo ha sido el siguiente:

1. Se determina la resistencia a compresión sobre tres probetas, iguales en forma y tamaño a aquellas utilizadas para la determinación del módulo de elasticidad estático, fabricadas y curadas en condiciones iguales. El valor medio de la resistencia a compresión, f_c , determinará el esfuerzo a aplicar en la obtención del módulo de elasticidad estático.

2. Se coloca la probeta en la máquina de ensayo y se centra con el instrumento de medida colocado en posición axial.
3. Se aplica la tensión inicial, σ_b , es decir $0,5 \text{ N/mm}^2$ y se registra la deformación leída en cada línea de medición.
4. Se incrementa uniformemente la tensión a una velocidad de $0,5 \pm 0,2 \text{ N/mm}^2$ por segundo hasta que la tensión alcance el valor de un tercio de la resistencia a compresión del hormigón ($\sigma_a = f_c/3$). Para la medida de las deformaciones y partiendo del valor medio de rotura de las probetas estudiadas anteriormente, se ha comprimido la probeta hasta un 10%, 20% y 30% de la resistencia a compresión estimada y se han registrado las deformaciones correspondientes.

Se aplican tres ciclos sucesivos manteniendo la carga durante 60 s y se registra la deformación medida, tomando lecturas de cada línea de medida con intervalos de 30 s. Si estas lecturas difieren en más del 20% del valor medio, se vuelve a centrar de ensayo y se repite el mismo.

5. Una vez compraba que el centrado ha producido medidas correctas, se reduce la carga con la misma velocidad que se aplicó durante el proceso de carga, hasta alcanzar el nivel de la tensión inicial ($0,5 \text{ N/mm}^2$). Se realizaron dos ciclos adicionales de carga y descarga, utilizando las mismas velocidades, y manteniendo las tensiones (σ_a y σ_b) constantes durante un periodo de 60 s. Después de terminar el último ciclo y de esperar durante 60 s manteniendo la tensión $\sigma_b = 0,5 \text{ N/mm}^2$, se registraron las lecturas de las deformaciones ϵ_b , tomadas al cabo de 30 s. Se volvió a cargar la probeta hasta la tensión σ_a , a la velocidad especificada, y se registraron las lecturas de las deformaciones relativas ϵ_a , tomadas a los 30 s. Una vez realizadas las medidas se llevó la probeta a la rotura, registrando el valor de la carga necesaria hasta conseguir dicho estado final.

La máxima diferencia encontrada entre la resistencia estimada y la determinada mediante técnica experimental descrita anteriormente ha sido del 14%, valor tolerable

dado que se encuentra por debajo del límite admitido por la norma, cuyo valor máximo en compresión es del 20%.

Los módulos de elasticidad han sido obtenidos con galgas extensiométricas, de acuerdo con la norma UNE-83316:1996 [5.40]. El dispositivo experimental utilizado (galgas extensiométricas unidas a un medidor digital de tensiones conectado a prensa y a un ordenador) se muestra en la figura 5.43.

El procedimiento utilizado fue el siguiente: se pega la galga extensiométrica en la superficie de la probeta, limpiando cuidadosamente la superficie del material para que no contenga ningún tipo de impureza; una vez adherida, se conectan los cables al indicador digital de tensiones. En todas las probetas se coloca una galga horizontal y otra vertical.



Figura 5.43. Equipo de medida digital (prensa, medidor digital, ordenador)

Los valores del módulo de elasticidad son proporcionados directamente por el software del equipo o bien mediante los valores de deformación registrados a través del conmutador de medidas. Las expresiones utilizadas para este último serían:

$$E_{j(10,20)} = \frac{\sigma_{20} - \sigma_{10}}{\epsilon_{20} - \epsilon_{10}} \quad (5.41)$$

$$E_{j(20,30)} = \frac{\sigma_{30} - \sigma_{20}}{\epsilon_{30} - \epsilon_{20}} \quad (5.42)$$

$$E_{j(10,20)} = \frac{E_{j(10,20)} - E_{j(20,30)}}{2} \quad (5.43)$$

donde:

σ_i tensión correspondiente al i-% de la carga de rotura

ϵ_i deformación correspondiente a σ_i

E_j módulo correspondiente a edad j

Los resultados obtenidos, ya sean por el software del equipo o mediante cálculo manual, se redondean a 500 N/mm² para valores superiores a 10000 N/mm² y a 100 N/mm² para valores por debajo de 10000 N/mm².

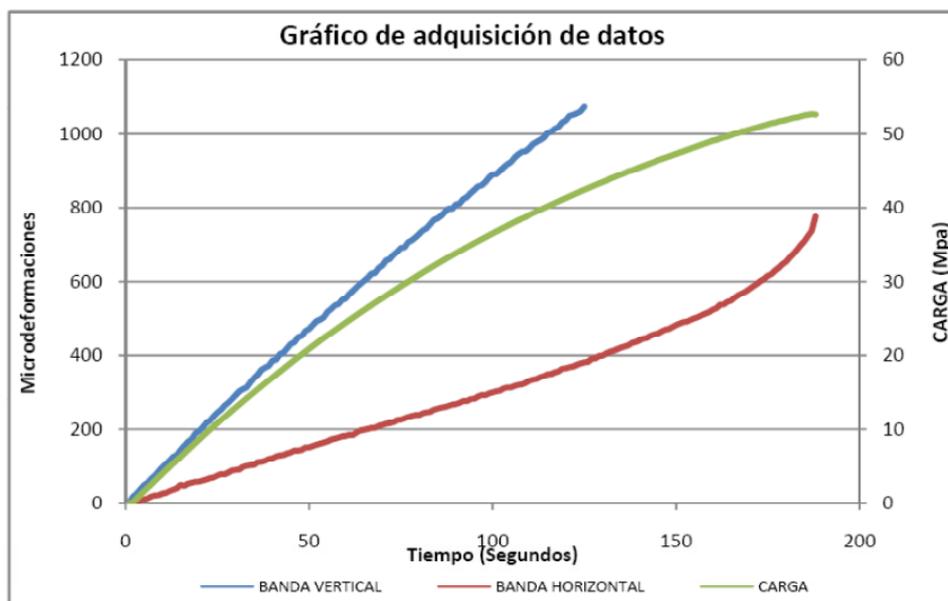


Figura 5.44. Gráfico de adquisición de datos

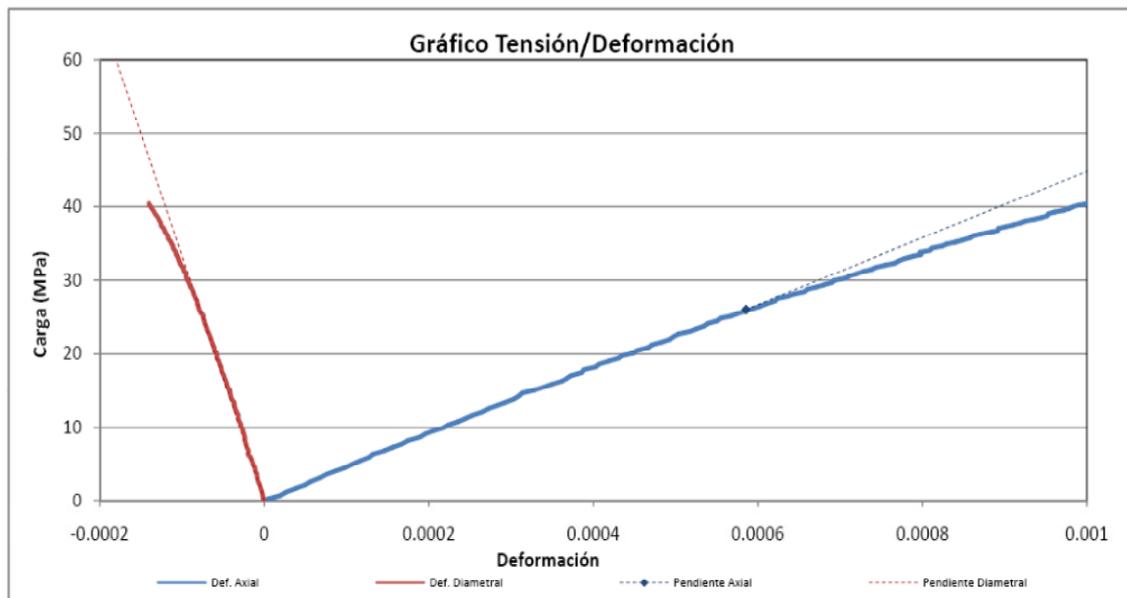


Figura 5.45. Gráfico tensión/deformación obtenidos del equipo

5.8.3 Resultados y discusión

En la tabla 5.15 se detallan los valores obtenidos del módulo de elasticidad estático a 28 días, para cada tipo de hormigón ensayado. Igualmente en la figura 5.46 se realiza una representación de los valores de ensayo.

Tabla 5.15
Módulo de elasticidad a 28 días

Tipología hormigón	Módulo de Elasticidad E_{28} (GPa)
HSA	40,85
HEC-20	41,18
HEC-40	41,22
HEC-60	42,31
HEC-80	42,64
HEC-100	43,88

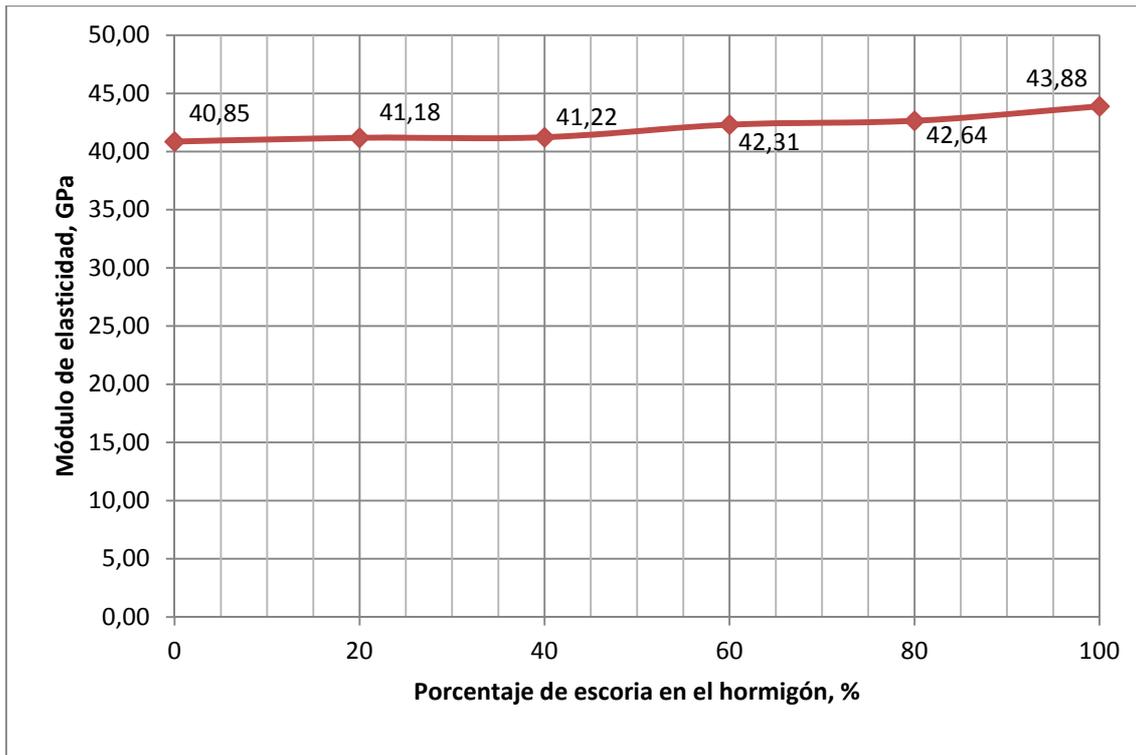


Figura 5.46. Módulo de elasticidad estático según el porcentaje de escoria de cobre

De los valores experimentales obtenidos, se observa que existe una influencia de la adición de la escoria de cobre en el hormigón, de forma que a medida que se incrementa el porcentaje de escoria aumenta el módulo de elasticidad.

Para concentraciones entre 0% y 40% se observa una pequeña meseta de estabilidad donde las variaciones del módulo de elasticidad son mínimas. A partir de concentraciones superiores al 40% se produce un cambio de tendencia, obteniéndose valores crecientes del módulo de elasticidad a medida que se incrementa la escoria. Este hecho vendría justificado por dos motivos:

1. La forma de los áridos y su textura superficial influyen en la formación de microfisuras. Como se indicó en las figuras 4.14 a 4.17 del capítulo 4, los granos de árido fino son de geometría cúbica/prismática y textura lisa, frente a una geometría más esférica y textura rugosa de la escoria de cobre. Ello conlleva a que exista mayor adherencia entre la pasta de cemento y la escoria debido a su

textura rugosa, al igual que su geometría esférica induce que se produzcan menos microfisuras, en comparación con el árido fino 0/2.

2. La pequeña actividad puzolánica que pudiera haber desarrollado la escoria de cobre a la edad del estudio hace que se densifique y se cierre la red capilar del hormigón, aumentando la compacidad y la resistencia a la deformación.

Independientemente de la actividad puzolánica de la escoria de cobre, muy pequeña a la edad de 28 días, en general las variaciones observadas en el módulo de los distintos hormigones estarán producidas muy posiblemente por la diferente microestructura generada en la zona de transición interfacial (ZTI), como consecuencia de la textura y geometría de los granos del árido fino y la escoria de cobre.

Utilizando la expresión de Takizaki (ecuación 5.18) es posible obtener los valores teóricos del módulo de elasticidad conocida la densidad del hormigón y la tensión de rotura de las probetas. En la tabla 5.16 se indica estos valores.

Tabla 5.16
Resultados del módulo de elasticidad según Takizaki

Tipología hormigón	Resultado experimental (E_{28} , GPa)	Resultado Takizaki (E_T , GPa)	Relación E_{28}/E_T
HSA	40,85	36,79	1,11
HEC-20	41,18	37,64	1,09
HEC-40	41,22	37,52	1,10
HEC-60	42,31	38,07	1,11
HEC-80	42,64	39,24	1,09
HEC-100	43,88	39,60	1,11

Representando gráficamente los valores experimentales con los estimados por el modelo de Takizaki y comparándolos con los obtenidos experimentalmente se observa que ambas curvas son prácticamente paralelas, siendo mayor la curva que representa los valores experimentales.

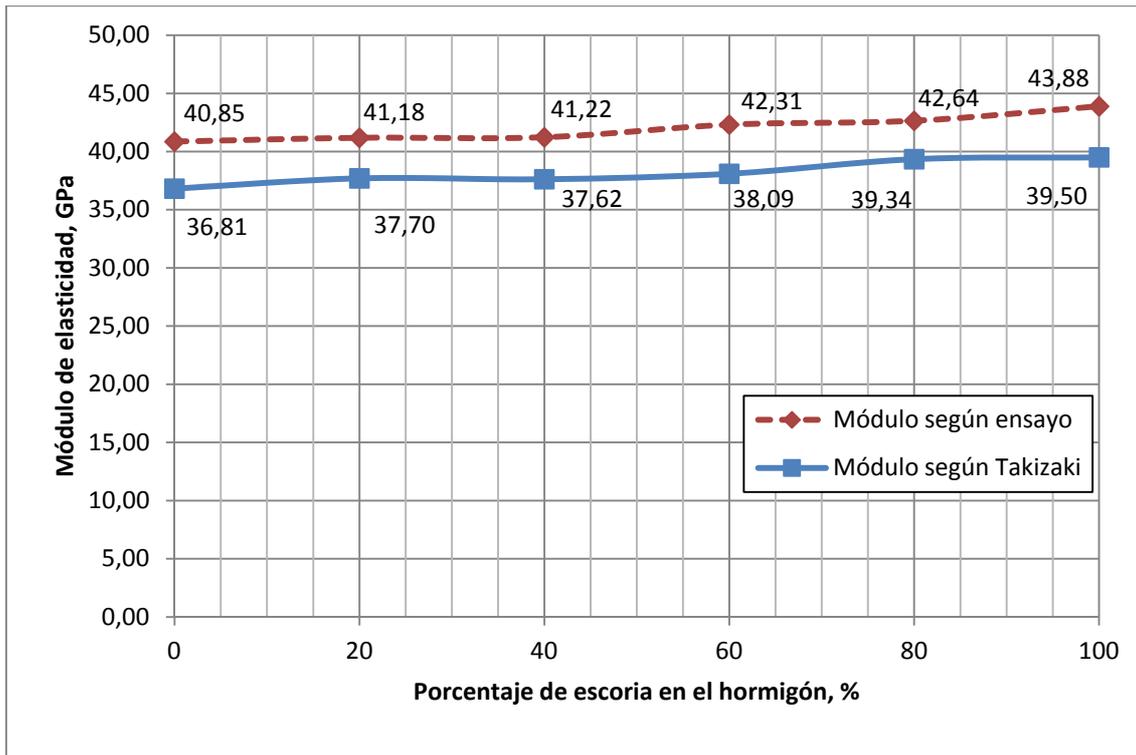


Figura 5.47. Comparativa entre el módulo de elasticidad experimental y módulo según modelo de Takizaki

La relación E_{28}/E_T representada en la tabla 5.16 indica que los valores experimentales son un 10% superior a los obtenidos por el modelo de Takizaki. En base a ello, sería posible determinar una expresión donde conocida la densidad y la resistencia a compresión del hormigón, se obtuviera el módulo de elasticidad teórico. El modelo de Takizaki modificado para los hormigones de este trabajo sería:

$$E_c = 2,31 \cdot \left(\frac{d_s}{2,3}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{f_c}{200}\right)^{0,5} \quad (5.44)$$

siendo:

E_c módulo de elasticidad estimado del hormigón, MPa

d_s densidad del hormigón, en kg/m^3

f_c resistencia a compresión del hormigón, en MPa

5.8.4 Modelización

A la vista de la representación gráfica de los resultados obtenidos en los ensayos, se propone ajustar los puntos experimentales con una recta de regresión calculada por el método de los mínimos cuadrados:

$$y = A x + B \tag{5.24}$$

donde:

y módulo de elasticidad, en GPa

x porcentaje de escoria de cobre, %

A, B constantes a determinar

Con los valores obtenidos en el laboratorio y realizado el ajuste, se obtiene:

$$y = 0,029 x + 40,54 \tag{5.45}$$

El coeficiente de determinación tiene un valor de $R^2=0,914$

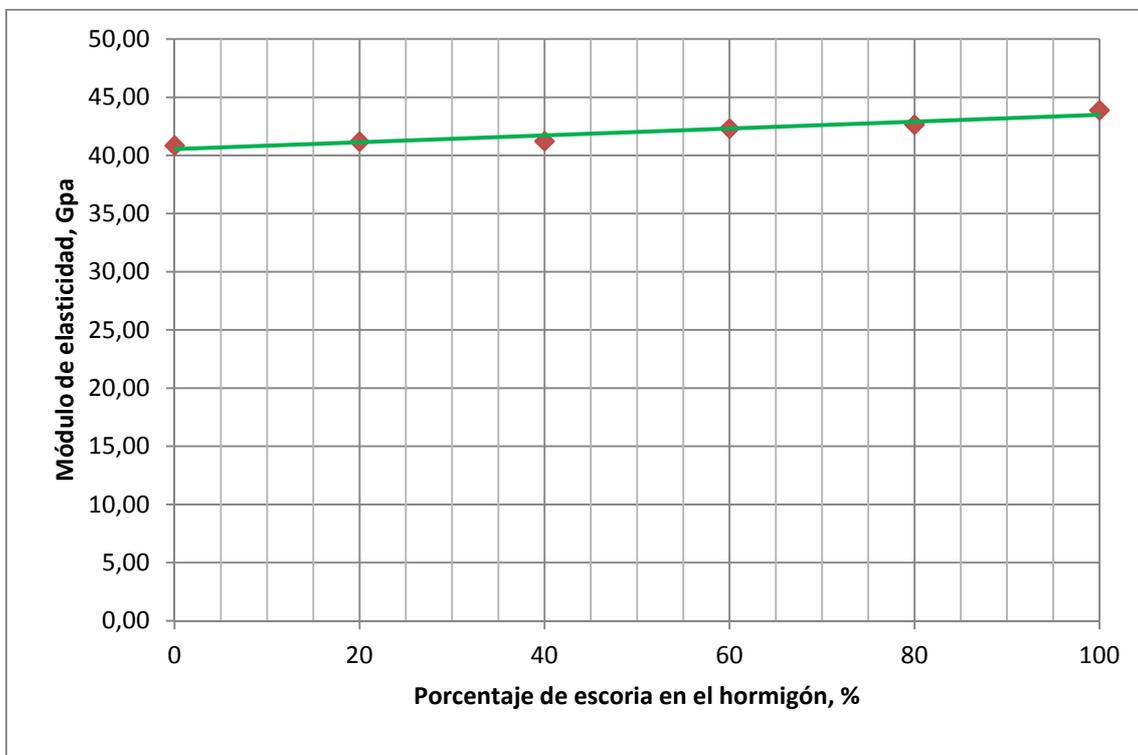


Figura 5.48. Modelización del módulo elasticidad estático a 28 días según el porcentaje de escoria de cobre

5.8.5 Conclusiones

A continuación se describen las conclusiones más relevantes que se derivan de los resultados obtenidos en el ensayo del módulo de elasticidad en compresión:

- El módulo de elasticidad del hormigón aumenta, en función de la concentración de escoria de cobre, para todos los casos estudiados.
- Los mayores incrementos del módulo de elasticidad corresponden a concentraciones de escoria de cobre superiores al 40%.
- El modelo de Takizaki modificado propuesto permite determinar los valores del módulo de elasticidad de forma muy fiable en los hormigones estudiados en este trabajo.

5.9 Ensayo de abrasión superficial

5.9.1 Introducción

La resistencia a la abrasión superficial del hormigón se define como la capacidad de una superficie para resistir el desgaste por frotamiento o fricción [5.41]. Esta abrasión del hormigón en su superficie se produce cuando sobre ella roza un cuerpo o cuando sufre percusión [5.26].

La abrasión de las superficies del hormigón puede ser debida a acciones de tipo mecánico provocadas por el aire, por el agua con partículas sólidas en suspensión, o por la acción de elementos granulares deslizando sobre las superficies de hormigón.

De los ensayos realizados por diferentes autores como Scripture *et al.* [5.41] y Witte *et al.* [5.42] y de las experiencias en obra, en general la resistencia a la abrasión del hormigón es proporcional a su resistencia a compresión. Debido a que la abrasión ocurre en la superficie, es fundamental maximizar la resistencia superficial [5.26].

La resistencia a la abrasión del hormigón es un fenómeno progresivo. Inicialmente la resistencia está muy relacionada con la resistencia a la compresión en la superficie de

desgaste y la mejor forma de estimar el desgaste es en base a esta resistencia. A medida que la pasta se desgasta los agregados finos y gruesos quedan expuestos; la abrasión y los impactos provocarán una degradación adicional relacionada con la resistencia de la adherencia entre la pasta y los áridos, y la dureza de estos [5.43].

La influencia de la resistencia abrasiva de los componentes del hormigón, como son los áridos y el cemento, determinará la resistencia a la abrasión del hormigón. Generalmente los hormigones fabricados con áridos muy resistentes presentan una resistencia a la abrasión mayor que hormigones fabricados con áridos menos resistentes. Así mismo se debe considerar la adherencia de los áridos con la pasta de cemento, ya que hormigones con fabricados con áridos muy resistentes, pero con escasa adherencia presentan menores resistencias a la abrasión que hormigones fabricados con áridos menos resistentes pero con buena adherencia.

Cuando se trata de desgaste por rozamiento, la resistencia al desgaste de los áridos tiene una influencia superior a la propia resistencia a compresión del hormigón que queda relegada a un segundo término. Sin embargo cuando se trata de acciones de percusión de pequeños objetos o partículas sólidas, la resistencia de la unión de la pasta de cemento al árido juega el papel más importante.

Para un hormigón determinado, la resistencia a la compresión de la superficie se mejoraría de la siguiente forma: [5.43]:

- Evitando la segregación de los componentes
- Eliminando la exudación
- Estableciendo un adecuado cronograma para el acabado
- Minimizando la relación agua/cemento
- Trabajando la superficie con un fratasado duro
- Utilizando procedimientos de curado adecuados

Payne y Dransfield [5.44] concluyeron que la resistencia a la abrasión es inversamente proporcional a la relación agua/cemento, y es afectada por los procedimientos de curado. Consecuentemente se concluye que el uso de aditivos reductores de agua incrementaría la resistencia a la abrasión debido a que disminuiría la relación agua cemento.

Como recomendaciones para obtener superficies de hormigón resistentes a la abrasión la norma ACI 302.1R-04 [5.45] en su tabla 6.2.1 indica una serie de medidas que permiten lograr una resistencia a la compresión adecuada, con lo que se obtendrían superficies de hormigón resistentes a la abrasión:

- Bajan relación agua/cemento en la superficie: Utilizar aditivos reductores de agua.
- Correcta graduación del árido fino y el árido grueso: El tamaño máximo del árido grueso se debería seleccionar de manera que se optimice la trabajabilidad y minimice el contenido de agua.
- Dosificar la mezcla de acuerdo con la consistencia deseada y la resistencia requerida.
- El contenido de aire debería de estar acorde con las condiciones de exposición. Para exposiciones donde no esté previsto la acción del hielo/deshielo es preferible que el contenido de aire sea menor o igual al 3%.

La norma ASTM C 779:2012 [5.46] describe tres procedimientos operativos para evaluar la resistencia a la abrasión de un hormigón. Estos procedimientos serían:

- Procedimiento A: Discos giratorios
- Procedimiento B: Ruedas abrasivas
- Procedimiento C: Rodamiento de bolas

Cada uno de los métodos se han utilizado durante años para desarrollar información sobre la resistencia al desgaste. A raíz de las investigaciones realizadas por Prior [5.47] sobre los procedimientos de abrasión, el método más fiable es el que utiliza discos giratorios, si bien no se ha encontrado ningún método de ensayo adecuado que englobe todas y cada una de las condiciones posibles de exposición a la abrasión del hormigón.

En cualquiera de los procedimientos indicados anteriormente la abrasión se interpreta como el promedio de la pérdida en gramos de las probetas ensayadas.

De cara al estudio de la resistencia a la abrasión del hormigón se deberían de considerar cuatro áreas generales de estudio [5.47]:

- Pisos y losas: La norma ACI 302.1R-04 [5.45] en su tabla 2.1 define tipos de desgaste y exige consideraciones especiales para lograr una buena resistencia al desgaste.
- Superficies de viales: El desgaste del hormigón se debe a la circulación de camiones pesados y automóviles con neumáticos con clavos o cadenas.
- Erosión de las estructuras hidráulicas, tales como las presas, vertederos, túneles, pilas y estribos de puentes, se debe a la acción de los materiales abrasivos transportados por el flujo del agua.
- Acción de la cavitación sobre el hormigón de las presas, vertederos, túneles y otros sistemas que transportan agua provocan erosión si las velocidades son elevadas y hay presiones negativas.

5.9.2 Proceso de elaboración del ensayo

Para la determinación de la resistencia a la abrasión se han ensayado 3 probetas cúbicas de dimensiones 10x10x10 cm para cada tipo de hormigón endurecido. La determinación del parámetro se ha realizado a 28 días de edad. El ensayo se realiza seguido las especificaciones indicadas en la norma UNE-EN 12808-2 [5.48].

La resistencia a la abrasión se determina midiendo el desgaste producido en la cara vista de una probeta que se somete a rozamiento mediante un disco de acero y material abrasivo bajo condiciones normalizadas.

Como material abrasivo se empleó corindón blanco de tamaño de grano 80, según la norma FEPA 42 F-84 [5.49].

El equipo utilizado consiste en una máquina de desgaste compuesta esencialmente de un disco de abrasión, una tolva para almacenar el abrasivo, una válvula de control para regular su salida, un conducto de salida desde la tolva, un carro porta probeta móvil y un contrapeso.

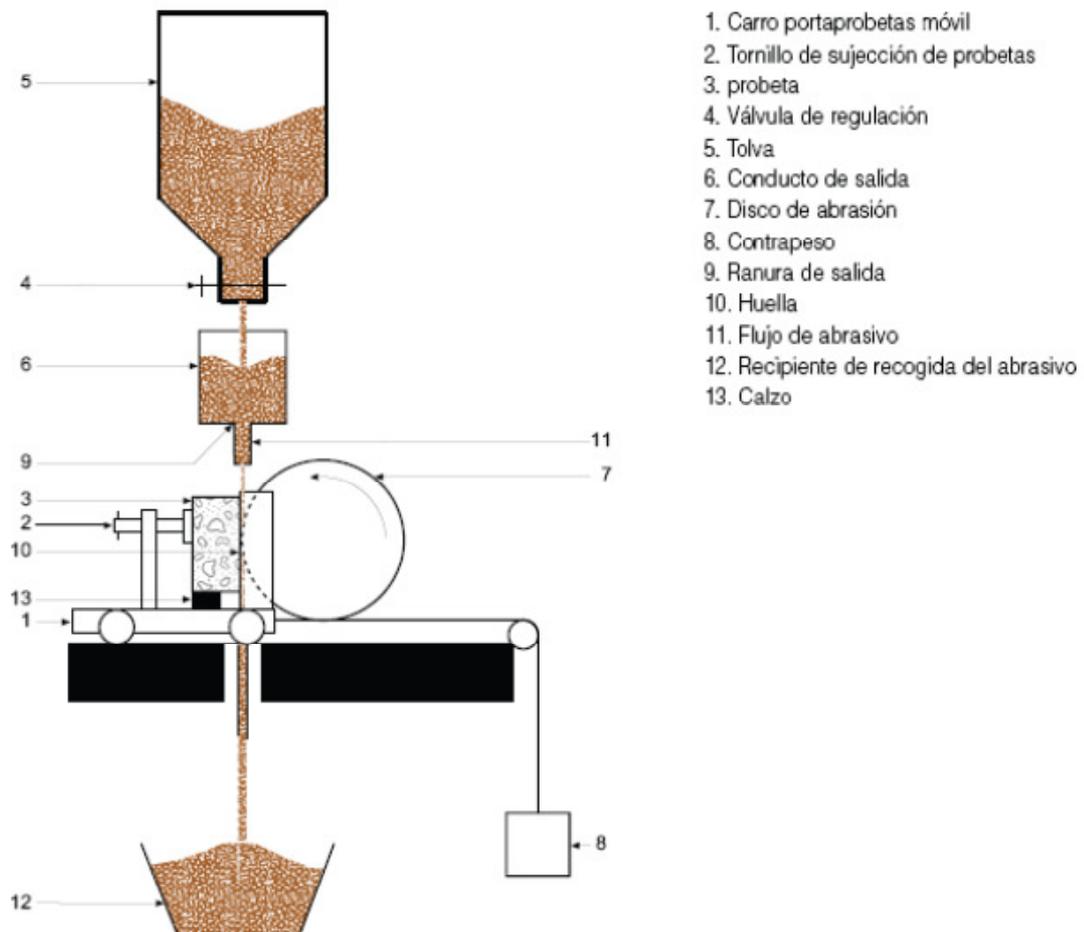


Figura 5.49. Esquema máquina de ensayo para determinar la resistencia a la abrasión
[Fuente: <http://www.infoterrazo.com>]

Para el ajuste del equipo se emplea una probeta de referencia de mármol Boulonnaise ajustando el contrapeso de forma que se consiga una huella de $20,0 \pm 0,5$ mm. La cuantía del contrapeso se incrementaría si la anchura de la huella es inferior al valor citado y se reduciría en caso contrario. En nuestro caso la comprobación realizada refleja que el aparato de medida está perfectamente ajustado, arrojando un valor de la huella dentro de los límites anteriormente indicado.

Una vez que se ha comprobado la calibración del equipo se comprueba la ortogonalidad entre el carro porta probetas y el eje del disco.

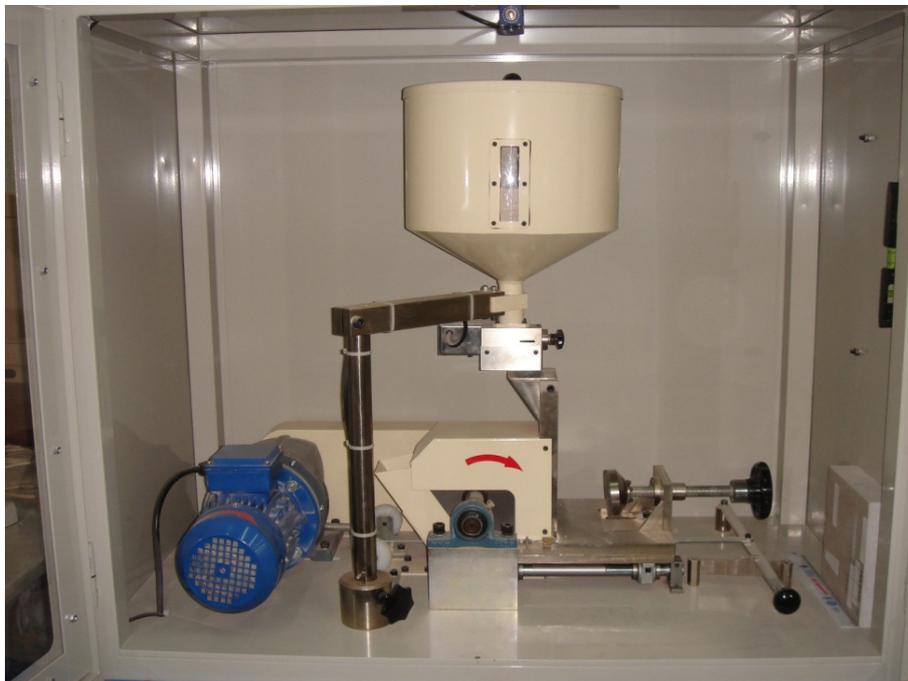


Figura 5.50. Equipo utilizado en el ensayo de abrasión

Para la realización del ensayo se utilizó una de las caras de la probeta en contacto con el encofrado liso de modo que en todo momento se han evitado coqueras, exfoliaciones, textura rugosa o alta porosidad.

Debido a que las probetas han sido sometidas a un proceso de secado en estufa a 50°C durante cuatro días, queda garantizada la eliminación de presencia de agua sobre la superficie del hormigón.

Antes de someter a las probetas al ensayo de abrasión se procedió a la limpieza de la cara a ensayar con un cepillo y posteriormente se roció la cara con pintura negra mediante vaporizador, a fin de facilitar la lectura de la huella.

A continuación se coloca la probeta en contacto con el disco de abrasión. Seguidamente se abre la válvula de control y simultáneamente se arranca el motor de accionamiento, de manera que el disco de abrasión consiga girar a 75 r.p.m. en 60 segundos.

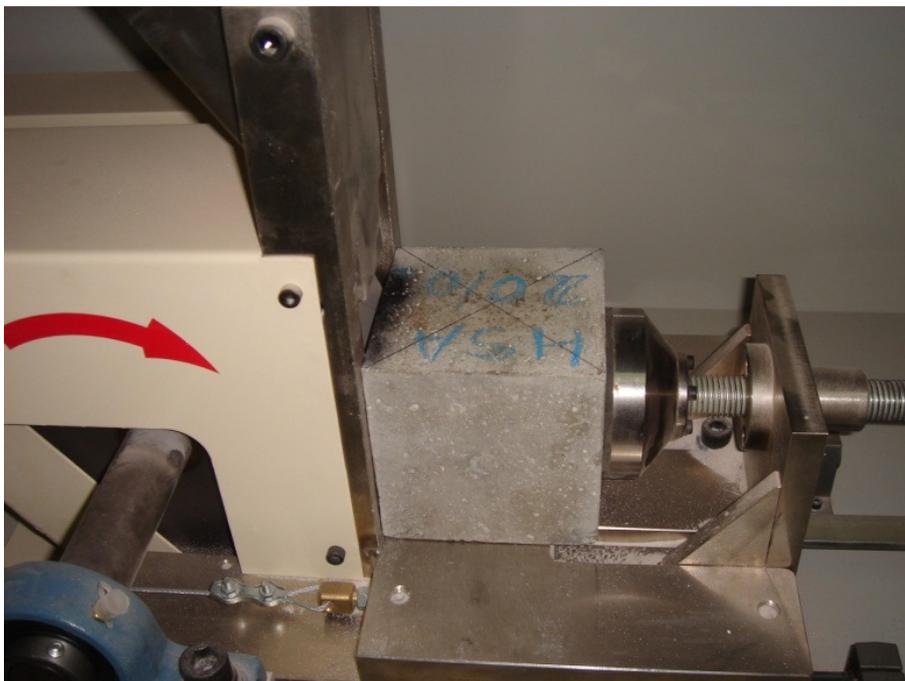


Figura 5.51. Probeta colocada en el equipo para el ensayo de abrasión

Para la medida de la huella (figura 5.54) se marcan los límites longitudinales exteriores de la huella **I**. Se dibuja una línea **AB** en el centro de la huella y perpendicular a su línea central. Igualmente se dibujan las líneas **CD** situadas a 10 ± 1 mm de los bordes.

Se mide con un calibre las tres longitudes de la cuerda de la huella, una medida central sobre la línea **AB** y dos medidas extremas sobre cada una de las líneas **CD**. La media de estas tres longitudes de huella determina el valor de la cuerda **L** necesario para determinar el valor del ensayo. En el caso de que la diferencia entre las dos medidas

extremas (medidas sobre las líneas CD) fuera superior a 0,5 mm el ensayo no será válido. En nuestro caso no hubo que desechar ningún ensayo.

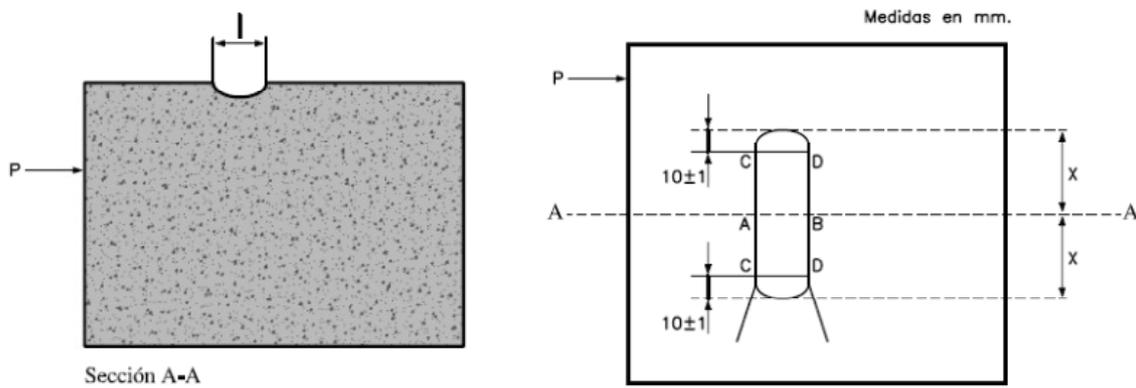


Figura 5.52. Situación de las líneas de medida en la huella del ensayo
[Fuente: [5.48] UNE-EN 12808-2:2009]

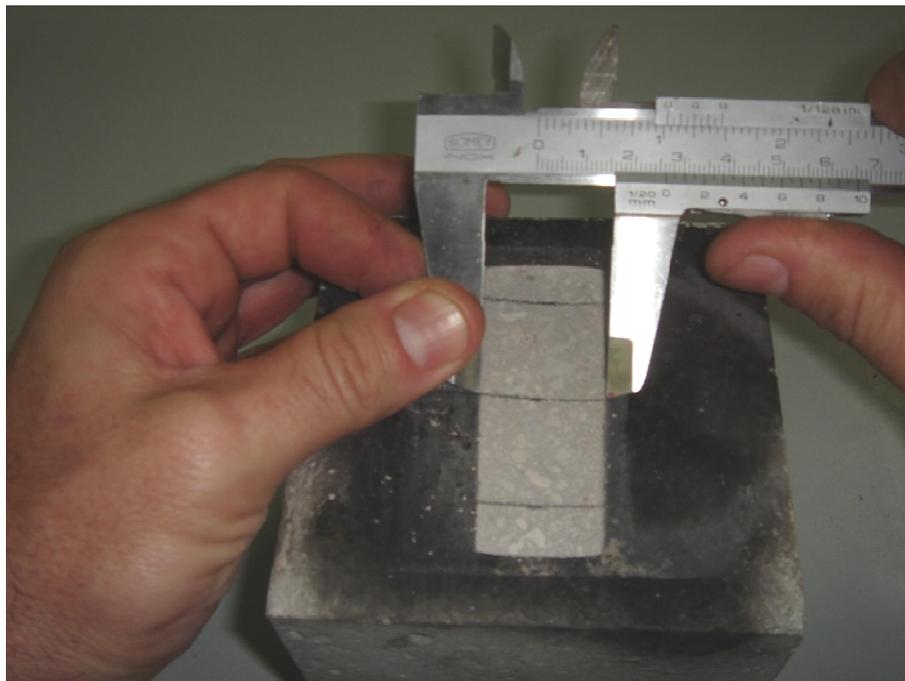


Figura 5.53. Medida del ancho central en la huella de abrasión superficial

Una vez obtenido el valor de la cuerda L se calcula la resistencia a la abrasión que se expresa como el volumen V , en mm^3 , de materia eliminada, según tabla 5.17.

Tabla 5.17

Relación entre valores de la cuerda **L** y el volumen de materia eliminada **V**

L mm	V mm ³								
20,0	67	30,0	227	40,0	540	50,0	1 062	60,0	1 851
20,5	72	30,5	238	40,5	561	50,5	1 094	60,5	1 899
21,0	77	31,0	250	41,0	582	51,0	1 128	61,0	1 947
21,5	83	31,5	262	41,5	603	51,5	1 162	61,5	1 996
22,0	89	32,0	275	42,0	626	52,0	1 196	62,0	2 046
22,5	95	32,5	288	42,5	649	52,5	1 232	62,5	2 097
23,0	102	33,0	302	43,0	672	53,0	1 268	63,0	2 149
23,5	109	33,5	316	43,5	696	53,5	1 305	63,5	2 202
24,0	116	34,0	330	44,0	720	54,0	1 342	64,0	2 256
24,5	123	34,5	345	44,5	746	54,5	1 380	64,5	2 310
25,0	131	35,0	361	45,0	771	55,0	1 419	65,0	2 365
25,5	139	35,5	376	45,5	798	55,5	1 459	65,5	2 422
26,0	147	36,0	393	46,0	824	56,0	1 499	66,0	2 479
26,5	156	36,5	409	46,5	852	56,5	1 541	66,5	2 537
27,0	165	37,0	427	47,0	880	57,0	1 583	67,0	2 596
27,5	174	37,5	444	47,5	909	57,5	1 625	67,5	2 656
28,0	184	38,0	462	48,0	938	58,0	1 669	68,0	2 717
28,5	194	38,5	481	48,5	968	58,5	1 713	68,5	2 779
29,0	205	39,0	500	49,0	999	59,0	1 758	69,0	2 842
29,5	215	39,5	520	49,5	1 030	59,5	1 804	69,5	2 906

Fuente: Norma UNE-EN 12808-2:2009 [5.48]

5.9.3 Resultados y discusión

Los valores medios obtenidos de la cuerda **L** y del volumen **V** perdido en el ensayo de abrasión, siendo este volumen la expresión de la resistencia a la abrasión según tabla 5.18, se indican en la tabla 5.18.

Tabla 5.18

Valores medios de cuerda (**L**) y resistencia a la abrasión medida como volumen de masa perdida (**V**)

Tipología hormigón	Cuerda L mm	Volumen V mm³
HSA	25,0	131
HEC-20	25,0	131
HEC-40	24,5	123
HEC-60	24,0	116
HEC-80	23,5	109
HEC-100	23,0	102

De la representación gráfica de la resistencia al desgaste indicada en la figura 5.56, se observa claramente que a medida que se aumenta la concentración de escorias, el

volumen de material eliminado en el ensayo es menor, lo que conlleva una resistencia mayor al desgaste. Este comportamiento se justifica sin más que comparar el coeficiente de friabilidad del árido fino con el de la escoria de cobre. En el caso de la escoria, el coeficiente de friabilidad tiene un valor del 7,3%, frente al árido fino que posee un valor de 27,7%, tal y como se indicó en el apartado 3.5 del capítulo 3.

5.9.4 Modelización de los parámetros

Se plantea un modelo analítico de recta de regresión resuelta por el método de los mínimos cuadrados. Esta expresión analítica facilita el valor de la resistencia al desgaste medida como volumen de materia perdida en función del porcentaje árido fino 0/2 que se sustituye por escoria de cobre, a la vez que nos indica a través del coeficiente de determinación R^2 la bondad del ajuste.

La expresión del modelo analítico planteado obedece a la expresión:

$$y = A x + B \quad (5.24)$$

donde:

y resistencia al desgaste medido como volumen de materia perdida, mm^3

x porcentaje de escoria de cobre, %

A, B constantes a determinar

Con los valores obtenidos en el laboratorio y realizado el ajuste, se obtiene:

$$y = -0,311 x + 134,2 \quad (5.46)$$

El valor del coeficiente de determinación tiene un valor de $R^2=0,968$

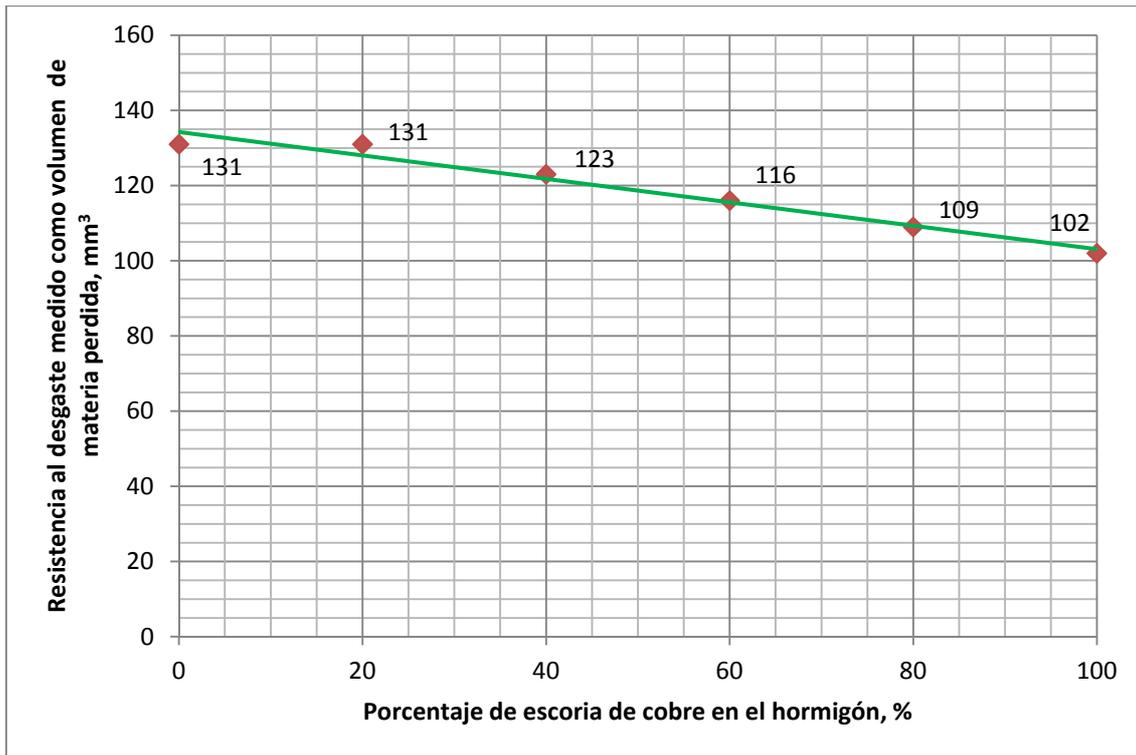


Figura 5.54. Resultados y modelización del ensayo de resistencia al desgaste medido como volumen de material perdido

5.9.5 Conclusiones

A continuación se describen las conclusiones más relevantes que se derivan del ensayo de resistencia al desgaste:

- La sustitución de árido fino 0/2 por escoria de cobre representa una excelente mejora de los hormigones frente a la abrasión. La resistencia a la abrasión superficial es proporcional al porcentaje de escoria.
- La adición de escoria estará indicada en todos los casos donde el hormigón diseñado este expuesto a condiciones de abrasión superficial elevada como es el caso de capas de rodadura de viales, estructuras sometidas a la erosión del agua y a la cavitación, etc.
- La concentración óptima será aquella que se ajuste mejor a las condiciones de diseño, determinándose en todo caso mediante ensayos de laboratorio o *in situ*.

5.10 Ensayo Cántabro modificado

5.10.1 Introducción

Además de los ensayos anteriormente descritos y con el fin de completar el conocimiento sobre el comportamiento de los hormigones diseñados frente al fenómeno de la abrasión, se ha previsto realizar el ensayo Cántabro modificado sobre las probetas fabricadas. Este ensayo normalmente se realiza a probetas de materiales bituminosos (ensayo Cántabro), pero en este caso resulta cuanto menos interesante aplicarlo a las probetas de hormigón.

El ensayo Cántabro fue propuesto en 1979 por Félix Pérez Jiménez y Carlos Kraemer y consiste en la determinación de la pérdida de desgaste empleando la máquina de Los Ángeles pero sin la carga abrasiva de las bolas y haciendo girar el tambor de la misma a una velocidad de 30 a 33 r.p.m., durante 300 vueltas.

Con el ensayo se obtiene un índice numérico de la pérdida de masa, expresado como porcentaje de la masa original de la probeta.

5.10.2 Proceso de elaboración del ensayo

La ejecución del ensayo se realiza adaptando la norma UNE-EN 12697-17:2006+A1:2007 [5.50] y se sustituyen las probetas bituminosas por probetas de hormigón de dimensiones 10x10x10 cm. El proceso seguido para el desarrollo del ensayo es el siguiente:

1. Se procede al secado de las probetas hasta masa constante, a una temperatura no superior 50°C.
2. Se determina el peso P_1 de cada probeta con una aproximación de 0,1 gramos.
3. Se introduce una probeta en el tambor de la máquina de Los Ángeles sin la carga abrasiva de las bolas y se hace girar el tambor a una velocidad de 30 a 33 r.p.m. durante 300 vueltas.

4. Al final del ensayo, se saca la probeta y se pesa de nuevo con la misma aproximación de 0,1 gramos, obteniendo el peso P_2 .

El resultado del ensayo de pérdida por desgaste según el ensayo Cántabro modificado, para cada probeta ensayada viene dado mediante la expresión:

$$P. D(\%) = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \quad (5.47)$$

siendo:

P.D valor de la pérdida por desgaste, en %

P_1 peso de la probeta inicial en, en gramos

P_2 peso de la probeta final en, en gramos

Se utiliza una máquina de Los Ángeles sin carga abrasiva, así como una balanza para obtener los pesos de la probeta inicial y final tras el proceso de desgaste a la que es sometida.



Figura 5.55. Máquina de Los Ángeles utilizada en el ensayo Cántabro



Figura 5.56. Estado de la probeta tras el ensayo Cántabro

5.10.3 Resultados y discusión

Los valores medios obtenidos por la ecuación 5.47 para cada una de las formulaciones del hormigón estudiado se indican en la tabla 5.19.

Tabla 5.19
Pérdidas por desgaste según el ensayo Cántabro modificado

Tipología hormigón	Peso medio probetas (gr)		Pérdida por desgaste (%)
	Inicial	Final	
HSA	2417,1	2220,0	8,15
HEC-20	2373,2	2200,5	7,28
HEC-40	2487,4	2308,4	7,20
HEC-60	2490,3	2292,7	7,93
HEC-80	2551,4	2350,0	7,89
HEC-100	2582,6	2380,1	7,84

En la figura 5.57 se representa la evolución de la pérdida por desgaste en función de la escoria de cobre. En ella, se observa como en todos los casos estudiados la resistencia

al desgaste de los hormigones que contienen escorias es mayor a la del hormigón de referencia.

Para concentraciones de escorias hasta el 40% se observa un aumento de la resistencia al desgaste a medida que se incrementa la proporción de escoria en el hormigón. Este hecho estará motivado por la mejora de la compacidad del sistema, debido a que aumenta el encaje entre partículas. Para valores de escoria superiores al 40%, la resistencia al desgaste disminuye ligeramente hasta alcanzar una meseta de estabilidad para concentraciones mayores al 60%. Esta ligera disminución de la resistencia estaría motivada por una pequeña pérdida de compacidad del sistema al perder árido fino.

5.10.4 Modelización de los parámetros

Se plantea un modelo analítico polinómico de grado 3 resuelta por el método de los mínimos cuadrados. Dicho modelo analítico facilitaría el valor de la resistencia al desgaste medida de la pérdida de masa, expresado como porcentaje de la masa original de la probeta.

La expresión del modelo planteado sería:

$$y = A x^3 + B x^2 + C x + D \quad (5.17)$$

donde:

y resistencia al desgaste, %

x porcentaje de escoria de cobre, %

A, B, C, D constantes a determinar

Con los valores obtenidos en el laboratorio y realizado el ajuste, se obtiene:

$$y = -1,012 \cdot 10^{-5} x^3 + 1,71 \cdot 10^{-3} x^2 - 7,3 \cdot 10^{-2} x + 8,14 \quad (5.48)$$

El valor del coeficiente de determinación sería $R^2=0,889$.

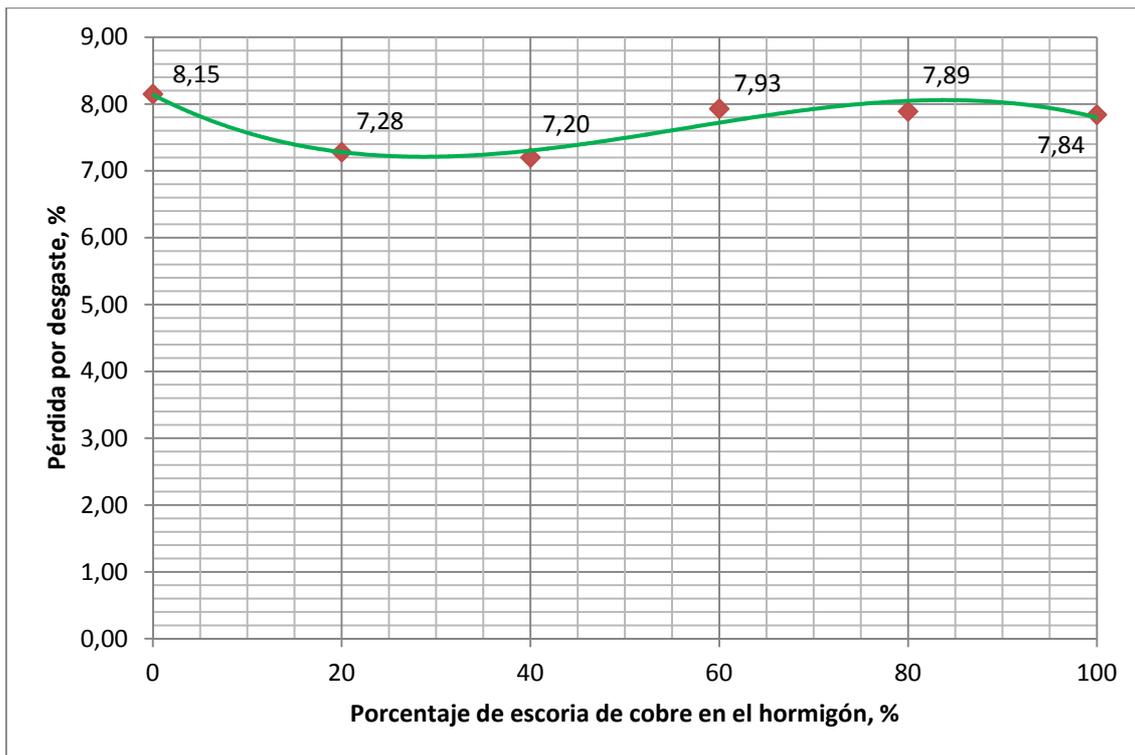


Figura 5.57. Resultados y modelización de la resistencia al desgaste según el ensayo Cántabro modificado

5.10.5 Conclusiones

A continuación se describen las conclusiones más relevantes que se derivan del ensayo Cántabro modificado:

- La resistencia al desgaste es mayor en todos los hormigones con incorporación de escorias.
- La resistencia al desgaste máxima corresponde a concentraciones del 40%.
- Para concentraciones superiores al 60% la resistencia al desgaste es prácticamente independiente del porcentaje de escoria de cobre en el hormigón.

5.11 Ensayo del índice de rebote o esclerómetro

5.11.1 Introducción

El ensayo del índice de rebote es una de las pruebas no destructivas más antiguas, estando su utilización en la actualidad muy extendida. Este ensayo se ha convertido en los últimos 50 años en el sistema de medida no destructivo más comúnmente utilizado en el mundo. Dado que el uso de este ensayo es muy habitual tenemos que ser muy cautelosos a la hora de interpretar los resultados debido a que el ensayo no tiene que ser entendido como una alternativa a la determinación de la resistencia a compresión.

Este ensayo fue diseñado en 1950 por E. Schmidt, por lo que también es conocido como ensayo de martillo Schmidt, o esclerómetro [5.11]. El ensayo consiste en una masa de acero impulsada por un muelle el cual, cuando es liberado, golpea un vástago de acero en contacto con la superficie de hormigón. El resultado del ensayo se expresa en términos de rebote de la masa de acero, es decir, a través de la cantidad de energía recuperada en el rebote de dicha masa. La distancia del rebote del martillo de acero se mide en una escala lineal acoplada al instrumento. Esta distancia obtenida del ensayo es el índice de rebote [5.51].

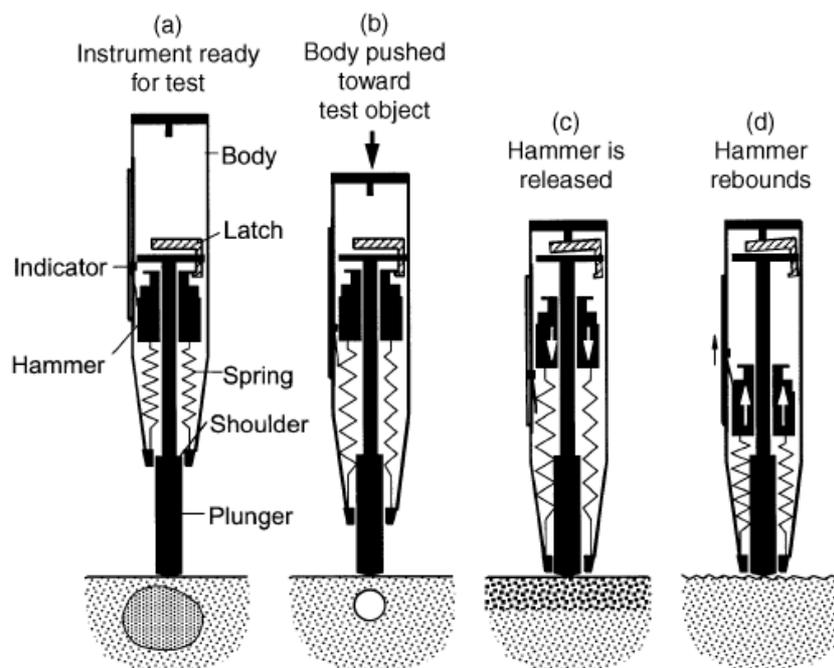


Figura 5.58. Funcionamiento del martillo Schmidt

[Fuente: [5.52] ACI 228.1R-03]

El índice de rebote determina la dureza de la superficie ensayada sobre una escala graduada del 10 al 100, la cual se encuentra acoplada al martillo. De este modo un número bajo del índice de rebote indicaría una baja dureza.

La energía absorbida por el hormigón depende de las relaciones tensión-deformación del hormigón. Por lo tanto, la energía absorbida está relacionada con la resistencia y la rigidez del hormigón. Un hormigón de resistencia baja dará como resultado un número de rebote inferior. Existe la posibilidad de que dos hormigones con la misma resistencia pero con diferentes rigideces, posean un índice de rebote diferente incluso si las fuerzas son iguales. En otro sentido, es posible que los dos hormigones con diferentes resistencias puedan tener el mismo índice de rebote si la rigidez del hormigón de baja resistencia es mayor que la rigidez del hormigón de alta resistencia [5.52]

Dependiendo del tipo de hormigón y del tipo de esclerómetro utilizados en el ensayo, la profundidad afectada del hormigón endurecido se encuentra entre 2-3 cm. Debido a que solo se afecta al hormigón de forma superficial no es posible detectar anomalías interiores del mismo, como fisuras, coqueras, zonas mal vibradas, etc. [5.53].

Igualmente no se debe olvidar que como el ensayo se hace de forma superficial, es posible obtener variaciones en la medida derivadas de las imperfecciones superficiales de la cara ensayada, como por ejemplo presencia de áridos gruesos, áridos frágiles o pequeñas coqueras que darán lugar a valores de medida del índice de rebote anormalmente altos o bajos respectivamente. De la misma forma se evitarán zonas que presenten exfoliaciones o porosidades, así como zonas donde las armaduras o cables de precompresión se encuentren muy próximas a la superficie.

Otros factores que influyen en la medida del índice de rebote serían [5.51, 5.54]:

- Carbonatación: La carbonatación en la superficie produce mayores valores del índice de rebote.

- Humedad de la superficie: Los ensayos realizados sobre superficies húmedas reflejan valores del índice de rebote inferiores en un 20-30% a los mismos ensayos pero realizados sobre superficies secas.
- Movimiento de la probeta durante el ensayo: Cualquier movimiento de la probeta durante el ensayo reflejaría valores no previstos. De ahí que previamente a la realización de la prueba se debe fijar la probeta de forma rígida.
- Dirección del ensayo: Según el ángulo formado entre el aparato de medida y superficie de ensayo, se procederá a la corrección de los valores si estos han sido obtenidos de forma distinta a la posición horizontal.
- Hormigones jóvenes: La realización del ensayo sobre hormigones jóvenes darían como resultado unas lecturas del índice de rebote del todo imprecisas debido a la baja resistencia del hormigón a edades tempranas.

5.11.2 Proceso de elaboración del ensayo

Para la determinación del índice de rebote se han ensayado 3 probetas cúbicas de dimensiones 10x10x10 cm para cada tipo de hormigón endurecido. La determinación del parámetro se ha realizado a 28 días de edad.

Para la realización del ensayo se siguen las especificaciones indicadas en la norma UNE-EN 12504-2:2013 [5.55].

Ha sido necesaria la utilización de un martillo Schmidt, el cual consta de una masa de acero impulsada por un muelle el cual, cuando es liberado, golpea un vástago de acero en contacto con la superficie de hormigón. La distancia del rebote del martillo de acero se mide en una escala lineal acoplada al instrumento.

El ensayo se efectúa sobre una de las caras de la probeta en contacto con el encofrado liso de modo que en todo momento se han evitado coqueas, exfoliaciones, textura rugosa o alta porosidad.

Debido a que las probetas han sido sometidas a un proceso de secado en estufa a 105°C durante 24 horas, queda garantizada la eliminación de presencia de agua sobre la superficie del hormigón.

Previo a la toma de datos de cada una de las probetas se procede al tarado del esclerómetro sobre el yunque de tarado.



Figura 5.59. Martillo Schmidt utilizado en los ensayos

Sobre cada una de las probetas ensayadas se han tomado 9 lecturas con el fin de disponer de una estimación fiable del índice de rebote en la zona de ensayo. Cada una de las lecturas se realiza de forma que la distancia entre ellas no sea inferior a 25 mm ni a 25 mm del borde de la pieza. Para ello se ha dispuesto de una cuadrícula de 25x25 mm sobre la cara a ensayar, haciendo coincidir cada una de las lecturas con la intersección de las líneas de cuadrícula. Todas las medidas se han efectuado con el esclerómetro en posición vertical.

Como resultado del ensayo sobre cada probeta se ha tomado la mediana de las lecturas, teniendo en cuenta la orientación del esclerómetro de acuerdo con las instrucciones del fabricante y expresando como un número entero. Los resultados

obtenidos se han verificado según establece la norma, de forma que se descartan la totalidad de las lecturas si más del 20% de estas difieren de la mediana en más de 6 unidades. Los valores obtenidos del índice de rebote se introducen en las tablas facilitadas por el fabricante del aparato y se obtiene la estimación resistencia a compresión. En la figura 5.62 se muestra el diagrama donde se relaciona el índice de rebote con la resistencia a compresión según las instrucciones facilitadas por el fabricante del martillo Schmidt utilizado en el ensayo.

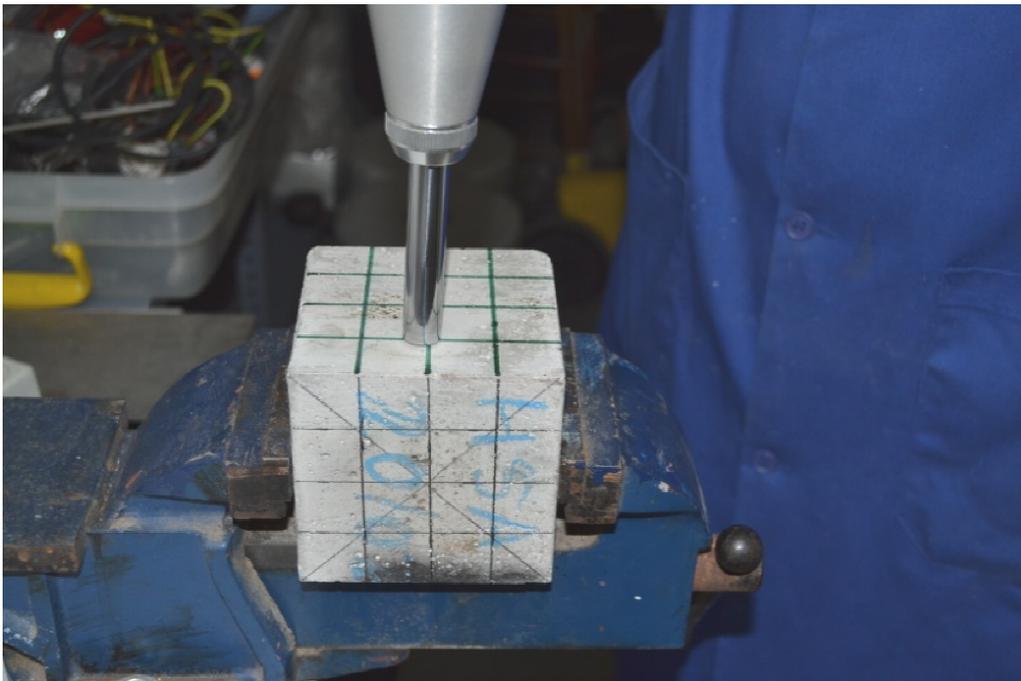


Figura 5.60. Determinación del índice de rebote

5.11.3 Resultados y discusión

En la tabla 5.20 se indica para cada uno de los hormigones estudiados el índice de rebote obtenidos en el ensayo. Según la representación gráfica de estos (figura 5.63), existe una tendencia al incremento del índice de rebote en relación con la concentración de escoria de cobre presente en el hormigón. La justificación estaría en la mayor resistencia al impacto de la escoria de cobre en relación con el árido fino. Para ello basta con comparar la friabilidad de ambos materiales (apartado 3.5 del capítulo 3).

Tabla 5.20
Valores medios del índice de rebote

Tipología hormigón	Índice de rebote
HSA	40
HEC-20	40
HEC-40	41
HEC-60	43
HEC-80	44
HEC-100	44

La resistencia a compresión obtenida por el ábaco del esclerómetro utilizado debe de interpretarse con cautela y en ningún momento debe ser entendido como una alternativa para obtener la resistencia a compresión del hormigón. No existe una correlación entre la resistencia a compresión y el índice de rebote que pueda ser aplicada de forma general a todos los hormigones. Para obtener un nivel de precisión aceptable en la estimación de la resistencia a compresión deberán de efectuarse calibraciones específicas para cada tipo de hormigón [5.55].

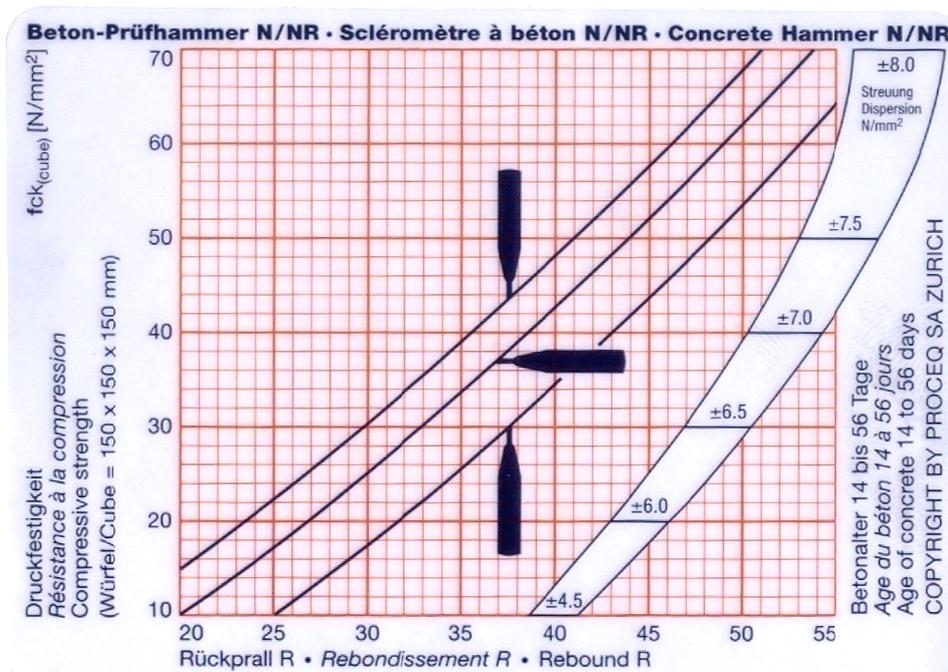


Figura 5.61. Relación entre el índice de rebote y la resistencia a compresión
[Fuente: Fabricante del martillo Schmidt utilizado]

Bungey et al. [5.54] indican que es difícil justificar algún tipo de relación teórica entre el índice de rebote y la resistencia a compresión del hormigón.

En la tabla 5.21 se indican los valores de resistencia a compresión de las probetas de ensayo estimados por el ábaco del esclerómetro (figura 5.61), así como la resistencia a compresión de esa misma probeta mediante ensayo según norma UNE-EN 12390-3:2009/AC:2011 [5.30]. Se aprecia como existe un incremento medio del 48% de la resistencia real frente a la estimada por el índice.

Tabla 5.21

Valores de la resistencia real y estimada mediante el índice de rebote

Tipología hormigón	R. Comp. Estimada (N/mm ²)	R. Comp. Real (28 días) (N/mm ²)	Incremento (%)
HSA	42	68,89	64
HEC-20	42	66,25	58
HEC-40	44	68,13	55
HEC-60	48	67,66	41
HEC-80	50	66,44	33
HEC-100	50	68,89	38

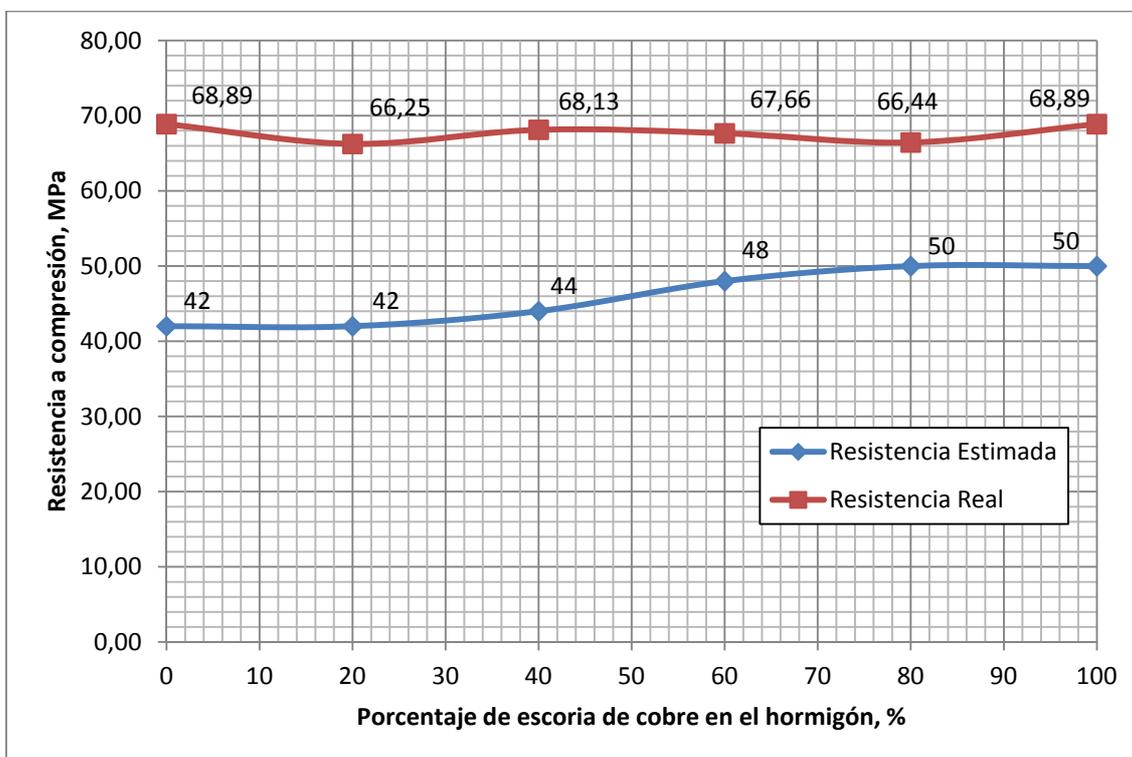


Figura 5.62. Comparativa entre resistencia a compresión estimada según IR y la resistencia real

5.11.4 Modelización

A la vista de la representación gráfica de los resultados obtenidos en los ensayos, se propone ajustar los puntos experimentales con una recta de regresión resuelta por el método de los mínimos cuadrados, cuya expresión genérica sería:

$$y = A x + B \quad (5.24)$$

donde:

y índice de rebote

x porcentaje de escoria de cobre, %

A, B constantes a determinar

Con los valores obtenidos en el laboratorio y realizado el ajuste, se obtiene:

$$y = 0,049 x + 39,11 \quad (5.49)$$

El coeficiente de determinación tiene un valor de $R^2=0,885$.

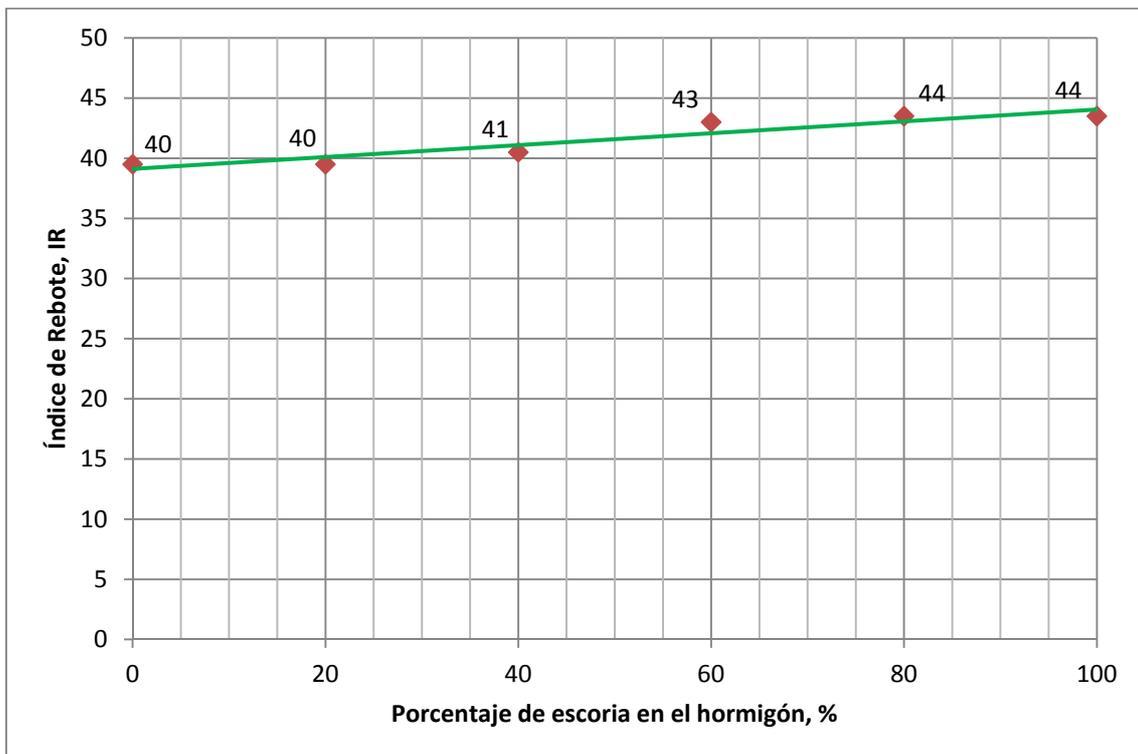


Figura 5.63. Resultados y modelización del ensayo del índice de rebote

5.11.5 Conclusiones

A continuación se describen las conclusiones más relevantes que se derivan del ensayo:

- El índice de rebote del hormigón tiende a incrementarse a medida que se aumenta la concentración de escoria de cobre en el hormigón.
- Las resistencias a compresión estimadas por el índice de rebote se encuentran un 48% de media por debajo de las obtenidas por medio de ensayos de compresión.

5.12 Ensayo de ultrasonidos

5.12.1 Introducción

La medición de la velocidad del pulso ultrasónico como una alternativa de prueba no destructiva para evaluar la calidad del hormigón se ha utilizado desde hace aproximadamente 50 años. La técnica fue desarrollada por Leslie y Chessman en Canadá [5.56] y se utilizó con gran éxito desde la década de los años sesenta para diagnosticar el estado del hormigón utilizado en presas.

El ensayo de impulsos ultrasónicos consiste en medir el tiempo que emplea un pulso ultrasónico en recorrer la distancia comprendida entre un transductor emisor y un transductor receptor. El transductor emisor emite impulsos de vibraciones longitudinales y después de atravesar en el elemento constructivo una trayectoria de longitud conocida, el impulso de vibraciones se convierte en una señal eléctrica por el transductor receptor, mientras que circuitos electrónicos de temporización miden el tiempo de tránsito del impulso [5.57].

Los transductores se acoplan a ambos lados del elemento constructivo o sobre a una cara de este, mantenido en todo momento el contacto con la superficie del elemento ensayado. Para garantizar que existe un óptimo acoplamiento acústico entre el hormigón y el transductor se utiliza vaselina, grasa, jabón líquido o glicerina.

Una vez conocido el tiempo de propagación del pulso ultrasónico se obtiene la velocidad de propagación de dichos pulsos, dado que la distancia entre los transductores es conocida.

Los impulsos ultrasónicos pasan a lo largo del camino más corto entre los palpadores, rodeando la periferia de los defectos (grietas, coqueas, capas de inferior calidad) en caso de que existan, lo que aumentaría el tiempo de recorrido.

Un factor decisivo para el cálculo de la velocidad de propagación es la aplicación de los transductores sobre la superficie del elemento a ensayar. Existen tres formas de aplicación según la norma UNE-EN 12504-4:2006 [5.58]:

1. Transmisión directa: siempre es la más efectiva, ya que los transductores son direccionables y el tiempo que se mide es el de la onda de compresión longitudinal.

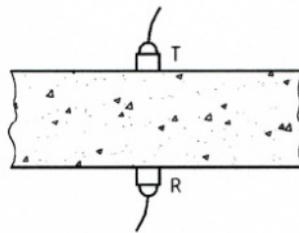


Figura 5.64. Posición de transductores en transmisión directa

2. Transmisión semidirecta: es efectivo para el control de aquellos elementos en los que los transductores puedan colocarse encima y a los lados, es decir, en caras perpendiculares.

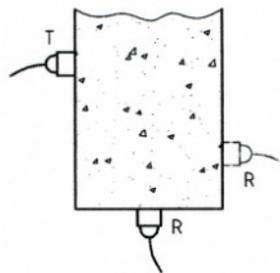


Figura 5.65. Posición de transductores en transmisión semidirecta

Este método está muy indicado para detectar la presencia o ausencia y profundidad de las grietas o zonas de baja compactación.

3. Transmisión indirecta: es mucho menos satisfactoria, ya que en este caso la energía recibida en el transductor es aproximadamente la décima parte que en la transmisión directa.

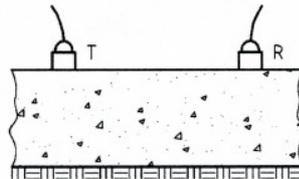


Figura 5.66. Posición de transductores en transmisión indirecta

En transmisiones directas y semidirectas la velocidad de propagación viene definida por la siguiente expresión:

$$V = \frac{L}{T} \quad (5.50)$$

donde:

V: velocidad de propagación del impulso, en Km/s

L: longitud de la trayectoria, en mm

T: tiempo de propagación del pulso ultrasónico medido en μ s

En transmisiones indirectas no se conoce la longitud exacta de la trayectoria, debido al tamaño de las áreas de contacto entre los transductores y el elemento a ensayar. Esto obliga a realizar un conjunto de medidas con los transductores a diferentes distancias.

El conjunto de medidas se realiza colocando el transductor transmisor T en contacto con la superficie del elemento a ensayar y en un punto fijo. El transductor receptor R se colocará a lo largo de una línea imaginaria elegida sobre la superficie del elemento a ensayar, pero separándolo a incrementos fijos X_n del transductor emisor T.

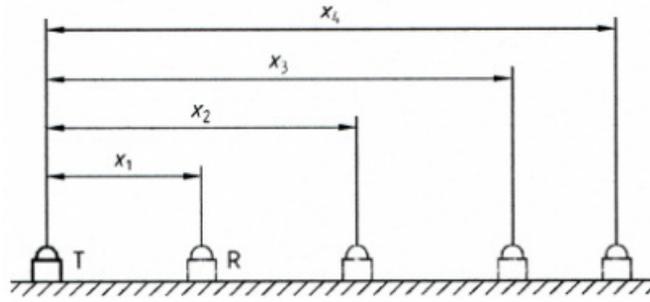


Figura 5.67. Distribución de transductores en medición indirecta

De esa forma los tiempos de propagación obtenidos junto con la separación de los transductores se representan gráficamente. El ajuste de la nube de puntos se realizará mediante una recta, para seguidamente obtener su pendiente mediante la tangente del ángulo que forma dicha recta con la vertical.

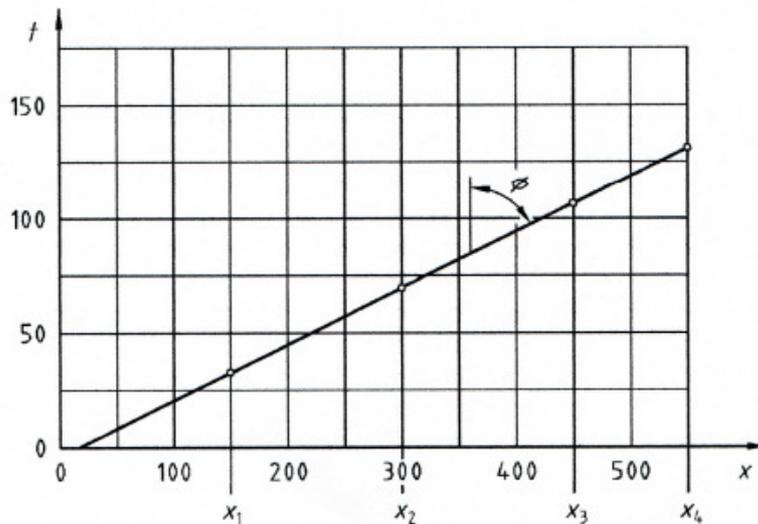


Figura 5.68. Ajuste de la velocidad de propagación en medición indirecta

La pendiente de la recta así obtenida será la velocidad de propagación de los impulsos a lo largo de la línea imaginaria elegida. En el caso de que los puntos obtenidos con este método presentasen una discontinuidad podría tratarse de la existencia de una grieta superficial o una capa superficial de baja calidad. En este caso la velocidad obtenida no es fiable.

Fernández Cánovas [5.26] propone una clasificación de la calidad del hormigón en función de la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas. Esta clasificación se indica en la tabla 5.22.

Tabla 5.22
Calidad del hormigón según la velocidad de propagación ultrasónica
[Fuente: [5.26] Fernández Cánovas]

Velocidad propagación (m/s)	Calidad del hormigón
$V \geq 4500$	Excelente
$3600 \leq V \leq 4500$	Bueno
$3000 \leq V \leq 3600$	Aceptable
$2100 \leq V \leq 3000$	Malo
$V \leq 2100$	Muy malo

La velocidad de ultrasonidos representa un método ideal para medir la uniformidad del hormigón. En infinidad de ocasiones se ha utilizado para detectar zonas del hormigón con coqueas, fisuras, zonas de mala compactación, etc., es decir, zonas del elemento donde el hormigón no es de buena calidad.

La medida de la velocidad resultaría afectada por un buen número de factores, lo que produce que dicha medición no sea fiable. Los factores que influyen en dicha medida serían [5.26, 5.54, 5.59-5.61]:

1. Humedad

Tiene dos efectos sobre la velocidad de propagación, uno químico y otro físico. El químico se corresponde con el efecto de las diferentes condiciones de curado sobre la hidratación del cemento. El físico se corresponde con la presencia de agua en los poros.

Bungey et al. [5.54] señala que la velocidad de ultrasonidos a través de un hormigón en condiciones saturadas puede ser hasta un 5% mayor que a través de un mismo hormigón en condiciones secas. En este caso la velocidad de propagación aumenta con la humedad.

2. Longitud de la trayectoria

Las velocidades de propagación de los impulsos generalmente no están influenciadas por la longitud de la trayectoria siempre que el valor de esta no sea excesivamente pequeña. En el caso de encontrarnos ante valores de trayectorias excesivamente pequeñas las medidas realizadas se verían afectadas debido a la naturaleza heterogénea del hormigón.

La norma UNE 12504-4:2006 [5.58] indica que la longitud mínima de la trayectoria debe ser de 100 mm para un hormigón con tamaño máximo del árido de 20 mm o menor y de 150 mm para hormigones con tamaño máximo del árido comprendidos entre 20 mm y 40 mm.

Bungey et al. [5.54] señala que las variaciones de velocidad están influenciadas por la longitud mínima de la trayectoria (figura 5.69). Se observa como para distancias entre transductores inferiores a 100 mm, la velocidad experimenta fuertes variaciones. Sin embargo para valores superiores a 100 mm la velocidad se estabiliza y no se ve afectada por la medida de la longitud de la trayectoria.

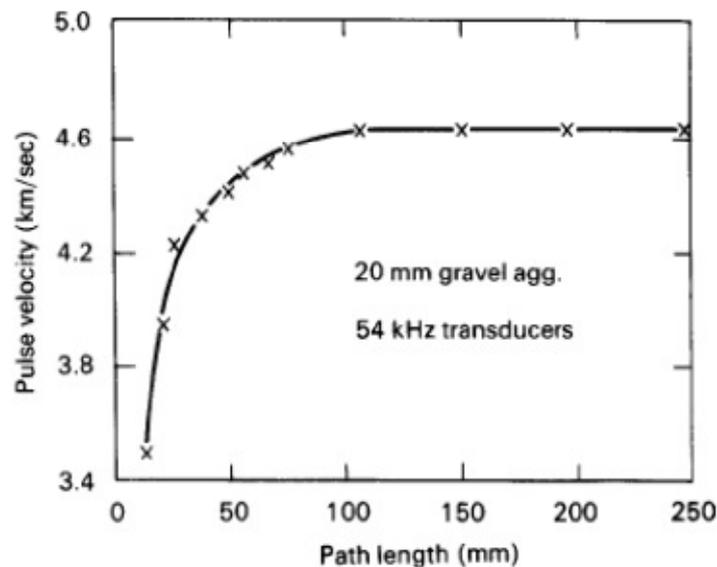


Figura 5.69. Influencia de la longitud de la trayectoria en la velocidad de propagación
[Fuente: [5.54] Bungey et al.]

3. Temperatura del hormigón

Variaciones de la temperatura entre 10°C y 30°C no producen cambios significativos en la velocidad de propagación. Fuera de ese rango deberán de efectuarse las correcciones pertinentes según las recomendaciones del fabricante del aparato medidor.

4. Efecto del armado

Deben evitarse realizar medidas próximas a barras de armado paralelas a la dirección de la propagación del impulso, dado que la velocidad de ultrasonidos medida en las proximidades de las barras de acero en un hormigón armado suele ser mayor que en el hormigón en masa de la misma composición.

El aumento de la velocidad de propagación depende del número, diámetro y distancia de las barras de acero, así como la orientación de las barras con respecto a la trayectoria de propagación del ensayo.

5. Áridos utilizados

El tipo y tamaño máximo del árido, así como la dosificación que tengan estos en la mezcla de hormigón influirá en la velocidad de propagación [5.60] así como la longitud mínima del ensayo se verá influenciada por el tamaño máximo del árido.

La utilización de áridos rodados suele presentar una mayor velocidad de propagación con respecto a la utilización de áridos machacados.

Según Trtnik [5.61] para un hormigón con la misma resistencia, probablemente aquel que posea un mayor contenido de áridos presentará una velocidad de propagación mayor.

6. Grietas y coqueras

La existencia de cualquier discontinuidad, fisura o coquera, en la masa del hormigón, situada entre los dos transductores obstruirá el haz ultrasónico

debido a que la transmisión de energía por esa discontinuidad es despreciable. Consecuencia de ello el tiempo de recorrido entre los transductores será mucho mayor que en el caso de un hormigón similar sin defectos.

7. Edad del hormigón

A mayor edad del hormigón se presentan mayores velocidades de propagación de los pulsos ultrasónicos.

8. Relación agua/cemento

La velocidad de propagación será menor para relaciones agua/cemento mayores.

5.12.2 Proceso de elaboración del ensayo

Para la determinación de los valores del ensayo y con objeto de valorar los posibles defectos de fabricación de las probetas, lo que se traduciría en una dispersión de los tiempos de ensayo, se han realizado la medición sobre 3 probetas diferentes para los distintos tipos de hormigón endurecido, pero siempre fabricadas en la misma amasada.

Las 3 probetas cúbicas ensayadas tienen de dimensiones 10x10x10 cm para cada tipo de hormigón endurecido.

La determinación del parámetro se efectúa a 28 días de edad. Para la realización del ensayo se han seguido las especificaciones indicadas en la norma UNE-EN 12504-4:2006 [5.58].

Se ha utilizado un equipo de auscultación ultrasónica concebido principalmente para hormigones. El instrumento está formado por un equipo de medida, 2 palpadores (transductores) y un patrón de calibración.



Figura 5.70. Equipo de ultrasonidos utilizado en los ensayos

Previo a la toma de datos de cada una de las probetas se procede a la calibración del aparato mediante el patrón de calibración suministrado por el fabricante. Para proceder a la calibración del equipo se sitúan cada uno de los palpadores en los extremos del patrón de calibrado, añadiendo el líquido acoplante, en nuestro caso vaselina. Una vez garantizado que el acople sea perfecto se comprueba que la lectura del aparato coincide con el valor del patrón de calibración. En el caso de que no coincidan se debe “ajustar a cero” el medidor hasta que coincidan las medidas.

Para la realización del ensayo se utilizaron dos caras opuestas de la probeta y dispuestas paralelamente a la dirección de hormigonado. Así de esta forma indicada se evitan coqueras, exfoliaciones, textura rugosa o alta porosidad en las superficies de ensayo. Esta disposición de las caras hace que los transductores se dispongan de forma que la medición sea directa. Dado que se han utilizado probetas de 10 cm de arista, la distancia entre palpadores es de 10 cm.

Las probetas han sido sometidas a un proceso de secado en estufa a 105°C durante 24 horas, queda garantizada la eliminación de presencia de agua sobre la superficie y en el interior, dado que el agua provoca aumentos en la velocidad de propagación.

5.12.3 Resultados y discusión

En la tabla 5.23 se indican los tiempos medio de propagación de los impulsos ultrasónicos, así como la velocidad de propagación del impulso obtenido según la ecuación 5.50.

Tabla 5.23
Valores medios del tiempo y velocidad de propagación ultrasónica

Tipología hormigón	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/s)
HSA	20,10	4975
HEC-20	20,71	4829
HEC-40	21,05	4751
HEC-60	20,79	4810
HEC-80	20,77	4815
HEC-100	20,80	4808

Según se ha indicado anteriormente en la tabla 5.23, y visto los resultados obtenidos para la velocidad de propagación, la calidad del hormigón es excelente en todos los casos, al obtenerse valores superiores a 4500 m/s.

Según la figura 5.71, el tiempo de propagación es similar en todos los hormigones estudiados, justificando las pequeñas variaciones observadas con la incertidumbre experimental.

5.12.4 Modelización

A la vista de la representación gráfica de los resultados obtenidos en los ensayos, se propone ajustar los puntos experimentales con una recta de regresión resuelta por el método de los mínimos cuadrados, cuya expresión genérica sería:

$$y = A x + B \quad (5.24)$$

donde:

y tiempo, en μ s

x porcentaje de escoria de cobre, %

A, B constantes a determinar

Con los valores obtenidos en el laboratorio y realizado el ajuste, se obtiene:

$$y = 0,004 x + 20,45 \quad (5.51)$$

El coeficiente de determinación tiene un valor de $R^2=0,330$.

Según la representación grafica de la figura 5.71, y a pesar del coeficiente de correlación del modelo, existe una tendencia muy definida a la independencia del tiempo de propagación a medida que se incrementa la concentración de escoria de cobre en el hormigón.

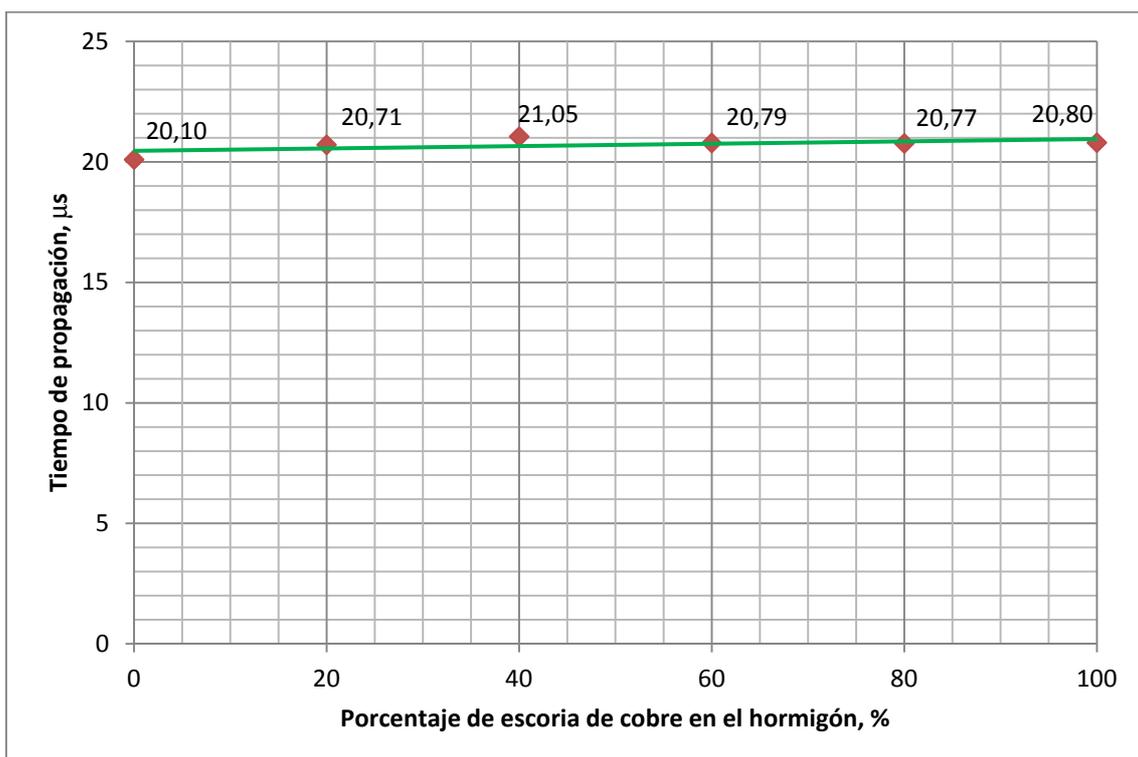


Figura 5.71. Resultados y modelización del tiempo de propagación ultrasónica

5.12.5 Conclusiones

A continuación se describen las conclusiones más relevantes que se derivan del ensayo de ultrasonidos:

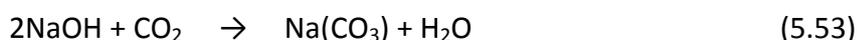
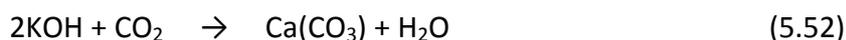
- Para todas las concentraciones de escoria estudiadas se obtienen hormigones de excelente calidad.
- La sustitución de árido fino por escoria de cobre no introduce cambios significativos en la velocidad de propagación ultrasónica del hormigón para la edad estudiada (28 días).

5.13 Carbonatación

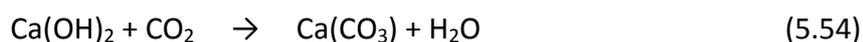
5.13.1 Introducción

La carbonatación es una reducción del pH en el hormigón. El acero embebido está protegido contra la corrosión por pasivación. La razón de esta pasivación es la alcalinidad del hormigón ya que el agua de los poros alcanza valores de $\text{pH} > 12,5$. En tales condiciones, se forma sobre la superficie del acero una capa microscópica de óxido de hierro que impide la disolución del hierro, impidiendo así la corrosión de las armaduras [5.62].

La acción principal del dióxido de carbono (CO_2) en relación a la corrosión de las armaduras, es la disminución de pH a valores inferiores a 9 como consecuencia de su reacción con los componentes alcalinos del hormigón [5.63]. El hormigón es un material poroso y, por lo tanto, el CO_2 y el aire penetran a través de los poros hacia su interior. Allí este se disuelve, en presencia del agua, y reacciona inicialmente con los hidróxidos de sodio y de potasio de acuerdo a las siguientes ecuaciones:



La solución del hidróxido cálcico depende de la concentración de OH^- en la solución intersticial, y esta va disminuyendo con el progreso de las reacciones citadas anteriormente (5.52 y 5.53) hasta que los cristales de hidróxido cálcico se solubilizan y pasan a la solución siendo, entonces, carbonatados también según la siguiente ecuación:



Cuando la concentración de OH^- es baja, las fases de silicatos y aluminatos hidratados también pueden descomponerse y ser atacados por CO_2 [5.62].

La profundidad de penetración se denomina “frente de carbonatación”. Este frente comporta una serie de reacciones complejas intermedias, pero la reacción principal se produce con el hidróxido cálcico, siendo el carbonato cálcico el producto predominante al final de proceso.

Las reacciones se producen en las superficies libres del hormigón y van progresando en profundidad según una ley que aproximadamente es función de la raíz cuadrada del tiempo y en la que intervienen unos parámetros relacionados con la permeabilidad del hormigón [5.26].

La carbonatación está controlada por la difusión del CO_2 , y esta, a su vez, depende de las condiciones ambientales y de las propiedades del hormigón.

Las condiciones ambientales más importantes son la temperatura, la concentración de dióxido de carbono y la humedad relativa. La carbonatación es directamente proporcional a la temperatura y a la concentración de CO_2 . La humedad relativa afecta a la carbonatación ya que, en condiciones extremas de sequedad, será muy pequeña porque no habrá agua para disolver el CO_2 y, en condiciones de saturación de agua en los poros, la carbonatación será baja porque la difusión del CO_2 será muy pequeña. La carbonatación es máxima para humedades relativas comprendidas entre un 50% y un 70% [5.64].

El efecto de la carbonatación es totalmente desfavorable en relación a la corrosión de las armaduras, mientras que para la impermeabilidad del hormigón el efecto será favorable debido a la sustitución de productos algo solubles por otros poco solubles [5.63]. Otro factor favorable de la carbonatación en el hormigón es la disminución de la porosidad al rellenarse los poros por el depósito de CaCO_3 , incluso produciendo un aumento de la resistencia mecánica. Sin embargo, las consecuencias positivas en relación al hormigón no son relevantes cuando se compara con los efectos negativos generados por la corrosión de armaduras.

5.13.2 Determinación de la profundidad y velocidad de la carbonatación

Para la determinación de la profundidad y velocidad de la carbonatación se han ensayado 3 probetas cúbicas de dimensiones 10x10x10 cm para cada tipo de hormigón endurecido. El ensayo se ha realizado seguido las especificaciones indicadas en la norma UNE 83993-1:2013 [5.65].

Las probetas siguieron el mismo proceso de fabricación y curado que las utilizadas para los diferentes ensayos mecánicos descritos en este capítulo y, posteriormente, se expusieron a un ambiente natural según el Método Alternativo indicada en la norma UNE 83993-1:2013.

El Método alternativo se corresponde con el existente en un recinto expuesto al ambiente natural y protegido de la acción directa de la lluvia. En nuestro caso las probetas se mantuvieron a la intemperie durante 90 y 210 días.

Para realizar el ensayo se requiere un recinto con un tejado con una pequeña inclinación, para evitar la acción directa de la lluvia sobre las probetas y permitir la evacuación del agua, y no tendrá paredes laterales, para permitir libremente el acceso de aire de la atmósfera. Se recomienda que el tejado tenga, al menos, una altura de 1,5 m.

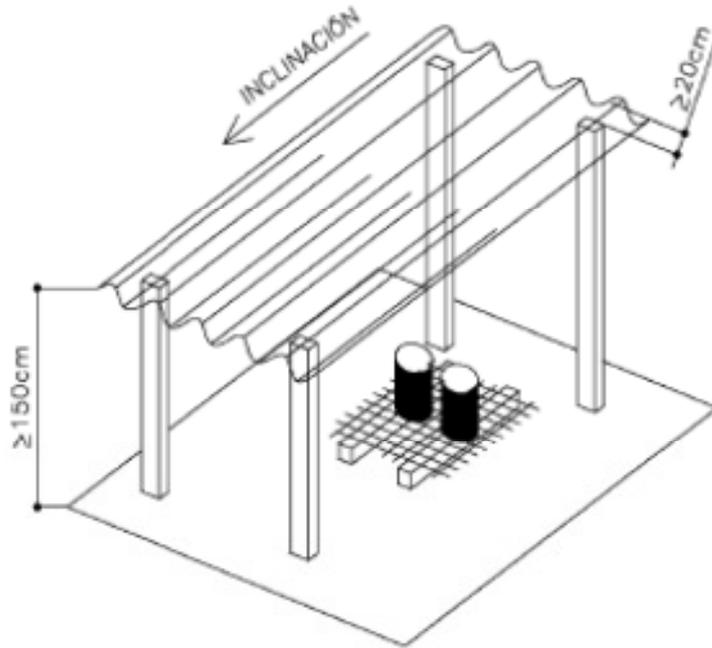


Figura 5.72. Esquema del recinto para el ensayo de carbonatación en el ambiente B
[Fuente: [5.65] UNE 83993-1:2013]

Antes del comienzo del ensayo se deben mantener las probetas al aire en el ambiente de laboratorio durante una semana. A continuación, se colocan las probetas en el recinto de ensayo, de tal forma que, al menos, el 90% de la superficie de apoyo esté expuesta a la acción del aire. Las probetas estarán separadas entre sí al menos 10 cm.

La medida de la profundidad de la capa carbonatada se estudia mediante la norma UNE 112011:2011 [5.66], según se representa en la figura 5.73.

La medida de la profundidad de la capa carbonatada en los hormigones se basa en la determinación de la reducción de la alcalinidad que supone la carbonatación, la cual se pone de manifiesto mediante un indicador de pH, que la hace visible por cambios de coloración.

Como indicador del pH se usó una disolución de fenolftaleína al 1% disuelta en alcohol etílico al 70%. De este modo para obtener 100 cm³ de indicador se disuelve 1 g de fenolftaleína en 70 cm³ de alcohol etílico del 96% de pureza y se adicionan después 30 cm³ de agua destilada.

La fenolftaleína toma color rojo-púrpura para valores de pH superiores a 9.5 (hormigón no carbonatado) y se vuelve incolora para valores inferiores a 8 (hormigón carbonatado). Para valores entre 8 y 9.5 toma tonalidades entre rosa y rojo-púrpura.

Para la aplicación del indicador se utilizó un pulverizador, que permite extender una capa relativamente fina y uniforme sobre la superficie en cuestión. No debe aplicarse en cantidades excesivas o sobre la superficie mojada, puesto que la disolución con el indicador se escurriría de unas zonas a otras y, en caso de que hubiera adquirido coloración, daría resultados erróneos.

La medida de la profundidad de carbonatación se realizó pasados 20 minutos desde la aplicación del producto.

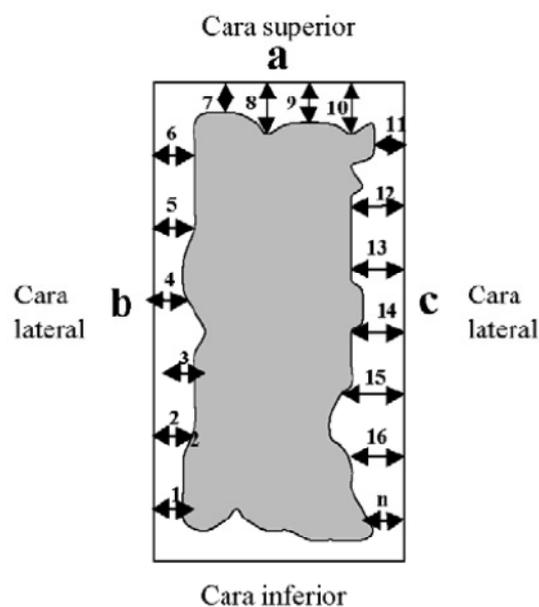


Figura 5.73. Medida de la profundidad de carbonatación
[Fuente: [5.66] Norma UNE 112011:2011]

En las determinaciones de la profundidad de carbonatación debe tenerse en cuenta la forma del frente; si este se presenta de forma homogénea, la profundidad se expresa como d_k ; si el frente se presenta de forma irregular la medida se dará indicando una penetración media d_k , la penetración máxima d_{kmax} y la penetración mínima d_{kmin} . Por otro lado, deberá medirse preferentemente en zonas donde exista árido de pequeño

tamaño, evitando las zonas de árido grueso. Para la obtención de estos resultados se ha utilizado un calibre o pie de rey.

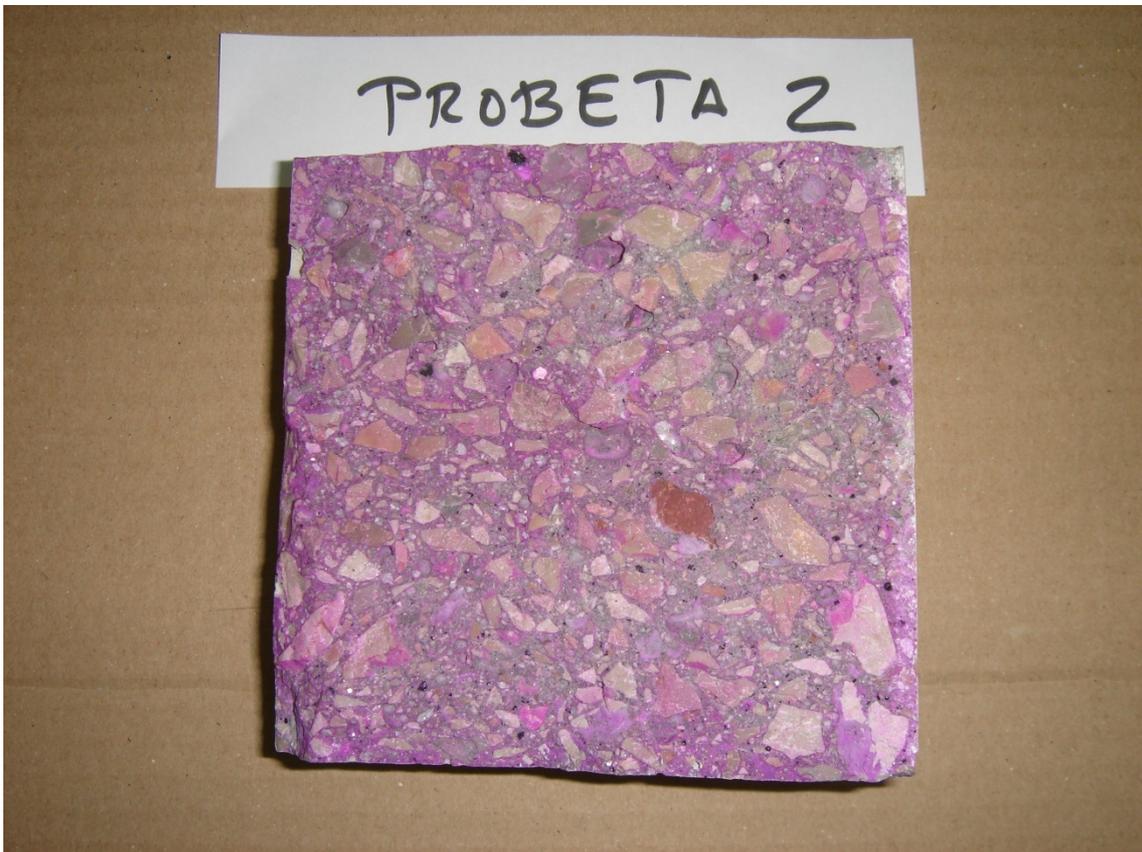


Figura 5.74. Probeta rociada con fenolftaleína para la determinación de la profundidad de carbonatación

Una vez determinada la profundidad de carbonatación es posible calcular la velocidad de avance de la carbonatación en el interior del hormigón mediante la expresión aportada en la norma UNE 83993-1:2013 [5.65]:

$$V_{CO_2} = \frac{X_{CO_2}}{\sqrt{t}} \quad (5.55)$$

donde:

V_{CO_2} velocidad de carbonatación, en mm/año^{1/2}

X_{CO_2} profundidad media de carbonatación, en mm

t tiempo de ensayo, en años

5.13.3 Resultados y discusión

En la tabla 5.24 se indican las profundidades mínima, máxima y media del frente de carbonatación para los diferentes tipos de hormigones estudiados.

Tabla 5.24
Profundidad del frente de carbonatación a 90 y 210 días

Tipología hormigón	90 días			210 días		
	d_{kmax}	d_{kmin}	d_k	d_{kmax}	d_{kmin}	d_k
HSA	3	2	2,5	4	3	3,5
HEC-20	0	0	0	0	0	0
HEC-40	0	0	0	0	0	0
HEC-60	0	0	0	0	0	0
HEC-80	0	0	0	0	0	0
HEC-100	0	0	0	0	0	0

Nota: Las medias están expresadas en milímetros (mm)

Igualmente en la tabla 5.25 y utilizando la expresión 5.55 se indica la velocidad del frente de carbonatación de los diferentes hormigones.

Tabla 5.25
Velocidad de carbonatación a 90 y 210 días

Tipo hormigón	V_{CO_2} a 90 días (mm/año ^{1/2})	V_{CO_2} a 210 días (mm/año ^{1/2})
HSA	5,00	4,58
HEC-20	0,00	0,00
HEC-40	0,00	0,00
HEC-60	0,00	0,00
HEC-80	0,00	0,00
HEC-100	0,00	0,00

Como se observa en la tabla 5.24 no se aprecian fenómenos de carbonatación a 90 y 210 días, exceptuando el hormigón de referencia donde existe un pequeño frente de carbonatación con profundidades medias de 2,5 mm y 3,5 mm respectivamente. Este resultado no es

de extrañar dado que el tiempo de exposición al medio natural ha sido relativamente pequeño para que se produzcan fenómenos de carbonatación relevantes. No obstante existe una tendencia en los hormigones con escoria de cobre a un mejor comportamiento frente a los fenómenos de carbonatación.

Según la figura 5.74, el color que adquiere la superficie de rotura con el indicador no es rojo-púrpura sino rosado, correspondiendo a un pH entre 8 y 9,5 siendo este el color óptimo, tal y como indica la norma UNE 112011-94.

5.13.4 Modelización

No se ha realizado modelización del ensayo debido a la escasez de datos obtenidos.

5.13.5 Conclusiones

A continuación se describen las conclusiones más relevantes que se derivan del ensayo de carbonatación:

- Para los tiempos de exposición al medio natural estudiados, no se aprecian fenómenos de carbonatación para los hormigones con escoria de cobre.
- Para el hormigón de referencia se aprecian signos de carbonatación, si bien estos son mínimos.

5.14 Bibliografía del capítulo

- [5.1] Pellicer Llopis V. (2014): *Ensayos no destructivos en hormigón. Georadar y ultrasonidos*. Universidad Politécnica de Valencia.
- [5.2] Código Técnico de la Edificación (2009): *Documento básico SE-AE. Seguridad Estructural. Acciones en la edificación. Anejo C: Prontuario de pesos y coeficientes de rozamiento interno*.
- [5.3] Valcárcel Pérez J. (2008): *Instrucción para el hormigón estructural*. Programa de formación permanente. Departamento de Tecnología de la Construcción. E.T.S. Arquitectura de La Coruña.
- [5.4] Herrera Toledo, Y. (2008): *Hormigón de muy alta resistencia*. Tesis de Master Ingeniería Estructural y de la Construcción. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [5.5] Schmitt H., Heene A. (2009): *Tratado de construcción*. 8ª edición, Ed. Gustavo Gili.
- [5.6] Olivares M., Laffarga J., Galán C., Nadal P. (2003): *Evaluación de la resistencia mecánica de un hormigón según su porosidad*. Materiales de Construcción, 54, pp. 21-26
- [5.7] Howland Albear J.J., Martín Acosta, A.R. (2012): *Investigación de la absorción capilar de hormigones con áridos calizos cubanos*. Revista Cubana de Ingeniería, **3**, pp. 17-24.
- [5.8] Hummel A. (1966): *Prontuario del hormigón*. 2ª edición, Ed. Técnicos Asociados S.A, Barcelona.
- [5.9] Powers T.C (1960): *Physical properties of cement paste*. Proceedings of the Chemical Cement, **2**, pp. 577-613

- [5.10] Haynes, H. H. (1980): *Permeability of concrete in sea water. Performance of concrete in marine environment*. ACI publication, **65**, pp. 21-38.
- [5.11] Neville, A. (2012): *Properties of concrete*. 5ª edición, Prentice Hall.
- [5.12] Larbi, L.A. (1993): *Microstructure of the interfacial zone around aggregate particles in concrete*. Heron, **38**, pp.1-69.
- [5.13] Gómez Cano J.C. (2008): *Identificación y cuantificación de algunos factores en la permeabilidad de hormigones y morteros*. Universidad Nacional de Colombia.
- [5.14] Sánchez de Guzmán D. (2004): *Nuevas tendencias en las especificaciones de mezclas de concreto*. Memorias Técnicas: X reunión del concreto. Cartagena, Colombia.
- [5.15] Torres Agredo J.: *Durabilidad de hormigones y morteros*. Tesis de pregrado. Universidad del Valle. Cali, Colombia.
- [5.16] UNE-EN 12390-7:2009: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009.
- [5.17] Zega C.J., Taus V.L., Di Maio A.A. (2006): *Comportamiento físico químico de hormigones reciclados elaborados con canto rodado*. Boletín técnico IMME, Venezuela, **44**, pp. 17-26
- [5.18] Bizzotto M.B., Astori R.E., Sanguinetti B.M. (2006): *Determinación de la absorción capilar en hormigones de alto desempeño elaborados con materiales de la región NEA*. Universidad Nacional del Nordeste. Argentina
- [5.19] Sánchez Rodríguez A. (2011): *Análisis de la aplicabilidad de los áridos reciclados mixtos en hormigones*. Tesis de especialidad. Universidad Politécnica de Cataluña.

- [5.20] IRAM 1871:2004: *Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), 2004.
- [5.21] ASTM D 6527-00: *Standard test method for determining unsaturated and saturated hydraulic conductivity in porous by steady-state centrifugation*. American Society for Testing and Materials (ASTM), 2000.
- [5.22] UNE-EN 12390-8:2009: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009.
- [5.23] Valenta O. (1969): *Kinetics of water permeability into concrete as an important factor of its deterioration and of reinforcement corrosion*. RILEM, International Symposium on the Durability of Concrete. Parte I, Praga.
- [5.24] EHE-08: *Instrucción de Hormigón Estructural*. Serie Normativas, Ministerio de Fomento. 2ª edición, Ed. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento, febrero 2009.
- [5.25] Hearn N., Detwiler R., Sframeli C. (1994): *Water permeability and microstructure of three old concretes*. Cement and Concrete Research, **24**, pp. 633-640.
- [5.26] Fernández Cánovas M. (2007): *Hormigón*. 10ª edición, Ed. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- [5.27] Ramirez J.L., Barcena J.M., Urreta J.I. (1985): *Arenas calizas para la confección de hormigones: influencia de sus finos calizos y arcillosos a nivel de morteros*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Materiales de Construcción, **35**, pp. 23-39

- [5.28] Rebolledo Ramos N. (2010): *Aplicación de técnicas no destructivas al estudio del hormigón fresco*. Trabajo fin de master. Universidad Politécnica de Madrid.
- [5.29] Carino N.J (1983): *“Temperature effects on strength maturity relations of mortar”*. ACI Materials Journal, **80**, pp. 177-182.
- [5.30] UNE-EN 12390-3:2009/AC:2011: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión en probetas*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2011.
- [5.31] UNE-EN 12390-4:2001: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Características de las máquinas de ensayo*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2001.
- [5.32] Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación (ENV 1992-1-1:1991). Comité Europeo de Normalización (CEN).
- [5.33] Código Modelo CEB-FIP 1990 para hormigón estructural. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. GEHO-CEB y ATEP, Madrid.
- [5.34] Sedran T., Larrard F. de (1999): *Optimization of self compacting concrete thanks to packing model*. Self-Compacting Concrete-Proceedings of the First Internacional RILEM Symposium, Sweeden, pp. 321-332.
- [5.35] UNE-EN 12390-6:2010: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2010.
- [5.36] UNE-EN 12390-5:2009: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a flexión de probetas*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009.

- [5.37] Mehta, P.K., Montero P.J.M. (1994): *Concreto: estructura, propiedades y materiales*. 1ª edición. Ed. Pino. Sao Paulo, Brasil.
- [5.38] Ortiz Berrocal, L. (1990): *Curso de elasticidad y resistencia de materiales*. Universidad Politécnica de Madrid.
- [5.39] Takizaki, M. (1988): *Strength and elastic modulus of recycles aggregate concrete*. The second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. Tokio, Japan, pp. 557-564.
- [5.40] UNE-83316:1996: *Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 1996.
- [5.41] Scripture E.W., Benedict S.W., Bryant D.E. (1953): *Floor aggregates*. American Concrete Institute (ACI). ACI Proceedings, **50**, pp.305-316.
- [5.42] Witte L.P., Backstrom J.E. (1951): *Some properties affecting the abrasion resistance of air-entrained concrete*. ASTM Proceedings, **51**, pp. 1141-1155.
- [5.43] ACI 201.2R-01: *Guía durabilidad hormigón*. American Concrete Institute (ACI), 2001.
- [5.44] Payne J.C., Dransfield J.M. (1985): *The influence of admixtures and curing on permeability*. Conference on permeability of concrete and its control. *Concrete Society*, London, pp. 89-105.
- [5.45] ACI 302.1R-04: *Guide for concrete floor and slab construction*. American Concrete Institute (ACI), 2004.
- [5.46] ASTM C 779:2012: *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces*. American Society for Testing and Materials (ASTM), 2012.

- [5.47] Prior M. E. (1966): *Abrasion Resistance: Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*. ASTM STP-169A, ASTM, Philadelphia, pp. 246-260
- [5.48] UNE-EN 12808-2:2009: *Materiales de rejuntado para baldosas cerámicas. Parte 2: Determinación de la resistencia a la abrasión*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009.
- [5.49] Norma FEPA-42-F-84. Federación Europea de Fabricantes de Productos Abrasivos, 1984.
- [5.50] UNE-EN 12697-17:2006+A1:2007: *Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas en caliente. Parte 17: Pérdidas de partículas de una probeta de mezcla bituminosa drenante*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2007.
- [5.51] Rojas Henao L.M. (2012): *Ensayos de información y extracción de probetas testigo en hormigones autocompactantes*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- [5.52] ACI 228.R-03: *In-Place Methods to estimate concrete strength*. American Concrete Institute (ACI), 2003.
- [5.53] Hostalet F.A. (1989): *La estimación in situ de la resistencia del hormigón endurecido*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. pp. 662.
- [5.54] Bungey J.H., Millard, S.G., Grantham M.G. (2006): *Testing of concrete in structures*. 4th edition, Taylor@Francis Group. London and New York.
- [5.55] UNE-EN 12504-2:2013: *Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 2: Ensayos no destructivos. Determinación del índice de rebote*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2013.

- [5.56] Malhotra V.M., Carino N.J. (1991): *Handbook no nondestructive testing of concrete*. CRC Press, Boca Ratón, U.S.A.
- [5.57] Manual de equipo de ultrasonidos C.U.P. H-2000. Sistemas de Ensayo S.L, Fuenlabrada, Madrid.
- [5.58] UNE-EN 12504-4:2006: *Ensayos de hormigón de estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2006.
- [5.59] Popovics S. (2001): *Analysis of the concrete strength versus ultrasonic pulse velocity relationship*. Material Evaluation. USA, **59**, pp. 123-124.
- [5.60] Fernández J. et al. (2001): *Evaluación de la capacidad resistente de estructuras de hormigón*. INTEMAC: Instituto Técnico de Materiales de Construcción. Madrid.
- [5.61] Trtnik G., Kavcic F., Turk G. (2009): *Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks*. Ultrasonics, **49**, pp.53-60.
- [5.62] Calavera Ruíz J. (2002): *Cálculo, construcción, patología y rehabilitación de forjados de edificación: unidireccional y sin vigas – hormigón, metálicos y mixtos*. 5ª edición, Instituto Técnico de Materiales y Construcción, INTEMAC.
- [5.63] Tutti K. (1982): *Corrosion of steel in concrete*. Swedish Cement and Concrete Research Institute, pp. 4-82.
- [5.64] Silva, T.J. (1998): *Predicción de la vida útil de forjados unidireccionales de hormigón mediante modelos matemáticos de deterioro*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.

- [5.65] UNE 83993-1:2013: *Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la velocidad de penetración de la carbonatación en el hormigón endurecido. Parte 1: Método natural.* Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2013.
- [5.66] UNE 112011:2011: *Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio.* Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2011.

CAPÍTULO 6

CORRELACIÓN ENTRE PARÁMETROS REOLÓGICOS Y MECÁNICOS

6.1 Introducción

A lo largo del desarrollo de los capítulos 4 y 5 de este trabajo se han obtenido los resultados correspondientes a los parámetros reológicos del hormigón en estado fresco a través de su mortero equivalente, así como parámetros relativos al hormigón en estado endurecido de acuerdo con los ensayos efectuados.

Con objeto de completar la investigación realizada se plantea establecer una correlación entre las medidas en estado fresco y las medidas en estado endurecido, debido a la gran utilidad práctica que conlleva. La utilidad radica básicamente en la facilidad de realizar los ensayos reométricos, así como la pequeña cantidad de material requerido en comparación con la utilizada en realizar amasadas y obtener las diferentes probetas necesarias para los ensayos correspondientes al estado endurecido.

Como variables del estado fresco se utilizarán el límite de fluencia y la viscosidad plástica, y se tratará de buscar las correlaciones con las siguientes mediciones del estado endurecido:

- Densidad
- Porosidad
- Resistencia a compresión a 28, 90 y 150 días
- Tracción a 28, 90 y 150 días
- Flexotracción
- Módulo de elasticidad
- Índice de rebote
- Abrasión

En todo momento se intenta deducir relaciones sencillas analizando previamente si existe una relación lineal y a la vista de la bondad del coeficiente de correlación, se irán buscando relaciones de un mayor grado.

Por otro lado, hay que hacer la observación, que las relaciones halladas son válidas para los hormigones de esta tesis doctoral, y se fundamentan únicamente en formulaciones empíricas.

6.2 Correlaciones entre el límite de fluencia y parámetros del estado endurecido

Previamente al estudio de las correlaciones entre el límite de fluencia y las distintas mediciones obtenidas de los ensayos del estado endurecido, debemos recordar que el límite de fluencia se define como el esfuerzo mínimo que es necesario aplicar a un material para que empiece a fluir [6.1, 6.2].

Las premisas consideradas para establecer las correlaciones entre variables y discutir los resultados obtenidos son las siguientes:

1. La densidad de la escoria de cobre es mayor que la densidad del árido fino.
2. Las partículas de escoria de cobre tienen una textura rugosa frente a la textura lisa del árido fino.
3. La rugosidad de las partículas hace que aumente la adherencia árido-pasta y disminuye la formación de microfisuras, lo que proporciona mayores resistencias [6.3].
4. Un sistema donde exista una mayor concentración de partículas rugosas que lisas será más difícil el movimiento relativo de las partículas, es decir, será más difícil deshacer la estructura y, en consecuencia, mayor será el límite de fluencia.

Todas las mediciones obtenidas de los ensayos correspondientes al estado fresco y endurecido se indicaron a lo largo de los diferentes apartados de los capítulo 4 y 5 respectivamente.

6.2.1 Límite de fluencia-densidad

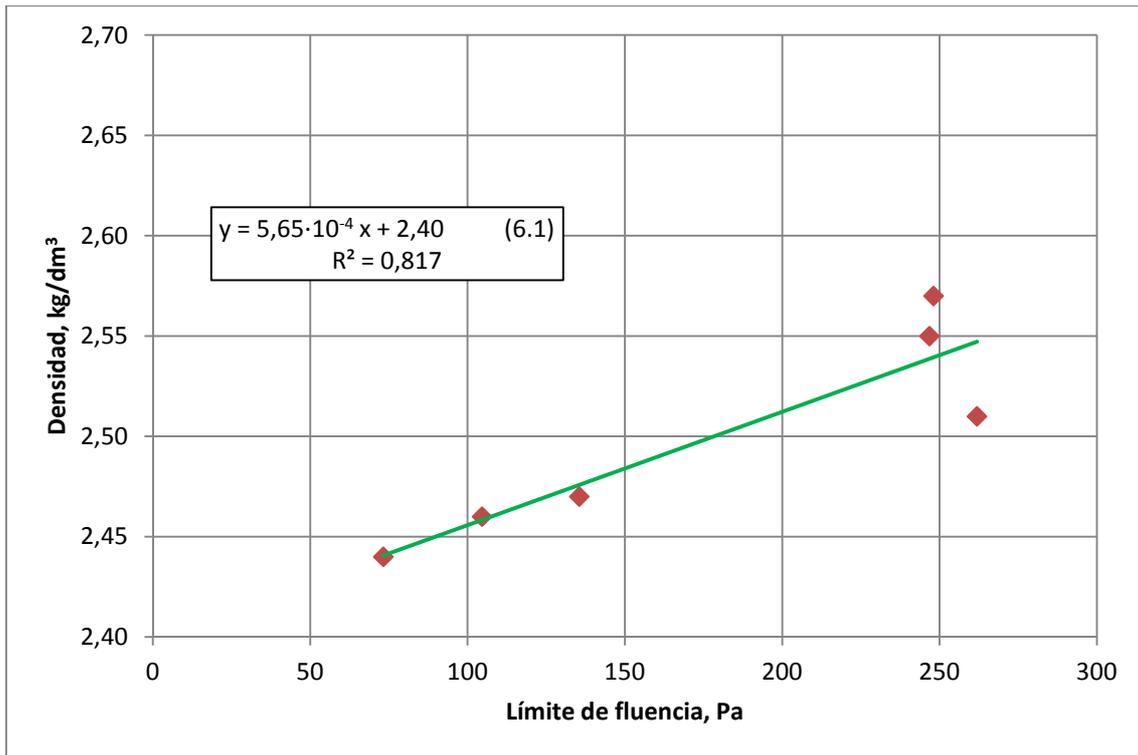


Figura 6.1. Correlación límite de fluencia-densidad

La figura 6.1 sugiere que un aumento del límite de fluencia conlleva un incremento de la densidad del hormigón en estado endurecido. La mayor concentración de escorias de cobre en el hormigón y por consecuencia en el mortero equivalente, hace que por un lado aumente la densidad del hormigón al ser la escoria de cobre más densa que el árido fino y por otro la textura rugosa de las partículas de escoria hace el movimiento relativo de las partículas del sistema sea más difícil, por lo que se incrementará el límite de fluencia al existir una estructura más fuerte.

6.2.2 Límite de fluencia-porosidad

Según se representa en la figura 6.2, un aumento del límite de fluencia conlleva una disminución de la porosidad.

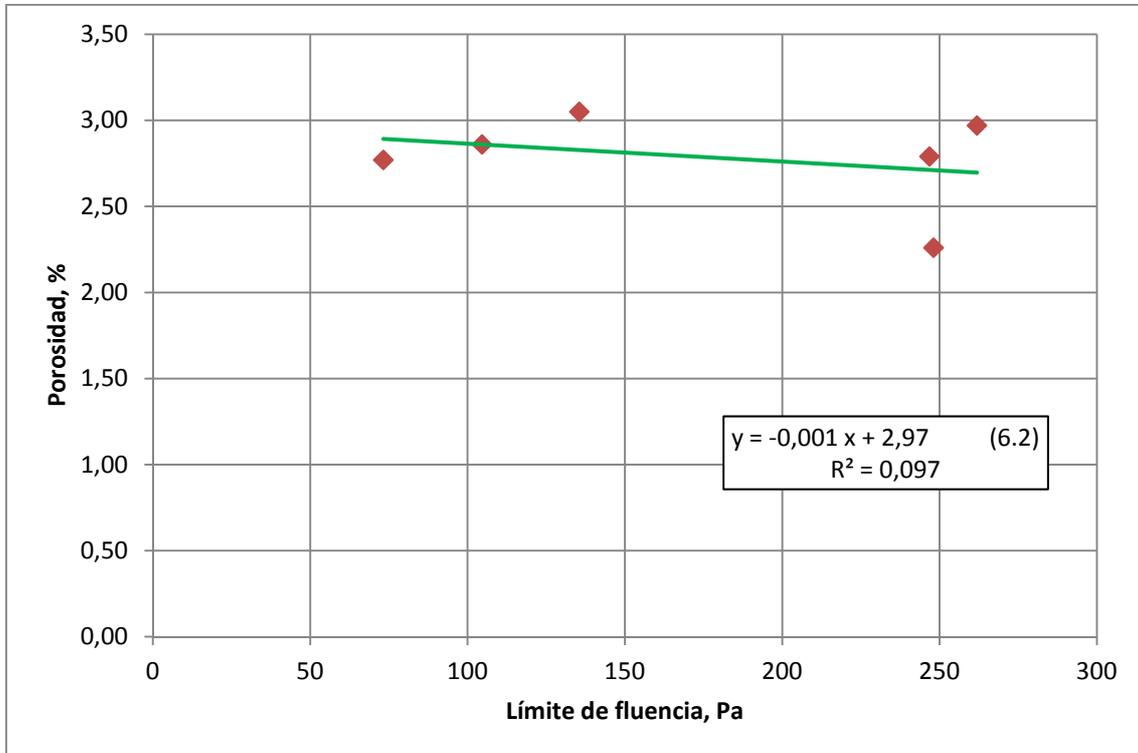


Figura 6.2. Correlación límite de fluencia-porosidad

6.2.3 Límite de fluencia-resistencia a compresión

Para el estudio de la correlación existente entre el límite de fluencia y la resistencia a compresión del hormigón en estado endurecido se diferencia entre la resistencia a 28, 90 y 150 días, dado que la edad del hormigón será determinante a la hora de buscar algún tipo de relación entre las variables de cada estado.

A la vista de figura 6.3 la resistencia a compresión a 28 días no se ve afectada por el límite de fluencia. La pequeña pendiente de la recta de correlación estaría justificada por la incertidumbre experimental.

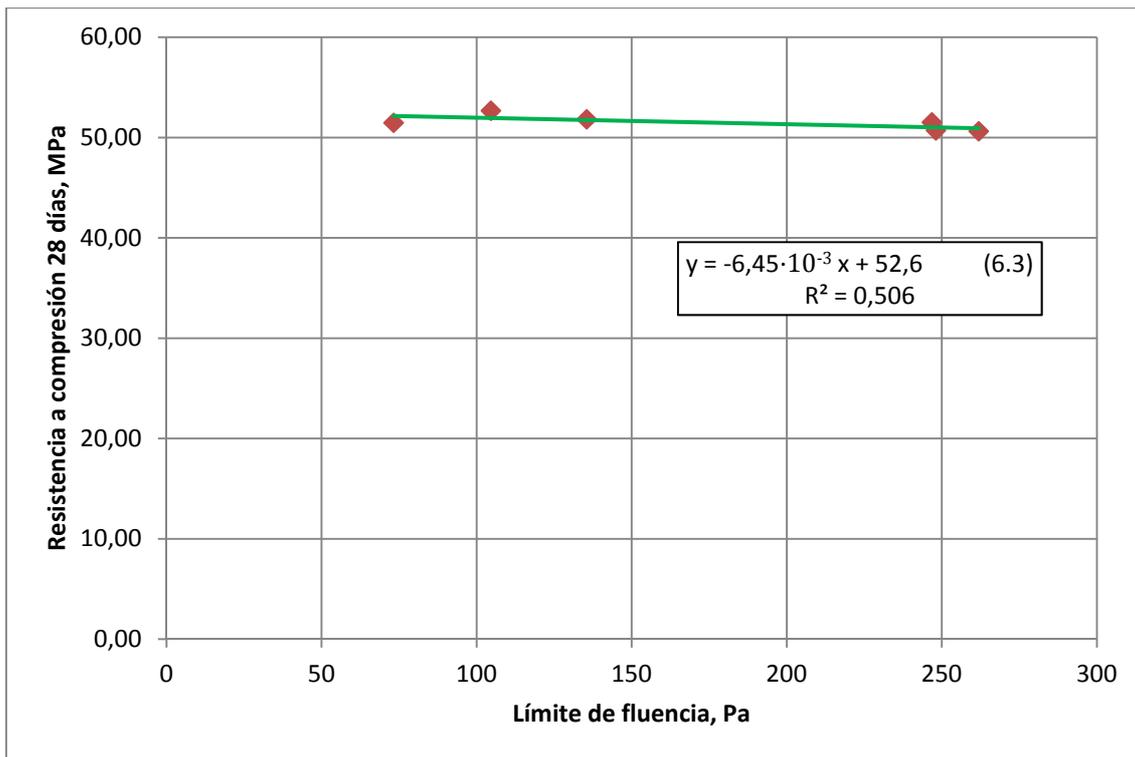


Figura 6.3. Correlación límite de fluencia-resistencia a compresión a 28 días

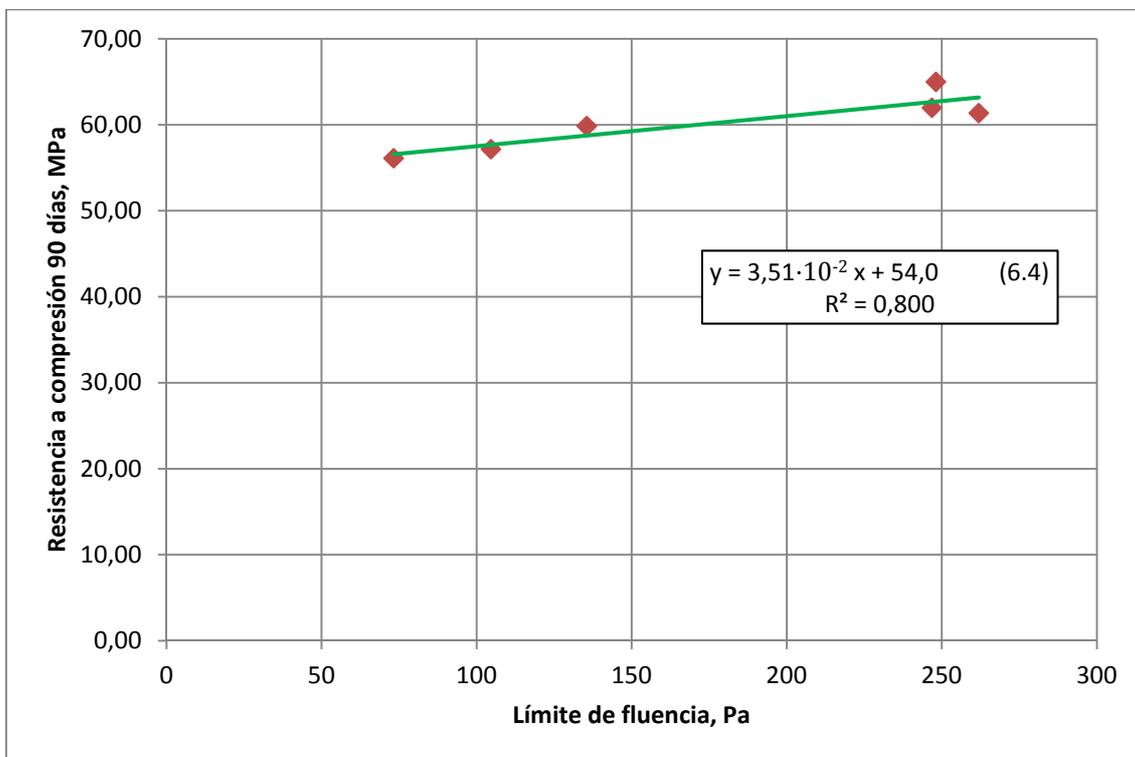


Figura 6.4. Correlación-límite de fluencia- resistencia a compresión a 90 días

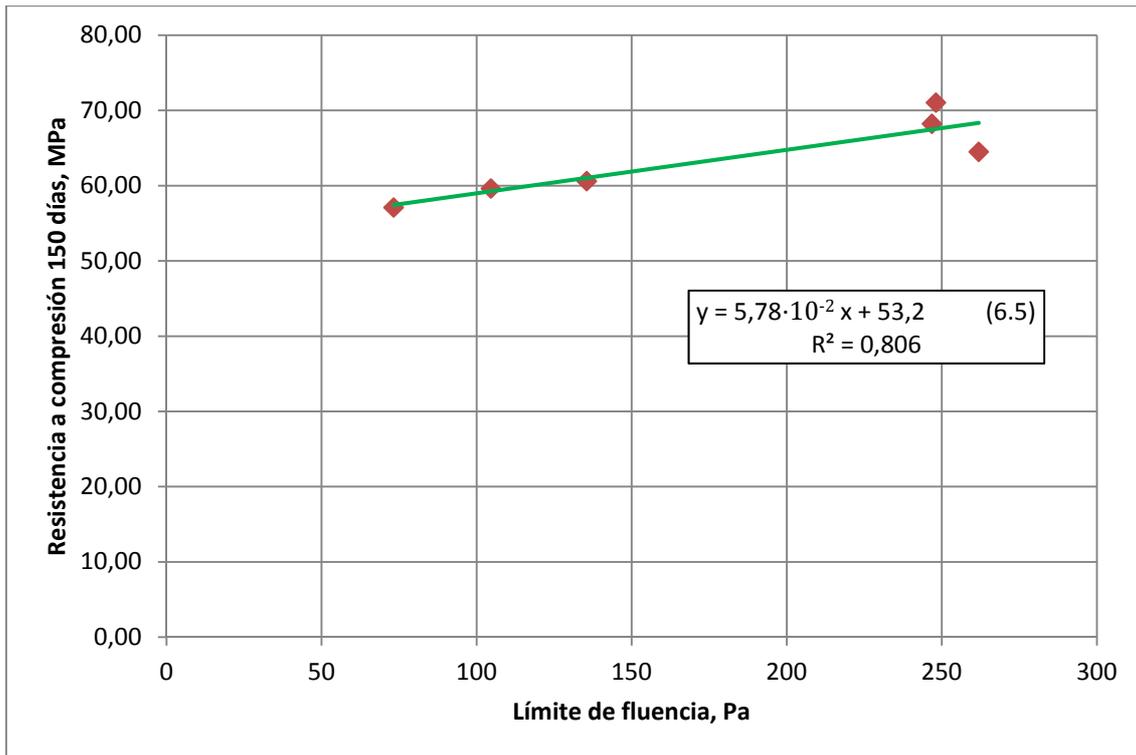


Figura 6.5. Correlación límite de fluencia-resistencia a compresión a 150 días

A las edades de 90 y 150 días las resistencias aumentan a medida que lo hace el límite de fluencia (figuras 6.4 y 6.5). Esta tendencia parece razonable dado que a esas edades la actividad puzolánica de la escoria de cobre ha comenzado y la estructura del sistema es más fuerte que a edades más tempranas, lo que hará que el límite de fluencia también se incremente.

6.2.4 Límite de fluencia-tracción pura

En la figura 6.6 se indica que la resistencia a tracción a 28 días no se ve afectada por el límite de fluencia. Sin embargo a la edad de 90 días (figura 6.7) la resistencia a tracción aumenta a medida que lo hace el límite de fluencia. Este comportamiento sugiere que la estructura del sistema es menor a 28 días que 90 días, dado que a 90 días la actividad puzolánica de la escoria colabora en generar una estructura más fuerte (mayor límite de fluencia), lo que se traduce en mayor resistencia.

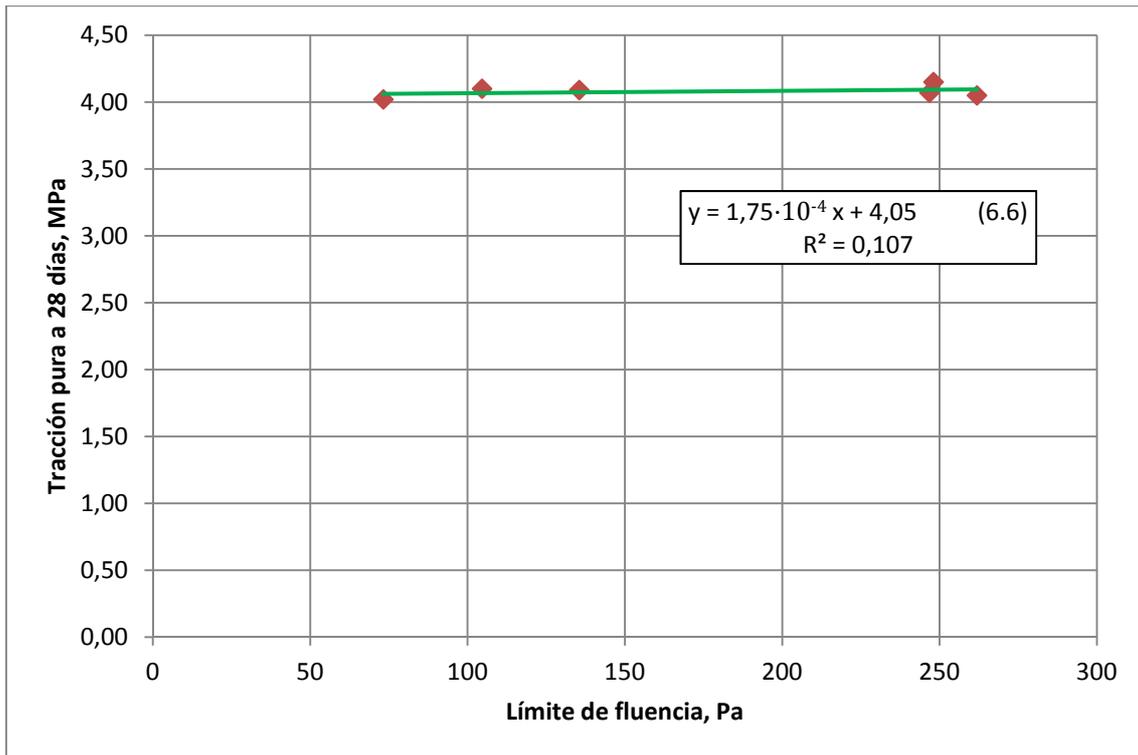


Figura 6.6. Correlación límite de fluencia-tracción pura a 28 días

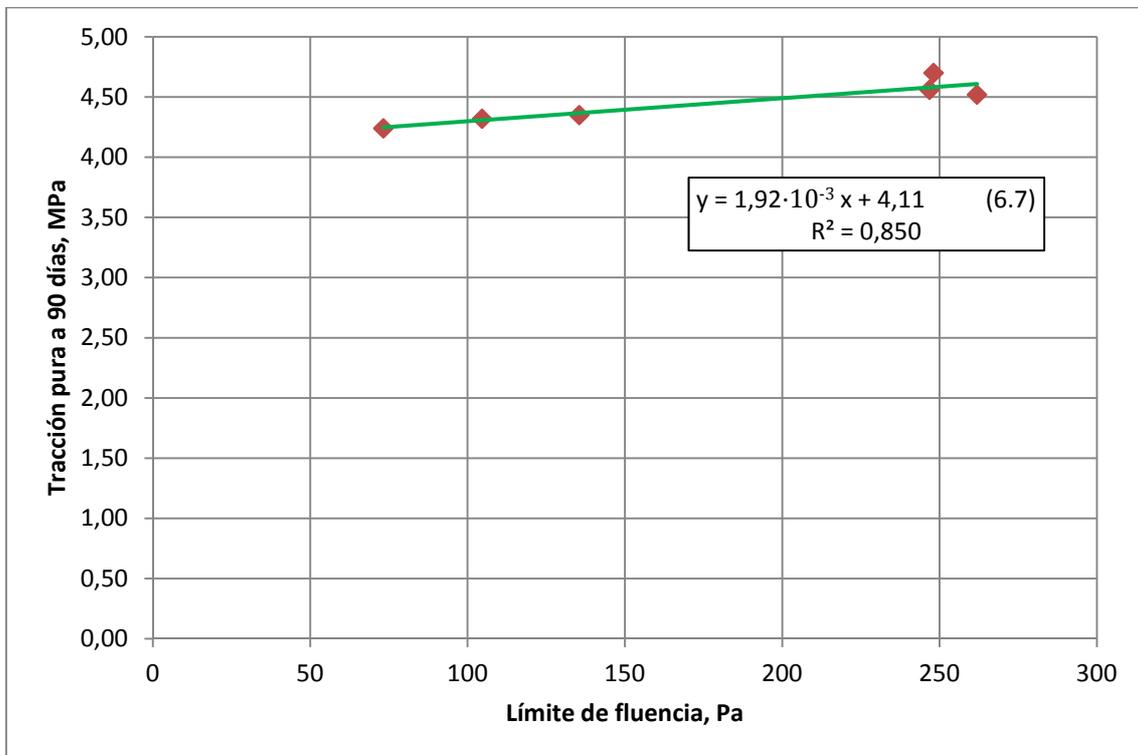


Figura 6.7. Correlación límite de fluencia-tracción pura a 90 días

6.2.5 Límite de fluencia-flexotracción

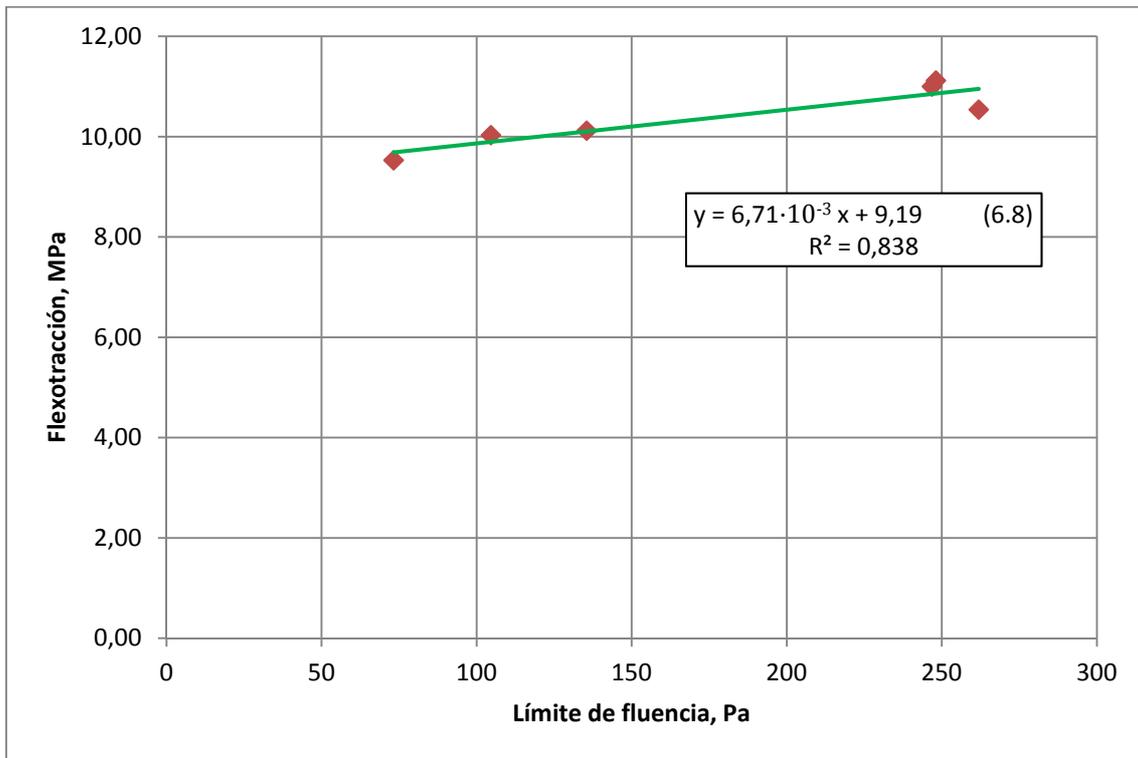


Figura 6.8. Correlación límite de fluencia-flexotracción

Según se representa en la figura 6.8, la resistencia a flexotracción se incrementa de forma proporcional al límite de fluencia. El aumento de la resistencia a la flexotracción se debe, entre otros motivos, a la textura de los áridos. Un hormigón cuyos áridos tengan una textura rugosa se comporta mejor frente a los esfuerzos de flexotracción en comparación con un hormigón fabricados con áridos de textura lisa [6.3]. Este comportamiento se debe a la mayor adherencia entre la pasta de cemento y el árido.

En nuestro caso a mayor concentración de escorias de cobre mayor adherencia con la pasta de cemento y en consecuencia mayor resistencia a la flexotracción y, a su vez, mayor límite de fluencia al existir una mayor estructura en el sistema formado.

6.2.6 Límite de fluencia-módulo de elasticidad

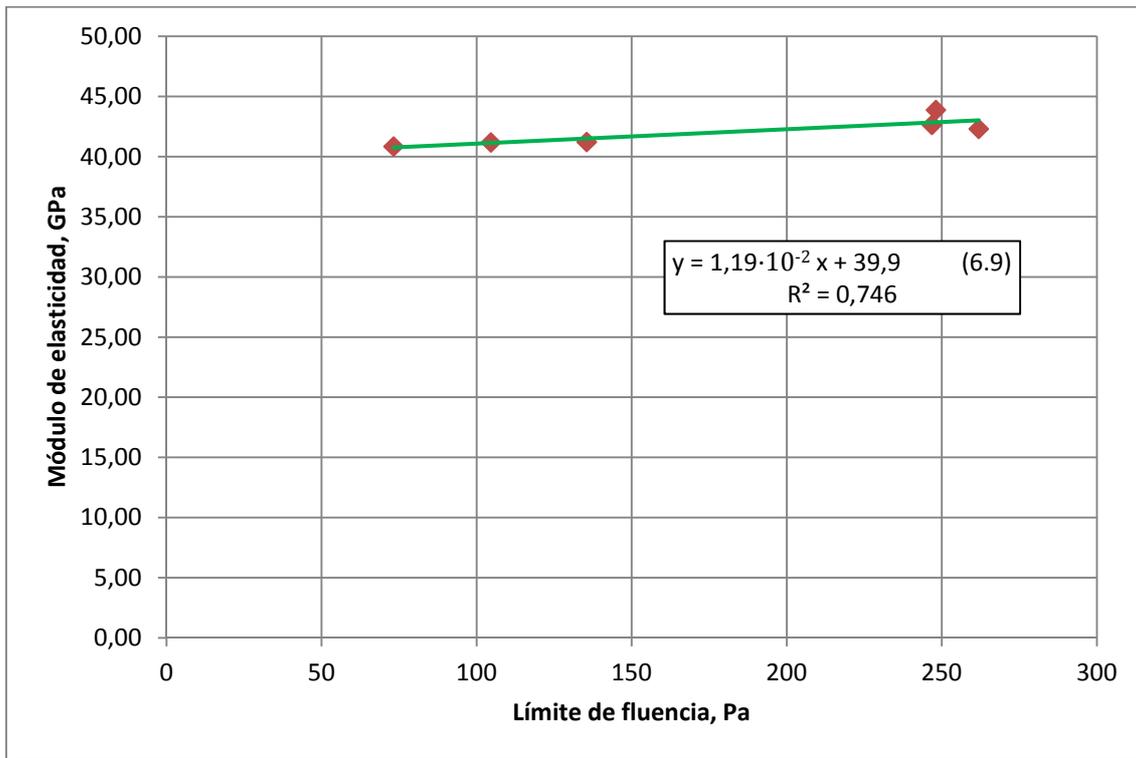


Figura 6.9. Correlación límite de fluencia-módulo de elasticidad a 28 días

Como se aprecia en la figura 6.9 el módulo de elasticidad a 28 días se incrementa ligeramente a medida que aumenta el límite de fluencia, lo que parece razonable debido a que a mayor límite de fluencia más fuerte será la estructura del sistema, y mayor la adherencia entre la pasta de cemento y la escoria.

6.2.7 Límite de fluencia-índice de rebote

La figura 6.10 muestra una tendencia claramente definida entre el límite de fluencia y el índice de rebote. Si el límite de fluencia aumenta como consecuencia de una mayor concentración de escorias, parece razonable que el índice de rebote también se incremente, debido a que la escoria de cobre aumenta la resistencia superficial y la rigidez del hormigón gracias a su mayor densidad y resistencia a la friabilidad.

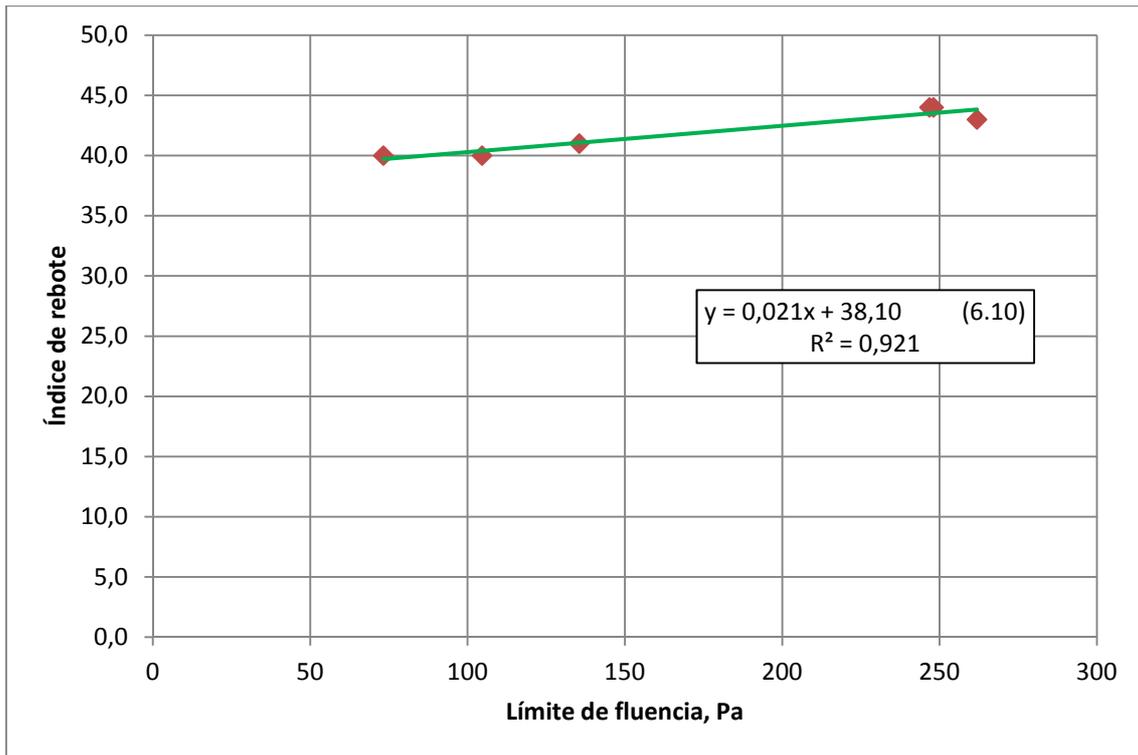


Figura 6.10. Correlación límite de fluencia-índice de rebote

6.2.8 Límite de fluencia-abrasión superficial

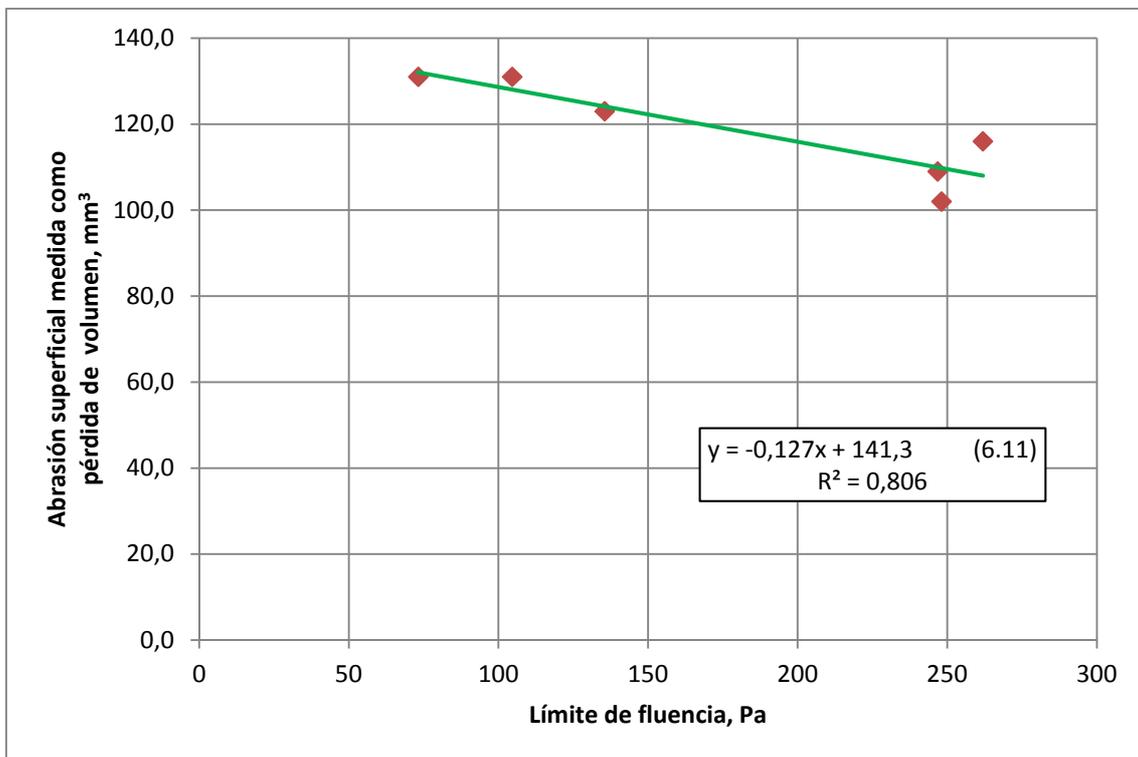


Figura 6.11. Correlación límite de fluencia-abrasión superficial

El comportamiento observado en la figura 6.11 pone de manifiesto que la abrasión superficial disminuye con el incremento del límite de fluencia, debido a que un aumento de este último conlleva una mayor concentración de escorias de cobre, cuyo coeficiente de friabilidad es mayor que el del árido fino y por lo tanto presenta mayores resistencias al desgaste.

6.3 Correlaciones entre la viscosidad plástica y parámetros del estado endurecido

La viscosidad plástica está relacionada con la resistencia a la segregación del material, de forma que si este valor es pequeño existirá una tendencia a la separación de los componentes una vez realizado el amasado, provocando que la mezcla en estado fresco presente una distribución no uniforme de sus partículas [6.4]. La segregación se produce de dos formas [6.5]:

1. Las partículas gruesas tienden a separarse de las otras por acción de la gravedad, esto ocurre generalmente con mezclas secas y poco plásticas.
2. La separación de la pasta formada por cemento/agua, lo que ocurre con mezclas muy fluidas.

6.3.1 Viscosidad plástica-densidad

Según la representación realizada en la figura 6.12 la densidad prácticamente es constante a medida que se incrementa la viscosidad. Las pequeñas variaciones observadas se justifican por la incertidumbre experimental.

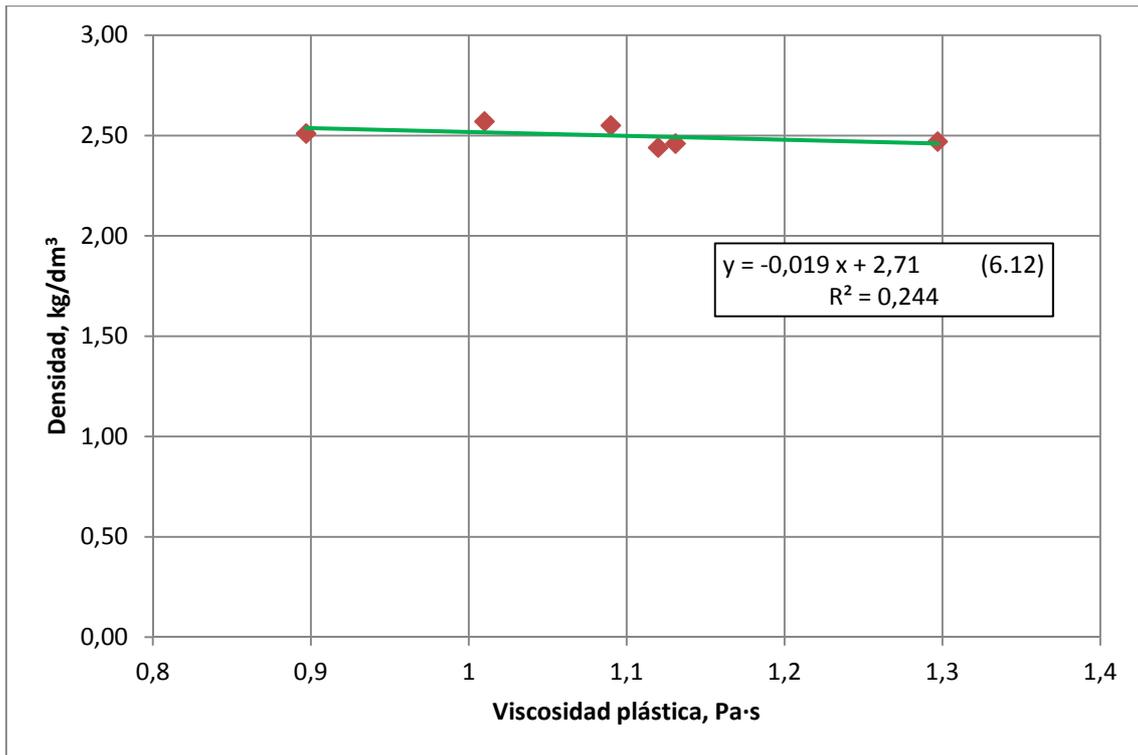


Figura 6.12. Correlación viscosidad plástica-densidad

6.3.2 Viscosidad plástica-porosidad

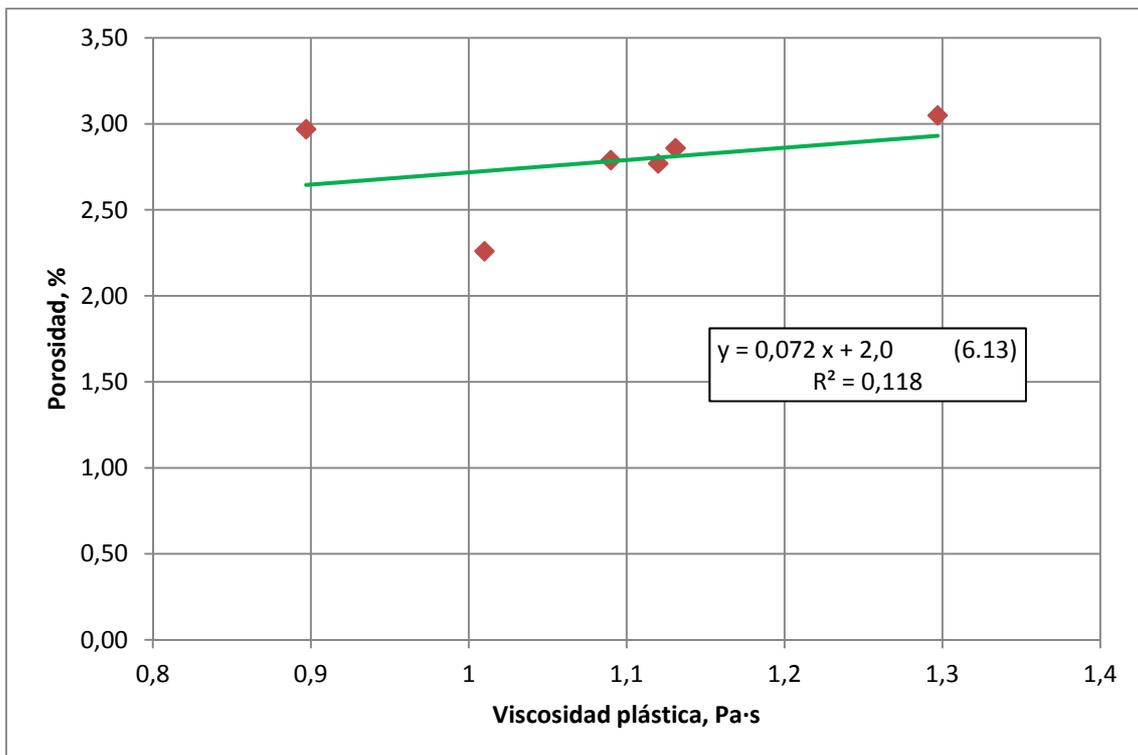


Figura 6.13. Correlación viscosidad plástica-porosidad

Según se representa en la figura 6.13 la porosidad aumenta con la viscosidad plástica.

6.3.3 Viscosidad plástica-resistencia a compresión

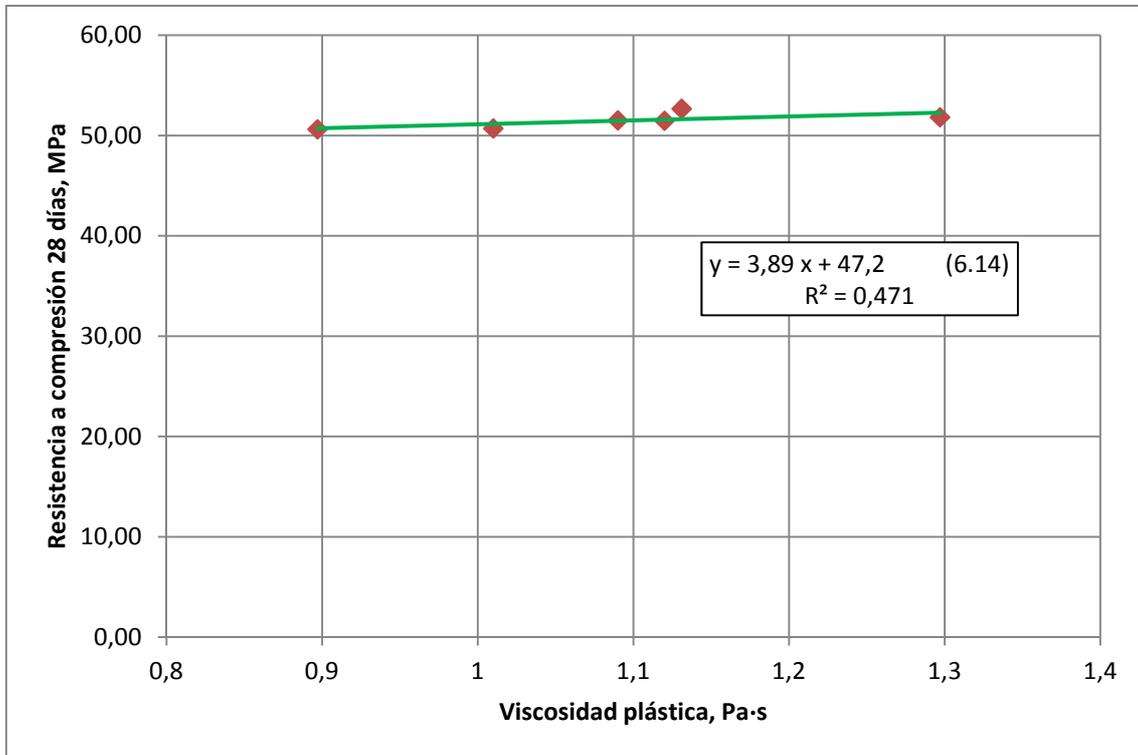


Figura 6.14. Correlación viscosidad plástica-resistencia a 28 días

En relación a la figura 6.13 se observa que las variaciones de la resistencia a compresión a 28 días son mínimas con los incrementos producidos en la viscosidad plástica.

En las figuras 6.14 y 6.15 se representan las correlaciones existentes entre la viscosidad plástica y la resistencia a compresión a las edades de 90 y 150 días. En ambas figuras la resistencia a compresión a dichas edades disminuye a medida que aumenta la viscosidad plástica del sistema.

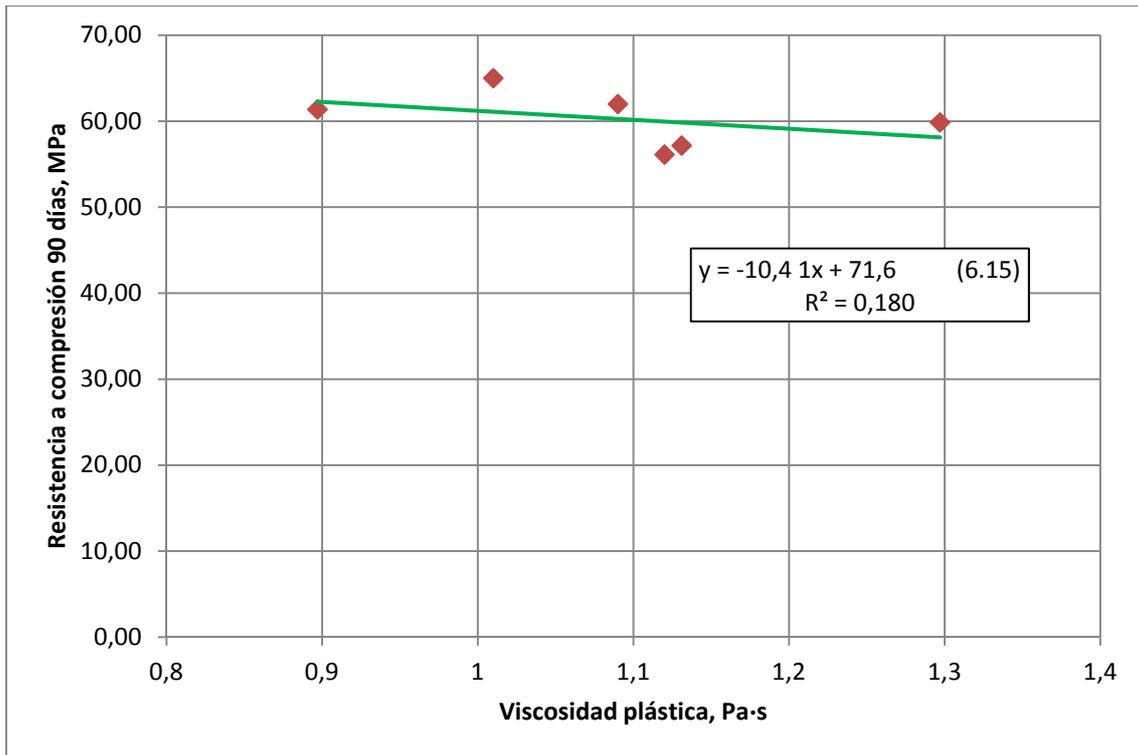


Figura 6.15. Correlación viscosidad plástica-resistencia a 90 días

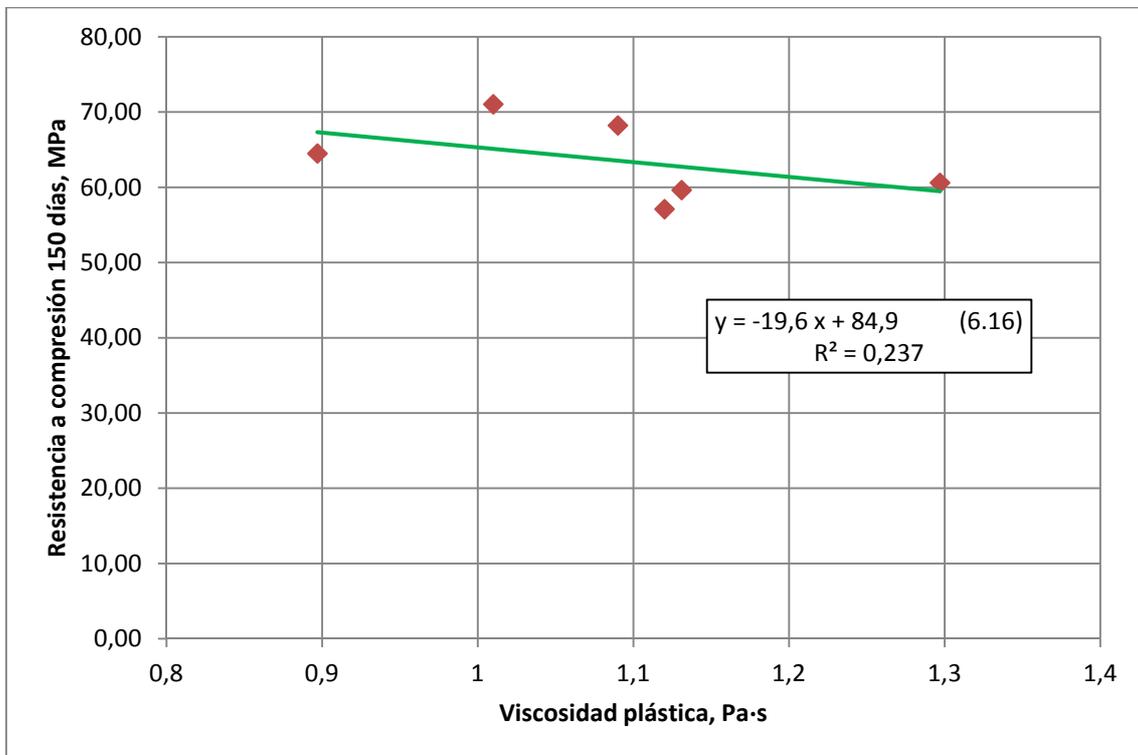


Figura 6.16. Correlación viscosidad plástica-resistencia a 150 días

6.3.4 Viscosidad plástica-tracción pura

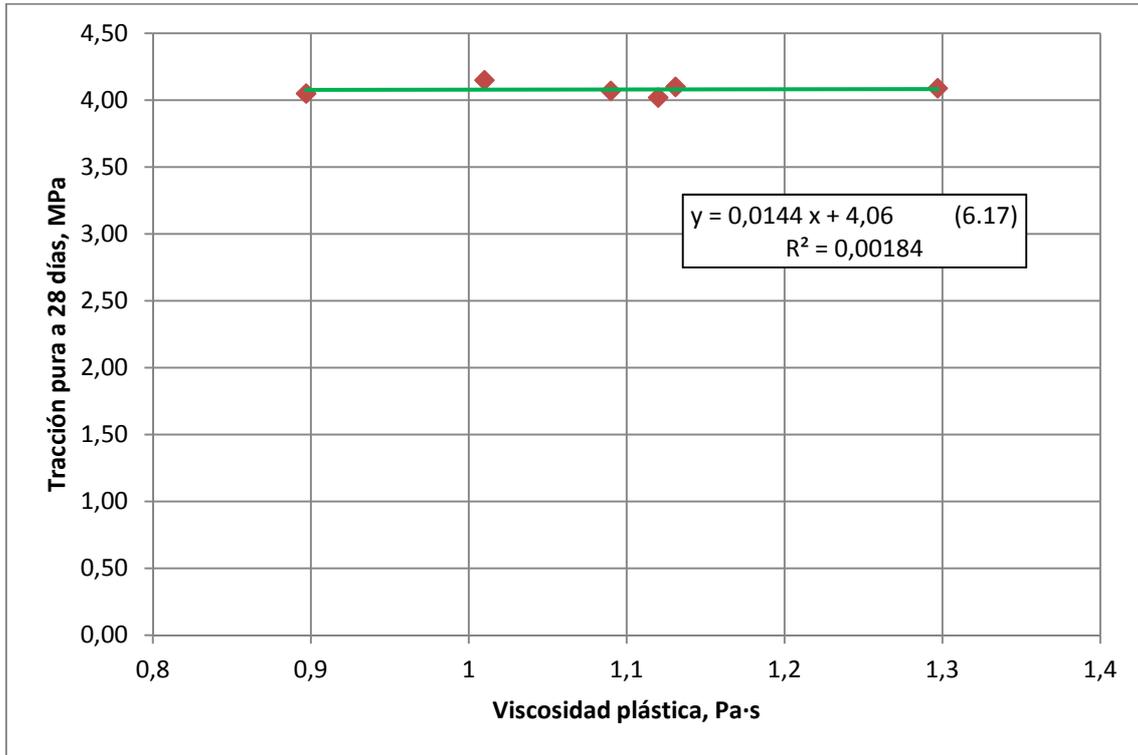


Figura 6.17. Correlación viscosidad plástica-tracción pura a 28 días

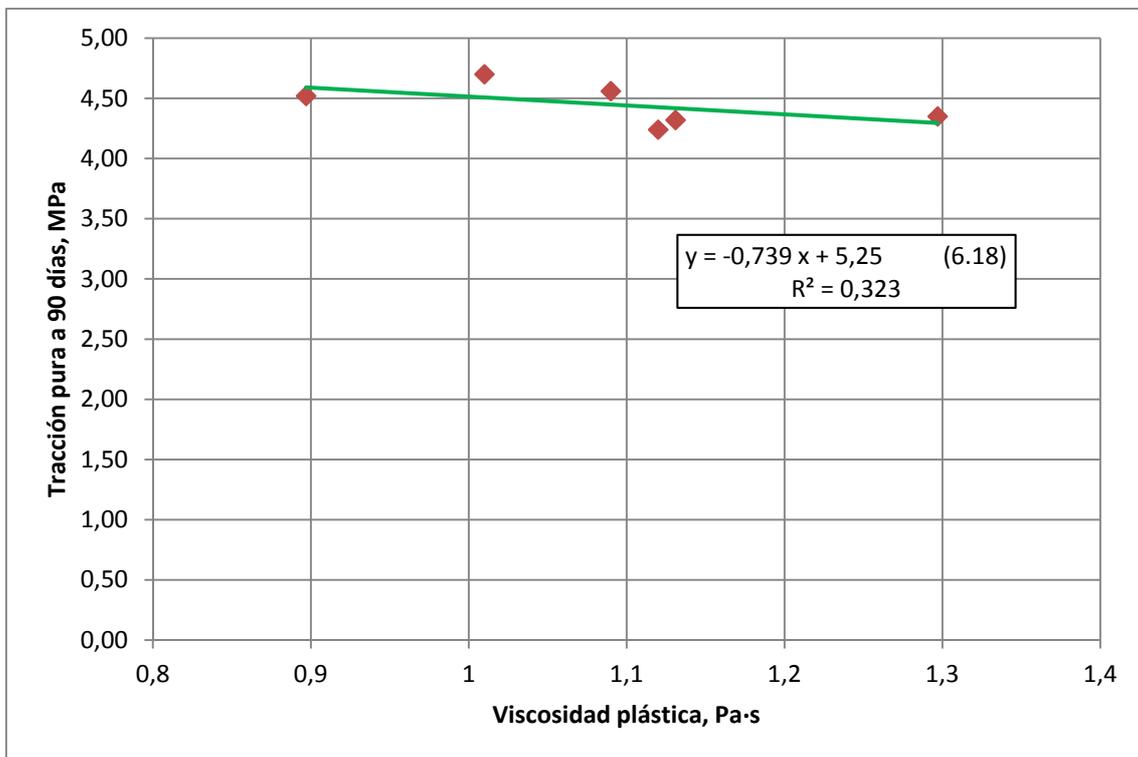


Figura 6.18. Correlación viscosidad plástica-tracción pura a 90 días

Al igual que el caso de la resistencia a compresión, la resistencia a la tracción a la edad de 28 días no está afectada por un incremento de la viscosidad plástica (figura 6.17).

En las figura 6.18 se observa que la resistencia tracción a la edad de 90 días disminuye a medida que se incrementa la viscosidad plástica.

6.3.5 Viscosidad plástica-flexotracción

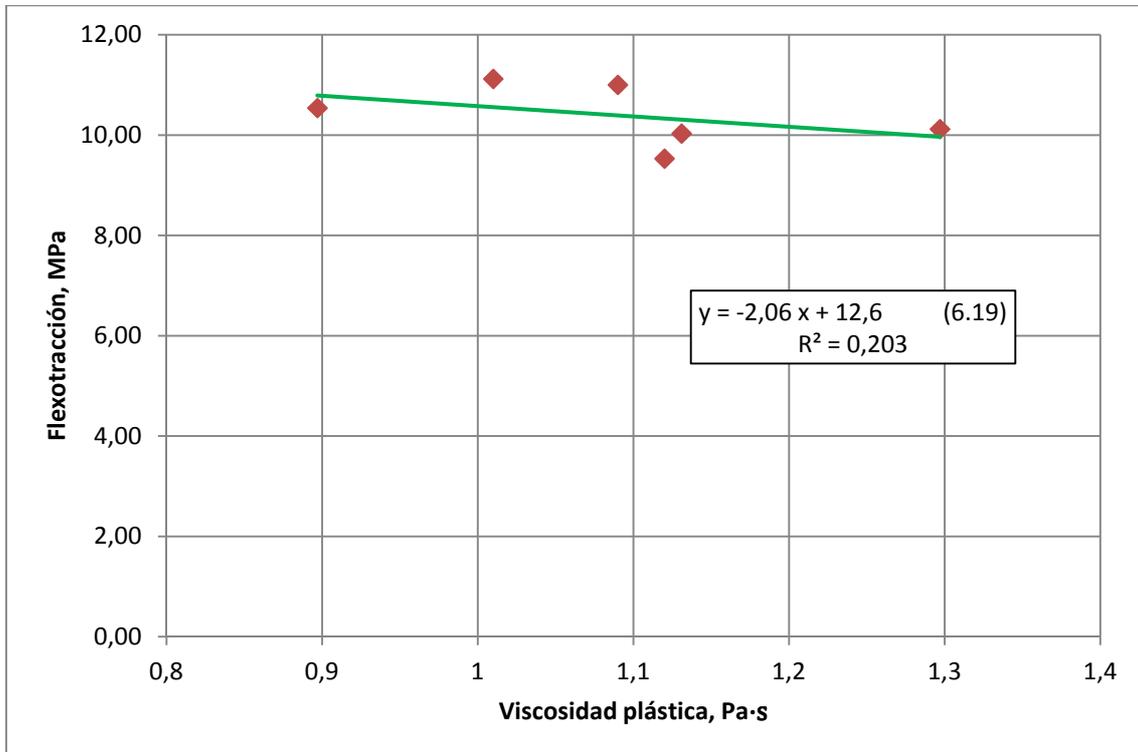


Figura 6.19. Correlación viscosidad plástica-flexotracción

La figura 6.19 indica que la resistencia a flexotracción disminuye a medida que se incrementa la viscosidad plástica del sistema.

6.3.6 Viscosidad plástica-módulo de elasticidad

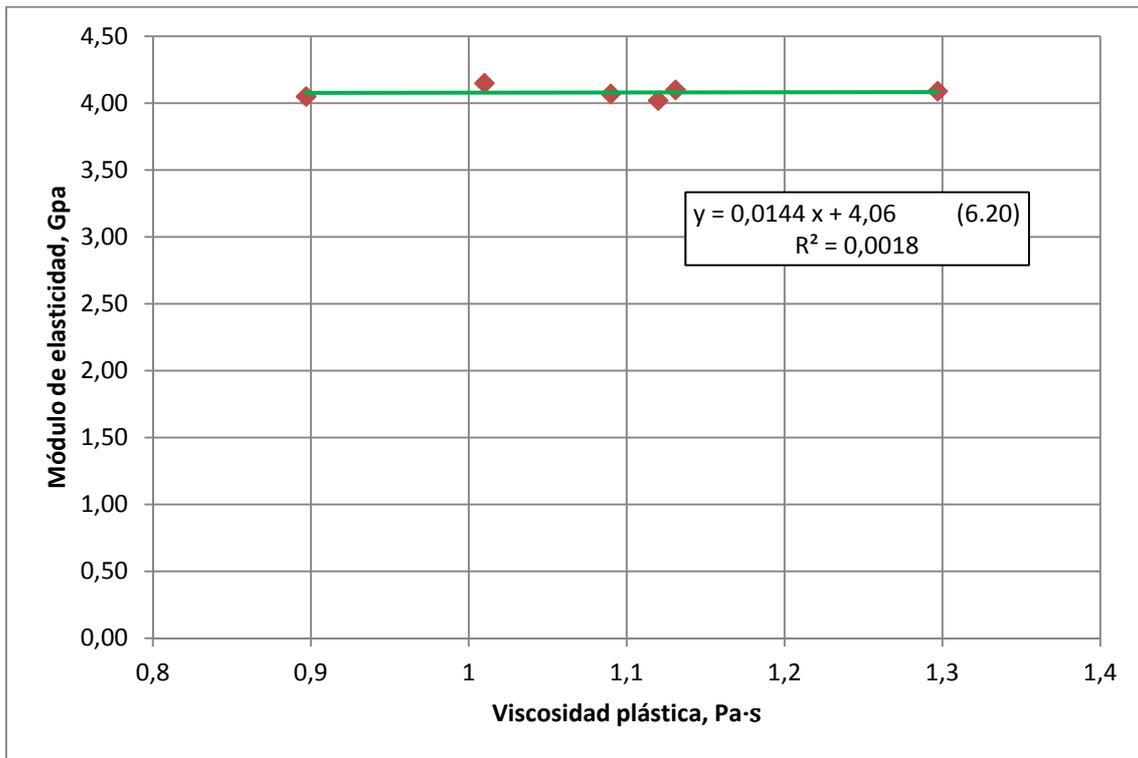


Figura 6.20. Correlación viscosidad plástica-módulo de elasticidad

La figura 6.19 sugiere que el módulo de elasticidad no se ve afectado por la viscosidad plástica. Las pequeñas variaciones que indica la pendiente de la recta de correlación estarían justificadas por la incertidumbre experimental.

6.3.7 Viscosidad plástica-índice de rebote

Según se representa en la figura 6.20 el índice de rebote medido en probeta de hormigón endurecido, disminuye proporcionalmente al incremento de la viscosidad plástica medida sobre el mortero equivalente en estado fresco.

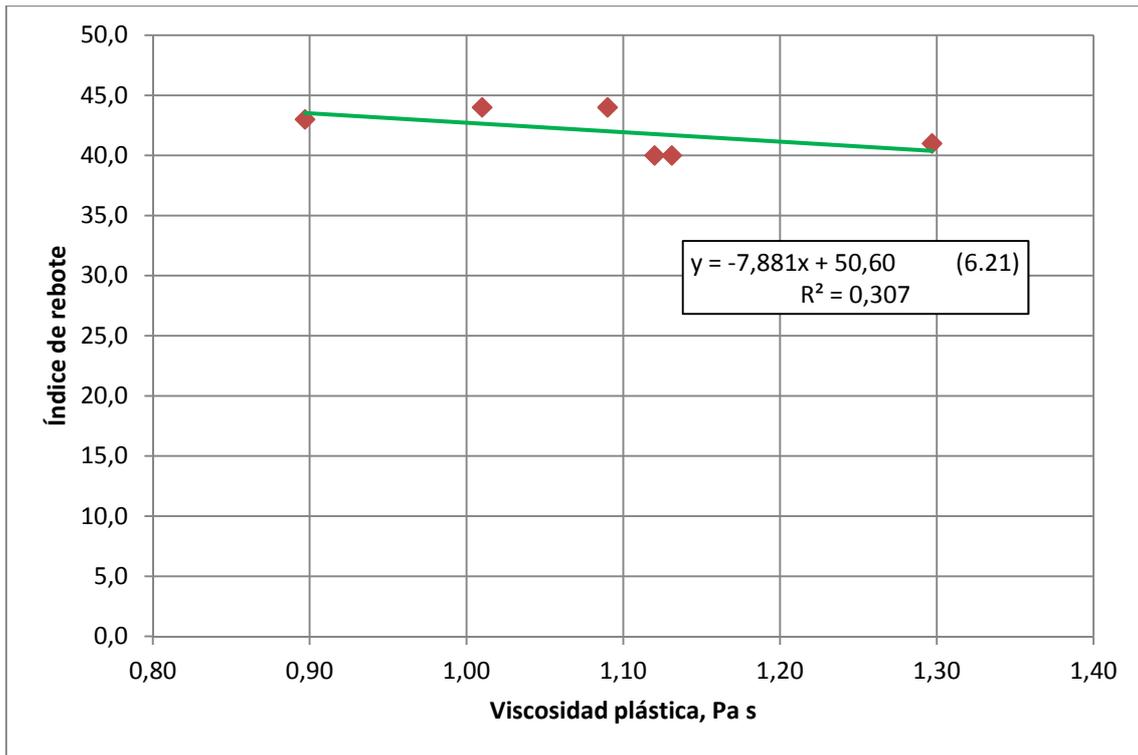


Figura 6.21. Correlación viscosidad plástica-índice de rebote

6.3.8 Viscosidad plástica-abrasión superficial

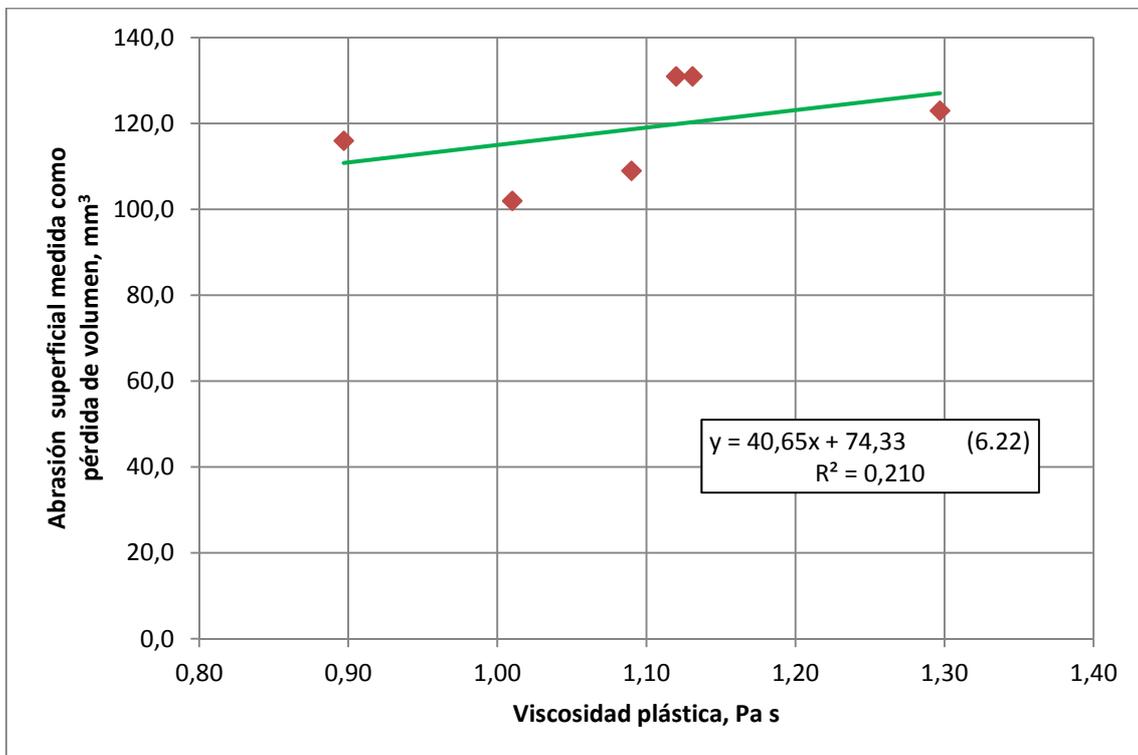


Figura 6.22. Correlación viscosidad plástica-abrasión superficial

La figura 6.21 indica que existe un aumento de la abrasión superficial en el estado endurecido a medida que se incrementa la viscosidad plástica en el mortero equivalente en el estado fresco.

6.4 Conclusiones

Las conclusiones de este capítulo son las siguientes:

- Un aumento del límite de fluencia conlleva un aumento de la densidad del hormigón así como de las resistencias a compresión a 90 y 150 días, además de las resistencias a tracción, flexotracción y abrasión, así como en el módulo de elasticidad e índice de rebote.

La resistencia a compresión a 28 días es invariante a los cambios en el límite de fluencia.

- Un incremento de la viscosidad plástica conlleva una disminución de la resistencia a compresión a 90 y 150 días, de la resistencia a tracción a 90 días y de la resistencia a flexotracción. De la misma forma el índice de rebote y la resistencia a la abrasión disminuyen.

La porosidad aumenta con el incremento de la viscosidad plástica, siendo invariantes la resistencia a compresión y tracción a 28 días, así como el módulo de elasticidad.

6.5 Bibliografía

- [6.1] Tattersall G. H., Banfill P.F.G (1983): *The Rheology of Fresh Concrete*. Ed. Pitman Publishing.

- [6.2] Wallevik J.E. (2009): *Rheological properties of cement paste: Thixotropic behaviour and structural breakdown*. Cement and Concrete Research, **39**, pp. 14-29.

- [6.3] Fernández Cánovas M. (2007): *Hormigón*. 10ª edición, Ed. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

- [6.4] Feys D., Verhoeven R., De Schutter G. (2008): *Fresh self-compacting concrete. A shear thickening material*. Cement and Concrete Research, **38**, pp. 920-929.

- [6.5] Neville, A. (2012): *Properties of concrete*. 5ª edición, Prentice Hall.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

7.1 Conclusiones parciales

Se ha fabricado un hormigón con características diferentes a las del hormigón convencional, garantizando la estabilidad del material elaborado con escorias de cobre como sustituto del árido fino.

Inicialmente se ha realizado una caracterización física, química y mineralógica de la escoria de cobre, así como una clasificación ambiental, obteniendo como resultado que se trata de un residuo no ecotóxico y que cumple con las exigencias de la instrucción de hormigón estructural EHE-08 para ser tratado como árido en hormigones. Posteriormente se llevó a cabo la fabricación y estudio del hormigón con la incorporación de escorias de cobre.

Se ha analizado la evolución de los nuevos hormigones desde su consistencia primaria hasta su consolidación final, mediante ensayos reológicos del mortero equivalente en estado fresco y mediante el estudio de probetas del propio hormigón en estado endurecido.

De la misma forma se han evaluado las prestaciones resistentes del nuevo hormigón, aportadas por la escoria de cobre, en comparación con las del hormigón convencional.

En cuanto al comportamiento de los hormigones y morteros equivalentes en estado fresco se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Un aumento del porcentaje de escoria de cobre en el hormigón provoca una disminución de la docilidad y en consecuencia de la trabajabilidad.
- En los morteros equivalentes estudiados se observa una disminución de la docilidad a medida que se incrementa la concentración de escoria de cobre, si bien, se alcanza una meseta para concentraciones iguales o superiores al 60%.
- Un aumento del porcentaje de escoria de cobre en la composición de los morteros equivalentes, provoca una transición del material hacia valores más

elevados del límite de fluencia, tendiendo a una meseta de estabilidad para concentraciones iguales o superiores al 60%.

- La presencia de escorias de cobre en los morteros equivalentes no influye en la viscosidad plástica, y por ello la tendencia a la segregación del material es prácticamente independiente de la sustitución de árido por escoria.
- De los estudios realizados con el mortero equivalente, se deduce que la presencia de escoria de cobre en la formulación dota de respuesta autocompactante al correspondiente hormigón, si bien a partir de concentraciones superiores al 60%, la respuesta autocompactantes es similar.

En cuanto al comportamiento del hormigón en estado endurecido se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Los hormigones fabricados con escorias de cobre incrementan su densidad a medida que aumenta la concentración de escorias, obteniéndose hormigones más pesados.
- La porosidad y la absorción de los nuevos hormigones aumenta para concentraciones de escoria comprendidas entre 0% y 40% debido a la pequeña pérdida de compacidad del sistema por la disminución del árido fino. Para concentraciones superiores al 40% se produce una disminución de las mismas debido seguramente al inicio de la actividad puzolánica que es capaz de empezar a producir pequeñas cantidades de silicatos como para densificar y cerrar la red de poros del sistema.
- Se observa una tendencia a la disminución de los coeficientes de succión a medida que se incrementa la escoria de cobre en el hormigón.
- En todos los casos existe una mejora del comportamiento de la permeabilidad de los hormigones cuando se incrementa el porcentaje de escoria de cobre, obteniéndose hormigones más impermeables.

- La resistencia a compresión para hormigones con edades de 7 y 28 días no se ve alterada por la adición de escoria de cobre. Para edades de 90 y 150 días la capacidad puzolánica de la escoria de cobre se pone de manifiesto y la resistencia a compresión aumenta considerablemente en función de la concentración de escoria y de la edad del hormigón, debido a que la actividad puzolánica se incrementa con el tiempo. Los mayores incrementos de resistencia a compresión se obtienen para edades de 150 días y con concentraciones de escoria de cobre superiores al 40%.
- La resistencia a tracción del hormigón a la edad de 28 días, es similar a la de un hormigón convencional. Para hormigones con una edad de 90 días la resistencia a tracción presenta valores superiores a los del hormigón de referencia. En todos los casos estudiados la resistencia se incrementa en función de la concentración de escoria de cobre presente en el hormigón, obteniéndose los mayores incrementos para concentraciones superiores al 40%.
- En cuanto a la resistencia a la flexotracción no existe un incremento significativo para concentraciones de escoria de cobre comprendidas entre 0% y 40%. Para valores por encima del 40 % se observan incrementos significativos en la resistencia a flexotracción.
- En todos los casos estudiados el módulo de elasticidad del hormigón aumenta a medida que se incrementa la concentración de escorias de cobre, correspondiendo a concentraciones superiores al 40% los mayores crecimientos.
- La presencia de escoria de cobre representa una excelente mejora de los hormigones frente a la abrasión superficial. Dicha resistencia es proporcional al porcentaje de escoria.
- La resistencia al desgaste presenta valores superiores en todos los hormigones con escoria de cobre, correspondiendo a concentraciones del 40% la resistencia máxima. Para concentraciones superiores al 60% la resistencia al desgaste es

prácticamente independiente del porcentaje de escoria de cobre en el hormigón.

- El índice de rebote del hormigón tiende a incrementarse a medida que se aumenta la concentración de escoria de cobre en el hormigón, consiguiendo mayores resistencias al impacto. Las resistencias a compresión estimadas por el índice de rebote se encuentran un 48% de media por debajo de las obtenidas por medio de ensayos de compresión.
- La incorporación de escoria de cobre al hormigón no introduce cambios significativos en la velocidad de propagación de los ultrasonidos a la edad de 28 días, obteniéndose hormigones de excelente calidad según las mediciones efectuadas.
- No se parecían fenómenos de carbonatación en ninguno de los hormigones con incorporación de escorias a edades de 90 y 210 días. El hormigón de referencia muestra una pequeña carbonatación a esas edades.

En cuanto a las correlaciones entre las mediciones efectuadas en estado fresco y estado endurecido, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Un aumento del límite de fluencia conlleva un aumento de la densidad del hormigón así como de las resistencias a compresión a 90 y 150 días y de las resistencias a tracción, flexotracción y abrasión, así como en el módulo de elasticidad e índice de rebote.
- Un incremento de la viscosidad plástica conlleva una disminución de la resistencia a compresión a 90 y 150 días, de la resistencia a tracción a 90 días y de la resistencia a flexotracción. De la misma forma el índice de rebote y la resistencia a la abrasión disminuyen. La porosidad aumenta con el incremento de la viscosidad plástica, siendo invariantes la resistencia a compresión y tracción a 28 días, así como el módulo de elasticidad.

7.2 Conclusiones generales

Tras el estudio de los resultados obtenidos en esta Tesis Doctoral, se han llegado a las siguientes conclusiones:

- La adición de escorias de cobre empleado como sustituto del árido fino en el hormigón, le confiere una buena trabajabilidad en estado fresco, además de compacidad y rigidez como material endurecido.
- El hormigón con escorias de cobre en estado fresco (medido a través de su mortero equivalente) presenta un valor del límite de fluencia más elevado que el hormigón de referencia, debido a la dificultad del movimiento relativo entre las partículas de escoria y las de estas con el resto de los áridos, es decir, es más difícil deshacer la estructura del sistema. La viscosidad plástica no se modifica con la incorporación de escorias. La presencia de escoria de cobre en la formulación dota de respuesta autocompactante al correspondiente hormigón.
- El comportamiento mecánico de los hormigones con escoria de cobre consigue resistencias a compresión, tracción, flexo-tracción, abrasión superficial, desgaste y módulo de elasticidad superiores a los de los hormigones convencionales.
- La escoria de cobre mejora notablemente la durabilidad del hormigón al disminuir el acceso de los agentes agresivos, eliminando o retardando el ataque sobre las armaduras y la degradación interna del hormigón. Se pone de manifiesto que la escoria se comporta de forma óptima ante el diseño de hormigones impermeables.
- La adición de escoria estará indicada en todos los casos donde el hormigón diseñado este expuesto a condiciones de abrasión superficial y desgaste elevado, como es el caso de capas de rodadura de viales, estructuras sometidas a la erosión del agua y a la cavitación, etc. La concentración óptima será aquella que se ajuste mejor a las condiciones de diseño, determinándose en todo caso mediante ensayos de laboratorio *o in situ*.

En base a los resultados obtenidos, el uso de las escorias de cobre es viable para la elaboración de hormigones dado que se comporta como un árido con capacidad puzolánica significativa para tiempos iguales o superiores a 90 días. El campo de aplicación para su explotación es amplio; estructuras convencionales, elementos prefabricados, capas de rodadura de viales, estructuras sometidas a erosión y cavitación, elementos estructurales expuestos a ambientes agresivos, etc.

7.3 Futuras líneas de investigación

A la vista de los excelentes resultados obtenidos en los hormigones fabricados con escorias de cobre como sustituto del árido fino a lo largo de este trabajo de investigación, se proponen las siguientes líneas de desarrollo para un futuro próximo:

- Completar el estudio del límite de fluencia de los morteros equivalentes. Se ha visto como estos materiales presentan este tipo de comportamiento y como la caracterización del mismo puede permitir predecir características importantes del comportamiento en estado endurecido del hormigón final.
- Estudiar otros tipos de formulaciones del hormigón (relación agua/cemento, consistencia, número de áridos que intervienen en la mezcla) y comparar los resultados a distintas escalas (hormigón, mortero equivalente).
- Estudiar el comportamiento mecánico y reológico incorporando filler de escoria de cobre al hormigón según distintos porcentajes de peso cemento, manteniendo invariantes las proporciones de agua/cemento, áridos y aditivo.
- Hacer estudios del comportamiento de los hormigones con escorias de cobre en ambientes marinos y de aguas residuales con grandes concentraciones de ácido sulfhídrico, estabilidad frente al fuego, aislamiento frente a radiaciones ionizantes, ciclos de hielo/deshielo, así como ampliar los estudios de carbonatación.

- Estudiar el cambio de comportamiento en muchas de las propiedades estudiadas cuando la concentración de escorias de cobre es superior al 40%-60%.
- Finalmente, estudiar otras formulaciones enfocadas a la utilización de las escorias de cobre como un material que reemplace de forma parcial al cemento Pórtland. De esta forma se producirá una disminución del impacto medioambiental además del ahorro económico que supone.

CAPÍTULO 8

BIBLIOGRAFÍA

8.1 Autores

Ahmed S.F.U., Mihashi H. (2007): *A review on durability properties of strain hardening fibre reinforced cementitious composites*. (SHFRCC), *Cement and Concrete Composites.*, **29**, pp. 365-376.

Aitcin P.C (2000): *Cements of yesterday and today, concrete of tomorrow*. *Cement and Concrete Research*, **30**, pp. 1349-1359.

Akihiko Y., Takashi Y. (1996): *Study of utilization of copper slag as fine aggregate for concrete*. *Ashikaya Kogyo Daigaku Kenkyu Shoroku*, **23**, pp.79-85.

Akihiko Y., Takashi Y. (1996): *Study of utilization of copper slag as fine aggregate for concrete*. *Ashikaya Kogyo Daigaku Kenkyu Shoroku*, **23**, pp.79-85.

Al-Jabri K., Tana RA., Al-Ghassani M. (2002): *Use of copper slag and cement by-pass dust as cementitious materials*. *Cement Concrete Aggregates*, **24**, pp. 7-12.

Al-Jabri K., Tana R., Al-Hashmi A., Al-Harthy A. (2006): *Effect of copper slag and cement by-pass dust addition on mechanical properties of concrete*. *Construction and Building Materials*, **20**, pp. 322-331.

Al-Jabri K., Tana R., Hisada M., Al-Oraimi SK., Al-Saidy AH. (2009): *Copper slag as sand replacement for high performance concrete*. *Cement and Concrete Composites*, **31**, pp. 483-488.

Al-Jabri K., Hisada M., Al-Saidy AH., Al-Oraimi SK. (2009): *Performance of high strength concrete made with copper slag as a fine aggregate*. *Construction and Building Materials*, **23**, pp. 2132-2140.

Arlandis Rubio J. (1999): *La metalurgia del cobre*. Boletín de estudios y desarrollo corporativo de Atlantic Copper S.A. Madrid, pp. 13-15.

Arnaud L. y Dierkens M. (2007): *Setting and Hardening of cement based materials: which differences between mortars and concretes*. Advanced in Construction Materials, Part VI, Springer Berlin Heidelberg.

Atlantic Copper (2003): *Informe de resultados de los ensayos efectuados sobre una muestra de material granular de escoria granulada de fundición de cobre*. Instituto técnico de materiales y construcciones (INTEMAC). Madrid

Atlantic Copper (2012): *Estudios y usos alternativos de la escoria de cobre*.

Atlantic Copper (2013): *Declaración ambiental*.

Ayano Toshiki, Kuramoto Osamu, Sakata Kenji (2000): *Concrete with copper slag fine aggregate*. Society of Materials Science, **49**, pp. 1097-1102

Barnes H. A., Hutton J.F., Walters K. (1989): *An Introduction to Rheology*. Ed. Elsevier.

Barnes H.A. (1999): *The yield stress – a review or πάντα ρει - everything flows?* Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, **81**, pp. 133-178.

Barnes H.A (2000): *A handbook of elementary rheology*. University of Wales. Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Aberystwyth.

Barnes H.A., Nguyen Q.D. (2001): *Rotating vane geometry. A review*. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanier, **98**, pp. 1-14.

Basf España. *Ficha técnica superplastificante Glenium ACE-324*.

Bauer E., de Sousa J.G.G., Guimaraes E.A., Silva F.G.S. (2007): *Study of the laboratory vane test on mortars*. Building and Environment, **42**, pp. 86-92.

Bayod E., Mansson P., Innings F., Bergenstahl B., Tornberg E. (2007): *Low shear rheology of concentrated tomato products. Effect of particle size and time*. Food Biophysics, **2**, pp. 146-157.

Beregovski, V., Kistiakouski, B. (1974): *Metalurgia del cobre y del níquel*. Editorial Mir. Moscú.

Bhatty, J.I. (1987): *The effect of retarding admixtures on the structural development of continuously sheared cement pastes*. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, **9**, pp. 137-144.

Biswas A.K., Davenport W.G (1980): *El cobre: metalurgia extractiva*. Ed. Limusa. México.

Biswas, A.K., Davenport, W.G (1993): *EL cobre: metalurgia extractiva*. Ed. Limusa. México.

Bizzotto M.B., Astori R.E., Sanguinetti B.M. (2006): *Determinación de la absorción capilar en hormigones de alto desempeño elaborados con materiales de la región NEA*. Universidad Nacional del Nordeste. Argentina

Bouvet A., Ghorbel E., Bennacer R. (2010): *The mini-conical slump flow test: Analysis and numerical study*. Cement and Concrete Research, **40**, pp. 1517-1523.

Bungey J.H., Millard, S.G., Grantham M.G. (2006): *Testing of concrete in structures*. 4th edition, Taylor@Francis Group. London and New York.

Breve historia del cobre. <http://www.cimsaww.com>

Calavera Ruíz J. (2002): *Cálculo, construcción, patología y rehabilitación de forjados de edificación: unidireccional y sin vigas – hormigón, metálicos y mixtos*. 5ª edición, Instituto Técnico de Materiales y Construcción, INTEMAC.

Carino N.J (1983): *“Temperature effects on strength maturity relations of mortar”*. ACI Materials Journal, **80**, pp. 177-182.

Chhabra R.P., Richardson J.F (1999): *Non-Newtonian flow in the Process Industries*. Ed. Butterworth-Heinemann

Comisión Chilena del Cobre. <http://www.cochilco.cl>

Copper Development Association. <http://www.copper.org>

Corporación Nacional del Cobre Chilena. <http://www.codelco.com>

Corporación Nacional del Cobre Chilena. Documentación e información técnica. <http://www.codelcoeduca.cl>

Correa Camargo D. (2011): *Dosificación Ponderal para hormigones de alta y baja densidad*. Tesis de Master. Universidad Politécnica de Cataluña.

Derakhshandeh B., Hatzikiriakos S.G., Bennington C.P.S. (2010): *Rheology of pulp suspensions using ultrasonic Doppler velocimetry*. Rheologica Acta, **49**, pp. 1127-1140.

Díaz Marinovic J. (2012): *Metalurgia extractiva del cobre*. Ingeniería civil de Minas. Universidad de Chile. p. 25-34.

Douglas E., Mainwaring P. (1985): *Hydration and puzzolanic activity of nonferrous slags*. The Bulletin of the American Ceramic Society, **64**, pp. 700-706.

Eguchi K., Teranishi K., Nakagome A., Kishimoto H., Shinozaki K, Narikawa M. (2007): *Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction*. Construction and Building Materials, **21**, pp. 1542-1551.

Elaty M.A.A., Ghazy M.F. (2012): *Flow properties of fresh concrete by using modified geotechnical vane shear test*. HBRC Journal, **8**, pp. 159-169.

European Copper Institute. <http://www.copperalliance.eu>

Fernández Cánovas M. (2007): *Hormigón*. 10 edición, Ed. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Fernández J. et al. (2001): *Evaluación de la capacidad resistente de estructuras de hormigón*. INTEMAC: Instituto Técnico de Materiales de Construcción. Madrid.

Ferraris C.F. (2009): *Measurement of the rheological properties of Cement Pastes: a new approach. Proceedings of Role of Admixtures in High Performance Concrete*. RILEM International Symposium, Moterrey, México, pp. 1999.

Ferrer Prada, R. (2011): *Percepción social sobre la gestión de residuos en Madrid*. Universidad Complutense de Madrid.

Feys D., Verhoeven R., De Schutter G. (2008): *Fresh Self-Compacting Concrete, a shear thickening material*. Cement and Concrete Research, **38**, pp. 920-929.

Feys D., Verhoeven R., De Schutter G. (2009): *Why is fresh self-compacting concrete shear thickening?* Cement and Concrete Research, **39**, pp. 510-523.

Ficha de características técnicas *del* cemento CEM I 52,5R. Holcim España, 2013

Frías Rojas, M. (2010): *Nuevas adiciones al cemento*. Seminario IECA. Instituto Eduardo Torroja. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Galindo-Rosales F.J., Rubio-Hernández F.J., Velazquez-Navarro J.F, Gomez-Merino A.I. (2010): *Structural level of silica-fumed aqueous suspensions*. The Bulletin of the American Ceramic Society, **90**, pp. 1641-1643.

Geocisa (1997): *Estudio de escoria de cobre granulada de horno eléctrico*. Atlantic Copper, 1997.

Gómez Cano J.C. (2008): *Identificación y cuantificación de algunos factores en la permeabilidad de hormigones y morteros*. Universidad Nacional de Colombia.

Gorai B., R.K. Jana, and Premchand (2003): *Characteristics and utilization of copper slag—a review*. Resources, Conservation and Recycling, **39**, pp. 299-313.

Haynes, H. H. (1980): *Permeability of concrete in sea water. Performance of concrete in marine environment*. ACI publication, **65**, pp. 21-38.

Hearn N., Detwiler R., Sframeli C. (1994): *Water permeability and microstructure of three old concretes*. Cement and Concrete Research, **24**, pp. 633-640.

Herrera Toledo, Y. (2008): *Hormigón de muy alta resistencia*. Tesis de Master Ingeniería Estructural y de la Construcción. Universidad Politécnica de Cataluña.

Holcim España. *Fichas de dosificación para hormigones*, 2013.

Hooton R.D. (2008): *Bridging the gap between research and standards*. Cement and Concrete Research, **38**, pp. 247-258

Hostalet F.A. (1989): *La estimación in situ de la resistencia del hormigón endurecido*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. pp. 662.

Howland Albear J.J., Martín Acosta, A.R. (2012): *Investigación de la absorción capilar de hormigones con áridos calizos cubanos*. Revista Cubana de Ingeniería, **3**, pp. 17-24.

Hummel A. (1966): *Prontuario del hormigón*. 2ª edición, Ed. Técnicos Asociados S.A, Barcelona.

International Copper Study Group. <http://www.icsg.org>

Ishimaru K., Mizuguchi H., Hashimoto C., Ueda T., Fujita K., Ohmi M. (2005): *Properties of copper slag and second class fly ash as a part of fine aggregate*. Japan Society of Materials Science, **54**, pp. 828-833.

Jarny S., Roussel N., Le Roy R. y Coussot P. (2008): *Modelling thixotropic behaviour of fresh cement pastes from MRI measurements*. Cement and Concrete Research, **38**, pp. 616-623.

Jiménez Montoya P., García Meseguer A., Morán Cabré F. (2000): *Hormigón armado*. 14ª edición basada en la EHE, ajustada al código modelo y al eurocódigo. Ed. Gustavo Gili.

Kambham K., Sangameswaran S., Datar S., Kura B. (2007): *Copper slag: optimization of productivity and consumption for cleaner production in dry abrasive blasting*. Journal of Cleaner Production, **15**, pp. 465-473.

Kosmatka S.H., Panarese W.C., Kerkhoff B. (2002): *Design and control of concrete mixtures*. Portland Cement Association.

Krulis M., Rohm H. (2004): *Adaptation of a vane tool for the viscosity determination of flavoured yoghurt*. European Food Research Technology, **218**, pp. 598-601

Larbi, L.A. (1993): *Microstructure of the interfacial zone around aggregate particles in concrete*. Heron, **38**, pp.1-69.

Larrard F. de, Ferraris C.F., Sedran T. (1998): *Fresh Concrete: A Herschel-Bulkley material*. Materials and Structures, **31**, pp. 494-498.

Laskar A.I., Bhattacharjee R. (2011): *Torque-speed relationship in a concrete rheometer with vane geometry*. Construction and Building Materials, **25**, pp. 3443-3449.

Liddell P.V., Borger D.V. (1996): *Yield stress measurements with the vane*. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanier, **63**, pp. 235-261.

Lovera Dávila D.F., Arias V., Coronado Falcón R. (2004): *La valoración de las escorias de metalúrgicas como recursos industriales*. Revista del Instituto de Investigación FIGMMG, **7**, pp. 26-28. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú.

Mackey P.J (1982): *The physical Chemistry of Copper Smelting Slags-a review*. Can Metall., **21**, p. 221

Malhotra, V.M. (1987): *Supplementary cementing materials for concrete*. Canmet, Ministry of Supply and Services. Canadá.

Malhotra V.M., Carino N.J. (1991): *Handbook no nondestructive testing of concrete*. CRC Press, Boca Ratón, U.S.A.

Malvern Instruments (2005): *Gemini 150/200/HR nano*. Malvern Manuals.

Manual de equipo de ultrasonidos C.U.P. H-2000. Sistemas de Ensayo S.L, Fuenlabrada, Madrid.

Martinez Padilla L.P., Rivera Vargas C. (2006): *Flow behavior of Mexican sauces using a vane in a large cup rheometer*. Journal of food Engineering, **72**, pp. 181-196.

Meeten G.H. (2008): *Squeeze-flow and vane rheometry of a gas-liquid foam*. Rheologica Acta, **47**, pp. 883-894.

Mehta, P.K., Monterero P.J.M. (1994): *Concreto: estructura, propiedades y materiales*. 1ª edición. Ed. Pino. Sao Paulo, Brasil.

Mendonça P., Bragança L. (2007): *Sustainable housing with mixedweight strategy. A case study*. Building and Environment, **42**, pp. 3432-3443.

Merrit, F.S. (1993): *Manual del ingeniero civil*. 3ª edición, Ed. McGraw Hill.

Mezger T.G. (2002): *The rheology handbook. For the users of rotational and oscillatory rheometers*. Ed. Ulrich Zorll.

Murray R, Spiegel (1988): *Estadística*. Serie Schaum. McGraw Hill, p. 343.

Nazer A., Pavez O., Rojas F., Palacios J. (2005): *Uso de las escorias de cobre como agregado pétreo en hormigones*. X Congreso de Control de Calidad en la Construcción. VIII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción. Asunción, Paraguay, 2005.

Nazer A., Pavez O., Rojas F., Aguilar C. (2010): *Una revisión de los usos de las escorias de cobre*. Congreso IBEROMET XI, XCONAMET/SAM. Viña del Mar, Chile. 2010

Nehdi M., Rahman M.A. (2004): *Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological model for different test geometry, gap and surface friction*. Cement and Concrete Research, **34**, pp. 1993-2007.

Neville, A. (2012): *Properties of concrete*. 5ª edición, Prentice Hall.

Newman J. (2002): *Advance Concrete Technology Set*. Ed. Elsevier.

Olivares M., Laffarga J., Galán C., Nadal P. (2003): *Evaluación de la resistencia mecánica de un hormigón según su porosidad*. Materiales de Construcción, 54, pp. 21-26

Ortiz Berrocal, L. (1990): *Curso de elasticidad y resistencia de materiales*. Universidad Politécnica de Madrid.

Parrón Vera M.A. (1999): *Pirometalurgia con reductores no convencionales aplicada a la recuperación de metales de los óxidos de residuos de acerías*. Tesis doctoral Universidad de Cádiz.

Payne J.C., Dransfield J.M. (1985): *The influence of admixtures and curing on permeability*. Conference on permeability of concrete and its control. *Concrete Society*, London, pp. 89-105.

Pellicer Llopis V. (2014): *Ensayos no destructivos en hormigón. Georadar y ultrasonidos*. Universidad Politécnica de Valencia.

Peris-Mora E. (2007): *Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials*. *Building and Environment*, **42**, pp. 1329-1334

Petit J.-Y., Wirquin E., Vanhove Y. y Khayat K. (2007): *Yield stress and viscosity equations for mortars and self-consolidating concrete*. *Cement and Concrete Research*, **37**, pp. 655-670.

Popovics S. (2001): *Analysis of the concrete strength versus ultrasonic pulse velocity relationship*. *Material Evaluation*. USA, **59**, pp. 123-124.

Powers T.C (1960): *Physical properties of cement paste*. *Proceedings of the Chemical Cement*, **2**, pp. 577-613

Prior M. E. (1966): *Abrasion Resistance: Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*. ASTM STP-169A, ASTM, Philadelphia, pp. 246-260

Procedimientos Integrados S.L. (2013): *Módulo de cálculo para el diseño de fórmulas de hormigón*. Madrid.

Ramirez J.L., Barcena J.M., Urreta J.I. (1985): *Arenas calizas para la confección de hormigones: influencia de sus finos calizos y arcillosos a nivel de morteros*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. *Materiales de Construcción*, **35**, pp. 23-39

Rebolledo Ramos N. (2010): *Aplicación de técnicas no destructivas al estudio del hormigón fresco*. Trabajo fin de master. Universidad Politécnica de Madrid.

Resende C., Cachim P., Bastos A.M. (2008): *Copper slag mortar properties*. Materials Science Forum, **587-588**, pp. 862-866

Richardson D.N (2005): *Aggregate Gradation Optimization*. University of Missouri-Rolla. Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering. Rolla, Missouri.

Rojas Henao L.M. (2012): *Ensayos de información y extracción de probetas testigo en hormigones autocompactantes*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

Roussel N. (2006): *A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications*. Cement and Concrete Research, **36**, pp. 1797-1806.

Rubio Cintas M.D. (2010): *Influencia de la adición de polvo de humo ferrítico en el comportamiento reológico y resistente de morteros y hormigones*. Tesis doctoral Universidad de Cádiz.

Rubio-Hernández F.J., J.F. Velázquez-Navarro, Ordoñez-Belloc L.M. (2012): *Rheology of concrete: a study case based upon the use of the concrete equivalent mortar*. Materials and Structures, DOI 10.1317/s11527-012-9915-1.

Rubio-Hernández F.J., J.F. Velázquez-Navarro, Galindo-Rosales F.J. (2009): *Rheological characterization of a time dependent fresh cement paste*. Mechanics of Time-Dependent Materials, **13**, pp. 199-206.

Rubio Hernández F.J., Morales Alcalde J.M., Gomez Merino A.I. (2013): *Limestone filler cement ratio effect on the flow behavior of a SCC cement paste*. Advances in Cement Research, **25**, pp.262-272

Sales A., Rodrigues de Souza F. (2009): *Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble*. Construction and Building Materials, **23**, pp. 2362-2370.

Sánchez de Guzmán D. (2004): *Nuevas tendencias en las especificaciones de mezclas de concreto*. Memorias Técnicas: X reunión del concreto. Cartagena, Colombia.

Sánchez de Rojas, M.I., Rivera J., Frías M. (2004): *Escorias de cobre: comportamiento puzolánico y fijación de los elementos metálicos en morteros*. Instituto Eduardo Torroja. VIII Congreso Nacional de materiales. SPUPV.

Sánchez de Rojas, M.I., Rivera J., Frías M. (2008): *Use of recycled copper slag for blended cements*. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, pp. 83-209.

Sánchez de Rojas, M.I., Rivera J., Frías M. (2004): *Escorias de cobre: comportamiento puzolánico y fijación de los elementos metálicos en morteros*. Instituto Eduardo Torroja. VIII Congreso Nacional de materiales. Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia (SPUPV).

Sánchez de Rojas, M.I., Rivera J., Frías M. (2008): *Use of recycled copper slag for blended cements*. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, pp. 83-209

Sánchez Rodríguez A. (2011): *Análisis de la aplicabilidad de los áridos reciclados mixtos en hormigones*. Tesis de especialidad. Universidad Politécnica de Cataluña.

Santander, Nelson H. (1979): *Pirometalurgia del cobre*. 2ª edición. Ed. UTE. Chile, 1979.

Sarmentero Regueira J.C. (2010): *Impacto de la lógica inversa en el mercado del cobre en España*. Tesis de Master. Universidad Politécnica de Cataluña.

Schmitt H., Heene A. (2009): *Tratado de construcción*. 8ª edición, Ed. Gustavo Gili.

Schram G. (2000): *A practical Approach to Rheology and Rheometry*. Haake.

Scripture E.W., Benedict S.W., Bryant D.E. (1953): *Floor aggregates*. American Concrete Institute (ACI). ACI Proceedings, **50**, pp.305-316.

Shaughnessy III, R., Clark P.E. (1988): *The Rheological Behaviour of Fresh Cement Pastes*. Cement and Concrete Research, **3**, pp. 327-341.

Schwartzentruber A. y Catherine C. (2000): *Method of the concrete equivalent mortar (CEM): A new tool to design concrete containing admixture*. Materials and Structures, **33**, pp. 475-782.

Sedran T., Larrard F. de (1999): *Optimization of self compacting concrete thanks to packing model*. Self-Compacting Concrete-Proceedings of the First Internacional RILEM Symposium, Sweeden, pp. 321-332.

Sepúlveda Estay C.A. (2006): *Utilización de escorias de fundición para la producción de compuestos de hierro*. Memoria de Grado. Universidad de Chile.

Siddique R., Khatib J., Kaur I. (2008): *Use of recycled plastic in concrete: A review*. Waste Management Journal, **28**, pp. 1835-1852

Shi C., Meyer C., Behnood A. (2008): *Utilization of copper slag in cement and concrete*. Resources, Conservation and Recycling, **52**, pp. 1115-1120

Shi C., Zheng K. (2007): *A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete*. Resources, Conservation and Recycling, **52**, pp. 234-247

Silva, T.J. (1998): *Predicción de la vida útil de forjados unidireccionales de hormigón mediante modelos matemáticos de deterioro*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.

Tadros, Th. F. (1987): *Solid/Liquid Dispersions*. Ed. Academic Press.

Takizaki, M. (1988): *Strength and elastic modulus of recycles aggregate concrete*. The second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. Tokio, Japan, pp. 557-564.

Tantaleán Vanini, G. (2004): *Recursos metalúrgicos*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú

Tattersall G. H., Banfill P.F.G (1983): *The Reology of Fresh Concrete*. Ed. Pitman Publishing.

Tixier R., Arino-Moreno A., Mobasher B. (1996): *Properties of cementitious mixture modified by copper slag*. Symposium: HH, Structure-Property Relationships in Hardened Cement Paste and Composites. Tucson, Arizona, USA: Minerals Research and Recovery.

Tixier R., Devaguptapu R., Mabasher B. (1997): *The effect of copper slag on the hydration and mechanical properties of cementitious mixtures*. Cement and Concrete Research, **27**, pp. 1569-1580

Torres Agredo J.: *Durabilidad de hormigones y morteros*. Tesis de pregrado. Universidad del Valle. Cali, Colombia.

Trtnik G., Kavcic F., Turk G. (2009): *Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks*. Ultrasonics, **49**, pp.53-60.

Tutti K. (1982): *Corrosion of steel in concrete*. Swedish Cement and Concrete Research Institute, pp. 4-82.

Ueno K., Kokubu K., Uji K. (2005): *A fundamental study on blending control of concrete containing slag fine aggregates*. In: Banthia et al. editors. Proceedings of the third international conference on construction materials: Performance, innovations and structural implications and mindess symposium, Vancouver, Canada. pp. 22-24.

Valcárcel Pérez J. (2008): *Instrucción para el hormigón estructural*. Programa de formación permanente. Departamento de Tecnología de la Construcción. E.T.S. Arquitectura de La Coruña.

Valenta O. (1969): *Kinetics of water permeability into concrete as an important factor of its deterioration and of reinforcement corrosion*. RILEM, International Symposium on the Durability of Concrete. Parte I, Praga.

Velázquez Navarro J. (2009): *Reología de pastas y morteros equivalentes de hormigones autocompactables*. Tesis doctoral Universidad de Málaga.

Vivian W.Y., Tam C.M., Wang Y. (2007): *Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach*. Construction and Building Materials, **21**, pp. 1928-1939

Wallewick O.H. (2004): *IBRI at our Service; Rheological Measurements on cement paste, Mortar and Concrete by use of a Coaxial Cylinder Viscometer*. IBRI (Icelanding Building Research Institute).

Wallevik J.E (2003): *Rheology of Particle Suspensions: Fresh Concrete, Mortar and Cement Pastewith various types of Lignosulfonates*. Tesis Doctoral. Department of Structural Engineering. The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

Wallevik J.E. (2009): *Rheological properties of cement paste: Thixotropic behaviour and structural breakdown*. Cement and Concrete Research, **39**, pp. 14-29.

Weeks C., Hand R.J., Sharp J.H. (2008): *Retardation of cement hydration caused by heavy metals present in ISF slag used as aggregate*. Cement and Concrete Composites, **30**, pp. 970-978.

Witte L.P., Backstrom J.E. (1951): *Some properties affecting the abrasion resistance of air-entrained concrete*. ASTM Proceedings, **51**, pp. 1141-1155.

World Copper Factbook 2012. International Copper Study Group.

Wu W., Zhang W., Ma G. (2010): *Optimum content of copper slag as a fine aggregate in high strength concrete*. Materials and Design, **31**, pp. 2878-2883

Wu W., Zhang W., Ma G. (2010): *Mechanical properties of cooper slag reinforced concrete under dynamic compression*. Construction and Building Materials, **24**, pp. 910-917.

Zega C.J., Taus V.L., Di Maio A.A. (2006): *Comportamiento físico químico de hormigones reciclados elaborados con canto rodado*. Boletín técnico IMME, Venezuela, **44**, pp. 17-26

Zong L. (2003): *The replacement of granulated copper slag for sand concrete*. Journal of Qingdao Institute of Architecture and Engineering, **24**, pp. 20-22

8.2 Normas

ACI 201.2R-01: *Guía durabilidad hormigón*. American Concrete Institute (ACI), 2001.

ACI 228.R-03: *In-Place Methods to estimate concrete strength*. American Concrete Institute (ACI), 2003.

ACI 302.1R-04: *Guide for concrete floor and slab construction*. American Concrete Institute (ACI), 2004.

ACI 316-84: *Building Code Requirements for structural concrete*. American Concrete Institute (ACI), 1984.

ASTM C 779:2012: *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces*. American Society for Testing and Materials (ASTM), 2012.

ASTM D 6527-00: *Standard test method for determining unsaturated and saturated hydraulic conductivity in porous by steady-state centrifugation*. American Society for Testing and Materials (ASTM), 2000.

BOE 10 noviembre 1989. Orden de 13 de octubre de 1989. *Residuos Tóxicos y Peligrosos. Métodos de caracterización.*

Código Modelo CEB-FIP 1990 para hormigón estructural. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. GEHO-CEB y ATEP, Madrid.

Código Técnico de la Edificación (2009): *Documento básico SE-AE. Seguridad Estructural. Acciones en la edificación. Anejo C: Prontuario de pesos y coeficientes de rozamiento interno.*

DIN 38414. *German standard methods for the examination of water, waste water and sludge; sludge and sediments (group S)*, 1989.

EHE-08: *Instrucción de Hormigón Estructural*. Serie Normativas, Ministerio de Fomento. 2ª edición, Ed. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento, febrero 2009.

ENV 197-1. *Cemento. Composición, especificaciones y criterios de conformidad. Cementos comunes*. Comité Europeo de Normalización, 1992.

EUROCÓDIGO 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación (ENV 1992-1-1:1991). Comité Europeo de Normalización (CEN).

IRAM 1627:1997: *Granulometría de agregados para hormigones*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación IRAM, 1997.

IRAM 1871:2004: *Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), 2004.

ISO 3310-1:2000: *Test sieves. Technical requirements and testing. Part 1: Test sieves of metal wire cloth*. ISO, 2000

ISO 3310-2:2013: *Test sieves. Technical requirements and testing. Part 2: Test sieves of perforated metal plate*. ISO, 2013.

Norma FEPA-42-F-84. Federación Europea de Fabricantes de Productos Abrasivos, 1984.

RC-08: *Instrucción para la Recepción de Cementos*. Serie Normativas, Ministerio de Fomento. 2ª edición, Ed. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento, 2009.

Real Decreto 849/1986, 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico que desarrolla los títulos preliminar, I, IV, V, VI, VII y VIII del texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, y última revisión 22 de septiembre de 2013.

UNE-EN 932-1:1997: *Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 1: Métodos de muestreo*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 1997.

UNE-EN 932-2:1999: *Ensayos para la determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 2: Métodos para la reducción de las muestras de laboratorio*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 1999.

UNE-EN 933-1:2012: *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2012.

UNE-EN 933-2: 1996: *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 1996.

UNE-EN 1097-6:2001/A1:2006: *Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.* Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2006.

UNE-EN 1744-1:2010+A1:2013: *Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico.* Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2013.

UNE 7050-3:1997: *Tamices y tamizado de ensayo. Parte 3: Exigencias técnicas y verificaciones de los tamices de ensayo de tela metálica.* Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 1997.

UNE-EN 12350-2:2009: *Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento.* Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009.

UNE-EN 12390-1:2013: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, medidas y otras características de las probetas y moldes.* Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2013.

UNE-EN 12390-2:2009: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia.* Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009.

UNE-EN 12390-3:2009/AC:2011: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión en probetas.* Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2011.

UNE-EN 12390-4:2001: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Características de las máquinas de ensayo.* Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2001.

UNE-EN 12390-5:2009: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a flexión de probetas*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009.

UNE-EN 12390-6:2010: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2010.

UNE-EN 12390-7:2009: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009.

UNE-EN 12390-8:2009: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009.

UNE-EN 12504-2:2013: *Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 2: Ensayos no destructivos. Determinación del índice de rebote*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2013.

UNE-EN 12504-4:2006: *Ensayos de hormigón de estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2006.

UNE-EN 12697-17:2006+A1:2007: *Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas en caliente. Parte 17: Pérdidas de partículas de una probeta de mezcla bituminosa drenante*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2007.

UNE-EN 12808-2:2009: *Materiales de rejuntado para baldosas cerámicas. Parte 2: Determinación de la resistencia a la abrasión*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009.

UNE 83115:1989 EX: *Áridos para hormigones. Medida del coeficiente de friabilidad de las arenas.* Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 1989.

UNE-83316:1996: *Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión.* Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 1996.

UNE 83993-1:2013: *Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la velocidad de penetración de la carbonatación en el hormigón endurecido. Parte 1: Método natural.* Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2013.

UNE 112011:2011: *Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio.* Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2011.

UNE 146507-1:1999 EX: *Determinación de la reactividad potencial de los áridos. Método químico. Parte 1: Determinación de la reactividad álcali-sílice y álcali-silicato.* Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 1999.

En la presente investigación se estudian hormigones con características diferentes a las del hormigón convencional, donde se ha sustituido el árido fino por escorias de cobre en diferentes proporciones.

Inicialmente se ha realizado una caracterización física, química y mineralógica de la escoria de cobre, así como una clasificación ambiental, obteniendo como resultado que se trata de un residuo no ecotóxico y que cumple con las exigencias de la instrucción de hormigón estructural EHE-08 para ser tratado como árido para hormigones.

Posteriormente se analiza la evolución de los nuevos hormigones desde su consistencia primaria hasta su consolidación final, mediante ensayos reológicos del mortero equivalente en estado fresco y mediante el estudio de probetas del propio hormigón en estado endurecido, comparando los resultados con un hormigón de referencia que no tiene escorias.

Los resultados medidos en estado fresco a través del mortero equivalente, señalan que se obtienen hormigones de buena trabajabilidad, produciéndose un aumento del límite de fluencia y de la capacidad autocompactante, no observándose variaciones apreciables en la viscosidad plástica.

Las mediciones efectuadas en el estado endurecido indican un aumento de todas las propiedades resistentes del hormigón, así como un incremento del módulo de elasticidad y una disminución de la porosidad, succión y permeabilidad lo que indica que la adición de escorias de cobre mejora notablemente la durabilidad del hormigón al disminuir el acceso de los agentes agresivos, eliminando o retardando el ataque sobre las armaduras y la degradación interna del mismo.

En base a los resultados obtenidos, el uso de las escorias de cobre es viable para la elaboración de hormigones dado que se comporta como un árido con capacidad puzolánica significativa para tiempos iguales o superiores a 90 días mejorando notablemente todas las propiedades del hormigón.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA