



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

**UNIVERSIDAD DE MÁLAGA**

**TESIS DOCTORAL**

**INDUSTRIALIZACIÓN DE PROCESOS Y  
VALORACIÓN DE RESIDUOS  
SIDERÚRGICOS.**

**DOCTORANDO:**

*María Eugenia Parrón Rubio*

**DIRECTORES DE TESIS:**

*Dra. María Dolores Rubio Cintas*

*Dr. Antonio González Herrera*

UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



*Málaga 2018*



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

AUTOR: María Eugenia Parrón Rubio

 <http://orcid.org/0000-0002-5973-6341>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

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](http://riuma.uma.es)



*A mi marido y a mi hijo Miguel,  
A mis padres y hermanas.*



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

*El ayer es historia,  
el mañana un misterio,  
pero el hoy es un regalo....  
Por eso se llama **presente**.*

Eleanor Roosevelt



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## **AGRADECIMIENTOS:**

Primero agradecer a mis directores de tesis, Lola Rubio y Antonio González.

Antonio, a ti agradecerte que hayas aparecido en este último año y medio, y haber querido ayudarme y aconsejarme tanto con los artículos como con la tesis. Sin esa ayuda me hubiese costado mucho más llegar hasta donde ahora mismo me encuentro.

A Lola, que no sólo es mi directora de tesis sino que además es mi madre, gracias a ella y a sus conocimientos acerca del hormigón me adentró en su estudio cuando más lo necesitaba. Gracias por confiar en que podía, y por esa ayuda incondicional que has tenido, aunque a veces ha resultado difícil por el carácter que tenemos las dos pero que, siendo madre e hija, es imposible no solucionarlo. Con ella, siempre mi padre, sin el cual tampoco hubiese sido fácil llegar hasta donde he llegado, solucionando los problemas a los que yo no le veía solución y que, aunque no haya sido director, ha ejercido también como tal. A los dos deciros que os quiero muchísimo y que espero que, aunque las cosas no sean fáciles, teneros siempre a mi lado, y que gracias al ejemplo de constancia y dedicación que me habéis inculcado hoy puedo presentar este trabajo y llegar a ser doctora.

A José Ramón de Andrés, por los años en los que ha sido director de la tesis, muchas gracias por tu ayuda y por tu tiempo.

A mi compañera de fatigas, además de amiga, Paqui. Sin ti todo esto me hubiese costado mucho más. Gracias por estar siempre escuchando y animando cuando las cosas no nos han salido como nos gustaría, y por hacer todo lo que haces por mí para que pueda salir adelante buscando soluciones para todo ello. Así que sólo puedo darte las gracias y decirte que ahora te toca a ti darle el empujoncito que te falta para también terminarlo lo antes posible.

Por supuesto agradecer a los dos técnicos de laboratorio de la Politécnica de Algeciras, Manolo y María José. Sin su ayuda incansable y con los contratiempos que conlleva el fabricar hormigón, han estado siempre ahí para darme su ayuda y sus palabras de ánimo.

A Miguel Oliveira, mi tutor en el Algarve. Gracias a la oportunidad que me has dado estando allí hoy, además, puedo presentar mi tesis con mención internacional. Muchas gracias por todo ello y ahora nos queda acabar con los ensayos que hemos realizado estos meses.

A José María Pereira, Pedro Avellanosa y la empresa Drace Infraestructuras, por facilitarme los datos obtenidos en sus ensayos y permitirme publicarlos, para darle a esta tesis un mayor valor. Muchas gracias por vuestra colaboración y disponibilidad en todo momento.

También agradecer a todas las personas que, con su pequeño granito de arena, han hecho posible que llegue a ser doctora.

A Alberto, por las horas de más que hemos echado con las traducciones de inglés. Gracias por tu tiempo, y espero que te lo pienses y sigas con nosotros.

A David Sales, por ser la persona que me dio el primer consejo para comenzar a escribir los artículos antes de enfrentarme al folio en blanco.

A mi marido, por aguantarme durante días, dándole la lata durante estos años de investigación, aguantando mis malos y buenos días, y escuchándome y dándome ánimo cuando más lo necesitaba. Por todo ello te mereces llevar el título de “Doctor Consorte”.

A mi niño Miguel, que a sus cinco años me alegra el día y se me olvidan los problemas que pueda tener los días que no venía con todo el ánimo que debiera.

A los dos os quiero con toda mi alma.

Y a todas las personas, tanto familia como amigos que siempre han tenido una palabra de apoyo y ánimo en algún momento de estos cuatro años.

Y sobre todo agradecer a Dios que me haya colocado estratégicamente a todas estas personas y me haya dado la fuerza necesaria para llegar al día de hoy y presentar y defender esta tesis doctoral.

## RESUMEN

Cada día es más conocido en la sociedad, empresas e instituciones el concepto de sostenibilidad.

Diremos que algo es sostenible si la relación que establece ese algo con el resto del entorno no llegará a ser una agresión, ni a la hora de su utilización, ni una vez que deje de realizar la función para la cual se diseñó. Es decir, que su destrucción no proporciona ningún peligro para el medio ambiente, por lo que debemos de llegar a un ciclo en el cual hay una relación sostenible en todos los ámbitos de la vida humana, para así garantizarnos un futuro a largo plazo del ecosistema en el que vivimos.

Para definir “sostenibilidad”, decimos que es la capacidad de continuar indefinidamente un comportamiento determinado. Por tanto, supone conservar y proteger el medio ambiente de forma indefinida. Para ello necesitamos un sistema en el cual la principal prioridad sea el reciclado, estando todo esto interrelacionado con lo que hoy en día se denomina “Economía Circular”. Es decir, todos los productos consumidos generan un residuo, tanto a la hora de producirse, como a la hora de consumirse, y este residuo debe ser reutilizado para que no vaya a vertedero.

Este concepto aparece porque hasta ahora vivíamos en un sistema económico lineal (extracción, fabricación, utilización y eliminación) el cual ha alcanzado sus límites. Por lo que este nuevo modelo de economía utiliza y optimiza los residuos, los flujos producidos por otros materiales, y siendo su objetivo la eficiencia del uso de los recursos.

Así pues, esta tesis ha surgido de una idea de llevar a la práctica este tipo de economía circular e intentar minimizar lo máximo posible el impacto ambiental que se genera en la obra civil. Y en particular, en la fabricación de hormigón, ya que sus componentes (áridos) son la segunda materia prima más consumida en la sociedad después del agua. Por lo tanto, es necesario darle una atención especial y dedicarle tiempo a la investigación del mismo, para desarrollar un material lo más ecológico posible, reutilizando y/o valorizando algunos de los residuos que se producen en algunas industrias, ya que el consumo de áridos es limitado y está acabando con grandes extensiones de zonas naturales, las cuales en unos años desaparecerán.

En consecuencia, el objetivo principal de esta tesis es sustituir la mayor cantidad de cemento por algún residuo el cual aporte los mismos beneficios al hormigón. Se decidió que fuese el cemento el material a sustituir porque éste, además de la cantidad de materia prima que necesita para su fabricación, también es un material que a la hora de producirlo supone un elevado consumo de energía producido por los hornos que lo fabrica, ya que, para llegar a obtenerlo, los combustibles que se utilizan para la producción del mismo aumentan las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) al medio ambiente.

Para la investigación en la sustitución de este material vamos a centrarnos en las escorias siderúrgicas de distintas factorías de España. Analizaremos su composición química y veremos de qué forma se comportan a la hora de actuar como conglomerante en el hormigón. Es decir, estudiaremos las características físicas, mecánicas y durables que se obtienen una vez se han sustituido estas escorias en distintos porcentajes por cemento.

Este material ha sido elegido ya que diversas investigaciones nos llevan a pensar que sus propiedades químicas son muy similares a las del cemento, y además se genera una gran cantidad de las mismas en la industria siderúrgica, lo cual también acarrea un problema medio ambiental a las mismas a la hora de llevarlas a vertedero.

Por ello, profundizaremos en las propiedades tanto físicas como mecánicas para la caracterización del nuevo hormigón con escorias siderúrgicas.

Para analizar lo expuesto anteriormente, se han establecido distintos capítulos:

En primer lugar, un capítulo de antecedentes o estado del arte. En él se muestra todo lo estudiado hasta ahora en relación a las escorias siderúrgicas en la construcción ya que, como veremos, hay muchas investigaciones en las cuales estos materiales se les han dado un uso en distintos campos de la ingeniería civil. Además, en este capítulo se encuentran los objetivos principales de la tesis y las hipótesis de las cuales partimos, además de su estructuración.

El segundo capítulo, “Acero, Escoria y Hormigón”, muestra los conceptos principales que nos abarca la tesis. En primer lugar, desarrollamos y definimos de dónde proviene el material a sustituir, escorias, por lo que se profundiza en ellas desde que se comienza a utilizar el hierro, pasando por los primeros hornos donde se producía acero hasta llegar a día de hoy, a la gran variedad de los mismos que se fabrican y cómo funcionan cada uno de ellos. Por ende, la cantidad de escorias de distintas naturalezas que se producen y sus distintas propiedades, tanto físicas como químicas, las cuales analizamos y comparamos, centrándonos en las dos que nos competen en esta tesis, que son las escorias de alto horno (GGBFS) y las escorias blancas de hornos de arco eléctrico (LFS), teniendo de esta última dos tipos de distintas factorías de España.

En segundo lugar, el capítulo se centra en el hormigón y la historia del mismo desde sus comienzos, cuando se descubrió como el polvo de las cenizas se solidificaba hasta el día de hoy, y llegando por cómo se comenzó a armar con aceros, llamando a este nuevo tipo hormigón “hierro con cemento”, que es lo que hoy en día conocemos como “hormigón armado”. En consecuencia, como vemos en este capítulo, acero, escorias y hormigón están íntimamente relacionados en la obra civil. Por esta razón, es un claro ejemplo de lo que queremos conseguir, una economía circular completa: de cómo desarrollar aceros para construcción y ese deshecho que se produce al generarlo, a su aprovechamiento en la misma construcción, pero en la masa cementante que lo envuelve.

Una vez hemos argumentado estos dos términos pasamos al capítulo 3: “Materiales, Dosificación y Fabricación del Hormigón”. Comenzamos con el desarrollo de los materiales que utilizaremos para la elaboración del hormigón. Para ello, separaremos uno a uno todos ellos, además de los distintos tipos de escoria que emplearemos para la sustitución del cemento. En este estudio se observa como cada una de las escorias tienen composiciones físicas y químicas distintas.

En nuestro caso, para hacerlas granulométricamente iguales al cemento, lo que hemos hecho con dos de ellas (dos tipos de escorias blancas de horno eléctrico (LFS), las cuales no tienen la misma granulometría), ha sido tamizarlas hasta lograr obtenerla.

La otra, que son escorias de alto horno (GGBFS), la empresa que nos la suministraba ya tenía esa granulometría, al haber pasado por un tratamiento físico con molinos verticales de rodillos.

En este capítulo veremos también cómo son cada una de ellas en su composición química, y esta diferencia sobre todo en el dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) que existe entre ambas. Y esto es así ya que las escorias de alto horno tienen un contenido de este compuesto del 32%, mientras que las de arco eléctrico, una contiene un 18%, y la otra incluso menos un 13%.

Este compuesto, junto con la composición química del cemento, es esencial para llegar a la conclusión de porqué las escorias de alto horno tienen un mejor comportamiento mecánico a la hora de utilizarlo como material cementante que las escorias de arco eléctrico, ya que dicho compuesto tiene la capacidad de generar un gel llamado tobermorita (hidrosilicatos de calcio), que es el causante de otorgarle al hormigón una mayor resistencia. En los siguientes capítulos veremos cómo se cumple esta premisa con las escorias que contienen mayor cantidad de este compuesto.

El cemento utilizado para la elaboración de todos los tipos de mezclas ha sido el Cemento Portland CEM I 52,5 R, cemento de alta resistencia y sin ningún tipo de adición, para que no tuviese ninguna repercusión en los resultados.

Una vez hemos estudiado las características de cada uno de los componentes del hormigón, la siguiente parte de este capítulo es la dosificación del hormigón con la cual hemos trabajado durante toda la investigación. Ha sido una dosificación que llama la atención por su consistencia, que para este proyecto ha sido seca, ya que esta tesis surge de un proyecto de colaboración con las empresas Drace Infraestructuras S.A. y Geotecnia y Cimientos S.A. concedido por el organismo público CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), en el que su fin principal es la fabricación de elementos prefabricados de hormigón.

Uno de los elementos a fabricar eran dovelas prefabricadas, para las cuales es necesario este tipo de consistencias, pero al final de la investigación se decidió que las piezas a fabricar serían traviesas para las vías de los trenes, ya que tienen una normativa mucho más exigente. Entonces se pensó que, si cumplía para este tipo de piezas, cumpliría para el resto, por lo tanto se tuvo que cambiar la dosificación del material sin que esta

permuta supusiera ningún problema, ya que se utiliza la fórmula que tienen en fábrica y se sustituye el cemento por la escoria en el porcentaje elegido, que en este caso ha sido del 30%. En conclusión, aquí veremos los materiales que vamos a emplear y las sustituciones que se van a fabricar en cada una de las amasadas de escorias por cemento, además de hacer un desarrollo del proceso de elaboración que hemos tenido para la fabricación del mismo. Por último se muestra todo el material de laboratorio que se va a utilizar para la elaboración de las probetas (moldes, hormigonera, etc...)

Los siguientes capítulos ya muestran directamente los ensayos (se desarrolla el método utilizado para los mismos), resultados a los que han sido sometidos los distintos tipos de mezclas que hemos elaborado, la discusión de los mismos y las conclusiones a las que se han llegado en cada uno.

En el capítulo 4, “Ensayos físicos del material”, vamos a desarrollar los siguientes ensayos, consistencia, densidad, porosidad, absorción, abrasión, succión del hormigón resultante. El capítulo comienza definiendo la codificación que se va a utilizar para las distintas mezclas que se van a utilizar y, a partir de ahí, se explican los ensayos y resultados que se obtienen de los mismos.

#### Ensayos de Consistencia.-

Se define el modo de elaboración del ensayo de consistencia, que se realiza mediante el cono de Abrams, la consistencia necesaria para los distintos tipos de mezcla debe ser seca que, como se ha comentado anteriormente, es la que se requiere para el proyecto por el cual se ha desarrollado esta tesis. Una vez han sido elaboradas todas las mezclas, se les realizó el ensayo dando un cono de Abrams entre 0 y 2 cm. Por lo tanto, todas las mezclas han obtenido la consistencia requerida, pero siendo las escorias de arco eléctrico (LFS) y, en particular, las M3, en las que se ha visto cómo este asiento ha sido menor que en el resto. Es decir, que se ha obtenido una consistencia más seca a la del hormigón convencional, mientras que las escorias de alto horno han tenido un comportamiento similar al del hormigón.

#### Ensayos para la obtención de la Densidad.-

Para la elaboración de este ensayo se han utilizado probetas de 10 cm de arista, y pesando la probeta saturada de agua y completamente seca. En la densidad de las mezclas con cada una de las escorias no se aprecian grandes diferencias: todas ellas mantienen una densidad alrededor de  $2500 \text{ kg/m}^3$ , a excepción de la escoria M2, que a medida que se iba sustituyendo la cantidad de escoria por cemento iba disminuyendo su densidad hasta perder un 5% de la misma con respecto al hormigón convencional.

#### Ensayos para la determinación de la Porosidad.-

Sostendremos que esta propiedad es una de las más importantes de las mezclas, ya que la cantidad de huecos que se generan en el hormigón aportan una mayor o menor capacidad resistente al material. Veremos en capítulos posteriores curiosidades que se dan en esta tesis con respecto a una de las escorias.

Primero se explica qué es la porosidad y los tipos que hay de la misma. Existe porosidad relativa o real, siendo la relativa la que se puede medir fácilmente por el método que se va a utilizar en esta tesis doctoral.

Sólo se sabe cual es la cantidad de poros existentes a los cuales les puede entrar agua mediante capilaridad, pero se desconoce la porosidad real, ya que en estos materiales pueden formarse huecos, los cuales quedan bloqueados por partículas y enlaces químicos que se hacen inaccesibles para el agua mediante capilaridad. Por lo tanto, para saber la real habría que someter a la probeta a otro tipo de ensayos que no son parte de esta tesis.

Los datos obtenidos en la porosidad concuerdan con la densidad de cada una de las mezclas. Es decir, la mezcla más porosa es la M2, teniendo esto sentido ya que, como hemos comentado, la densidad M2 era la menos densa, por lo tanto nos lleva a pensar que es la que contiene un mayor número de huecos.

También se observa como las mezclas con escorias M3 son las menos porosas ya que, en este caso, su densidad era la mayor de todas, aunque no en un porcentaje muy elevado.

En la segunda parte de este capítulo tenemos ensayos tales como la abrasión superficial y la succión.

El ensayo de abrasión superficial al que hemos sometido este tipo de hormigón sostenible se ha elaborado con las probetas cúbicas de 10 cm de arista, a las cuales hemos sometido a un proceso de desgaste con un abrasivo y se ha comprobado la huella que deja en la probeta. Esta huella producida se mide con un calibre haciendo la media de tres medidas.

Los resultados nos hacen ver que las escorias que más se asemejan al hormigón convencional son las escorias de alto horno (GGBFS), mientras que no ocurrió lo mismo con las escorias de arco eléctrico (LFS), llegando a tener una de ellas hasta un rozamiento mayor del 60% que las escorias convencionales.

Ensayos para la preparación de la Succión.-

Este ensayo es importante para saber la capacidad de absorber agua por capilaridad que tiene el hormigón, relacionándose con la porosidad relativa. Por lo tanto, si se tiene una baja velocidad de succión, esto nos indica que tendríamos un material poco poroso capilarmente. Este ensayo se realiza con una probeta de 10 cm de arista y completamente seca, y lo que se desea es que el agua entre por una de las caras.

Para ello, se pintan los laterales 5mm para que sólo penetre el agua por esa cara, y se sumerge la probeta en 1-2 cm de agua. Se van anotando medidas cada cierto tiempo y estas nos indican la capacidad de succión de agua. En nuestro caso, una vez sometidas todas las probetas a este ensayo, se vio que ocurría lo mismo que en la porosidad. Es decir, que las mezclas realizadas con escoria M1 succionan menos que las de hormigón convencional, al igual que ocurre con las M3, aunque en menor proporción que las M1.

No ocurre lo mismo con las mezclas realizadas para M2, que succionan más cantidad de agua que las de hormigón convencional.

Por lo tanto, como conclusión a este capítulo, hemos visto como las escorias con mejor comportamiento en todos los ensayos son las M1, siendo no sólo las que mejoran con respecto a las otras dos, sino que dan mejores resultados que en las del hormigón convencional.

El siguiente capítulo es el 5, “Ensayos mecánicos”, por lo que veremos cómo se comportan las probetas de las distintas mezclas elaboradas a compresión y flexión. Además, en este capítulo, se ha calculado mediante la resistencia a compresión el módulo elástico y se ha hecho una comparación entre distintos métodos para calcularlo.

En cada uno de los ensayos, lo primero que se desarrolla es la maquinaria y probetas que se han utilizado a la hora de calcular cada una de las resistencias.

Ensayos de resistencia a compresión.-

Para el cálculo de la resistencia a compresión hemos utilizado probetas de 10 cm de aristas, así como una prensa automática de 2.000 KN de capacidad.

Los resultados obtenidos en estas pruebas nos llevan a pensar que, para las sustituciones altas, la escoria blanca de horno de arco eléctrico (LFS) tiene una pérdida de resistencia mayor que para las de alto horno (GGBFS) y el de hormigón convencional, obteniendo con una de éstas valores mucho más bajos que con la primera. Es la escoria M2 la que tiene un peor comportamiento en la resistencia a compresión, ya que llega a perder hasta casi un 60% de la resistencia con una sustitución del 40% de cemento.

Por el contrario tenemos las de alto horno, que aumentan hasta un 10 % de la resistencia a 90 días. Aunque este tipo de escorias tienen un problema, y es que su fraguado es más lento que el del hormigón convencional, ya que a 1 día llega a perder hasta un 50% de la resistencia a compresión en la sustitución del 40%, aunque a 7 días vemos como ya se ha igualado con la mezcla patrón.

Resistencia a flexotracción.-

Para la resistencia a flexión, las probetas utilizadas han sido de 4x4x16 cm. Esta resistencia se ha calculado mediante la aplicación uniforme de la carga centrada.

Una vez realizados estos ensayos, se ve como ocurre algo parecido que en la resistencia a compresión, pero no en el mismo porcentaje. Es decir, las escorias de alto horno se comportan a 28 y 90 días de la misma forma que el hormigón convencional, mientras que las escorias procedentes de arco eléctrico en las sustituciones del 23% y 25% se mantiene como la mezcla patrón, y es a partir del 30% cuando disminuye esta resistencia y del 10%.

Por lo que diremos que en este estudio las escorias de alto horno (GGBFS) tienen a compresión y a flexión cualidades parecidas e incluso mejores que el hormigón convencional, mientras que las escorias de arco eléctrico (LFS) tienen muy malas

propiedades a compresión, ya que en cualquiera de sus porcentajes de sustitución pierden resistencia. Pero a flexotracción, hasta el 25% funcionan de la misma manera que la mezcla sin sustitución, y comienza a perder a partir del 30%, pero sólo hasta un 10% de la resistencia. Por lo tanto, a este tipo de escorias se le podría dar un uso no estructural, pero sí para fabricar hormigones, en los cuales no sea necesaria la resistencia a compresión.

El siguiente apartado que vemos es el módulo elástico, sin entrar en profundidad. Se han elaborado unas tablas con las distintas escorias y se ha calculado el módulo elástico con distintas fórmulas para ello, realizándose una comparación entre todas ellas.

Se han calculado seis módulos de elasticidad, algunos de ellos formulaciones sólo para hormigones convencionales, y otras incluyen a los hormigones reciclados.

Los resultados obtenidos nos muestran como casi todos los modelos son parecidos. Oscilan entre un 10% y el 15% con el de referencia que, en nuestro caso, sería el calculado con la EHE-08. El único que difiere de esto es Takizaki, cuya diferencia con el resto de autores es de un 62%, por lo que vamos no lo vamos a tener en cuenta.

El módulo de elasticidad, la retracción, y la fluencia son las propiedades que más se ven afectadas con tal sustitución. Así, la docilidad aumenta progresivamente con el contenido de escoria reciclada y con la relación entre el cemento y el agua, que como línea futura de investigación, habrá de encontrar un importante significado en el momento de su dosificación.

Al final de este capítulo se hace una comparación entre los porcentajes de pérdida o aumento de resistencias a compresión y a flexión, donde vemos con más claridad que se cumple lo dicho anteriormente: que las escorias no se correlacionan en pérdida de resistencia a flexión y a compresión.

Por último, se establece una conclusión general, en la que se deja claro que las escorias que tienen mejores características mecánico-resistentes son las escorias de alto horno ya que, no sólo igualan las resistencias del hormigón convencional, sino que las mejora.

Para las otras dos escorias se le puede buscar otra solución no estructural para no tener que ser depositadas en vertedero.

Otro factor que se destaca en este capítulo es que en sustituciones hasta el 23% de escorias de arco eléctrico por cemento y para la resistencia a flexión, lo podríamos considerar como óptimo ya que la pérdida de resistencia no llega al 10%.

A continuación tenemos el capítulo 6: "Ensayos de durabilidad y ambientales". En este capítulo, comenzamos con los ensayos de Penetración de agua, que es un factor importante en la durabilidad del material, ya que nos hacemos una idea de la cantidad de agua que el material puede absorber si se somete a la presión del agua.

Es un dato que hay que conocer ya que, si el hormigón va armado y penetra mucha cantidad de agua, esta armadura podría corroerse y, de esta forma, la estructura perdería resistencia.

Los ensayos se realizan con probetas cilíndricas de 15x30 cm, con una edad de más de 28 días. Se desecan en la estufa durante más de 48h y se someten a una presión de  $500 \pm 50$  kPa durante 3 días. Una vez transcurrido el tiempo, se rompen en dos mitades perpendiculares y se mide la cantidad de agua que ha penetrado.

Los resultados obtenidos en estas pruebas han sido satisfactorios para las mezclas con escorias M1 y M2 ya que cumplen por normativa las exigencias de la misma, siendo las M1 las que, además, mejoran la permeabilidad del hormigón convencional; mientras que las M2 las empeoran, pero sin pasarse del límite. Las escorias M3, en cambio, han sido las que peores resultados han dado, ya que no sólo no cumplen la normativa, sino que además la sobrepasan por mucho.

Esto es curioso porque este tipo de mezclas eran las menos porosas, lo que nos lleva a pensar que la porosidad de éstas es de tipo real. Es decir, mediante capilaridad es difícil llegar a los huecos internos pero, en el momento en el que se le añade una presión, los enlaces entre las partículas, al ser débiles, se rompen, por lo que se desplazan permitiendo la entrada del agua.

Al final de este ensayo se hace una comparativa con los tres tipos de mezclas y la porosidad, absorción y penetración de agua, en la que se observa como en las escorias M1 y M2 están en correlación los tres datos, mientras que en las mezclas M3 la penetración de agua se dispara.

Seguido al ensayo de penetración de agua tenemos el ensayo de carbonatación, que nos dará una idea para saber si el hormigón es un buen protector para la armadura o permite la entrada de oxígeno, que haría que se corroyese el armado. La forma de realizar este ensayo es con las probetas de 10 cm de arista. Se rompen a la mitad y se le aplica una solución de fenolftaleína por la cual, en función de los tonos que coja el material, diremos si la mezcla puede carbonatarse o no.

Observamos como el hormigón fabricado con las distintas escorias y porcentajes se comporta exactamente igual que el convencional. Es decir, ninguna de las probetas carbonata, llegándose a alcanzar con las escorias de alto horno (GGBSF) tonos rojos-púrpuras, lo que nos lleva a decir que los valores de pH en las probetas están por encima de 9.5.

Las escorias de horno de arco eléctrico (LFS) no carbonatan al igual que ocurre con las anteriores, pero su color es menos intenso. Por lo tanto, los valores de pH que tienen deben estar entre 8 y 9.5.

El siguiente ensayo es el ambiental, lo que supone medir la lixiviación de las mezclas realizadas, ya que se debe estudiar el efecto que puedan causar las escorias una vez encapsuladas y colocadas en el medio.

Lo primero que nos encontramos son generalidades acerca de lixiviado, los factores tanto físicos como químicos que influyen en las muestras, así como las diversas normativas para realizar los ensayos de lixiviado. Estas normativas también proponen opciones para reducir la solubilidad de las escorias, como estabilización, solidificación,

vitrificación y extracción química. En nuestro caso hemos utilizado un proceso de estabilización-solidificación.

Para la realización de este ensayo se ha tomado un trozo de cada probeta rota para que estuviese en las peores condiciones, y se ha realizado un análisis de lixiviado en la sustitución de escoria por cemento al 30% de las 3 escorias y se ha hecho una adicional con las escorias M1 sustituyendo el 40% de las mismas, ya que proporcionan al material similares características a las del cemento. Se tuvieron 48 h en un litro de agua destilada, y esta agua se mandó analizar a un laboratorio externo. Los resultados obtenidos, y teniendo en cuenta los valores máximos permitidos por las DG 4291, nos indican que el uso de este tipo de mezclas, una vez fuesen puestas en servicio, no superarían estos valores.

Uno de los valores más importantes es el Cromo, y observamos que estas mezclas disminuyen dichos valores que se generan en la muestra sin sustitución. En el caso opuesto tenemos el Aluminio, que aumenta su valor en la sustitución de escoria al 40% hasta tres veces. Pero una vez comprobados los valores máximos admisibles en el medio, para el Aluminio no hay restricciones, por lo tanto, no influye a la hora de poner el hormigón en servicio.

Así que, el encapsulamiento de cualquiera de las tres escorias lo que hace es que este metal se diluya en la matriz cementosa sin generar peligro ambiental una vez sea colocado en el medio.

Por último, las conclusiones finales a este capítulo, en las que al igual que en los anteriores vemos como las escorias de alto horno son las apropiadas para la sustitución del cemento, ya que mejoran todos los ensayos de durabilidad del hormigón, y mantiene los valores de lixiviados dentro de la normativa para su puesta en servicio.

El capítulo 7, “Aplicación práctica de la nueva matriz cementante”, se muestran las piezas prefabricadas realizadas por la empresa Drace Infraestructuras en la Fábrica de traviesas de Sagunto con las escorias de alto horno. Se decidió hacer con este tipo de escorias ya que son las que proporcionaban mejores resultados con porcentajes de sustitución mayores en todos sus ensayos realizados. Se ejecutaron traviesas y dovelas sustituyendo el 30% y el 50% (la empresa al ver los buenos resultados obtenidos en laboratorio decidió ampliar el porcentaje de sustitución un 10%).

Se decidieron hacer estos dos tipos de piezas ya que las dovelas es para lo que se pensó en un principio, y al final también se decidieron traviesas, ya que son los prefabricados que tienen que cumplir una normativa más estricta (Adif especificación técnica 03.360.571.8 Traviesas monobloques de hormigón pretensado). Por lo tanto, si cumplía para este tipo de piezas cumpliría para el resto.

Se realizaron dos tipos de pruebas, las primeras de laboratorio en la fábrica, de compresión, tracción indirecta y flexotracción al hormigón en masa y utilizando moldes de 15x15x15 cm. Los resultados de estas pruebas nos valen tanto para las traviesas como para las dovelas.

En la fabricación de la mezcla se observaron peculiaridades tales como que el material fluidifica más cuando se adiciona la escoria por encima del hormigón convencional.

Aunque parecía sangrado, no se ve agua superficial. Actúa bien con la vibración y no segrega el material. Por último se observó que es un material muy cohesivo y difícil de coger con la pala.

En cuanto a los resultados de resistencia obtenidos en laboratorio, se observa en el porcentaje del 30% que la resistencia a compresión a 48 horas cumple con la normativa, pero muy justo, mientras que a 28 días ya si alcanza una resistencia mayor a la exigida en la especificación, pero sin alcanzar los valores del hormigón convencional. El resto de ensayos tales como flexión y tracción, tanto a 7 como a 28 días, alcanza la resistencia requerida para las traviesas, aunque sin alcanzar las resistencias obtenidas en las mezclas convencionales.

Para la sustitución del 50%, se ve como ocurría en nuestros ensayos que en las primeras horas el hormigón con mayor sustitución endurecía de forma más lenta, ya que a 48h no cumple la normativa de traviesas para la rotura a compresión. Pero con el resto de ensayos como ocurre con la sustitución al 30%, ya alcanza la resistencia requerida para dichas piezas.

Los otros ensayos que se le hicieron a las traviesas fueron los de la flexión estática de la Sección Central y flexión estática de la Sección Bajo Carril completo hasta llegar a rotura.

Los resultados para las pruebas fueron satisfactorios, ya que todos alcanzaron la resistencia que se les pedía casi igualando las fabricadas con hormigón convencional.

Y por último, se le realizó una inspección ocular a las dovelas y se vio que el aspecto es buenos, sin coqueras y sin oclusiones.

Por lo tanto como conclusión de este capítulo, diremos que la sustitución de cemento por escorias de alto horno para piezas prefabricadas es un buen modo de contribuir con el medio ambiente, ya que se comportan bien para este tipo de piezas. Habría que ver la forma de que su endurecimiento se acelerara mediante algún aditivo.

En el capítulo 8, ya se obtienen las conclusiones finales y futuras líneas de investigación.

Como conclusión final y después de examinar todos los ensayos realizados, se concluye que la escoria que mejor funciona como sustitución de cemento, es la escoria de alto horno, ya que como se ha comprobado, tienen resultados iguales e incluso mejores que el hormigón convencional.

Para las escorias de arco eléctrico, se pueden buscar otros usos, ya sea sustituyéndolas en la matriz cementosa por cemento, o por áridos.

A raíz de esta investigación hay diversas líneas de investigación, como sería intentar llegar a conseguir un hormigón lo más ecológico posible, es decir, sustituyendo tanto cemento como áridos por escorias siderúrgicas.

Además de ver el comportamiento de estas escorias en otro tipo de matrices cementantes, como son lechadas, morteros y hormigón ultra higt.

## ABSTRACT

The concept of sustainability is becoming widespread every day in society, enterprises and institutions.

Defining something as sustainable means that the relationship that it establishes with the environment does not represent an aggression or a threat to the latter neither when it is being utilized nor when it stops performing the function for which was designed. That is to say that its destruction does not represent a threat to the environment. In this way, we must reach to a state in which there are sustainable relationships in every area of human life in order to guarantee its survival, in other words, ensuring a future in the long-term in the ecosystem in which we live.

In order to define precisely “sustainability”, we can say that is the ability to continue a certain behavior indefinitely. Therefore, it means preserving and protecting the environment in an indefinite way. To make this happen we need a system in which the main priority is recycling. Everything mentioned above is related to what is called the “Circular Economy”. This means that every consumption product generates a waste not only when it is produced but also at the consumption stage and this waste must be valorized in order to avoid being end up in a landfill.

This concept showed up because the lineal economy system in which we are immersed nowadays (extraction, manufacture, consumption and elimination) is reaching its limits. This new model for the economy uses the resources optimizing them and the flows of waste generated by other products and its objective is the efficiency in the use of resources.

Therefore, this thesis has emerged from the idea of putting into practice this type of circular economy and to make an attempt to minimize the impact that civil engineering causes to the environment and, particularly, in the manufacturing of concrete given that one of the resources used in this industry, aggregates, is one of the most consumed raw materials in society together with water. Therefore, it is necessary to pay special attention and to devote time to research in this industry in order to develop a final product as eco-friendly as possible valorizing some of the wastes generated in the manufacturing process since the consumption of aggregates as raw material is limited and nowadays its extraction is destroying vast natural areas that are in risk of disappearance.

As a consequence, the main objective of this thesis is to substitute as more cement as possible by some waste but without compromising the mechanical and durability behavior of the concrete. The decision of substituting the cement, among any other constituent of concrete, was made due to both the high amount of raw material needed to manufacture cement and the great amount of energy consumed in the process in clinker furnaces. Furthermore, the fuel used in the production of the cement generates harmful emissions to the environment such as carbon dioxide (CO<sub>2</sub>).

In the research of the substitution of this constituent of concrete we will focus on the use of steelmaking slags from different locations in Spain. We will study their chemical composition and analyze how they behave when comprising the conglomerate matrix of concrete. This means that we will study, using different cement substitution percentages, the physical and mechanical properties and the durability of the final concrete.

The choice of this type of waste has been made because several researches has led us to think that its chemical properties are very similar to those of the cement and because the amount of waste generated in the steelmaking industry is huge, entailing an important environmental issue when deposited in landfills.

Therefore, we will analyze deeply the properties both physical and mechanical in order to obtain a proper characterization of the resulting concrete with steel slags as partial constituent.

Several chapters have been established to analyzed the foregoing:

First of all, this thesis includes a chapter describing the state of the art in which the known state of this field of engineering will be explained, particularly related to the use of steelmaking slags in construction given that, as it will be shown, there are many researches in which this type of waste has been introduced in several areas of civil engineering. Furthermore, this chapter contains the main objectives of the thesis and the hypotheses on which the research is based and the description of the thesis structure.

The second chapter “Steel, slag and concrete”, contains the two main concepts that this thesis covers. In the first place, we develop and define the origin of the waste used in the substitution: steelmaking slags. This comprises the description of the manufacture process of steel both historically and in the present factories, explaining the different types of furnaces and industrial processes used nowadays and the consequent influence on the type of waste or slag produced by every and each one of them. The chemical and physical differences of the slags produced will be described and analyzed making finally a comparison focusing on the two types of slags used in this research: ground granulated blast furnace slags (GGBFS) and ladle furnace slags (LFS), the latter being produced in two types of factories in Spain.

This chapter also contains a description of the history of concrete since its beginnings when the mechanism of fly ash solidification was discovered to this day, describing the different advances in concrete technology such as the crucial contribution of adding steel bars to the concrete to shape a versatile structural component giving rise to what is now known as reinforced concrete, the most widely used structural material in civil engineering. As a consequence, in this chapter we can observe the intimate relationship between steel and concrete in civil engineering and is a perfect example of what we want to achieve, a complete circular economy in which the steel that may be used as reinforcement in concrete, goes through a manufacture process that generates several

types of waste that can be valorized and introduced as a constituent in the concrete itself in the cementitious conglomerate matrix.

Once these two topics are precisely described and explained, we continue with the third chapter “Materials, dosage and manufacturing of concrete”. We start with the definition of the raw constituents used in the manufacture of concrete. In order to achieve this, we will describe every constituent used in the process and every type of slag used in the cement substitution strategy. The result of this analysis will show the differences among types of slags used in both physical and chemical properties.

In our case, in order to normalize mainly the physical properties and to make them similar to cement the slags originated in ladle furnaces (LFS) are sieved to obtain a granulometry as similar as possible to the cement.

However, ground granulated blast furnace slags (GGBFS) had been previously processed by the supplier manufacturer with a physical treatment in vertical mills, thus sieving is not needed for this type of slag.

This chapter also contains the chemical composition of the slags and cement, and the differences among them mainly in silicon dioxide content ( $\text{SiO}_2$ ). We have observed a noticeable difference in this component content among the slags, obtaining about 32% of this component for the slag produced in blast furnaces, and 18% and less than 13% for the slags produced in electric arc furnaces.

This component, together with the chemical composition of cement, seems to be essential to explain the reason why the slag produced in blast furnaces has a better mechanical behavior than those produced in electric arc furnaces when used as conglomerate matrix in concrete. This is due to the capacity of this component of producing tobermorite (hydrosilicates of calcium), which causes the higher strength properties of the final concrete. In the next chapters we will show that slags with high content of this component perform better in the different tests.

The cement used for the manufacture of every set of mixtures has been Portland Cement CEM I 52.5 R, a high strength cement with no additions in order to avoid alterations of the results due to uncontrolled additions of the cement.

Once the characteristics of every constituent of concrete are detailed this chapter describes the concrete mixture dosage that has been used throughout the research. The reference mixture dosage consistency is dry for normal concrete standards, leading to a resultant concrete with low workability. The reason why this dosage was chosen for the research is because the research is based on a project done in collaboration with Drace Infraestructuras SA and Geotecnia y Cimientos SA funded by the public institution CDTI (Center for Industrial Technology Development) in which the concrete dosage was designed in other to meet the workability and consistency requirements for the manufacture of precast structural elements.

One of these elements was precast concrete voussoirs, elements that requires this type of concrete consistency. However, after some preliminary analysis we decided to design

the concrete dosage for another precast element: railway ties. The technical standards for railway ties manufacturing are very demanding thus the concrete dosage was designed in order to comply with the most restrictive normative in this case, railway ties normative. The concrete dosage used in the manufacturing plant would be used but substituting a percentage of the cement by slag, in this case up to the 30%. To resume what is mentioned before, this chapter covers the description and definition of the materials, the concrete dosage for every mixture and the slag substitution strategy used in the research process. Finally, we will cover the laboratory tools employed throughout the manufacturing process.

The following chapters contain the performed tests and the description of the methodology used for every one of them. These tests have been performed for every concrete mixture manufactured and lead to the discussion of the results obtained and the elaboration of the conclusions of this research.

In the 4<sup>th</sup> chapter, “Physical material tests” the following tests will be developed: concrete slump test, density, porosity, absorption, abrasion and concrete suction test. The chapter starts defining the nomenclature used for every mixture and the description of the different tests carried out, together with the results obtained.

#### Concrete slump test

The methodology used to perform the concrete slump test, using the Abrams cone, according to normative will be defined. As mentioned before, every mixture was designed to have a dry consistency. Once the different batches were manufactured this test was performed obtaining a result between 0 and 2 cm of slump. Therefore, every mixture obtained the required consistency. However, we observed that the mixtures with ladle furnace slag substitution (LFS), specially the M3 mixture, subsided noticeable less than the other concrete mixtures and the reference concrete. Concrete mixtures using blast furnace slag substitution showed a similar behavior than the reference concrete on this test.

#### Density test

Density of concrete mixtures was measured using 10 cm cubes and obtaining saturated and dry weight of the probes. The results showed no significant differences among the different slag type used and cement substitution percentage. Density was measured to be around 2500 kg/m<sup>3</sup> with the exception of mixture M2, which showed a decrease in density as the cement substitution percentage increased up to a 5% of the density of reference concrete.

#### Porosity test

This property is one of the most important of concrete due to the strong correlation existent between porosity and final concrete strength. In the following chapters, the special behavior of one of the slags used in this thesis will be described regarding this characteristic.

We will start by describing what is porosity and the different types of porosity. Two main types of porosity can be highlighted: relative porosity and actual porosity. The first one can be measured using standard procedures and it will be the one developed in this thesis.

The method used to measure relative porosity can only take into account air volumes inside the concrete that are accessible to water by capillarity. However, those air volumes that are not accessible to water will be showed in the result as solid volumes, since we are not able to measure differences in weight in the test. In the casting process of concrete some air volumes can be formed that are inaccessible to water due to particle obstructions and different chemical bondings. Therefore, in order to measure the actual porosity other types of test would be required that are not covered by this thesis.

Porosity results correlate with the density results obtained, showing that the mixture M2, the least dense mixture, obtained the higher porosity index.

We also observed that the mixture M3 obtained the lowest porosity index, being the most dense mixture, although not by a significant percentage.

On the second part of this chapter we will cover the superficial abrasion test and the suction test.

The superficial abrasion test has been performed using 10 cm cubes that goes through an erosion process leaving a trace measurable using a caliper averaging three measures.

Los resultados nos hacen ver que las escorias que más se asemejan al hormigón convencional son las escorias de alto horno (GGBFS), mientras que no ocurrió lo mismo con las escorias de arco eléctrico (LFS), llegando a tener una de ellas hasta un rozamiento mayor del 60% que las escorias convencionales.

The results show that the mixture with the most similar behavior to the concrete without cement substitution was the one using blast furnace slags (GGBFS). However, the mixtures with ladle furnace slag (LFS) showed results differing up to a 60% from the other type of slag and conventional concrete.

#### Suction test

This test is important in order to obtain the water absorption capacity by capillarity of concrete, property that is correlated with relative porosity. Therefore, a slow suction velocity means that the material tested has a low relative porosity index and low capillarity. This test is performed with dry concrete cubes with edges of 10 cm and only a face is exposed to water.

In order to achieve this, the side faces are covered with a special paint up to 5 mm of height and the concrete specimen is immersed in 1-2 cm of water thus the only face in contact with water is the bottom face. Then we measure the water suction capacity of the specimen every interval of time according to normative. In our case, once every specimen went through this test, we observed a similar pattern than with the porosity

tests. Specimens with M1 slag substitution showed less water suction capacity than conventional concrete and the same behavior was observed with specimens with M3 slag substitution, but in a lesser proportion than M1. However, specimens with M2 slag showed more water suction capacity than conventional concrete.

In order to conclude this chapter, we have observed how the specimens with the best performance in physical material tests are those with M1 slag substitution, showing not only better results than those specimens with M2 and M3 slag substitution but improving the results of conventional concrete.

The next chapter is the 5th, "Mechanical tests". In this chapter we will show the mechanical behavior of the different mixtures under compression and flexural tests. Furthermore, this chapter includes a comparison of the estimations of the young modulus of the different specimens using the 28<sup>th</sup> day compression strength of each mixture using several experimental equations.

For every test we will cover the different machines and specimens used in order to obtain the strength parameters.

#### Compression strength test

In order to obtain the compression strength of the concrete specimens we used cubes with edges of 10 cm and an automated press of 2.000 kN of capacity.

The results lead us to think that, for high percentage substitution, specimens with ladle furnace slag (LFS) substitution have a higher strength loss compared with conventional concrete than those with blast furnace slag (GGBFS) substitution. Particularly, the mixture with M2 slag substitution showed the worst behavior at compression strength tests, obtaining up to a 60% of compression strength loss with a cement substitution percentage of 40%.

On the other hand, specimens with blast furnace slag substitution showed an increase in compression strength of 10% at 90 days. Mixtures using this type of slag substitution showed a slower hardening process, with losses of up to 50% of the compression strength at 1 day with a 40% substitution percentage. However, compression strength is similar to the conventional concrete at 7 days.

#### Flexural strength test

In order to measure the flexural strength of the specimens we used prismatic specimens of 4x4x16 cm. This parameter has been calculated using the uniform application of centered load.

Once this tests were carried out, we observed the same pattern as with compression strength tests. Specimens with blast furnace slag substitution showed a similar behavior than the conventional concrete at 28 and 90 days of casting., while specimens with electric arc furnace slag substitution showed also a similar behavior than conventional concrete but only up to 23% and 25% percentages of substitution. With percentages of

substitution of 30% and higher significant losses of up to 10% were observed in flexural strength.

Therefore, the conclusion of this study would be that mixtures with cement substitution by blast furnace slags (GGBFS) show a similar mechanical behavior in compression and flexural strength tests, and in some cases a better behavior, than conventional concrete. However, mixtures with electric arc slag substitution show poor mechanical properties in compression, with strength losses with every substitution percentage. Flexural strength in this type of mixtures is similar to conventional concrete up to 25% of substitution, showing strength losses starting from 30%. Therefore, electric arc furnace slag may be suitable for cement substitution in non structural concrete since compression strength is not required.

The next part covered in this chapter is the study of the elastic modulus of the different mixtures. Several tables show a comparison of the estimation of the specimens young modulus using experimental equations that correlate the elastic modulus with compression strength at different ages.

Six elastic modulus has been calculated, some of them using experimental formulas designed for conventional concrete, and others using equations specially designed for recycled concrete such as the experimental equations of Ravindrarajah and Takizaki.

Most of the results obtained show similar values for every experimental equation, differing from 10% to 15% with the reference estimation equation that would be, in this case, the values obtained using the equation from EHE-08. However, the results obtained using Takizaki equation show a significant deviation of up to 62% therefore we decided not to take into account these results in the study.

Elastic modulus, concrete shrinkage and creep are the most affected properties of concrete when substitution cement by these types of slag. The workability of the mixture increases with the slag substitution percentage and with the water cement ratio.

At the end of this chapter, we show a comparison of compression and flexural strength losses and gains for the different mixtures using conventional concrete as reference. We can clearly observe what has been mentioned before ie using slags as cement substitution material does not correlate with losses in compression and flexural strength.

Lastly, a general conclusion is drawn, in which it is clearly stated that the slags with a better mechanical characteristics are those slags obtained in blast furnaces. This type of slags show not only a similar strength capacity than conventional concrete but, in some cases, a better mechanical behavior.

However, electric arc furnace slags might not be suitable for structural concrete, due to their poor performance in mechanical tests but, as a suggestion from the author, they might be suitable used in dosages for non structural concrete, in order to achieve the valorization of this waste and avoid their final destiny deposited in landfills.

Another conclusion that can be drawn from this chapter is that the optimal substitution percentage for electric arc furnace slags is 23%, with a loss in flexural strength of about 10% compared with conventional concrete.

Following this chapter we cover “Durability and environmental tests” in chapter 6<sup>th</sup>. In this chapter we start with water penetration tests, which is a key parameter of concrete in order to assess the durability of the material since we can estimate the behavior of concrete under the influence of pressured water.

This parameter is important because it let us know the level of corrosion that rebars inside concrete can be exposed to due to water contact depending of the mechanical cover of the designed concrete element. This corrosion lead to a loss in the mechanical properties of the rebars and might cause a structural failure.

The tests are performed using cylindrical specimens of 30 cm of height and 15 cm of diameter at 28 days. Specimens are dried in a laboratory stove during 48h and then are exposed to a pressured water of  $500 \pm 50$  kPa during 3 days. Afterwards, specimens are broke into two halves and the penetrated water is measured.

The results obtained in this test has been satisfying for mixtures with M1 and M2 slag substitution since they meet the normative requirements. Furthermore, specimens with M1 slag substitution showed better results in this test than conventional concrete. However, specimens with M3 slag substitution performed the worst in this test and did not meet the normative requirements by far.

The M3 slag substitution results for this test are somewhat contradictory with the porosity test results, since this mixture showed the lowest porosity index. This lead us to think that the relative porosity and actual porosity differs significantly for this mixture. Through capillarity effect is difficult to reach some intern air volumes but when pressured water is added to the process, the weak particle bondings break and allow the water to flow filling these volumes.

At the end of this test we make a comparison showing the performance of every mixture in porosity, absorption and water penetration tests. We can conclude from these values that these three parameters are correlated for mixtures M1 and M2 but not for mixture M3, where the water penetration parameter shows an odd behavior and can be explained by what has been mentioned before.

Following the water penetration test we show the carbonation test for concrete. The result of this test will let us know whether the concrete acts as a good protector for rebars from external agents such as oxygen. This test is carried out using cubic specimens with edges of 10 cm of length. Specimens are then broken into two halves and a phenolphthalein indicator solution is applied to the internal faces. The result of the carbonation test will be given depending of the colour into which this solution, in contact with the concrete specimen face, turns.

In this test we observe the same behavior in every mixture of concrete for every type of slag and substitution percentage, including the reference mixture. None of the mixtures

showed carbonation and, in the case of mixtures with blast furnace slag substitution (GGBFS), we observed a purple reddish colour that is an indication of a pH level above 9.5 in these specimens.

Mixtures with blast furnace slag substitution did not show carbonation as well. However, they showed a less intense colour that is indicative of pH level between 8 and 9.5.

Following this test we carried out a leaching test for the different mixtures in order to measure the effect on this property of the slags encapsulated in the concrete matrix.

At first we found basic concepts about leaching and the factors that affect this test both physicals and chemicals, and the several regulations regarding this environmental aspect. These regulations also propose different options in order to decrease the solubility capacity of the slags, as well as stabilization, solidification, vitrification and chemical extraction. In our case we chose an stabilization-solidification process.

To perform this test we used a broken piece of concrete for every specimen in order to carry the test out in the worst possible conditions. The cement substitution percentages chose was 30% for every mixture. Additionally we carried the test out using a 40% slag substitution percentage for M3 slag, since throughout the research showed similar behavior than conventional concrete. Specimens were immersed in 1 liter of distilled water during 2 days and then the water was sent to be analyzed to an external laboratory. The results, keeping in mind the maximum values set by DG 4291, indicate that the use of these types of slags as cement substitution in concrete will not exceed these maximum values.

One of the most important parameters is the chromium content, and in our case we observe a decrease in this value compared with the mixture without slag substitution. On the other hand, we observe an increase in the values for aluminium content, tripling this value in the case of 40% slag substitution relative to conventional concrete. Since there are no limitations for aluminium content in the regulation this does not affect the suitability of this mixtures for use in construction.

Therefore, we can conclude that the encapsulation of any of these slags in a concrete matrix show satisfying results in leaching tests thus the use of these slags as cement substitution in concrete do not constitute a danger to the environment.

Lastly, as final conclusion for this chapter, we can state that blast furnace slags are suitable for cement substitution in concrete due to their performance in durability tests and the results in leaching tests, meeting the requirements of the regulation.

In the 7th chapter, "Practical application of the new cementitious matrix", we show the precast concrete railway ties using blast furnace slag substitution manufactured by Drace Infraestructuras in the factory in Sagunto. Using this type of slag for cement substitution was decided due to their good performance in the tests of this research. Railway ties and voussoirs were manufactured using a dosage with 30% and 50% of cement substitution by slag (the company decided to increase the substitution percentage once observed the good results of this substitution).

They decided to manufacture railway ties with this concrete dosage because the regulation of this type of precast elements is more demanding than the regulation for precast voussoirs (Adif technical specification 03.360.571.8 – Precast prestressed mono-block railway ties). Therefore, if the concrete used met the technical requirements for railway ties regulation, it would then meet the requirements for precast concrete voussoirs.

Two types of test were carried out for these elements: laboratory tests and field tests. For the laboratory tests, 15x15x15 cm cubic specimens were used to test compression, tensile and flexural strength in laboratory at the factory. The results of these test can be shared for both types of precast elements: railway ties and voussoirs.

During the manufacturing process it was observed that the workability of the concrete mixture increased when the slag was added to the mix.

No superficial water was observed. The mixture behaved well during the vibration process. Lastly, the resultant mixture showed a great cohesive capacity and it was hard to handle with shovel.

In respect of the results obtained in laboratory, they show that the concrete with 30% substitution slightly passed the compression strength tests at 2 days and then exceeded the required strength at 28 days. However, it showed strength loss compared to conventional concrete. For flexural and tensile strength the results were similar to those of compression, meeting the requirements at 7 and 28 days but performing slightly worse than conventional concrete.

The results for concrete with 50% slag substitution showed a slow hardening process, behavior also observed in our research. As a result, the results did not meet the strength requirements at 2 days of casting. However, as with the 30% slag substitution concrete, at 7 and 28 days the required strength is also exceed for this type of elements.

Two types of field tests were carried out to the precast railway ties: concrete railway sleepers and bearers static and dynamic tests.

The results of these test were satisfying obtaining similar results than conventional concrete and exceeding the required strength by regulation.

Lastly, an ocular inspection was carried out to the voussoirs elements, showing a good external aspect without concrete hollows.

Therefore, as a conclusion for this chapter, it can be stated the the substitution of cement by blast furnace slags for precast concrete manufacturing is a great way to contribute to the sustainability of the environment. The behavior of this concrete is mainly satisfactory and, as a suggestion from the author, some drawbacks, such as the slow hardening process, could be solved using certain types of additive in the mix.

The 8th chapter covers the final conclusions of this research and future lines of investigation.

As a final conclusion, after analyzing every test performed, it can be concluded that the slag that performs better as a substitution of cement is the slag produced in blast furnaces, obtaining similar results, when not better, to those of conventional concrete.

Electric arc furnace slags have demonstrated to be unsuitable for this type of substitution in concrete due to the poor results obtained mainly in mechanical tests. However, the use of this slag as substitution in concrete of other constituent, such as aggregates could be feasible.

A raíz de esta investigación hay diversas líneas de investigación, como sería intentar llegar a conseguir un hormigón lo más ecológico posible, es decir, sustituyendo tanto cemento como áridos por escorias siderúrgicas.

After this research several lines of investigations could follow, such as attempting to formulate a concrete dosage as ecological as possible, substituting both cement and aggregates by slags.

Furthermore, it would be interesting to study the behavior of this types of slags in other cementitious matrixes, such as grouts, mortars or ultra high performance concretes.

# ÍNDICE

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

<b>1.1</b>	<b>ANTECEDENTES .....</b>	<b>5</b>
<b>1.2</b>	<b>OBJETIVOS PRINCIPALES.....</b>	<b>10</b>
<b>1.3</b>	<b>HIPÓTESIS.....</b>	<b>11</b>
<b>1.4</b>	<b>ESTRUCTURA DE LA TESIS .....</b>	<b>11</b>
<b>1.5</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>ACERO .....</b>	<b>21</b>
2.1.1	<b>TIPOS DE ACERO .....</b>	<b>23</b>
a.	<b>Aceros al carbono .....</b>	<b>24</b>
b.	<b>Aceros aleados.....</b>	<b>25</b>
2.1.2	<b>ESCORIAS.....</b>	<b>26</b>
2.1.3.1	<b>Escoria de alto horno (GGBFS) .....</b>	<b>26</b>
-	<b>Propiedades escorias GGBFS .....</b>	<b>28</b>
2.1.3.2	<b>Escoria de arco eléctrico.....</b>	<b>29</b>
-	<b>Propiedades de las escorias blancas (LFS) .....</b>	<b>32</b>

## CAPÍTULO 2. BREVE HISTORIA DEL ACERO, LA ESCORIA Y EL HORMIGÓN

<b>2.2</b>	<b>HORMIGÓN .....</b>	<b>33</b>
2.2.1	<b>HISTORIA DEL HORMIGÓN .....</b>	<b>34</b>
<b>2.3</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>38</b>

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES Y DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN

<b>3.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>45</b>
<b>3.2</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES .....</b>	<b>46</b>
3.2.1	<b>ÁRIDOS .....</b>	<b>46</b>
3.2.2	<b>CEMENTO .....</b>	<b>46</b>
3.2.3	<b>ESCORIAS.....</b>	<b>48</b>
3.2.3.1	<b>CARACTERÍSTICAS ESCORIA BLANCA M1 .....</b>	<b>48</b>
3.2.3.2	<b>CARACTERÍSTICAS ESCORIA BLANCA M2 .....</b>	<b>50</b>
3.2.3.3	<b>CARACTERÍSTICAS ESCORIA BLANCA M3 .....</b>	<b>52</b>
<b>3.3</b>	<b>DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN .....</b>	<b>53</b>

<b>3.4</b>	<b>FABRICACIÓN DE HORMIGÓN Y PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES ...</b>	<b>54</b>
3.4.1.	Amasado .....	55
3.4.2.	Moldes y probetas .....	56
<b>3.5</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>58</b>
<b>CAPÍTULO 4. ENSAYOS FÍSICOS DEL MATERIAL</b>		
<b>4.1.</b>	<b>CONSISTENCIA DEL MATERIAL .....</b>	<b>63</b>
4.1.1.	Proceso de elaboración .....	63
4.1.2.	Resultados.....	64
<b>4.2.</b>	<b>ENSAYO DE DENSIDAD, POROSIDAD Y ABSORCIÓN .....</b>	<b>67</b>
<b>4.2.1.</b>	<b>Propiedades .....</b>	<b>67</b>
4.2.3.1	Densidad .....	67
4.2.3.2	Porosidad .....	67
4.2.3.3	Absorción .....	69
4.2.2.	Proceso de elaboración .....	69
4.2.3.	Resultados.....	70
<b>4.3.</b>	<b>ENSAYO DE ABRASIÓN SUPERFICIAL.....</b>	<b>72</b>
4.3.1.	Proceso de elaboración .....	73
4.3.2.	Resultados.....	75
<b>4.4.</b>	<b>ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA SUCCIÓN .....</b>	<b>76</b>
4.4.1.	Proceso de elaboración .....	77
4.4.2.	Resultados.....	79
<b>4.5.</b>	<b>CONCLUSIÓN FINAL .....</b>	<b>83</b>
<b>4.6.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>83</b>
<b>CAPÍTULO 5. RESISTENCIA MECÁNICA</b>		
<b>5.1.</b>	<b>RESISTENCIA A COMPRESIÓN .....</b>	<b>89</b>
5.1.1.	Proceso de elaboración del ensayo.....	90
5.1.2.	Resultados de los ensayos de la resistencia a compresión .....	91
5.1.2.1	Resultados de las probetas con escoria M1 .....	91
5.1.2.2	Resultados de las probetas con escoria M2 .....	94
5.1.2.3	Resultados de las probetas con escoria M3 .....	97
5.1.2.4	Comparación de las muestras de escorias M1, M2, M3.....	99
<b>5.2.</b>	<b>MÓDULO DE ELASTICIDAD.....</b>	<b>100</b>

<b>5.3. RESISTENCIA A FLEXIÓN.....</b>	<b>108</b>
5.3.1. Proceso de elaboración .....	109
5.3.2.1 Resultados de las probetas con escoria M1 .....	110
5.3.2.2 Resultados de las probetas con escoria M2 .....	111
5.3.2.3 Resultados de las probetas con escoria M3 .....	112
<b>5.4. COMPARACIÓN ENTRE FLEXOTRACCIÓN Y COMPRESIÓN .....</b>	<b>115</b>
<b>5.5. CONCLUSIÓN FINAL DEL CAPÍTULO .....</b>	<b>116</b>
<b>5.6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>117</b>
<b>CAPÍTULO 6. DURABILIDAD DEL HORMIGÓN Y LIXIVIADO</b>	
<b>6.1. ENSAYOS DE PENETRACIÓN DE AGUA .....</b>	<b>123</b>
6.1.1 Introducción .....	123
6.1.2 Proceso de elaboración .....	123
6.1.3 Resultados.....	124
6.1.4 Discusión de estos resultados y su relación con la absorción y porosidad .....	128
<b>6.2. CARBONATACIÓN .....</b>	<b>130</b>
6.2.1 Proceso de elaboración .....	130
6.2.2 Resultados.....	131
<b>6.3. COMPORTAMIENTO AMBIENTAL DEL HORMIGÓN CON ESCORIA. LIXIVIADO.....</b>	<b>133</b>
6.3.1 Generalidades sobre la lixiviación .....	133
6.3.2 Detalles de la muestras .....	136
6.3.3 Resultados.....	136
<b>6.5. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>140</b>
<b>CAPÍTULO 7. APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA NUEVA MATRIZ CEMENTANTE</b>	
<b>7.1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>147</b>
<b>7.2 PRUEBAS .....</b>	<b>149</b>
7.2.1. Resultados de las pruebas.....	150
<b>7.3 CONCLUSIÓN .....</b>	<b>155</b>
<b>7.4 BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>155</b>
<b>CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES FINALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN</b>	

<b>8.1. INTRODUCCIÓN/ INTRODUCTION.....</b>	<b>161</b>
<b>8.2. CONCLUSIONES GENERALES/GENERAL CONCLUSIONS.....</b>	<b>161</b>
8.2.1 Propiedades de las escorias utilizadas en esta tesis / Properties of the slags used in this thesis .....	162
8.2.2 Propiedades físicas del hormigón obtenido / Physical properties of the resultant concrete.....	163
8.2.3 Propiedades mecánica-resistentes del hormigón obtenido / Mechanical properties of the concrete mixtures.....	164
8.2.4 Durabilidad y Comportamiento medioambiental del hormigón con sustitución de escorias / Durability and environmental behavior of concrete with slag substitution.....	166
<b>8.3. CONCLUSIÓN FINAL / FINAL CONCLUSION .....</b>	<b>166</b>
<b>8.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN / FUTURE LINES OF RESEARCH .</b>	<b>167</b>
<b>8.5. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>169</b>

# CAPÍTULO 1

## Introducción y Antecedentes



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## Capítulo 1. Introducción y Antecedentes

1.1 ANTECEDENTES.....	5
1.2 OBJETIVOS PRINCIPALES.....	10
1.3 HIPÓTESIS.....	11
1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	11
1.5 BIBLIOGRAFÍA .....	13

### Índice de figuras

Figura 1. 1 Diferencia entre economía circular y economía lineal.....	5
Figura 1. 2 Objetivos de desarrollo sostenible .....	6
Figura 1. 3 Reutilización de los subproductos del acero .....	8



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## 1.1 ANTECEDENTES

Actualmente vivimos en un mundo en el cual nos basamos en un consumo lineal, todo lo que se produce y consume se deshecha sin reciclaje. Es decir, al ritmo que se consume hoy en día precisaríamos de 1,63 planetas para continuar con la especie humana, ya que los recursos naturales no tienen capacidad de regeneración al ritmo que lo consumimos [1]. Esto es lo que llamamos economía lineal.

Por tanto, tenemos el siguiente sistema:

**Extracción de recursos → Producción → Distribución → Consumo → Residuos**

Por lo que necesitamos un planeta sustentable en sus cuatro dimensiones de la biosfera: la parte humana, social, ambiental y económica; y nos debemos dirigir hacia una economía circular. Esto se traduce en un sistema en el cual se propone cerrar los ciclos de vida y promover un diseño circular de sus productos. Es decir, que todo lo que se genere y provoque un residuo, en lugar de que vaya a un vertedero, se le intente dar un uso adecuado y sostenible para que vuelva entrar en la cadena de producción (Figura 1.1).

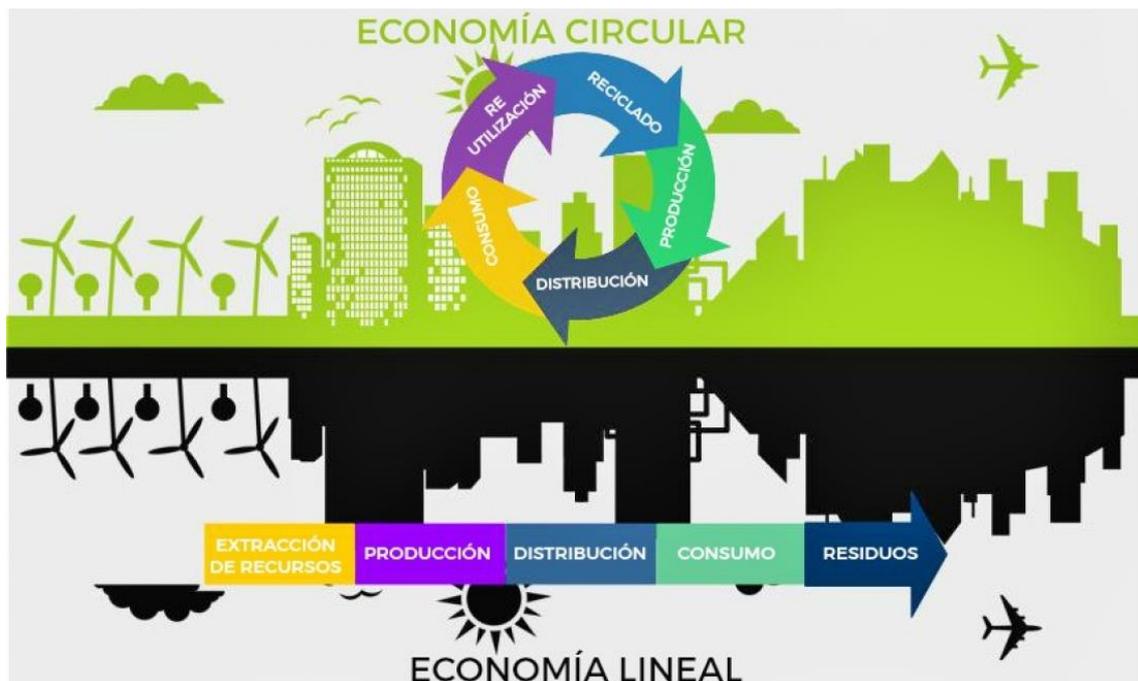


Figura 1. 1 Diferencia entre economía circular y economía lineal [2]

En 1987, en el informe titulado “Nuestro futuro en común”, en la comisión mundial sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, se definió el desarrollo sostenible como “la satisfacción de las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” [3].

En septiembre de 2015 se aprobó la Agenda 2030, en la que participaron más de 150 jefes de Estado y de Gobierno en la Cumbre del Desarrollo Sostenible. Esta Agenda contiene 17 objetivos (Figura 1. 2) de aplicación universal que, desde el 1 de enero de

2016, los países están haciendo un gran esfuerzo lograr un mundo sostenible en el año 2030 [4].



Figura 1. 2 Objetivos de desarrollo sostenible [4]

Estos nuevos objetivos presentan la singularidad de pedir a todos los países, sin importar su nivel de desarrollo, tomar medidas para lograr prosperidad en todos ellos, cumpliendo además con la protección del planeta. Estos objetivos, que muestran nuevas maneras de terminar con la pobreza, van acompañados de una serie de maniobras las cuales aumentan el crecimiento tanto económico como social, por lo que debemos luchar para que estos se lleven a cabo y así contribuir para que mejoren estas necesidades básicas, tales como la salud, la educación, el disminuir el desempleo mundial; y por otro lado, hacerlo favoreciendo con todo ello al medio ambiente

Todos estos objetivos están relacionados entre sí, suponiendo que quitar o centrarse más en alguno de ellos puede beneficiar o perjudicar a otro. Por lo tanto, hay que buscar la forma de intentar mantenerlos todos.

Esta tesis es una labor de investigación en la cual se beneficia a tres de los objetivos, que serían:

- Objetivo 9: Industria, Innovación e Infraestructura
- Objetivo 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles
- Objetivo 12: Producción y Consumo Responsable

Con estos tres objetivos fomentamos la innovación e infraestructura, creando comunidades y ciudades capaces de producir y consumir de forma sostenible.

Es inevitable el crecimiento de residuos generados como consecuencia de la actividad industrial, por lo que debemos ver el modo de poder reutilizarlos de forma que sean eficientes. Se ha convertido en un problema complejo y difícil de tratar, sobre todo debido al endurecimiento de las normativas y políticas medioambientales [5], por lo que debemos de llegar, en definitiva, a si un residuo está clasificado según la "Ley 22/2011,

de 28 de julio, [6] de residuos y suelos contaminados”, como «d). Residuos industriales»: residuos resultantes de los procesos de fabricación, de transformación, de utilización, de consumo, de limpieza o de mantenimiento generados por la actividad industrial, excluidas las emisiones a la atmósfera reguladas en la Ley 34/2007, de 15 de noviembre, [7] una vez reutilizado pase a r) «Valorización»: cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales, que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función en la instalación o en la economía en general.

La gestión de residuos que hoy en día está instaurada en la sociedad es la que destruye el residuo sin darle la oportunidad de ser aprovechado para su uso en otro tipo de materia. Y esto, desde el punto de vista medioambiental, no es conveniente ya que se van almacenando residuos de todas clases sin darle salida.

Por lo que, si alcanzamos valorizar estos residuos, lograremos que mejore tanto el medio ambiente como la economía nacional, ya que no tendríamos que hacer uso de nuevas materias primas ni energías. Esto, además, incrementaría el empleo ya que se necesitaría personal para la gestión de los residuos, además de mejorar la economía de las empresas, porque la utilización un residuo debe ser más económico que la de la materia prima. Todo ello, además, nos lleva a un equilibrio ecológico [8].

La industria tanto del hormigón como del acero es un ejemplo de equilibrio ecológico, ya que el subproducto generado por el acero (escoria), ya sea como sustitución de áridos o como adición o sustitución al cemento en la formulación de la mezcla de hormigón, hacen que la extracción de materias primas en canteras, la cuales degradan el medio ambiente, se reduzcan en la misma proporción que se generan estos residuos, proporcionándoles otro uso como subproductos industriales.

Para poder llegar a este punto es claro que este tipo de subproductos debe estar respaldado por una investigación exhaustiva, para no generar problemas medioambientales que a la larga sean perjudiciales para el medio ambiente, por lo que deberá estar acreditado para el uso que se le vaya a dar [9–14].

Por todo lo comentado anteriormente, se observa que hay un gran interés por la utilización de residuos industriales como adición y sustitución de áridos en matrices cementosas, y su comportamiento en lo referente a su sostenibilidad ambiental [15–19].

Según un informe de la **World Steel Association** [20], en los últimos 50 años, la industria ha convertido en investigación y tecnología, afirmando que “*Reutilizar es usar un objeto o material nuevamente, ya sea para su propósito original o para un propósito similar, sin alterar significativamente la forma física del objeto o material*”.

Los principales subproductos que utilizaremos serán las escorias producidas, que en porcentaje de reutilización del acero es el 32,9% como vemos en la Figura 1.3.

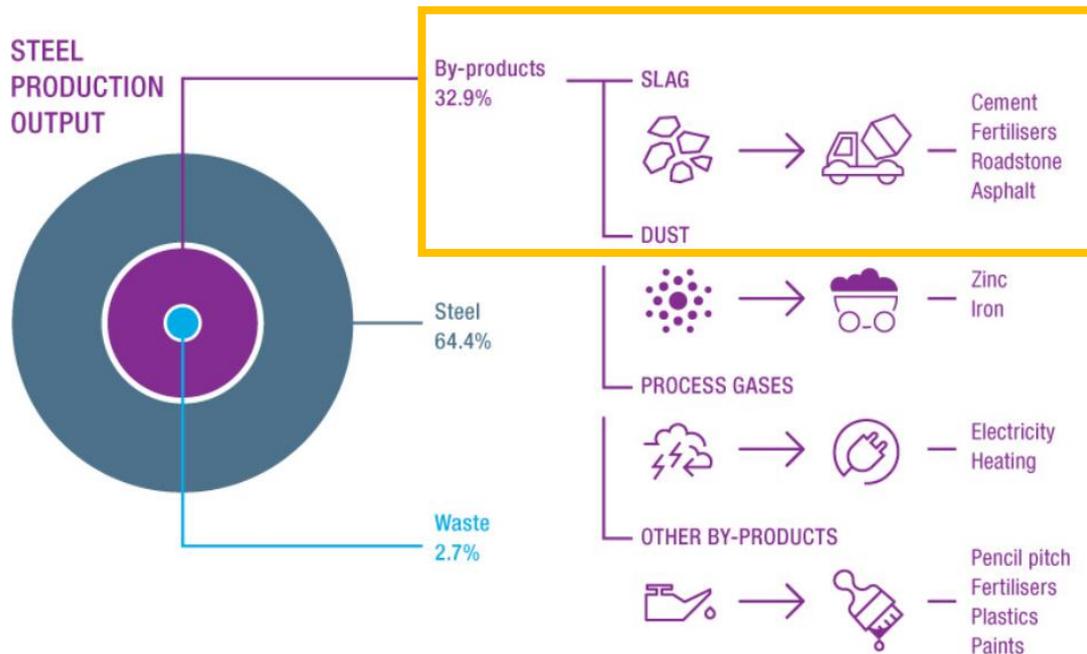


Figura 1. 3: Reutilización de los subproductos del acero (World Steel Association) [21]

En cuanto al desarrollo sostenible, uno de los productos estrella es el acero ya que se puede reutilizar y remanufacturar, además de ser un material que se puede reciclar permanentemente, tanto el propio material como los subproductos que generan, sin perder sus propiedades. Los subproductos incluyen escoria, polvo de humo y lodos. La escoria, por ejemplo, se usa para hacer una gama de productos que incluye cemento, fertilizantes y asfalto. La escoria una vez enfriada se usa en industrias que van desde la producción de cemento a la construcción de carreteras [22–25].

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. 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 éste 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 procesos metalúrgicos como sustitutos de cemento en el hormigón, 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 hormigón que incorporen escorias de distintas acerías como sustituto de un porcentaje de cemento [26–28]. La composición de los mismos, sería una mezcla de los siguientes compuestos químicos: sílice, óxido de calcio, óxido de magnesio, aluminio y óxido de hierro. Se producen en el alto horno durante de la fabricación del acero ya que estas escorias se utilizan para eliminar las impurezas del mineral del hierro

y chatarra de acero, las escorias protegen el metal líquido del oxígeno, y además mantienen la temperatura del mismo formando una capa y, al ser las escorias más ligeras que el metal líquido, flotan, pudiendo ser extraídas fácilmente.

Según la **World Steel Association**, se produjeron en el mundo **1,6 billones** de toneladas, en la Unión Europea se produjeron **162 millones** de toneladas y en particular en España **13 millones** toneladas de acero bruto en 2016, por lo que sería la cuarta en importancia a nivel europeo, sólo por detrás de Alemania, Italia y Francia [21]. Respecto a la producción media de estos subproductos, por cada tonelada de acero producidos se genera entre un 20% y un 40% de escorias, tal y como indicaba ADEC GLOBAL indicando, además de lo anterior, que alrededor del 75% de las escorias producidos en el proceso de fabricación del acero en hornos arco eléctrico corresponde a “*escorias negras*” (EAFS) procedentes del proceso de fusión y con una granulometría mayor que las “*escorias blancas*” (LFS), que son las escorias generadas procedentes del afino [29].

Debido a esta cantidad de escorias generadas, existe un gran interés en encontrar otras vías para dar salida a estos residuos como subproductos de otros materiales. En estos momentos, a las escorias de acero se les están dando los usos alternativos que se comentan a continuación [30]:

- a. Obras de tierra y terraplenes
- b. Firms de carreteras
- c. Edificación de obra pública
  - Utilización en cementera de escorias negras
  - Utilización de escorias negras como áridos para morteros
  - Utilización de escorias negras como árido para hormigón
  - Utilización en cementeras de escorias blancas

Las escorias siderúrgicas en construcción se llevan utilizando desde el siglo XVIII, y parece que se usaron por primera vez en Inglaterra como materiales conglomerantes, las cuales se añadían a morteros o argamasas de cal, y a partir de 1825, se extendió su uso en Alemania, comenzándose a llamar a estas mezclas “*cementos de escorias*”. Este tipo cementos son los primeros en el empleo específico para edificaciones, en las cuales ya se le exige a las mezclas cierta durabilidad y resistencia química del material [31].

En estos últimos años, las líneas de investigación más importantes de las escorias siderúrgicas en la ingeniería civil se centran, fundamentalmente, en el estudio y comportamiento de cementos y hormigones.

Durante las últimas décadas, se han estudiado diferentes alternativas para reducir o minimizar el gran volumen de escorias producidas, y todos estos estudios dan lugar a los distintos usos citados.

Particularmente, los estudios desarrollados de este nuevo hormigón se han basado en la utilización de escoria (EAFS) como sustituto de los distintos áridos, tales como la posibilidad de utilizar este residuo como árido grueso o fino para la elaboración del mismo [32–36].

Internacionalmente, existen recomendaciones para el uso de este tipo de residuos como áridos de hormigón. Una de ellas es de la sociedad japonesa “JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS”, en las que se recogen tanto los requisitos de los áridos como las propiedades del hormigón, y recomendaciones para su proyecto y puesta en obra. La resistencia del hormigón con escoria suele ser inferior a la de uno convencional a edades tempranas (hasta 3 días), aunque posteriormente se puede obtener una resistencia similar e incluso superior a la del hormigón convencional, presentando una menor retracción [37].

No obstante hay pocas referencias encontradas de escorias blanca (LFS) sustituyendo al cemento o, dicho de otro modo, como aglomerante del hormigón. Un referente lo encontramos en la patente del grupo ARHENE de la Universidad de Cádiz [38], la cual basa su invención en un procedimiento para la fabricación de hormigón mediante la adición de escorias de acero inoxidable de horno de arco eléctrico, o bien sustitución de parte del cemento por estas escorias, para la obtención de una formulación de hormigón especialmente indicada para la construcción de estructuras de contención y control, óptimamente sostenibles y más baratas. También encontramos algunos artículos que basan sus estudios en la sustitución de cementos por escorias o cenizas volantes, como el elaborado para esta tesis [39–42], y una tesis doctoral que basa su estudio en pastas y morteros de cementos sustituyéndolo por escorias blancas de horno de arco eléctrico [43].

### 1.2 OBJETIVOS PRINCIPALES

En esta tesis doctoral intentaremos analizar cómo afecta la sustitución de la escoria siderúrgica por el cemento en el hormigón en estado endurecido.

Para ello, utilizaremos distintos porcentajes de sustitución a partir de un hormigón convencional, el cual servirá de referencia, para poder evaluar el máximo porcentaje que podemos sustituir y que siga teniendo características similares al de referencia.

Esta tesis es novedosa ya que, una vez consultada la bibliografía, se deduce que hay muchos estudios acerca de la sustitución de escoria por áridos o como balasto, pero no se han encontrado muchos casos en los que se sustituya un porcentaje del cemento por lo que, de obtener resultados satisfactorios, sería un gran avance en el ámbito de la valorización de residuos y del ahorro económico, puesto que conlleva la utilización de una menor cantidad de cemento en el hormigón.

Por ser novedad a este nuevo sustrato se le realizarán todos los ensayos que tienen que ver con la resistencia, durabilidad, abrasión, desgaste, lixiviado, para tener todas las garantías de que es un hormigón viable y sostenible para su puesta en obra.

### 1.3 HIPÓTESIS

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

- I. Aplicación de un residuo industrial, escoria originada en distintas industrias siderúrgicas, encapsulada en una matriz cementosa, de un material compuesto como es el hormigón, empleándola como conglomerante hidráulico, obteniendo características similares a las del hormigón convencional.
- II. Obtención de un hormigón con unas características de durabilidad mayores a las del convencional.
- III. Elaboración de un modelo de piezas prefabricadas de hormigón, con las que compararemos cuales son los efectos de la sustitución de escorias por cemento y cómo afecta a sus propiedades.

Con relación a la primera hipótesis de partida, se van a sustituir distintos porcentajes de cemento por escoria siderúrgica de distintas acerías de España para comprobar cómo afecta la misma a las propiedades del hormigón. Comprobaremos resistencias, tanto a tracción como a compresión, y el resto de las características de estos materiales.

Con relación a la segunda hipótesis, se harán comparativas con respecto al hormigón convencional sobre la durabilidad de los mismos.

Para la tercera hipótesis contamos con la ayuda de la empresa Drace Infraestructuras la cual, y gracias al proyecto en común, nos facilitará los datos obtenidos en la prueba que se hizo en la fábrica de prefabricados de Sagunto. En principio, para valorar la influencia de la escoria se tomarían como piezas del estudio las dovelas; pero se decidió elaborar, además de éstas, traviesas de vías del tren, ya que los ensayos a los que deben someterse estas últimas tienen exigencias mayores que el resto, por lo que si cumplen para la normativa propia de estas piezas prefabricadas, valdrán para el resto de piezas a las que no se les exige tanto.

Para comprobar la validez de las hipótesis planteadas, y en última instancia obtener una formulación útil del material de estudio, se realizarán los diferentes ensayos normalizados de los hormigones en estado endurecido [44].

### 1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS

#### ➤ Capítulo 1: Introducción y Antecedentes

El capítulo 1 resume y nos sitúa el problema que justifica la investigación relativa a la presente tesis doctoral. Además, enuncia los objetivos generales, las hipótesis, y se detalla su estructura.

➤ **Capítulo 2. Acero, Escorias y Hormigón**

En este capítulo hacemos un breve repaso por la historia tanto del acero y los subproductos que se pueden obtener del mismo, como del hormigón, hasta llegar a nuestros días, para así hacernos una idea más clara de los materiales con los que vamos a tratar en esta tesis.

➤ **Capítulo 3. Análisis experimental. Caracterización de los Materiales y dosificación del hormigón.**

En este apartado hay una primera parte en la cual caracterizaremos todos los materiales que se van a utilizar para la elaboración del hormigón, haciendo mayor hincapié en las distintas escorias empleadas, ya que es el componente que más nos interesa estudiar. A continuación, describimos la dosificación utilizada y el método de elaboración del hormigón.

➤ **Capítulo 4. Características físicas del hormigón.**

A partir de este capítulo comenzamos a ver las distintas características que obtenemos con la nueva mezcla cementante, desarrollando los métodos utilizados para cada uno de los distintos ensayos. En primer lugar, nos centraremos en las características físicas del material y veremos sus propiedades en estado fresco, consistencia y fluidez; y una segunda parte, en la que realizaremos un análisis de los ensayos de densidad, porosidad, absorción y succión para cada una de las mezclas realizadas.

➤ **Capítulo 5. Resistencia mecánica.**

Se analizan los distintos ensayos mecánicos a los que hemos sometidos a estas nuevas mezclas, tales como compresión y flexión, y a partir de las cuales hemos elaborado unas tablas para evaluar en función de la resistencia a compresión el módulo elástico de las mismas; además de hacer una comparación de los distintos métodos que se utilizan para su evaluación.

➤ **Capítulo 6. Durabilidad del hormigón y lixiviado.**

Este es el último capítulo dedicado a las características del hormigón, en el cual evaluamos su durabilidad con la realización de los ensayos de penetración de agua, y carbonatación del material. Además se le realizan a las probetas un ensayo de lixiviado, para ver cómo afecta medioambientalmente una vez puesto en servicio.

➤ **Capítulo 7. Aplicación práctica de la nueva matriz cementante.**

En este capítulo aparecen los datos de los ensayos realizados a las piezas prefabricadas que se han elaborado por la empresa Drace Infraestructuras, la cual nos ha cedido los datos, para ver cómo funcionaba una vez puesto en servicio el material en una pieza prefabricada.

➤ **Capítulo 8. Conclusiones finales y futuras líneas de investigación.**

Se establecen las conclusiones y resultados más relevantes surgidos a lo largo de la tesis doctoral. Finalmente, se plantean las líneas de investigación futuras que permitan seguir trabajando en aspectos relacionados con la sustitución de cementos por escorias, y que no hayan podido abordarse en el presente trabajo de investigación.

## 1.5 BIBLIOGRAFÍA

1. Scheel, C.; Monterrey, E. A. La Economía Circular , una alternativa a los límites del crecimiento lineal . 1–25.
2. Bartolomé, A. Economía circular y mundo rural Available online: <http://carriondigital.com/noticia/2017-10-03-economia-circular-mundo-rural-1009> (accessed on Jun 29, 2018).
3. Brundtland, G. Report of the World Commision on Environement and Development: Our Common Future. *Oxford Pap.* **1987**, *Report of*, 400, doi:10.2307/2621529.
4. Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible Available online: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/> (accessed on Jan 9, 2018).
5. Cruz Carrasco, M. Estudio de la resistencia y reología de hormigones con adición de escorias de cobre como sustito del árido fino, Tesis doctoral: Universidad de Málaga, 2014.
6. Jefatura de Estado Ley 22/11 de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. *Bol. Of. del Estado* **2011**, 1–52.
7. Jefatura Del Estado LEY 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera. **2007**, 46962–46987.
8. Díez, R.; García, C.; Villena, V.; López, D. *Percepcion Social Sobre La Gestion De Residuos En Madrid. San Lorenzo Del Escorial Y Guadalajara*; 2011;
9. Sales, A.; de Souza, F. R. Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble. *Constr. Build. Mater.* **2009**, *23*, 2362–2370, doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.11.001.

10. Aitcin, P.-C. Cements of yesterday and today. *Cem. Concr. Res.* **2000**, *30*, 1349–1359, doi:10.1016/S0008-8846(00)00365-3.
11. Ulloa, V. A.; García-Taengua, E.; Pelufo, M.; Domingo, A.; Serna, P. New Views on Effect of Recycled Aggregates on Concrete Compressive Strength. *Mater. J.* **2013**, *110*, 687–696.
12. López Gayarre, F.; Suárez González, J.; Blanco Viñuela, R.; López-Colina Pérez, C.; Serrano López, M. A. Use of recycled mixed aggregates in floor blocks manufacturing. *J. Clean. Prod.* **2018**, *167*, 713–722.
13. Yu, R.; Shui, Z. Efficient reuse of the recycled construction waste cementitious materials. *J. Clean. Prod.* **2014**, *78*, 202–207, doi:10.1016/j.jclepro.2014.05.003.
14. Amario, M.; Pepe, M.; Martinelli, E.; Filho, R. D. T. Rheological behavior at fresh state of structural recycled aggregate concrete. In *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet - Proceedings of the 2017 fib Symposium*; Springer International Publishing, 2017; pp. 215–223.
15. Otieno, M.; Beushausen, H.; Alexander, M. Effect of chemical composition of slag on chloride penetration resistance of concrete. *Cem. Concr. Compos.* **2014**, *46*, 56–64, doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.11.003.
16. Singh, G.; Siddique, R. Effect of iron slag as partial replacement of fine aggregates on the durability characteristics of self-compacting concrete. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *128*, 88–95, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.10.074.
17. Feng, J.; Zhang, H.; Zhang, R. Discussion of blast furnace slag recycling of a factory. In *Proceedings of the 2015 27th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2015*; IEEE, 2015; pp. 5663–5666.
18. Wu, S.; Xue, Y.; Ye, Q.; Chen, Y. Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. *Build. Environ.* **2007**, *42*, 2580–2585, doi:10.1016/j.buildenv.2006.06.008.
19. Yüksel, İ. A review of steel slag usage in construction industry for sustainable development. *Environ. Dev. Sustain.* **2017**, *19*, 369–384, doi:10.1007/s10668-016-9759-x.
20. World Steel World Crude Steel Production - Summary The Largest Steel-Producing Countries. **2012**, *3*.
21. WorldSteel Association WorldSteel FACT SHEET Steel industry by-products Steel production and by-products at a glance. **2016**.
22. Sas, W.; Gluchowski, A.; Radziemska, M.; Dzieciol, J.; Szymanski, A. Environmental and geotechnical assessment of the steel slags as a material for road structure. *Materials (Basel)*. **2015**, *8*, 4857–4875, doi:10.3390/ma8084857.
23. Engineering, C.; Tropical, I. Lime and Slag Admixture Improvement of Tropical Black Clay Road Foundation. **2010**.
24. Gökalp, İ.; Uz, V. E.; Saltan, M.; Tutumluer, E. Technical and environmental evaluation of metallurgical slags as aggregate for sustainable pavement layer

- applications. *Transp. Geotech.* **2018**, *14*, 61–69, doi:10.1016/j.trgeo.2017.10.003.
25. Nishigaki, M. Producing permeable blocks and pavement bricks from molten slag. *Stud. Environ. Sci.* **1997**, *71*, 31–40, doi:10.1016/S0166-1116(97)80186-0.
  26. Rubio, M. D. Influencia de la adición del polvo de humo ferrítico en el comportamiento reológico y resistente de morteros y hormigones, Universidad de Málaga, 2008.
  27. Lima, C.; Caggiano, A.; Faella, C.; Martinelli, E.; Pepe, M.; Realfonzo, R. Physical properties and mechanical behaviour of concrete made with recycled aggregates and fly ash. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *47*, 547–559, doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.04.051.
  28. Singh, G.; Siddique, R. Strength properties and micro-structural analysis of self-compacting concrete made with iron slag as partial replacement of fine aggregates. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *127*, 144–152, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.09.154.
  29. Adec Global Available online: <https://www.adecglobal.com/es/adec-global/> (accessed on Jun 19, 2018).
  30. Fomento, M.; Rural, M. medio ambiente y; CEDEX Ficha técnica escorias de horno de arco eléctrico. *CEDEX* **2011**, *2.3*, 1–19.
  31. Calleja, J. Escorias y cementos siderúrgicos. *Mater. Construcción* **1982**, *186*, 35.
  32. Gokce, A.; Beyaz, C.; Ozkan, H. Influence of fines content on durability of slag cement concrete produced with limestone sand. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *111*, 419–428, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.139.
  33. Parra Araque Lina María; Pilar, S. G. D. Analisis de la valoración de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la Siderurgica DIACO, Municipio de Tuta, Boyacá., 2010.
  34. Pellegrino, C.; Cavagnis, P.; Faleschini, F.; Brunelli, K. Properties of concretes with black/oxidizing electric arc furnace slag aggregate. *Cem. Concr. Compos.* **2013**, *37*, 232–240, doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.09.001.
  35. Pepe, M.; Koenders, E. A. B.; Faella, C.; Martinelli, E. Structural concrete made with recycled aggregates: Hydration process and compressive strength models. *Mech. Res. Commun.* **2014**, *58*, 139–145, doi:10.1016/j.mechrescom.2014.02.001.
  36. Pepe, M.; Toledo Filho, R. D.; Koenders, E. A. B.; Martinelli, E. Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *69*, 124–132, doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.06.084.
  37. Cedex *Ficha técnica Escorias de Acería Horno de arco eléctrico*; 2011;
  38. Vinet, L.; Zhedanov, A. Steelmaking slag valorization from landfill as a substitute for cement in the manufacture of concrete. *Pat. PCT ES2014-000128, BOPI 22 septiembre 2015 P201300758* 2010, 1–16.

## Capítulo 1

39. Neves Junior, A.; Filho, R. D. T.; Fairbairn, E. de M. R.; Dweck, J. A study of the carbonation profile of cement pastes by thermogravimetry and its effect on the compressive strength. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2014**, *116*, 69–76, doi:10.1007/s10973-013-3556-7.
40. Ferraris, C. F.; Obla, K. H.; Hill, R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. *Cem. Concr. Res.* **2001**, *31*, 245–255, doi:10.1016/S0008-8846(00)00454-3.
41. Xuequan, W.; Hong, Z.; Xinkai, H.; Husen, L. Study on steel slag and fly ash composite Portland cement. *Cem. Concr. Res.* **1999**, *29*, 1103–1106.
42. Tsakiridis, P. E.; Papadimitriou, G. D.; Tsvilis, S.; Koroneos, C. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. *J. Hazard. Mater.* **2008**, *152*, 805–811, doi:10.1016/j.jhazmat.2007.07.093.
43. Herrero Vázquez, T. Estudio del efecto de la hidratación de la escoria blanca de acería de HEA: aplicación en pastas y morteros de cemento, Universidad de País Vasco, 2015.
44. Shi, C.; Zheng, K. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resour. Conserv. Recycl.* **2007**, *52*, 234–247, doi:10.1016/j.resconrec.2007.01.013.

# **CAPÍTULO 2**

**Breve historia del Acero, la  
Escoria y el Hormigón**



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## Capítulo 2. Breve historia del acero, la Escoria y el Hormigón

<b>2.1</b>	<b>ACERO</b>	<b>21</b>
2.1.1	HISTORIA DEL ACERO	21
2.1.2	TIPOS DE ACERO	23
a.	Aceros al carbono	24
b.	Aceros aleados	25
2.1.3	ESCORIAS	26
2.1.3.1	Escoria de horno alto (GGBFS)	26
-	Propiedades escorias GGBFS	28
2.1.3.2	Escoria de arco eléctrico	29
-	Propiedades de las escorias blancas (LFS)	32
<b>2.2</b>	<b>HORMIGÓN</b>	<b>33</b>
2.2.1	HISTORIA DEL HORMIGÓN	34
<b>2.3</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>38</b>

### Índice de tablas.

Tabla 2. 1	Composición química de las escorias de alto horno	29
Tabla 2. 2	Residuo y cantidad generada de éstos por cada tonelada de acero producida	31
Tabla 2. 3	Composición química escorias blancas (LFS)	33

### Índice de figuras.

Figura 2. 1	Proceso siderúrgico general [13]	24
Figura 2. 2	Escoria granulada de alto horno [16]	28
Figura 2. 3	Proceso de fabricación de acero con hornos de EAF-LF [17]	30



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## 2.1 ACERO

Inevitablemente, hoy en día el acero es uno de los materiales esenciales para la evolución del mundo tal y como lo conocemos. Imprescindible en cualquier ámbito, tanto social como empresarial, es utilizado a modo de ejemplo tanto en las grandes construcciones ferroviarias como en el alfiler que se utilice para coser un botón. Es un material de gran dureza y muy sostenible medioambientalmente.

Acero es el nombre del material formado por los elementos hierro (Fe) y carbono (C), en el cual la cantidad de carbono en disolución sólida en el hierro es menor del 2,1%. Esto implica que no sólo hay un tipo de acero, sino que hay distintos tipos del mismo en función de esta proporción. Estos elementos son fácilmente asequibles en la corteza terrestre ya que se encuentran en alta proporción. El único inconveniente que tiene es su proceso de elaboración, ya que se requiere de una tecnología muy avanzada para su fabricación. Por tanto, muchos países no llegan a alcanzar calidades determinadas en su producción [1].

Por lo explicado anteriormente, no hay que confundir hierro y acero, ya que el hierro hemos dicho que es un elemento fundamental del acero pero en aleación con otro material, como es el carbono. Hay grandes cantidades de hierro en toda la Tierra desde hace millones de años. En cambio, el acero hay que fabricarlo [2].

## HISTORIA DEL ACERO

El término "acero" procede del latín "*aciarius*", y éste proviene de la palabra "acies", llamándose así el filo de un arma blanca en latín. Es por ello que llamamos "aciarius" a un metal que sea adecuado, por su resistencia y fortaleza, a ir en la zona cortante de las armas o utensilios de corte [3].

No se sabe exactamente cuándo se comenzó a fabricar el acero, pero existen restos arqueológicos que datan de 3000 años a. C. Estos primeros restos se encontraron en Egipto, pero hay investigaciones donde se han hallado otro tipo de elementos encontrados que pueden llegar a ser incluso anteriores a estos. Se conoce que en el año 1400 a.C., los africanos fabricaban acero con hornos de carbono, por lo que la Edad del Hierro llegó pronto a África, sobre el siglo VI a.C. y particularmente a Etiopía [4].

En el siglo I a. C. se descubrió acero al calentar hierro forjado y fundido a la vez, ocurriendo todo ello durante la dinastía Han de China [5]. Además, se utilizaron métodos para crear otro tipo de acero, como el "wootz". Este tipo surge en India y Sri Lanka, sobre el año 300 a. C, y en el siglo V se comienza a exportar a China. El acero "wootz" tenía un alto contenido de carbono, siendo comercializado por herreros de la zona en Oriente, y le daban forma de pequeño queso fresco [6]. La forma de fabricarlo era mediante un horno de viento y se le daba la forma en época de monzones, ya que durante esa época era el viento el que hacía funcionar el horno. A este tipo de hacer también se le conoce como "Acero de Damasco", por sus famosas espadas, y se utilizó en la Edad Media. La

forma de obtenerlo es mediante hierro puro, que se reduce calentándolo a 1.200 °C y se obtiene mediante golpes un hierro libre de impurezas. Por lo que, al final, se obtiene un hierro bajo en carbono. Una vez se ha obtenido este tipo de acero, en un crisol se le añade carbón y se calienta nuevamente a 1.200 °C en una atmósfera libre de oxígeno. Luego, al enfriarse, la austenita se convierte en cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) y en perlita, esto es, una alteración de capas de cementita y ferrita.

Una vez conseguido el material, los herreros obtenían mejores espadas, más resistentes y elásticas, templando el material [7]. Peter Paufler, estudió este tipo de estructuras y sugirió que se formaban pequeños tubos de carbono, y esto explicaría las buenas propiedades de estas espadas como su dureza y la capacidad de mantener el filo de la misma intacto. Pero en esa época, lo más probable es que fuese fruto de la casualidad y no de un diseño previamente pensado [8].

Este diseño de acero debió durar siglos, ya que no se conoce otros tipos distintos hasta el año 1740, año en el que se descubre el acero de “crisol”. En este caso, también fruto de la casualidad, el británico Benjamin Huntsman descubrió la forma de producir acero tal y como lo hacían los indios, es decir, mezclando hierro y carbón vegetal en un crisol. Posteriormente se intentaron introducir otros métodos con menor éxito, por lo que éste se siguió utilizando hasta 1902, fecha en la que se inventó el horno eléctrico [9].

Los otros métodos que se intentaron introducir a mediados del siglo XIX fueron los descubiertos por Henry Bessemer, en el que la producción se llevaba a cabo en un horno al que se le denominaba “convertidor”. Lo bueno que tenía este método con respecto al proceso de crisol es que era más económico, por lo que con este método se fabricaron en aquella época mayores volúmenes de acero.

Este nuevo proceso de fabricar acero era mediante la inyección de aire en el fondo del horno y así burbujear a través del hierro fundido. De esta forma, el carbono genera mucho más calor, produciéndose un metal más refinado [6]. El método que utilizó el británico fue fabricar un recipiente con forma cónica de acero, revestido de ladrillos refractarios. A esto lo llamó convertidor, y tenía la facilidad de poder inclinarlo para vaciar la mezcla. Por lo tanto, era más cómodo verter el material en el recipiente e insuflar aire mediante unos orificios hechos en la base, durando esta inyección de aire alrededor de veinte minutos, cosa que era muy llamativa para la época. Pero este acero no era de mucha calidad ya que, como contenía oxígeno, era muy quebradizo, por lo que para objetos en los que se necesitase durabilidad y resistencia se prefería el acero de crisol [9].

Otro proceso que tampoco tuvo mucho éxito fue el desarrollado por Siemens en 1857, en el que se descarburizaba la fundición del hierro y el óxido de hierro. Esto era producto del calentamiento con aceite y gas de coque, pero como ya hemos comentado, no tuvo mucho éxito.

Ya en 1902 es cuando se comienza a fabricar acero en horno eléctrico, siendo invento de Paul Héroult. Esta forma de producción suponía introducir chatarra de acero y hacer saltar un arco eléctrico entre la misma y grandes electrodos de carbono, los cuales

estaban colocados en la parte arriba del horno. Esto produce calor, que derrite el material, y se genera un tipo de acero de mayor calidad al no entrar en contacto con gases, siendo un elemento de mayor calidad. Si quedase alguna impureza, le añadían flúor para eliminarla [10].

En 1945, comenzaron a investigar otras técnicas para mejorar el acero como, por ejemplo, la de inyectar oxígeno al final del proceso de elaboración del mismo, es decir, cuando hay que refinar el material. Pero hasta 1948, en Austria, no se logró desarrollar un nuevo procedimiento diseñado por Donawitz, quien utilizó en el proceso oxígeno básico o L-D. Este procedimiento actualmente es el más utilizado en todo el mundo.

Esta nueva forma de producir acero mediante oxígeno básico se realiza en un recipiente de forma semejante al del acero de convertidor. En un principio, sólo se utilizaba para convertir arrabio que fuese bajo en fósforo (0,3%), pero poco a poco se fue extendiendo para arrabios con mayor contenido del mismo, hasta el 2% de fosforo, al cual se le añadía un chorro de oxígeno con polvo de piedra caliza [6]. Esto es gracias a que, al inyectar oxígeno a una gran velocidad, el carbono y las impurezas que pueda contener el material se eliminan rápidamente [11].

El alemán Junghans, junto con el italiano Rossi, después de la Primera Guerra Mundial, comenzaron a investigar con metales ligeros hasta que, en 1942, decidieron extrapolarlo al acero; y desde 1950 hasta 1954, pusieron en marcha a escala industrial el proceso de colada continua. Y a partir de ahí se comenzaron a construir instalaciones de este tipo.

El tipo de maquinaria para la elaboración de acero mediante colada continua ha ido cambiando. Se comenzó con máquinas verticales, y poco a poco han ido disminuyendo su altura, hasta llegar a máquinas completamente horizontales [12].

Así llegamos hasta la fabricación de acero hoy en día, que nos lleva a dos caminos complementarios, tanto en su fabricación, como en su reciclaje, ya que la primera parte de la producción genera el material; y la segunda parte recicla los residuos producidos por el proceso. A este tipo de residuos se le denomina “chatarra”.

Con la primera parte se cubre la necesidad mundial del producto; y con la segunda, se cierra un ciclo de economía circular y eficiencia energética. Diremos que se reciclan más de 500 millones de toneladas de acero al año, y en este punto España es líder en fabricación y reciclado [13].

### 2.1.1 TIPOS DE ACERO

Hoy en día, la fabricación de acero en la industria siderúrgica se produce mediante dos formas distintas:

- Siderurgia integral (BOF), horno alto y convertidor de oxígeno LD, en las que el mineral de hierro es reducido con carbón en un alto horno para dar lugar a un

## Capítulo 2

producto intermedio (arrabio) donde, a partir de éste, se obtienen los distintos tipos de acero primario.

- Acería de horno de arco eléctrico (EAF), en las que se produce acero reciclado mediante la fusión de chatarra.

Las dos materias primas necesarias para la fabricación de acero son el arrabio y la chatarra. Ambas son las que, según su calidad, aportan al acero sus mejores o peores propiedades.

Para fabricar acero en el convertidor de oxígeno (siderurgia integral) se utiliza hierro puro y entre un 20% y un 30% de chatarra. Pero si partimos solo de la utilización de chatarra, sin adición de hierro puro, se utiliza exclusivamente el horno de arco eléctrico [14], (Figura 2. 1).

La fabricación tiene las siguientes etapas: derretir la chatarra mediante corriente eléctrica, que consiste en una serie de fases como la oxidación que elimina impurezas; posteriormente afino, en el que se eliminan óxidos metálicos; y hay una desulfuración y decarburación del acero.



Según los elementos aleados del acero así los podemos clasificar:

### a. Aceros al carbono

Generalmente se fabrican en horno eléctrico. En estos hornos se garantiza que la composición de azufre y fósforo se encuentre en valores menores al 0,03 %. La mayoría de los aceros fabricados son de este tipo.

Con este tipo de acero se fabrican muchísimos productos que utilizamos a diario como, por ejemplo, en el sector de la automoción, en el naval, en la edificación, además otros muchos tipos de utensilios que igualmente contienen acero.

La otra forma de clasificar este tipo de aceros es según la cantidad de carbono, el cual no puede superar el 0,25%, por lo que tendríamos:

- Aceros de bajo contenido en carbono
- Aceros de alto contenido en carbono

#### **b. Aceros aleados**

Otro tipo de aceros son los aleados. Contienen, además de vanadio y molibdeno, mayores cantidades de otros compuestos, como son el silicio y el carbono, que los aceros normales. Estos se clasifican en:

##### a) Estructurales

Aquellos que se utilizan tanto en estructuras de edificios, como para maquinaria o construcciones de chasis de automóviles.

##### b) Para Herramientas

Para este tipo de objetos, el acero debe ser de muy buena calidad, ya que algunas de estas herramientas se emplean para cortar y otras son moldes, los cuales deben tener la suficiente calidad como para que no se deterioren a la hora de utilizarlos.

##### c) Aceros inoxidables

Este tipo de aceros se diferencian del resto de los aleados porque tienen un mayor contenido de cromo, que suele ser superior al 12%, y además contienen níquel. Estos aceros son muy resistentes a las temperaturas elevadas y tienden a corroerse en menor medida que el resto [16].

En la fabricación de este tipo de acero se producen grandes cantidades de residuos, que se generan en los distintos procesos. Cada uno de estos residuos tiene propiedades que los hacen aptos para utilizarlos como subproductos, y cada uno de ellos tiene características tanto químicas como físicas, que los hacen distintos entre sí. Los residuos más habituales son los polvos de humo, procedentes de la depuración de las chimeneas de las fábricas; y las escorias de acería, que se producen en la última fase del proceso de fabricación.

En esta tesis nos centraremos en los diferentes tipos de escoria, no siendo todas iguales. Las clasificaremos en 6 grandes grupos:

- Escoria de horno alto (Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS))**
- Escoria de horno de arco eléctrico (Electric Arc Furnace Slag (EAFS))  
(Escorias negras)

- c) **Escoria de horno eléctrico de cuchara (Ladle Furnace Slag (LFS)) (Escorias blancas)**
- d) Escoria de convertidor al oxígeno (Basic Oxygen Furnace Slag (BOFS))
- e) Escoria de convertidor
- f) Escoria de cubilote

\* En este trabajo nos centraremos en dos tipos de escoria como material cementante, que son las escorias de alto horno (GGBFS) y las escorias de horno de cuchara (LFS).

### 2.1.2 ESCORIAS

Según la Sociedad Pública de gestión del Gobierno Vasco (IHOB), las escorias son residuos “inertes”, pudiendo ser sólidos o pastosos, y no tienen cambios significativos, no siendo residuos peligrosos (RP), obteniéndose de los distintos procesos industriales [14].

Son unos componentes esenciales en los procesos metalúrgicos de oxidación y reducción.

Nos centraremos en definir los dos tipos de escoria que van a ser utilizados en esta tesis, para hacer una comparación de ellos.

#### 2.1.3.1 Escoria de alto horno (GGBFS)

El alto horno (GGBFS) es el más antiguo (más de 700 años) de los diversos reactores que se utilizan en las plantas siderúrgicas. Se utiliza para la producción de hierro líquido (metal caliente). El alto horno es un reactor de contracorriente de alta temperatura, complejo, y que tiene la forma de un eje, en el cual los materiales que contienen hierro (mineral, sinterizado / gránulos) y el coque, se cargan alternativamente en la parte superior junto con materiales de flujo (piedra caliza, dolomita, etc.) para crear una carga en capas en el horno.

Se sopla aire precalentado desde la parte inferior del horno a través de las toberas. Este aire caliente reacciona con el coque para producir gases reductores. La carga de mineral descendente (óxidos de hierro) se reduce por los gases reductores ascendentes y se derrite para producir metal caliente. Los materiales de ganga y la ceniza de coque, se funden para formar escoria con los materiales fundentes.

Los productos líquidos (metal caliente y escoria), se drenan (roscados) del horno a ciertos intervalos a través del orificio del grifo. La calidad del metal caliente obtenido depende de la formación de la escoria y sus transformaciones mineralógicas. Una escoria de buena calidad, es necesaria para un metal caliente de calidad. La escoria es una mezcla de compuestos químicos de bajo punto de fusión, formados por la reacción

química de la ganga de la carga de hierro y la ceniza de coque con los materiales de flujo en la carga. Todos los compuestos no reducidos, tales como silicatos, aluminosilicatos y aluminosilicatos de calcio, etc., también se unen a la escoria.

Los componentes de la escoria aportan distintas propiedades al material fundente. La sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) aumentan la viscosidad, mientras que la presencia de óxido de calcio, la reduce. La zona de fusión de la escoria determina la zona cohesiva del alto horno y, por lo tanto, la fluidez y las características de fusión de la misma juegan un papel importante en la determinación de la productividad del alto horno.

Inicialmente, se forma escoria rica en hierro y, posteriormente, debido a la asimilación de óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) a partir de materiales de flujo, esta composición de la escoria es distinta en función de los componentes. A medida que la escoria se escurre, asimila  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de las cenizas, generadas por la combustión del coque. El proceso de goteo depende de la fluidez (baja viscosidad) de la escoria que, además, se rige por su composición y temperatura.

La escoria de alto horno se forma cuando el mineral de hierro o los gránulos de hierro, el coque y un fundente (ya sea piedra caliza o dolomita), se funden en un alto horno. Cuando se completa el proceso de fundición de estos minerales, la cal se combina químicamente con los aluminatos y silicatos del mineral y la ceniza de coque para formar un producto no metálico llamado escoria de alto horno. Durante el período de enfriamiento y endurecimiento desde su estado fundido, la escoria GGBFS se puede enfriar de varias maneras para formar cualquiera de varios tipos de productos de escoria [17].

En el alto horno el material de combustión y el mineral se suministran desde la parte superior, a la vez que se inyecta un flujo de aire desde el fondo de la cámara. Esto obliga a que la reacción química tenga lugar en todo el mineral, no solo en la superficie.

La escoria BF normalmente se produce en dos formas:

- \* **Escoria granulada de alto horno (GGBFS):** cuando la escoria líquida se enfría y se solidifica por enfriamiento rápido del agua a un estado vítreo, se produce poca o ninguna cristalización. Este proceso da como resultado la formación de fragmentos de tamaño de arena, generalmente con algún material similar al clínker.

La escoria granulada de alto horno, es un material granular vítreo que varía según la composición química y el método de producción.

Cuando se muele hasta la finura adecuada, la composición química y la naturaleza vítrea (no cristalina) de las escorias vitrificadas son tales que, en combinación con el agua, estas escorias vitrificadas reaccionan para formar productos de hidratación cementosos. La magnitud de estas reacciones cementosas depende de la composición química, el contenido de vidrio y la finura de la escoria. La reacción química entre GGBFS y el agua es lenta, pero se ve reforzada por la presencia de hidróxido de calcio, álcalis y yeso ( $\text{CaSO}_4$ ).

Debido a estas propiedades cementosas, GGBFS puede usarse como material cementante complementario, ya sea premezclando la escoria con cemento Portland o cal hidratada para producir un cemento mezclado (durante el proceso de producción de cemento), o agregando la escoria al cemento Portland como un mineral mezcla.

- \* **Escoria de alto horno enfriada por aire (Air granulated blast furnace slag (ACBFS)):** Si la escoria líquida se vierte en lechos y se enfría lentamente en condiciones ambientales, se forma una estructura cristalina para producir una escoria gruesa dura, que posteriormente puede aplastarse y apantallarse. El ACBFS aplastado es angular, aproximadamente cúbico, y tiene texturas que van desde superficies ásperas, vesiculares (porosas), hasta superficies vítreas (lisas) con fracturas conoidales [18].

#### - **Propiedades escorias GGBFS**

La estructura física de este tipo de escorias varía en función de su composición química y el modo de enfriamiento al que es sometida, si es mediante agua o al aire libre, y la forma de producirse esta.

Su tamaño se presenta como el de las arenas entre 0/6 mm (Figura 2. 2), con un tamaño medio de grano 1mm [19]. La cantidad de finos que se obtiene es pequeña, entre el 5 y el 10 %, aunque estos porcentajes aumentan en los procesos de manipulación de las mismas.



Figura 2. 2 Escoria granulada de alto horno [19]

Cuando se tritura o muele a partículas de tamaño de cemento muy fino, la escoria de alto horno granulada molida (GGBFS) tiene propiedades cementosas. Esta propiedad de la escoria lo convierte en un aditivo adecuado para el cemento Portland.

### Propiedades químicas

Estas escorias conservan su calor de cristalización, por lo que energéticamente tiene gran valor y mantienen latente su hidraulicidad, lo que conlleva a que en contacto con agua se formen cristales de gran dureza y resistentes a la acción del agua.

Su composición química va en función del mineral de hierro utilizado, las cenizas de coque, y los óxidos del material fundente empleado.

Los resultados medios son los siguientes (Tabla 2. 1):

Escorias GGBFS			
COMPUESTO	PORCENTAJE (%)	COMPUESTO	PORCENTAJE (%)
CaO	38-42	FeO	0.4-0.8
SiO <sub>2</sub>	32-37	MnO	0.2-0.6
MgO	7-9	TiO <sub>2</sub>	0.3-0.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10-14	I <sub>b</sub>	<1.2
S	<1	I <sub>bs</sub>	<1.3

Tabla 2. 1 Composición química de las escorias de alto horno

#### 2.1.3.2 Escoria de arco eléctrico

La producción de acero en el horno de arco eléctrico produce un tipo de escoria, la *Electric Arc Furnace Slag* (EAFS) o escoria negra; y con un posterior afino de dicho acero en el horno de cuchara, se produce un tipo de escoria diferente, la *Ladle Furnace Slag* (LFS) o escoria blanca.

La generación de escoria se produce al fabricar acero en este tipo de hornos, manifestándose la misma sobre el líquido fundido. Para poder retirar este residuo, se incorpora la cal para cubrirlo superficialmente. Esto sucede en la fase oxidante del proceso.

Las reacciones de oxidación mencionadas son exotérmicas, lo que hace que aumente la temperatura, disminuyendo el consumo energético. Una vez oxidado el silicio y el manganeso, la temperatura del metal fundido ronda los 1.600 °C. El contenido de cal en la escoria, hace que se produzca la eliminación de fósforo del líquido (defosforación). Es en esta fase, cuando por una de las puertas del horno se extrae la escoria, conocida como “escoria negra” (EAF), que es de colores oscuros con un aspecto poroso, morfología regular, cúbica y fractura puntiaguda.

En la Figura 2. 3 vemos un sencillo diagrama donde observamos de donde provienen las distintas escorias.



Figura 2.3 Proceso de fabricación de acero con hornos de EAF-LF [18]

La siguiente fase es la de afino. En esta fase se consigue un metal que contiene poco oxígeno y elimina el azufre. El material derretido se vierte en el horno de afino y se cubre con una escoria reductora denominada “escoria blanca” (LFS), la cual logra que se reduzcan óxidos metálicos.

Paralelamente a este proceso, se inicia la desulfuración del material fundido, el cual finalizará en el horno-cuchara, y antes de que el material pase a la colada se desescoria de nuevo. De esta forma se elimina la escoria blanca [20].

Hay una diferencia entre la fabricación de acero común y acero especial, y esta se encuentra en la fase del afino; mientras que, en el caso del acero inoxidable, su fabricación desde el comienzo es distinta, ya que lo normal es realizarla en atmósfera controlada por argón para evitar la oxidación del cromo.

En estos dos procesos (fusión y afino) forman tres fases:

- i. Fase líquida: formada por el líquido fundido.
- ii. Fase sólida: formada por la escoria (negra procedente de fusión y blanca procedente del afino)
- iii. Fase gaseosa: formada por los gases de fusión y las partículas finas (polvo de acería)

Los residuos generados como consecuencia del proceso productivo son los siguientes:

1. Gases generados como consecuencia de los procesos de fusión y afino. Los gases son depurados, normalmente, en instalaciones de filtración por vía seca que retienen las partículas arrastradas con los gases. Los gases una vez depurados son emitidos a la atmósfera, mientras que las partículas retenidas en los sistemas de filtración por vía seca, conocidas como polvos de acería, son almacenadas para su posterior gestión.

2. Sólidos. Entre los que se pueden distinguir las escorias (escorias negras procedentes del proceso de fusión, y escorias blancas procedentes del proceso de afino); los refractarios, procedentes de la rotura del refractario o de la reconstrucción y reparaciones del horno; y los electrodos como consecuencia de la degradación o rotura de los mismos.

La generación de residuos por tonelada de acero fabricado se encuentra en la Tabla 2. 2:

RESIDUO	CANTIDAD (kg)
<b>Escoria negra</b>	<b>110-150</b>
<b>Escoria blanca</b>	<b>20-30</b>
<b>Polvo de acería</b>	<b>18-28</b>
Polvo primario	10-15
Polvo secundario	3
Polvo de afino	5-10
<b>Refractarios</b>	<b>4-10</b>
<b>Electrodos</b>	<b>1,3-2</b>

Tabla 2. 2: Residuo y cantidad generada de éstos por cada tonelada de acero producida [14]

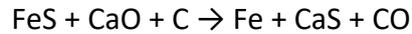
- \* **Escoria Blanca (LFS):** Ya hemos comentado que la fabricación de este tipo de escorias se produce después de la etapa del afino. Tras la fusión, este está basado en dos etapas: una primera denominada afino primario (afino ácido) y se lleva a cabo en el horno EAFS o en el LFS; y la segunda denominada afino secundario (afino básico) y se realiza en el horno de cuchara.

Durante la primera etapa, se lleva a cabo el proceso con afino ácido, contemplando las fases de soplado con oxígeno, defosforación y formación de la escoria.

En la segunda fase del proceso de afino se vuelve a añadir la materia prima, esto es, el caldo fundido procedente del arco eléctrico. Este caldo se vuelve a cubrir otra vez con escoria y se agita continuamente con un soplado de gas inerte. Esta es la fase en la que tiene lugar la desulfuración del líquido fundido y es aquí cuando se produce la escoria blanca, gracias a la combinación del calcio que entra en contacto con el líquido fundido y la cal existente en él [21]. Por lo que cuando la carga de acero líquido se vacía en el horno de arco eléctrico, hasta la cuchara, se forma en la superficie una espuma que una vez enfriada produce, como hemos dicho antes, la “escoria blanca” (LFS). Ello sucede porque la densidad de las escorias es menor que la del caldo.

Esta fase de desulfuración es muy importante para la elaboración del acero ya que, como se encuentra presencia de azufre, éste puede formar sulfuro de hierro (FeS), el cuál funde a 1.190 °C y origina, junto con el hierro eutéctico, un punto de fusión muy bajo. Estos dos compuestos solidifican, formando membranas, las cuales envuelven los

cristales de hierro solidificados a temperaturas de 1.535 °C. Si el acero se produce a menos de esa temperatura es más frágil y aparecen numerosas grietas en el proceso. Y ya por último, el proceso de desulfuración se produce al adicionar calcio al líquido, por lo que ocurre la siguiente reacción:



Este proceso es más eficaz, cuanto más básica sea la escoria y menor contenido en hierro tenga, por lo que es esencial en el proceso asegurar la basicidad de la escoria. Ésta debe tener alrededor de un 70% de CaO-MgO, ya que la función que cumple el óxido de hierro es exactamente la de mantener la basicidad alta, y el MgO se encarga de la protección de las paredes del refractario [21]. Pero este compuesto no se puede encontrar en abundancia en la escoria, ya que hay estudios en los que se le atribuye a la expansividad de la misma [22]. Además estos dos compuestos no pueden coexistir en estado líquido porque tienen su punto de fusión en 2.800 °C y 2.600 °C, respectivamente, mientras que la escoria alcanza su punto de fusión a 1.200 °C [18]. Por lo tanto, lo que sucede es que la escoria se satura por la cal y, por esta razón, obtenemos dos tipos de escoria en función de que se encuentren más o menos saturadas:

- Escoria blanca saturada en sílice
- Escoria blanca saturada en alúmina

Estos dos tipos de escoria tienen una composición parecida, pero se pueden comportar de manera diferente según el tratamiento que reciban en las acerías, ya que la adición de sílice o alúmina durante la desulfuración puede originar diferentes compuestos. En las acerías españolas, lo normal es la obtención de escorias blancas saturadas en sílice.

Una vez pasado este proceso, la escoria incandescente se lleva a acopios, en los cuales se produce el proceso de enfriamiento. Al principio llega como una masa hasta que, trascurrido un tiempo, se produce la pulverización de la misma.

#### - **Propiedades de las escorias blancas (LFS)**

Como acabamos de comentar, ya en vertedero y una vez enfriada, la escoria se encuentra en forma de polvo. Esta cualidad se mantiene constante si permanece en un lugar seco y protegido de la temperatura ambiente. Si el enfriamiento al que es sometido se encuentra a la intemperie, será rápido, y lo que generará es un material amorfo y quebradizo; en cambio, se conservarán las propiedades polvorientas con un color grisáceo y suave al tacto si el enfriamiento es lento. Para nuestro estudio necesitamos escorias finas, ya que cuanto más fina es la escoria mejores propiedades cementosas tiene.

### **Propiedades químicas**

Como veremos a continuación, la composición química de las escorias (LFS) es distinta a las (EAFS), ya que contienen menos óxidos ferrosos. Esta composición, según la acería de donde se obtengan las escorias, también varía, ya que el tipo de chatarra que utiliza cada una de ellas es distinta. Por lo tanto, las características de los residuos generados también serán diferentes [23].

Este tipo de escorias contiene cal libre y magnesio. Esto puede dar lugar a problemas tales como expansión retardada en zonas estructurales, siendo por ello muy importante hacer un estudio exhaustivo de cada tipo de escoria y su reacción con agua, ya que es lo que más afecta a esta estabilidad de volumen. Por tanto, necesitamos escorias cuyo grado básico sea inferior a dos, ya que las fases cristalinas que se forman tienen estabilidad volumétrica [24].

En general, los óxidos de aluminio y silicio son los que forman la escoria blanca, y suponen un 40% del peso total. El 60% lo componen el resto de compuestos, siendo en menor porcentaje los de magnesio, titanio, etc.

En el capítulo de materiales veremos si nuestras escorias se asemejan a alguna de estas.

En la siguiente tabla se puede ver la composición y el porcentaje en el que se encuentran (Tabla 2. 3):

COMPUESTO	PORCENTAJE (%)		
CaO	45 - 62	S	1.4 - 1.65
SiO <sub>2</sub>	17 - 20	FeO	0 - 0.95
MgO	4 - 17	MnO	0 - 1.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 - 10	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 - 3.6

Tabla 2. 3 Composición química escorias blancas (LFS)

## **2.2 HORMIGÓN**

El hormigón es el material de construcción más empleado en el mundo [25] y el segundo elemento más consumido por el hombre en la actualidad, sólo por detrás del agua. Se estima que se consume aproximadamente una tonelada anual por cada ser humano [26].

Una de las características que lo diferencian de otros materiales estructurales es su fácil disponibilidad, al estar compuesto por materiales que se obtienen fácilmente de la naturaleza (áridos, cada español ha consumido, en 2016, unos 2.070 kilogramos anuales, es decir 5,7 kilogramos diarios), además de su docilidad, ya que permite libertad de diseño en su ejecución, y el resto de propiedades como resistentes, su elevada durabilidad y un mantenimiento reducido por lo general.

### 2.2.1 HISTORIA DEL HORMIGÓN

*Hormigón* procede del término *formicō* (o *formáceo*), palabra latina que alude a la cualidad de “moldeable” o “dar forma” [27]. El término “concreto”, definido en el diccionario de la RAE como americanismo [28], también es originario del latín: procede de la palabra *concretus*, que significa “crecer unidos” o “unir”. “*Concretus*” es una palabra compuesta en su prefijo “*com-* (unión)” y el participio pasado del verbo “*crēscere* (crecer)”. En el idioma español proviene de un anglicismo que nos viene de la cultura anglosajona [29] (o calco semántico), siendo en inglés *concrete*.

“Etimológicamente concreto es sinónimo de *concrecionado* y *concreción*, que es la unión de diversas partículas para formar masa” [27].

¿Cuáles son las propiedades que caracterizan y valoran este material de construcción y su permanencia en el tiempo? Esta pregunta permite referenciar al hormigón como el integrante de edificación más habitual de cualquier época, actual o remota. Sus usos iniciales muestran ciertas divergencias de fechas entre distintos autores. El hombre prehistórico que vive en las cuevas, llega a comprender que esa envolvente que le protege es un hecho excepcional en la naturaleza. Pero entiende muy bien la singularidad de su cobijo. Cuando, forzado por la demografía y el dominio del medio, se ven obligados a dejar las cuevas, comienzan el imposible reto de reedificarlas con sus propias manos y los materiales existentes ubicados en su cueva, piedras calizas, yeso y arcilla. La alternancia de temperaturas, consigue carbonatar la piedra transformándola en polvo. Con la lluvia o por la erosión interna del suelo se produce la adhesión del polvo a la piedra, transformándose en una masa sólidamente unida. Investigaciones más modernas realizadas en Lepenski Vir, en el entorno del río Danubio, en la década de los sesenta, permiten afirmar que, durante la Edad de Piedra, hace 8.000 años, sus moradores fundaban el suelo de sus viviendas y recintos de culto uniendo tierra caliza, arena, grava y agua. Esta argamasa, es calificada por algunos autores, como un hormigón primitivo que permitía a estos pobladores nómadas asentamientos perdurables.

Tras el neolítico, los siguientes grandes constructores se trasladaron a Egipto empleando como aglomerante yeso cocido. Distintas excavaciones fijan en algo más de 4.000 años que los arquitectos de la pirámide de Giza hicieron uso de un tipo de hormigón autóctono, manufacturado en bloques con cemento procedente de piedra caliza.

Al comienzo de la Edad de Bronce, sobre el año 3000, aparece en la antigua Grecia la civilización cicládica, coincidiendo en el tiempo con la civilización minoica de Creta y los egipcios. Aún se encuentran en el asentamiento de Akrotiri en la isla de Santorini, un yacimiento arqueológico, donde sus edificios no sólo están sellados con una mezcla de materiales volcánicos, si no su arquitectura doméstica responde a los continuos sismos ocasionados por el volcán, que desarrolló la isla y que posteriormente en el año 1600 la destruyó, quedando en su geografía actual. En el siglo IV a.C., según el filósofo griego Empédocles de Agrigento, en sus poemas explicando los fundamentos científicos y racionales acerca del mundo natural, escribió, que “*todos los materiales de la naturaleza*

*están compuestos por cuatro elementos básicos juntando el agua de Tales de Mileto, el fuego de Heráclito de Éfeso, el aire de Anaxímenes de Mileto y la tierra de Jenófanes de Colofón, los cuales se mezclan en los distintos entes sobre la Tierra*” [30]. Existen indicios para admitir que emplearon cal mezclada con arcilla cocida y agua. Así, la fabricación de yeso era una industria cotidiana reconocida por la cantidad de restos hallados en estos asentamientos. Las rocas de origen calcáreo se reducen a cal, sometiénolas a una transformación de origen térmico. En la antigüedad eran cocidas a elevada temperatura durante largo tiempo, consiguiendo su deshidratación y dando lugar a la cal que, una vez molida, muestra características diferenciadas del material originario. Si aludimos al poema de Empédocles anteriormente citado, se señala que; las rocas calcáreas no es otro “*arché*” o elemento primordial en griego, que la tierra de Jenófanes, que una vez calcinada con el fuego de Heráclito y el aire de Anaxímenes, es tratada con el agua de Tales de Mileto [31]. Este material pulverulento de color blanco es conocido por yeso común y procede del sulfato cálcico  $\text{CaSO}_4$ . Una vez rehidratada con agua, se convierte en sulfato cálcico hemihidrato  $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ .

La civilización romana se fundó con los conocimientos y artes de la civilización helena, que se expandió en el siglo XII a.C. a lo que conocemos como Italia, dejando yacimientos arqueológicos en Paestum, antigua ciudad griega llamada Poseidonia o Posidonia en la Campania cercana al Vesubio, con antigüedad del siglo VII a.C. y coincidiendo con la fundación de Roma. Todas estas edificaciones de la ciudad, estaban realizadas empleando el hormigón griego con el uso de puzolanas o cenizas volcánicas, extraídas de Puzzoli, ciudad de la colonia griega de Dicearquía “*lugar donde reina la justicia*”, situada a las faldas del Vesubio.

El “*opus caementicium*” u *hormigón romano*, (del latín = caementum: escombros, piedra en bruto) es un material de obras realizadas con mortero y piedras de todo tipo (de residuos) y con aspecto de hormigón. La mezcla se hacía a pie de obra, alternando paladas de mortero con gravas procedentes de ríos y agua de mar. Su empleo era mediante encofrados donde se le daba forma a la estructura o para rellenar espacios entre otros elementos estructurales. Los procedimientos constructivos adoptaron nuevas técnicas y así Vitruvio en el siglo I a.C., escribe el *documento De Architectura*, donde describe diferentes tipos de agregados para la dosificación del hormigón romano de acuerdo a la obra a realizar. El mortero procedente de rocas calcáreas no resistía bien la acción del agua durante periodos largos y observaron que las rocas volcánicas tenían mayor resistencia y duración, tanto al agua dulce como al agua salada. Posteriormente, añadiendo piedra pómez en lugar de los guijarros obtuvieron un material de baja densidad, los nervios de la bóveda de la Basílica de Majencio, con luces de más de 25 m. [32], o la cúpula del Panteón de Agripa en Roma con 43 m de diámetro [33], son ejemplo de ello, en definitiva, del uso de un hormigón aligerado para determinadas superestructuras. Los romanos eran excelentes ingenieros y buenos administradores y aceptaban estas recomendaciones constructivas, que les permitieron grandes volúmenes en sus edificaciones civiles y militares.

Pero llegó la época de la decadencia y caída del Imperio Romano, en primer lugar el Occidental a principio del siglo VI d.C. y posteriormente el Oriental, en el siglo XV, y con ello la desaparición del hormigón romano como material para construcciones. Todo esto dio lugar a unos siglos de oscurantismo técnico en occidente, basados en la decadencia de las ciudades y el crecimiento de las edificaciones militares y religiosas usando fundamentalmente la piedra, madera y barro cocido. En oriente, la cultura musulmana se caracterizó en su urbanismo por la proliferación bazares y mercados conjuntamente con las construcciones defensivas y de orden religioso.

Fue en Inglaterra cuando comenzó de nuevo el uso del hormigón hacia el año 700 d.C. Se recurría a este material para relleno de muros que después se recubrían de piedra.

El desarrollo del hormigón conocido como cocción de la cal viva, se inició durante el siglo XII, y fue en el año 1420, con la construcción de la cúpula de la Basílica de Santa María del Fiore, de la catedral de Florencia, construida por Filippo Brunelleschi, simboliza un colofón en la historia de la construcción con hormigón. La pretensión del arquitecto era manipular un material cerámico, pero éste necesitaba de un elemento cohesivo como el aplicado por los romanos.

En el siglo XVIII, se restaura completamente el uso del hormigón con lo que se denominan los aglomerantes actuales [30] y para esto, ayudaron mucho los escritos de Vitruvio, ya que en ellos se insistía en la pureza de la cal.

John Smeaton (1724-1792), ingeniero inglés y reconocido por algunos autores como responsable de la ingeniería civil en Europa, redescubrió en la obra de reconstrucción del faro de Eddystone (Inglaterra), el desarrollo del cemento moderno mezclando una puzolana y una roca calcárea con alto contenido de arcilla. Así, se lograba un aglomerante con resistencia al agua de mar y altas prestaciones mecánicas al impacto por el oleaje. Todo este trabajo condujo a la invención del cemento Portland. Este faro, edificado en el canal de la Manga en un accidente rocoso con bloques de granito en disposición de cola de milano, es famoso por ser pionero en el uso de cal hidráulica. El primer faro fue construido por Henry Winstanley (1664-1703), y fue trágicamente arrastrado cinco años después. Fue reemplazado por la torre de John Ruyard (1650-c.1718), construida en roble y devorada por un incendio en 1755 [34].

En los inicios del siglo XIX, el científico e ingeniero de caminos francés Louis Vicat recibe el encargo de Napoleón de construir el puente de Souillac sobre el turbulento río Dordogne. Vicat realiza una argamasa con calizas con arcilla, los cuece juntos, los muele, y derrama esta pasta bajo el agua, a los pocos días comprueba que la mezcla consolida al combinarse con el agua. Louis Vicat acababa de conseguir un hallazgo fundamental para la ingeniería civil, por ello es considerado el inventor del cemento artificial. Estudió en detalle las reacciones químicas que se producían en el cemento y estableció reglas de fabricación y utilización de la cal. En 1818, publicó la obra titulada "*Morteros y Cementos*", tratado sobre la fabricación del cemento. El procedimiento consistía en apagar la cal y mezclarla con arcilla pura y agua. Esto se convertía en una masa pegajosa de la que se formaban unas bolas que, una vez secadas al sol, se metían en un horno y

como resultado se obtenía un material de cualidades diferentes [29,35,36]. En 1948 su hijo Joseph Vicat, construye la primera fábrica de cementos y desde entonces se desarrolla este producto reconocido mundialmente como cemento VICAT.

Todas las nuevas técnicas tienen como base una fe inquebrantable en el futuro de “hierro con cemento” (así lo conocían sus fundadores) y una prueba fundamental, fueron las patentes que registraron los principios del hormigón armado. El belga François Hennebique fue uno de los primeros en la industrialización del hormigón, para su empleo en la obra pública. Que el hormigón se internacionalizara se debe a él, ya que en 1892 patenta un sistema en el cual aplica el prefabricado a gran escala frente a la construcción “*in situ*”. Según Hennebique, se formula el principio fundamental del hormigón “*Los elementos asociados en la estructura tienden a ayudarse recíprocamente para aliviar sus respectivos esfuerzos*” [36], es decir no se concibe el hormigón como la unión de dos materiales, sino que los dos materiales unidos trabajan conjuntamente. Al principio se duda de las propiedades del material, pero una vez que se resuelven los problemas técnicos del mismo se comienza a utilizar de manera rápida. En 1897 Charles Rabut, recopila parte del conocimiento y lo lleva a la universidad donde se imparte el primer curso de hormigón armado. En estos cursos lo denomina como “material *amateur*”, ya que se encuentra bajo sospecha por los cuerpos oficiales de ingenieros, quienes no lo validan hasta que no demuestra su calidad y resistencia. En este curso lo que se imparte es una alternativa a la albañilería clásica ya que es fácil de ejecutar y montar.

Durante todo el siglo XIX el hormigón armado es utilizado en construcciones civiles, pero la entrada definitiva del hormigón en la historia de la construcción viene de la mano del arquitecto francés Anatole de Baudot (1834-1915). La Exposición Universal de París de 1889, tuvo una doble vertiente en materiales de construcción en la obra civil. Mientras Gustave Eiffel, destacó por sus estructuras metálicas, aún hoy significativas de aquel evento, Baudot lideró las edificaciones con hormigón armado como la *Galerie des machines*, donde descubrió que las proporciones no funcionaban. Estaba sorprendido por la alteración de las proporciones de las estructuras tradicionales. Los arquitectos, para las infraestructuras nobles urbanas, y los ingenieros para la obra civil, adoptan el hormigón armado y le otorgan carga de entidad a la construcción.

El periodo de máxima expansión del hormigón, por su carácter incombustible, dejando a la madera a un lado para salas de cines y teatros es el de 1910 y 1940. Fue Freyssinet en 1939, quién produjo cuñas cónicas para los anclajes de los extremos y diseñó gatos de doble acción. Estos tensaban los alambres y presionaban los conos machos dentro de los conos hembra para anclarlos a sus placas. Con ello aparece el hormigón pretensado, que supone una nueva revolución en la construcción. Lo que caracteriza este período es la conformidad del nuevo material como un elemento constructivo con pleno derecho dentro de todo tipo de edificaciones. La etapa de entreguerras, convierte al hormigón armado en un material apto e ideal para la expansión de las infraestructuras en Europa: puentes, viaductos, autopistas, carreteras, fábricas... En definitiva, el hormigón armado se impone en todo el orbe [37,38].

Desde el comienzo del siglo XX, hasta entrado los ochenta, el hormigón empleado es similar en todas partes. Evidentemente existían diferencias de dosificación con pequeñas variantes, pero las propiedades específicas del hormigón puesto en obra eran equiparables y, sobre todo, constantes. La gran revolución, porque de una revolución se trata, se está librando actualmente, y comenzó en la década de los ochenta [30].

En la actualidad, el hormigón es un material cuyas propiedades se programan en función de las necesidades resistentes, así como el tipo de ambiente y durabilidad del material que, según normativa, se debe emplear.

Para finalizar, recordemos que el hormigón es el segundo material más utilizado en la Tierra después del agua. Por lo tanto, y en vista de estos dos términos que hemos desarrollado (acero y hormigón), y viendo lo íntimamente unidos que están en la obra civil, es el ejemplo claro que se puede mostrar de la economía circular que en el capítulo anterior vimos. Se produce acero para la elaboración de hormigón armado, y el residuo que este genera lo introducimos en una matriz cementosa que queremos elaborar para la producción del hormigón que lo envuelve.

### 2.3 BIBLIOGRAFÍA

1. UNESID - Qué es el acero Available online: <https://unesid.org/siderurgia-que-es-el-acero.php> (accessed on Aug 23, 2018).
2. Moffit, A.; Masaitis, J.; Schneides, H. Industrias basadas en recursos naturales. *Hierro y Acero* **1998**, *73*.
3. Mallorca, S. F. Que es y como se fabrica el acero Available online: <https://www.steel framingmallorca.es/que-es-y-como-se-fabrica-el-acero/> (accessed on Sep 4, 2018).
4. Hooker, R. The iron age south of the Sahara Available online: <https://web.archive.org/web/20070924145657/http://www.wsu.edu/~dee/CIVAFRCA/IRONAGE.HTM>.
5. Munz, E. D. Psychotherapie in der Psychiatrie. *Nervenheilkunde* **2017**, *36*, 800–805, doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2.
6. Castro, G. Aceros. *Dep. Ing. mecánica* 2009, 111.
7. Linares, F. S. *El acero wootz de las espadas de Damasco*; 2014;
8. Reibold, M.; Paufler, P.; Levin, A. A.; Kochmann, W.; Pätzke, N.; Meyer, D. C. Materials: Carbon nanotubes in an ancient Damascus sabre. *Nature* 2006, *444*, 286.
9. Castro, P. K.; Contreras, A. El acero 5.
10. Arqhys Arquitectura Historia del acero Available online: <http://www.ayamsa.com/blog-Historia-del-acero.html> (accessed on Sep 12, 2018).

11. Acero - Inventos y Descubrimientos - Acanomas.com Available online: <http://www.acanomas.com/Inventos-y-Descubrimientos/1445/Acero.htm> (accessed on Aug 23, 2018).
12. Enriquez Berciano, J. L.; Tremps Guerra, E.; de Elío de Bengy, S.; Fernández Segovia, D. Colada del acero. *Monogr. sobre Tecnol. del Acero. Parte II.* **2009**, 79.
13. UNESID - Modos de producción Available online: <https://unesid.org/siderurgia-modos-de-produccion.php> (accessed on Aug 23, 2018).
14. IHOBE S.A. *Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones. Escorias de acerías.*; 1998;
15. WorldSteel Association WorldSteel FACT SHEET Steel industry by-products Steel production and by-products at a glance. **2016**.
16. UNESID - Tipos de acero Available online: <https://unesid.org/siderurgia-tipos-de-acero.php> (accessed on Aug 23, 2018).
17. National Slag Association Blast furnace slag 2009, *2009*.
18. Herrero Vázquez, T. Estudio del efecto de la hidratación de la escoria blanca de acería de HEA: aplicación en pastas y morteros de cemento, Universidad de País Vasco, 2015.
19. Cedex *Ficha técnica Escorias de Acería Horno de arco eléctrico*; 2011;
20. Fomento, M.; Rural, M. medio ambiente y; CEDEX Ficha técnica escorias de horno de arco eléctrico. *CEDEX* **2011**, 2.3, 1–19.
21. Manso, J. M.; Ortega-López, V.; Polanco, J. A.; Setién, J. The use of ladle furnace slag in soil stabilization. *Constr. Build. Mater.* **2013**, 40, 126–134, doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.09.079.
22. Yildirim, I. Z.; Prezzi, M. Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. *Adv. Civ. Eng.* **2011**, 2011, 1–13, doi:10.1155/2011/463638.
23. Papayianni, I.; Anastasiou, E. Effect of granulometry on cementitious properties of ladle furnace slag. *Cem. Concr. Compos.* **2012**, 34, 400–407, doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.11.015.
24. Akin Altun, I.; Yilmaz, I. Study on steel furnace slags with high MgO as additive in Portland cement. *Cem. Concr. Res.* **2002**, 32, 1247–1249, doi:10.1016/S0008-8846(02)00763-9.
25. Glavind, M. Sustainability of cement, concrete and cement replacement materials in construction. In *Sustainability of Construction Materials*; Elsevier, 2009; pp. 120–147 ISBN 9781845693497.
26. Fowler, D. W.; Allen, J. J.; Lange, A.; Range, P. The prediction of coarse aggregate performance by Micro-Deval and other aggregate tests, The University of Texas at Austin, 2006.
27. Real Academia Española y Asociación de Academias de la lengua *Diccionario de la lengua española*; 23.<sup>a</sup>.; Espasa: Madrid, 2014; ISBN 9788467041897.

## Capítulo 2

28. Asociación de Academias de la Lengua Española *Diccionario de americanismos.*; 1.<sup>a</sup>.; Asociación de Academias de la Lengua Española: Madrid, 2010; ISBN 9788429495508.
29. Simonnet, C. *Hormigón, historia de un material*; Nerea, 2009; ISBN 978-84-96431-10-2.
30. Romea, C. El hormigón: breve reseña histórica de un material milenario. *Apl. Av. los Mater. compuestos en la obra Civ. y la Edif.* **2014**, 1–18, doi:10.3926/oms.199.
31. Vitruvio Polión M.L. *Compendio de los diez libros de la Arquitectura. Literatura Obras Maestras.*; 2010;
32. Heyman, J.; Lopez Manzanares, G. M.; Huerta Fernández, S. *La ciencia de las estructuras*; Instituto Juan de Herrera, 2001; ISBN 8495365987.
33. Choisy, A. y col.; Choisy, A. y col.; Huerta, S.; Girón Sierra, J.; Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo.; Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.; España. Ministerio de Fomento. *El arte de construir en Roma*; 1999; ISBN 8489977674.
34. Picón A. *Art de l'ingénieur*; Centre Pom.; 1997;
35. Bosc J.L., Clement J., Marrey B., P. M. *Joseph Moniert et Naissance du Ciment Armé*; Linteau.; 2001;
36. Picon, A. *L'art de l'ingénieur: constructeur, entrepreneur, inventeur*; Editions du Centre Georges Pompidou, 1997;
37. Leniaud, J.-M.; Bouvier, B.; École nationale des chartes (Paris) *Le livre d'architecture : XV-XX siècle*; École des chartes, 2002; ISBN 9782900791530.
38. Giedion, S.; Lebeer, I.; Rosset, F.-M. *Espace, temps, architecture*; Denoël, 1990; ISBN 2207237524.

# CAPÍTULO 3

**Análisis experimental. Caracterización  
de los materiales y dosificación del  
hormigón**



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## Capítulo 3. Análisis Experimental. Caracterización de los materiales y dosificación del hormigón

3.1	INTRODUCCIÓN .....	45
3.2	CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES .....	46
3.2.1	ÁRIDOS .....	46
3.2.2	CEMENTO .....	48
3.2.3	ESCORIAS.....	47
3.2.3.1	CARACTERÍSTICAS ESCORIA BLANCA M1 .....	48
3.2.3.2	CARACTERÍSTICAS ESCORIA BLANCA M2 .....	50
3.2.3.3	CARACTERÍSTICAS ESCORIA BLANCA M3 .....	51
3.3	DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN.....	53
3.4	FABRICACIÓN DE HORMIGÓN Y PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES .....	54
3.4.1.	Amasado .....	55
3.4.2.	Moldes y probetas.....	56
3.5	BIBLIOGRAFÍA .....	58

### Índice de tablas.

Tabla 3. 1	Nomenclatura y tamaños de áridos empleados.....	46
Tabla 3. 2	Composición química de la escoriaM1.....	49
Tabla 3. 3	Composición química de la escoria M2 .....	51
Tabla 3. 4	Composición química de la escoria M3.....	53
Tabla 3. 5	Composición química del cemento .....	48
Tabla 3. 6	Dosificación del hormigón.....	54
Tabla 3. 7	kg de cemento y/o escoria por m <sup>3</sup> de hormigón fabricado en cada una de las amasadas .....	54

### Índice de figuras

Figura 3. 1	Escoria granulada M1 .....	48
Figura 3. 2	Escoria molida M1 .....	49
Figura 3. 3	Enfriamiento por aspersión de la escoria.....	50
Figura 3. 4	Escoria tamizada M2 .....	51
Figura 3. 5	a) Escoria M3 recién llegada de la fábrica b) Escoria M3 tamizada .....	52
Figura 3. 6	Piedras de Clinker .....	47

<b>Figura 3. 7 Moldes de para la fabricación de dovelas utilizadas por las empresa DRACE INFRAESTRUCTURAS.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 3. 8 Hormigonera utilizada para los ensayos.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 3. 9 Amasado y vertido de agua y de los materiales.....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 3. 10 Distintos tipos de moldes utilizados en la elaboración de probetas. a) Moldes para probetas prismáticas de aristas 10 cm b) Moldes para probetas rectangulares de 16X4X4 cm c) Moldes cilíndricos de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura .....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 3. 11 Mesa vibradora.....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 3. 12 Moldes llenos para que las probetas fragüen. ....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 3. 13 Curado de probetas sumergidas en agua. ....</b>	<b>58</b>

### 3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se analizan los áridos y los distintos tipos de escorias (LFS) que se han empleado para desarrollar la investigación de esta tesis doctoral, y que forman parte de la dosificación de todos los tipos de probetas de hormigón que se han elaborado.

Los materiales utilizados han sido los siguientes:

- Áridos
  - ✓ Árido Grueso (4/16) ha sido facilitado por la fábrica de prefabricados de la empresa DRACE (Grupo DRAGADOS) ubicada en Los Barrios, Cádiz.
  - ✓ Árido Intermedio (0/4) ha sido facilitado por fábrica de prefabricados de la empresa DRACE (Grupo DRAGADOS) ubicada en Los Barrios, Cádiz.
  - ✓ Árido Fino (0/2) ha sido facilitado por fábrica de prefabricados de la empresa DRACE (Grupo DRAGADOS) ubicada en Los Barrios, Cádiz.
  
- Escorias
  - ✓ Escorias de alto horno (GGBSF), que denominaremos M1, con un tratamiento físico hasta obtener una granulometría 0/3 con contenido de humedad (entorno 8-10%) secándola y moliéndola, esta se obtiene con molinos verticales de rodillo especiales para este tipo de materiales, que la van secando a la vez que triturando. En un tanto por ciento de humedad favorece la molienda.
  - ✓ Escorias blancas (LFS), que denominaremos M2, la cual se encuentra acopiada en vertedero dentro de la fábrica de arco eléctrico donde se producen.
  - ✓ Escorias blancas (LFS), que denominaremos M3, al igual que la anterior se encuentra acopiada en vertedero dentro de la fábrica de arco eléctrico donde se producen.
  
- Cemento
  - ✓ Cemento Portland CEM I 52,5 R.
  
- Agua, de consumo doméstico, sin ningún ingrediente perjudicial que pueda afectar a las propiedades del hormigón, por lo que debe estar limpia y encontrarse libre de impurezas. De este modo, no producirá alteraciones en la hidratación del cemento, ni afectará a las propiedades mecánicas del mismo.

- Aditivo
  - ✓ Aditivo superplastificante. Aditivo para hormigón UNE EN 934-2.

### 3.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

#### 3.2.1 ÁRIDOS

El árido es la materia prima mineral imprescindible para la fabricación del hormigón. Son partículas de diversos tamaños que, en su uso normal, están comprendidos entre el polvo casi imperceptible ( $60\mu$ ), hasta fragmentos mayores que alcanzan varios metros. Esta variedad de tamaños se consigue mediante voladuras en canteras, para luego triturar y tamizar hasta obtener el tamaño deseado y de forma estable. Los áridos unidos con o sin ligante, forman parte de la composición del hormigón, además de constituir una parte importante de su estructura. En nuestro caso, tenemos tres granulometrías distintas (tabla 3. 1). Estos tres áridos son de naturaleza caliza.

Nomenclatura	Tipo de árido	Tamaño (mm)	
		Mínimo	Máximo
Árido 0/2	Fino	0	2
Árido 0/4	Intermedio	0	4
Árido 4/16	Grueso	4	16

Tabla 3. 1 Nomenclatura y tamaños de áridos empleados.

Las características fundamentales de los áridos permiten que las propiedades mecánicas requeridas sean adquiridas por el hormigón para representar el comportamiento resistente esperado. Aunque no forman parte del fraguado y endurecimiento, desempeñan un papel importante, siendo entre un 60-75% del volumen total. El resto es el lugar ocupado por la pasta agua cemento.

Estos materiales además influyen en propiedades del hormigón, como son la retracción, la abrasión, las resistencias mecánicas, etc.

#### 3.2.2 CEMENTO

Los conglomerantes, según su origen milenario, están completamente ligados al hormigón ya que este material tiene como función principal la de ser un pegamento entre los materiales pétreos, y así formar distintas masas aglomeradas.

Desde que, en 1824, el constructor inglés, Joseph Aspdin, patentara los cementos portland, este material ha ido ganando protagonismo en el sector constructivo hasta convertirse en uno de los materiales industrializados de construcción de mayor

## **Análisis experimental. Caracterización de los materiales y dosificación del hormigón**

consumo. Su uso permite la obtención de hormigón con características de resistencia y durabilidad adecuadas, y se compone principalmente de materiales disponibles en la naturaleza de manera abundante, como son minerales calizos, arcillosos y yesos. Es por ello que el cemento sea estudio de investigación en el campo de la elaboración de morteros y hormigones, para la modificación o sustitución de sus materiales, o de él mismo, para minimizar el impacto medioambiental que causa su elaboración.

El cemento utilizado para la elaboración de todos los tipos de mezclas ha sido el Cemento Portland CEM I 52,5 R, cemento de alta resistencia y sin ningún tipo de adición.

El cemento se produce mediante la pulverización del Clinker (Figura 3. 6), el cual está formado principalmente por silicatos de calcio.



**Figura 3. 1 Piedras de Clinker**

### **✓ Características químicas**

En este caso, y aunque las características químicas de este material son sabidas por las numerosas tablas en muchas páginas de cementeras, hemos querido someter una muestra al mismo proceso que anteriores para obtener los datos de la misma máquina de fluorescencia de rayos X, y confirmar mayor fiabilidad a la hora de la obtención de datos.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3. 5

CEMENTO M0			
Fórmula	Concentración	Fórmula	Concentración
CaO	67,92	ZnO	0,0817
SiO <sub>2</sub>	16,6	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,061
SO <sub>3</sub>	4,59	MnO	0,049
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,25	NiO	0,041
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,02	SrO	0,0353
MgO	1,43	ZrO <sub>2</sub>	0,0308
K <sub>2</sub> O	1,31	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,015
TiO <sub>2</sub>	0,26	CuO	0,0092
Na <sub>2</sub> O	0,17	ZnO	0,0817
Total 99,9			

Tabla 3. 2 Composición química del cemento

### 3.2.3 ESCORIAS

Para desarrollar este trabajo partimos de tres tipos de escorias de procedencia distinta; una de ellas de alto horno y con un tratamiento físico de molienda; y otras dos procedentes de acerías de arco eléctrico depositada en vertedero.

#### 3.2.3.1 CARACTERÍSTICAS ESCORIA BLANCA M1 (GGBFS)

La primera de las escorias a la que denominaremos M1. Escoria de horno alto granulada GGBFS.

##### ✓ Características morfológicas.

Tal y como se comenta en el capítulo 2, la escoria granulada se obtiene por un enfriamiento brusco de la escoria líquida, dejándola caer sobre sistemas de agua pulverizada. Este proceso se llama *granulación*, porque la escoria se descompone en pequeñas partículas, más o menos alveolares, obteniéndose un producto similar a la arena, y cuyas moléculas no han tenido tiempo de orientarse al estado cristalino por la violencia del enfriamiento.



Figura 3. 2 Escoria granulada M1

### Análisis experimental. Caracterización de los materiales y dosificación del hormigón

La muestra original es una arena 0/3, tal y como se muestra en la Figura 3.1, con un alto contenido de humedad (entorno 8-10 %), la cual en las fábricas se seca y se muele. La molienda se realiza en molinos verticales de rodillos especiales para este tipo de materiales, que la van secando en la molienda, ya que este porcentaje de humedad en este caso favorece este proceso, y se puede hacer en el clásico molino de bolas de cemento, obteniéndose una finura como igual a este (Figura 3.2).

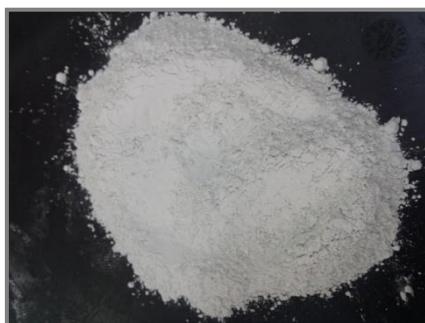


Figura 3. 3 Escoria molida M1

La granulometría de estas escorias es menor de 60  $\mu\text{m}$ , de color blanca y homogénea, con aspecto suave y pulverulento.

#### ✓ Características químicas

La caracterización química se llevó a cabo mediante fluorescencia de Rayos X (FRX) con el fin de determinar sus componentes principales, así como otros componentes secundarios cuyos contenidos se encuentran limitados.

Estos ensayos se han realizado en los laboratorios de la Universidad de Cádiz. El análisis se realizó con la muestra seca y se mandaron 20 gr para su ensayo.

La composición química que se obtuvo fue la siguiente (Tabla 3.2):

ESCORIAS M1			
Fórmula	Concentración	Fórmula	Concentración
CaO	47,14	MnO	0,419
SiO <sub>2</sub>	32,3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,7	SrO	0,115
MgO	7,64	Na <sub>2</sub> O	0,08
SO <sub>3</sub>	1,52	ZrO <sub>2</sub>	0,0386
TiO <sub>2</sub>	0,699	NiO	0,035
K <sub>2</sub> O	0,448	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,011
TOTAL 101,4356			

Tabla 3. 3 Composición química de la escoria M1

\* El porcentaje final no corresponde al 100%, ya que los valores dados por el laboratorio tienen una tolerancia de  $\pm 0,5$ .

En la estructura de la escoria blanca M1, los elementos más abundantes son los formados por calcio y sílice. Sólo estos dos compuestos forman el 75% de la composición de las mismas. Por lo tanto, el que estos componentes se encuentren en un porcentaje tan alto del total es fundamental, ya que son los que determinan el 90% de la estructura mineralógica una vez hidratados. Además, aparecen otros compuestos tales como concentraciones de alúmina, magnesita, fósforo, sosa. Esta composición coincide con las de los valores de la Tabla 2. 3 de las propiedades químicas generales de la escoria de alto horno, en el Capítulo 2.

Según Cánovas [1], los materiales puzolánicos con un alto contenido en  $\text{SiO}_2$  presentan la capacidad de generar tobermorita (hidrosilicatos de calcio (C-S-H)), a través de la reacción con la portlandita (compuesto de hidratación mineral del hormigón) en materiales cementosos, las cuales le aportan resistencia adicional a estas mezclas [2]. Veremos en los siguientes capítulos como las mezclas con tipo de escorias (M1) son las que tienen mejores propiedades.

### 3.2.3.2 CARACTERÍSTICAS ESCORIA BLANCA M2 (LFS)

La segunda escoria que se presenta es la que denominaremos M2. Proviene de la fundición y laminación de aceros en caliente de una acería de arco eléctrico LFS.

#### ✓ Características morfológicas.

La escoria, una vez sale del proceso, se vierte en una explanada y se enfría mediante aspersores, pulverizando agua sobre ellas tal y como se aprecia en la Figura 3.3.



Figura 3. 4 Enfriamiento por aspersión de la escoria.

La escoria nos llega con una granulometría variada, y esto se debe a la saturación de alúmina en la fase de producción, ya que la escoria al hidratarse inicialmente se disgrega de la cal libre, pero cuando se vuelven a hidratar los abundantes aluminatos cálcicos presentes se agrupan formando como pedruscos de distintos tamaños. El proceso que se realiza para poder integrarla en el trabajo de investigación como hormigón sustituyendo una parte del cemento, es tamizarla con una finura similar al mismo [3]. De esta forma, nos quedamos con la parte de material que pasa por el tamiz de  $63 \mu\text{m}$ . La fracción obtenida por tamizado fue del 23% del total que llegó al laboratorio. Para

## Análisis experimental. Caracterización de los materiales y dosificación del hormigón

darle un uso a este tipo de escorias como material cementante sería conveniente tener mecanismos para llegar a triturarla, utilizando así una mayor fracción del porcentaje de escoria; o bien ver la forma de darle otro uso al material, ya que podría incrementar mucho su valor por el coste energético que conlleva este proceso.

La tonalidad que adquiere es grisácea y su textura muy parecida al cemento (Figura 3.4).



Figura 3. 5 Escoria tamizada M2

### ✓ Características químicas

Al igual que la escoria M1, se analizó su composición química mediante fluorescencia de Rayos X, y los resultados obtenidos los encontramos en la Tabla 3. 3.

ESCORIAS M2 (LFS)			
Fórmula	Concentración	Fórmula	Concentración
CaO	55,18	SrO	0,256
MgO	16,9	ZnO	0,178
SiO <sub>2</sub>	13,7	BaO	0,088
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,1	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,074
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,57	NiO	0,061
SO <sub>3</sub>	1,28	Cl	0,056
MnO	1,25	K <sub>2</sub> O	0,04
TiO <sub>2</sub>	0,497	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,024
ZrO <sub>2</sub>	0,495	CuO	0,018
Total 100,767			

Tabla 3. 4 Composición química de la escoria M2

- \* El porcentaje final no corresponde al 100%, ya que los valores dados por el laboratorio tienen una tolerancia de  $\pm 0,5$ .

En la composición de esta escoria se observa, al contrario que en la anterior, un predominio de cal, ya que contiene hasta un 57% de esta. Mientras que en el caso de la escoria M1 el porcentaje de  $\text{SiO}_2$  llega al 32%, en este tipo de escorias no alcanza ni el 15%, por lo que suponemos nos llevará a menores resistencias ya que, como hemos comentado anteriormente, es un componente esencial para la formación de minerales que aportan resistencia al material.

### 3.2.3.3 CARACTERÍSTICAS ESCORIA BLANCA M3 (LFS)

Para la última de las escorias, a la que denominaremos M3, su proceso productivo comienza con la chatarra cargada en las sucesivas fases del horno de arco eléctrico de fusión con otras materias fundentes para la eliminación de escorias LFS.

#### ✓ Características morfológicas.

Estas escorias nos llegan con un aspecto fosilizado, la cual no nos permite trabajar con ella sin pasar por un tamizado de la misma. El porcentaje de escoria utilizado es el que pasa por el tamiz  $63\ \mu\text{m}$ , ya que al igual que en las anteriores, la sustitución se hará por cemento y, por lo tanto, se debe buscar una granulometría similar. Tiene un color blanco grisáceo y de textura suave, aspecto muy similar al cemento una vez tamizado el material (Figura 3. 5 b)). La fracción obtenida por tamizado fue del 15% del total que llegó al laboratorio, un porcentaje incluso menor que con la escoria M2. Por tanto, al igual que en el caso anterior, si a este tipo de escorias se le pretende dar algún uso como material cementante, para obtener una mayor cantidad de este material se recomienda tritúrala.



Figura 3. 6 a) Escoria M3 recién llegada de la fábrica b) Escoria M3 tamizada

✓ **Características químicas**

Con el mismo proceso que las anteriores se analizó una muestra de escoria tipo M3 mediante fluorescencia de Rayos X. Los resultados obtenidos fueron los que se muestran en la Tabla 3. 4

ESCORIAS M3 (LFS)			
Fórmula	Concentración	Fórmula	Concentración
CaO	54,9	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,11
SiO <sub>2</sub>	18,8	ZnO	0,0489
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,5	SrO	0,04
MgO	6,99	NiO	0,035
SO <sub>3</sub>	3,05	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,34	Cl	0,026
TiO <sub>2</sub>	0,458	K <sub>2</sub> O	0,025
MnO	0,417	ZrO <sub>2</sub>	0,0191
BaO	0,13	CuO	0,014
Total 99,933			

Tabla 3. 5 Composición química de la escoria M3

- \* El porcentaje final no corresponde al 100%, ya que los valores dados por el laboratorio tienen una tolerancia de  $\pm 0,5$ .

Observamos como la composición de las dos escorias de arco eléctrico es similar, es decir, tienen un alto contenido en CaO mientras que el SiO<sub>2</sub> baja con respecto a las escorias de alto horno. Por lo tanto, habrá que ver cómo afecta esto a las propiedades de cada mezcla.

A continuación, veremos las características del cemento para hacer una similitud entre los materiales a estudiar, ya que su función debe ser la misma en la mezcla.

### 3.3 DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN

La dosificación (Tabla 3. 6) utilizada es la que se realizó un proyecto conjunto con la empresa Drace Infraestructura, cuyo uso del hormigón con sustitución de escoria está destinado a las dovelas prefabricadas. La dosificación del hormigón ha sido diseñada para cumplir con ciertos requisitos de consistencia (secos), ya que para este tipo de piezas es necesario que esté en un cono de Abrams entre 0-2 cm, puesto que los moldes utilizados para su fabricación, por su forma, se quedan en su parte superior sin material, al ser este muy fluido (Figura 3.7).

Esta dosificación también es la misma que se utilizó en el artículo publicado para esta tesis [4].



Figura 3. 7 Moldes de para la fabricación de dovelas utilizadas por las empresa DRACE INFRAESTRUCTURAS.

Las dosificaciones las vemos en la tabla 3.6.

Mezcla	Agua (relación a/c)	Conglomerante				Áridos			
		Dosificación	Cemento	Escoria	Aditivo	Dosificación	A. Fino 0-2	A. Medio 0-4	Grava 4-16
0%	0.5	300 kg/m <sup>3</sup>	100%	0%	3.9 kg/m <sup>3</sup>	2033.8 kg/m <sup>3</sup>	15%	35%	50%

Tabla 3. 6 Dosificación del hormigón

En el hormigón patrón se observa que tiene una cuantía de fracción volumétrica de cemento de 300 kg/m<sup>3</sup> de hormigón fabricado. Sabemos que para esta dosificación la consistencia del material es seca, tal y como hemos comentado anteriormente, ya que era exigencia del proyecto del cual ha salido esta tesis doctoral.

De esta dosificación se realizan 3 amasadas diferentes, las mismas que se hacen para elaborar las distintas mezclas con sustitución de escoria por cemento.

De cada una de las escorias se sustituyen cuatro porcentajes distintos, 23%, 25%, 30% y 40%, obteniendo según la dosificación anterior los siguientes kg de cemento y/o escoria por m<sup>3</sup> de hormigón fabricado.

	0%	23%	25%	30%	40%
<b>Cemento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	300	231	225	210	180
<b>Escoria (kg/m<sup>3</sup>)</b>	0	69	75	90	120

Tabla 3. 7 kg de cemento y/o escoria por m<sup>3</sup> de hormigón fabricado en cada una de las amasadas

### 3.4 FABRICACIÓN DE HORMIGÓN Y PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES

Los materiales se encuentran en el laboratorio en estado seco y dentro de sacos para protegerlos de los agentes externos que puedan modificar sus propiedades.

### **3.4.1. Amasado**

Para la elaboración del hormigón se clasifican los materiales en distintas bandejas o cubos para tenerlos a mano a la hora de comenzar la elaboración en la hormigonera.

Para el amasado se ha utilizado una hormigonera con el tambor de forma cónica fácil de vaciar (Figura 3. 8). La colocación de la hormigonera puede ser ajustada por el funcionamiento de la rueda grande de mano para verter los materiales de forma más cómoda, la capacidad es de 140 l, por lo que se garantiza una mezcla homogénea en grandes cantidades de material.



**Figura 3. 8 Hormigonera utilizada para los ensayos**

Este proceso es fundamental que se elabore adecuadamente, ya que es el que condiciona el comportamiento tanto del hormigón fresco como del endurecido. De hecho, si el amasado no se realiza correctamente, puede que la mezcla no quede homogénea y haya una dispersión de los materiales.

Por lo que en primer lugar se mezclan todos los áridos con el cemento y escoria, en su caso, todo en seco. Posteriormente se incorpora el agua despacio para que se distribuya de forma homogénea por toda la mezcla y, por último, se le añade el aditivo plastificante (Figura 3. 9).



Figura 3. 9 Amasado y vertido de agua y de los materiales

### 3.4.2. Moldes y probetas

Para la elaboración de las probetas se han utilizado distintos moldes según indica la norma EN 12390-1 [5], siendo los siguientes:

- cúbicos de 10 cm de arista para la rotura a compresión y resto de ensayos tales como porosidad, abrasión, carbonatación, etc... (Figura 3. 10 a))
- prismáticos de 16 cm de longitud y 4 de arista, para la rotura a flexotracción (Figura 3. 10 b))
- cilíndricos de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, para realizar en ensayo de penetración de agua (Figura 3. 10 c))



a)



b)



c)

Figura 3. 10 Distintos tipos de moldes utilizados en la elaboración de probetas. a) Moldes para probetas prismáticas de aristas 10 cm b) Moldes para probetas rectangulares de 16X4X4 cm c) Moldes cilíndricos de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura.

### **Análisis experimental. Caracterización de los materiales y dosificación del hormigón**

Para la fabricación de las probetas se ha seguido el proceso establecido en la norma EN 12390-2 [6].

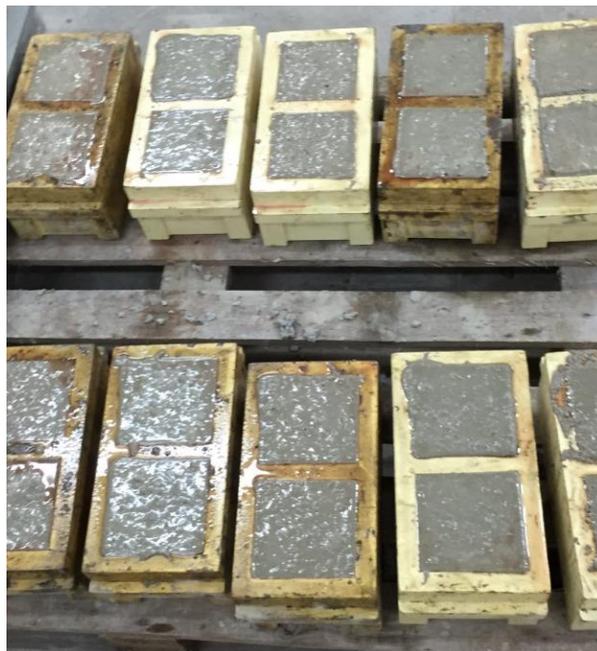
Una vez amasado los materiales y antes de verter la mezcla en los moldes, a éstos se les impregna el interior con una capa de desencofrante. Con este aceite lo que se consigue es que el hormigón, una vez que haya fraguado, no se pegue al molde y se logre desmoldar fácilmente.

El llenado de los moldes se ha realizado en varias capas para alcanzar una buena compactación, la cual se logra con el vibrado del material en el molde mediante una mesa vibradora (Figura 3.11) y se inicia en el momento en el que se comienza a llenar el molde. Así se obtiene una buena compactación material.



**Figura 3. 11. Mesa vibradora**

Una vez se ha vibrado se enrasan las probetas en los moldes con una llana, nivelando cuidadosamente la superficie.



**Figura 3. 12 Moldes llenos para que las probetas fragüen.**

La probeta se mantiene en el molde durante 24 horas para que fragüe con las mismas condiciones (Figura 3.12) de humedad y temperatura hasta su desmoldado.

Por último, y una vez transcurrido el tiempo de fraguado, se desmoldan y se marcan para identificarlas. El curado de las probetas se realiza mediante inmersión en agua y para ello se utiliza un baño de curado (Figura 3. 13) donde el agua se mantiene a una temperatura de  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ .



Figura 3. 13 Curado de probetas sumergidas en agua.

### 3.5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. F. Cánovas and V. H. Gaitan, “Comportamiento de hormigones de alta resistencia reforzados con fibras de acero frente al impacto de proyectiles,” *Mater. Construcción*, vol. 62, no. 307, pp. 381–396, 2012.
- [2] M. Sinica, G. A. Sezeman, D. Mikulskis, M. Kligys, and V. Česnauskas, “Impact of complex additive consisting of continuous basalt fibres and  $\text{SiO}_2$  microdust on strength and heat resistance properties of autoclaved aerated concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 50, pp. 718–726, Jan. 2014.
- [3] A. Bougara, C. Lynsdale, and N. B. Milestone, “Reactivity and performance of blastfurnace slags of differing origin,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, no. 4, pp. 319–324, Apr. 2010.
- [4] M. E. Parron-Rubio, F. Perez-García, A. Gonzalez-Herrera, and M. D. Rubio-Cintas, “Concrete properties comparison when substituting a 25% cement with slag from different provenances,” *Materials (Basel)*, vol. 11, no. 6, pp. 11–14, 2018.
- [5] European Committee for Standardization, “EN 12390-1: 2009. Testing hardened concrete - Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds.” .
- [6] European Committee for Standardization, “EN 12390-2: 2009 Testing hardened concrete - Part 2: Making and curing specimens for strength tests.” .

# CAPÍTULO 4

**Ensayos físicos del material.**



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## Capítulo 4. Ensayos físicos del material

<b>4.1. CONSISTENCIA DEL MATERIAL .....</b>	<b>63</b>
4.1.1. Proceso de elaboración .....	63
4.1.2. Resultados .....	64
<b>4.2. ENSAYO DE DENSIDAD, POROSIDAD Y ABSORCIÓN .....</b>	<b>67</b>
<b>4.2.1. Propiedades.....</b>	<b>67</b>
4.2.3.1 Densidad.....	67
4.2.3.2 Porosidad.....	67
4.2.3.3 Absorción.....	69
4.2.2. Proceso de elaboración .....	69
4.2.3. Resultados .....	70
<b>4.3. ENSAYO DE ABRASIÓN SUPERFICIAL .....</b>	<b>72</b>
4.3.1. Proceso de elaboración .....	73
4.3.2. Resultados .....	75
<b>4.4. ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA SUCCIÓN .....</b>	<b>76</b>
4.4.1. Proceso de elaboración .....	77
4.4.2. Resultados .....	79
<b>4.5. CONCLUSIÓN FINAL.....</b>	<b>83</b>
<b>4.6. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>83</b>

Índice de tablas:

<b>Tabla 4. 1 Codificación de los distintos tipos de hormigón.....</b>	<b>63</b>
<b>Tabla 4. 2 Clasificación del material de acuerdo con los valores de asiento.....</b>	<b>64</b>
<b>Tabla 4. 3 Consistencia media para cada tipo de escoria.....</b>	<b>64</b>
<b>Tabla 4. 4 Calidad del hormigón según su porosidad [12] .....</b>	<b>69</b>
<b>Tabla 4. 5 Datos obtenidos de los ensayos de densidad de cada una de las mezclas realizadas .....</b>	<b>70</b>
<b>Tabla 4. 6 Porcentaje de porosidad de cada una de las mezclas fabricadas .....</b>	<b>70</b>
<b>Tabla 4. 8 Datos de la resistencia a la abrasión superficial.....</b>	<b>76</b>
<b>Tabla 4. 9 Valores medios de la capacidad de succión capilar del hormigón con escoria M1 (gramos/m<sup>2</sup>).....</b>	<b>79</b>
<b>Tabla 4. 10 Valores medios de la capacidad de succión capilar del hormigón con escoria M2 (gramos/m<sup>2</sup>).....</b>	<b>80</b>
<b>Tabla 4. 11 Valores medios de la capacidad de succión capilar del hormigón con escoria M3 (gramos/m<sup>2</sup>).....</b>	<b>81</b>

Índice de figuras:

<b>Figura 4. 1</b>	<b>Ensayo de consistencia para las distintas mezclas .....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 4. 2</b>	<b>Consistencia de cada una de las mezclas con las distintas escorias y su desviación típica.....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 4. 3</b>	<b>Porosidad media de cada una de las mezclas con las distintas escorias.....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 4. 4</b>	<b>Porcentaje de absorción media para cada una de las mezclas.....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 4. 5</b>	<b>Tendencia entre la resistencia a compresión y el desgaste superficial .....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 4. 6</b>	<b>Equipo de abrasión superficial de la UCA.....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 4. 7</b>	<b>Probeta y material de medición para la abrasión superficial .....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 4. 8</b>	<b>Medición de la huella creada por el disco de abrasión .....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 4. 9</b>	<b>Situación de las huellas de las líneas de medida en la huella del ensayo .....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 4. 10</b>	<b>Relación entre valores de la cuerda L y el volumen de materia eliminada V .....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 4. 11</b>	<b>Comparación de las mezclas con el hormigón convencional en la resistencia a la abrasión superficial. ....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 4. 12</b>	<b>Esquema del ensayo de succión capilar .....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 4. 13</b>	<b>Probetas del ensayo de succión .....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 4. 14</b>	<b>Capacidad de succión capilar de del hormigón con sustitución de escoria M1 ...</b>	<b>80</b>
<b>Figura 4. 15</b>	<b>Capacidad de succión capilar de del hormigón con sustitución de escoria M2 ...</b>	<b>81</b>
<b>Figura 4. 16</b>	<b>Capacidad de succión capilar de del hormigón con sustitución de escoria M3 ...</b>	<b>82</b>

Antes de comenzar con la relación de ensayos, comentar la nomenclatura que hemos utilizado para definir cada uno de los materiales que vamos a fabricar. Estos códigos los encontramos en la Tabla 4. 1

Tipo de escorias	Codificación	Porcentaje de Sustitución
Cemento	M0	00
Escorias Alto Horno (GGBFS)	M1	23
Escorias Arco Eléctrico (LFS)	M2	25
Escorias Arco Eléctrico (LFS)	M3	30
		40

Tabla 4. 1 Codificación de los distintos tipos de hormigón

Se combinan cada una de ellas en función de la codificación de cada escoria y su porcentaje de sustitución. Como ejemplo pondremos que el hormigón fabricado con una escoria M1 y un porcentaje de sustitución del 30 por ciento se le denominará **M130**.

La dosificación a utilizar y las sustituciones a realizar, serán las desarrolladas en el capítulo 3, en el apartado 3.3 Dosificación del hormigón.

Una vez explicado esto, desarrollaremos los ensayos a los que se han sometido los distintos tipos de hormigón.

#### 4.1. CONSISTENCIA DEL MATERIAL

Determina la consistencia de un hormigón en estado fresco, permitiendo detectar fácilmente los cambios entre masas, sean por variaciones de agua de amasado o humedad de los áridos.

##### 4.1.1. Proceso de elaboración

En el desarrollo del ensayo de consistencia se usará la norma EN 12350-2 [1]. La forma de realizar el ensayo es con el hormigón recién mezclado, es decir, en estado fresco. Una vez mezclado, se vierte en un molde troncocónico y en tres fases, en la que cada una de ellas se le aplican 25 golpes con una barra para asemejar el vibrado de las probetas. Una vez el molde esté lleno se retira de forma vertical, y se mide el descenso que ha tenido el material. Esa medida será la consistencia del mismo.

Los valores de los asentamientos que establece esta norma van desde 1 cm, hasta 21 cm y en función del valor obtenido le asigna una definición de docilidad según su consistencia. Las vemos en la Tabla 4. 2.

Consistencia	Asentamiento en cm
Seca	0 a 2
Plástica	3 a 5
Blanda	6 a 9
Fluida	10 a 15
Líquida	≥ 16

Tabla 4. 2 Clasificación del material de acuerdo con los valores de asiento

#### 4.1.2. Resultados

La consistencia que necesitamos para este tipo de hormigón es seca, es decir, el cono debe estar entre 0-2 cm. Este tipo de consistencia no estaría permitido según normativa en estructuras *in situ*. Por el contrario, es la más apropiada para piezas prefabricadas, como por ejemplo el caso de las dovelas que, al ser fabricadas con moldes semicirculares, necesitan este tipo de consistencias ya que por su forma, sino tuviese esta consistencia, se iría el grueso del árido al fondo dejando la superficie del molde prácticamente sin material.

A cada una de las cuatro amasadas fabricadas se les ha realizado un ensayo de consistencia y, con todos estos datos, se ha calculado una media para cada tipo de escoria ya que los valores medios eran parecidos para todas las sustituciones elaboradas. Estos valores obtenidos se encuentran en la Tabla 4. 3., con la tolerancia obtenida para cada uno de ellos.

Muestra	Asiento (cm)	Tolerancia	Consistencia
M0	2,0	± 0,3	Seca
M1	2,0	± 0,2	Seca
M2	1,0	± 0,3	Seca
M3	0,1	± 0,1	Seca

Tabla 4. 3 Consistencia media para cada tipo de escoria

Se puede observar la consistencia para cada una de las amasadas en las siguientes figuras (Figura 4. 1).

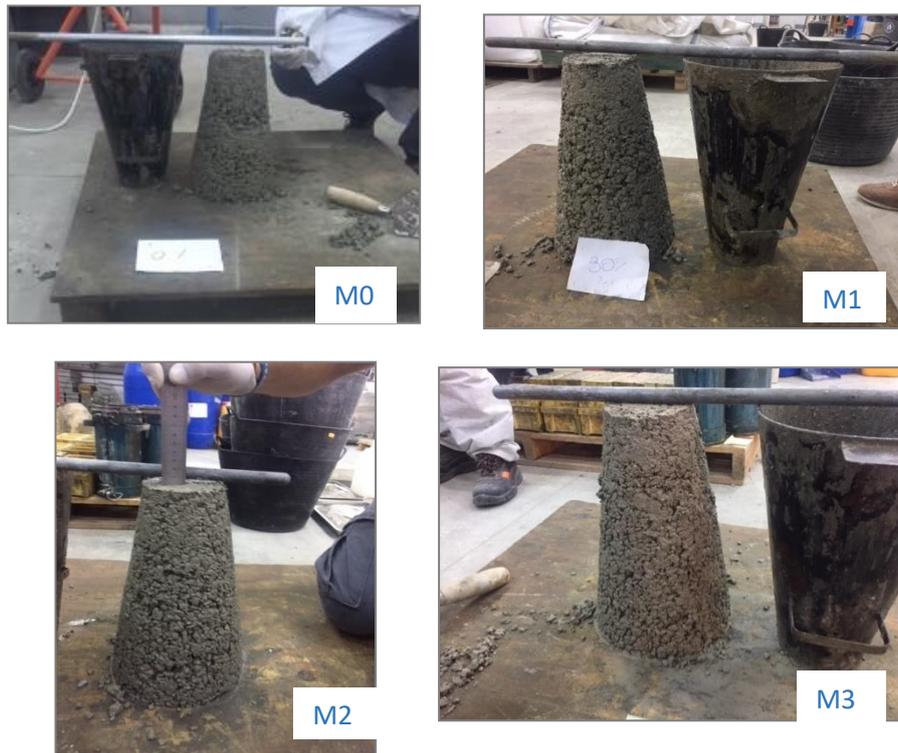


Figura 4. 1 Ensayo de consistencia para las distintas mezclas

En la Figura 4. 2, se muestran los valores de la Tabla 4. 3, en la que observamos de forma intuitiva la diferencia entre las consistencias de cada tipo de mezclas.

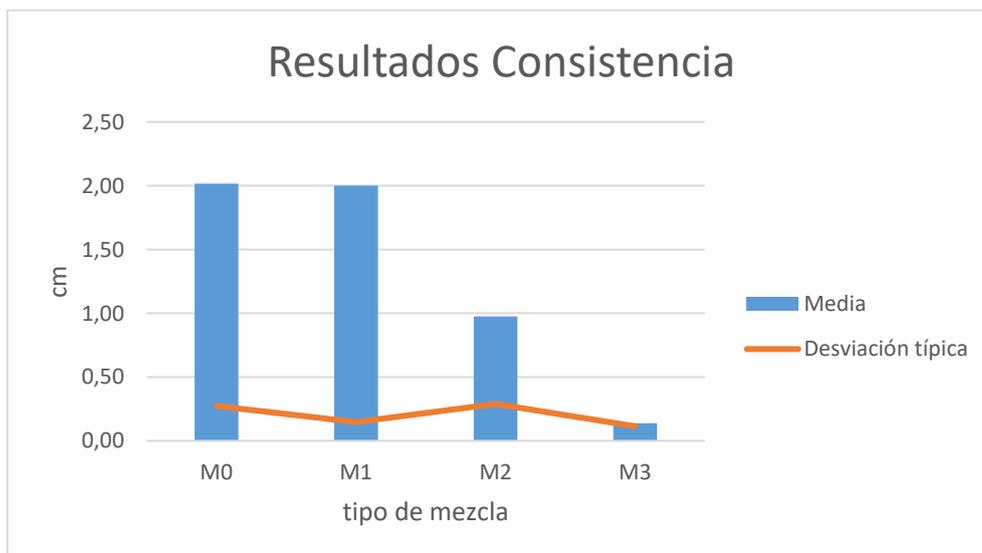


Figura 4. 2 Consistencia de cada una de las mezclas con las distintas escorias y su desviación típica

Se advierte que, aunque en todos los casos logramos consistencias secas (ya que dicho estudio se ha desarrollado para un determinado tipo de molde), para las mezclas

fabricadas con la escoria M3 el asiento es prácticamente 0, mientras que el fabricado con escoria M1 tiene un asiento parecido al hormigón sin sustitución.

La utilización de esta formulación de consistencia seca es la apropiada para este tipo de ensayos, y solo se utilizará en caso de moldes semicirculares o estructuras prefabricadas, con un control de ejecución intenso según normativa, para evitar la segregación del material.

Para el estudio de las características del hormigón, disponemos de tres niveles: el microestructural, el macroestructural y el intermedio o meso estructural. En el próximo capítulo se aportará el análisis experimental del comportamiento mecánico del hormigón. Su discusión tendrá lugar a nivel meso y macro, es decir, a tamaño del medio continuo. Los resultados de laboratorio se desarrollan a escala mayor evidenciando su interés para aplicaciones prácticas reales, adquiriendo un conocimiento mecánico concreto de los fenómenos observados.

La consistencia del mortero de cemento es el resultado de una serie de reacciones de hidratación, que tiene lugar cuando una cantidad determinada de cemento se mezcla con una cantidad limitada de agua. En nuestro caso, la relación agua/cemento es de 0,5. Sin duda, la zona más importante de la microestructura de la pasta de cemento en el hormigón, es la región próxima a la superficie de contacto con los áridos. Estas zonas de transición asociada con el desarrollo de películas de agua en el cemento del hormigón fresco, genera una región con mayor proporción de agua/cemento, conocida internacionalmente por sus siglas en inglés *ITZ (Interfacial Transition Zone)*. La influencia de esta zona en el comportamiento del hormigón es importante [2,3], faltando en la bibliografía un mayor número de trabajos que procuren definir sus complejas peculiaridades [4,5].

Para nuestro caso, al sustituir cemento por porcentajes de escorias, se nos producen dos circunstancias que determinarían este resultado previsto, en función de los dos tipos de escorias diferenciadas.

El primero y principal es el comportamiento de la escoria M1, con un idéntico potencial hidráulico que el cemento, justificando la similitud en cuanto a la consistencia del hormigón convencional. En segundo lugar, que las probetas con escorias M2 y M3 tienen un mayor poder aglomerante y su consistencia aumenta significativamente, tal y como indica la Figura 4. 2. Su adhesión al resto de los componentes del hormigón cambiará las propiedades y características del mismo.

## 4.2. ENSAYO DE DENSIDAD, POROSIDAD Y ABSORCIÓN

### 4.2.1. Propiedades

#### 4.2.3.1 Densidad

La densidad de un hormigón en estado endurecido, es la propiedad de éste entre su masa y el volumen (conocido) del recipiente que lo contiene.

Según la procedencia de los áridos y la proporción en la que se utilicen todos y cada uno de los componentes del hormigón, obtendremos valores distintos para la densidad. De la misma forma influyen en esta propiedad el método de compactación empleado.

El hormigón se clasifica de acuerdo con su densidad. El CEB-FIB 2000 (Código Modelo para Hormigón Estructural Federación Internacional de Betón) [6] hace la siguiente clasificación:

- Hormigón de peso normal, cuando su densidad, seco en estufa, es mayor de  $2.000 \text{ kg/m}^3$  y no superior a los  $2.800 \text{ kg/m}^3$ .
- Hormigón ligero, cuando su densidad, seco en estufa, es inferior a  $2.000 \text{ kg/m}^3$ .
- Hormigón pesado, cuando su densidad, seco en estufa, es mayor de  $2.800 \text{ kg/m}^3$ .

Las variaciones en la densidad del hormigón son pequeñas, tomándose como media para los cálculos el valor de  $2.400 \text{ kg/m}^3$  para hormigones en masa y  $2.500 \text{ kg/m}^3$  para los armados [7].

#### 4.2.3.2 Porosidad

Existen dos tipos de porosidad, la absoluta o real y la relativa o aparente. Esta segunda es la que se refiere a los poros accesibles o fácilmente penetrables. Mientras que la absoluta es la relación que existe entre “el volumen de huecos de un material y el volumen total del mismo”, difícil de medir porque, como hemos comentando, hay huecos inaccesibles, por lo tanto para medirla debemos recurrir a métodos como someter las probetas a adsorción de gas, porosímetros de mercurio y mediciones a escala microscópica.

Al contrario de esta, tenemos la porosidad relativa, que se determina mediante ensayos de absorción de agua [8]. Por lo tanto en este capítulo nos vamos a centrar en este segundo tipo de porosidad.

La porosidad del hormigón es uno de los parámetros más importantes en el mecanismo del transporte de los agentes agresivos hacia el interior de la estructura. La porosidad efectiva es la 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 [9]. La medida de la porosidad efectiva del hormigón es del grado de durabilidad de las estructuras de hormigón, frente a los agentes agresivos del medio en el cual se encuentran expuestas.

Se puede afirmar que no existe prácticamente ningún hormigón sin poros que componen el mismo. Son granulares y pulverulentos ya que, por si solos, poseen porosidad propia [10].

No solamente contaremos 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.

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 muy importante, no solo por el tamaño y distribución de los poros, sino por la conexión que exista entre los mismos, para de este modo tener la característica de no permitir el paso al agua y así llegar hasta la armadura. La porosidad de las mezclas disminuye con el tiempo, ya que a medida que pasa el tiempo las partículas de cemento se siguen hidratando, por lo que continúan formando una red que cada vez lo hace más resistente.

Según Powers [11], se pueden identificar los poros de las mezclas de cemento en dos grupos distintos, “poros de gel” y “poros capilares”.

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.

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.

Por lo tanto, viendo los dos tipos de poros que nos podemos encontrar diremos que los poros capilares son los correspondientes a la porosidad aparente, mientras que los poros que se generan en el gel serán los que nos proporcionen la porosidad absoluta.

Se establece un criterio de evaluación de la calidad del hormigón (Tabla 4. 4) en función de la porosidad total.

Porosidad total, %	Evaluación
$\leq 10\%$	Buena calidad y compacidad
10% - 15%	Moderada calidad
$> 15\%$	Durabilidad inadecuada

Tabla 4. 4 Calidad del hormigón según su porosidad [12]

#### 4.2.3.3 Absorción

Es el volumen del espacio ocupado por los poros. Se realiza secando una muestra hasta una masa constante, sumergiéndola en agua y midiendo el aumento de masa como un porcentaje de masa seca. Es un indicador de la porosidad, por lo que existe una relación entre las dos cualidades.

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 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.

#### 4.2.2. Proceso de elaboración

Para la determinación de la densidad, porosidad y absorción de agua, se ensayaron 2 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 más de 28 días de edad.

El ensayo se realiza según la norma EN 12390-7 [13].

Según normativa se utiliza una balanza hidrostática a la cual 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 parámetros se realiza de la siguiente forma:

- $P_{\text{sum}}$ : (Peso sumergido), Peso que se obtiene mediante la balanza hidrostática, colocando la probeta dentro. Esta probeta debe estar totalmente saturada de agua.
- $P_{\text{SSS}}$ : (Peso saturado superficie seca), se obtiene secando con un trapo húmedo el agua superficial.
- $P_{\text{s}}$ : (Peso seco), Se obtiene secando las probetas en la estufa durante al menos 24 horas a una temperatura de  $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Una vez seca se pesa.

A partir de los datos de pesadas anteriores, se determinan los parámetros de densidad, absorción y porosidad en función de las siguientes relaciones:

$$\text{Densidad } D = \frac{P_s}{P_{SSS} - P_{sum}}$$

$$\text{Absorción } A = 100 \frac{P_{SSS} - P_{sum}}{P_s}$$

$$\text{Porosidad } P = 100 \frac{P_{SSS} - P_s}{P_{SSS} - P_{sum}}$$

### 4.2.3. Resultados

#### 4.2.3.1 Densidad

Densidad (t/m <sup>3</sup> )				
	M0	M1	M2	M3
23%	2,50	2,50	2,46	2,52
25%	2,50	2,50	2,43	2,52
30%	2,50	2,49	2,45	2,53
40%	2,50	2,49	2,37	2,51

Tabla 4. 5 Datos obtenidos de los ensayos de densidad de cada una de las mezclas realizadas

En la Tabla 4. 5 se muestran los resultados de densidad del hormigón de las diferentes mezclas. La densidad de las mezclas M1 y M3 es similar a la de la mezcla patrón, variando un 1%, y no se observan cambios significativos conforme aumentan los porcentajes de sustitución de escoria. Sin embargo, el hormigón resultante de la mezcla M2 presenta una densidad ligeramente inferior al convencional y al resto de mezclas, disminuyendo alrededor de un 3%.

#### 4.2.3.2 Porosidad

% Porosidad				
	M0	M1	M2	M3
23%	1,81	1,64	2,95	1,03
25%	1,81	1,42	3,65	1,04
30%	1,81	1,51	3,12	0,91
40%	1,81	1,27	3,1	0,78

Tabla 4. 6 Porcentaje de porosidad de cada una de las mezclas fabricadas

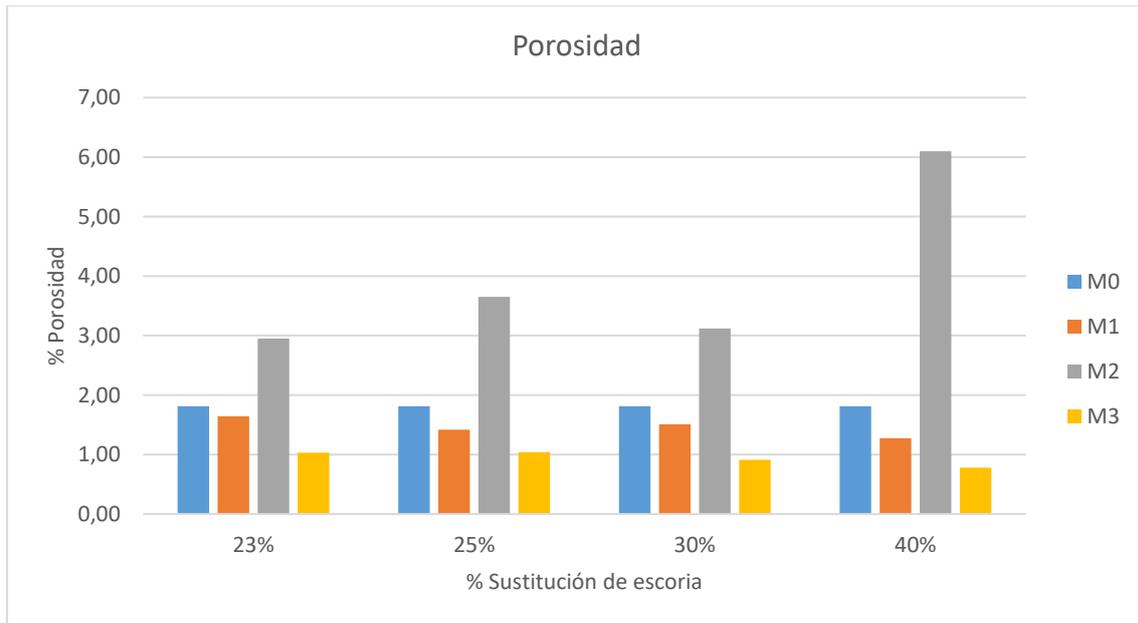


Figura 4. 3 Porosidad media de cada una de las mezclas con las distintas escorias.

La porosidad, como es sabido, está ligado a la permeabilidad. Es decir, cuanto mejor sea la distribución de los poros, disminuirá la penetración del agua. Observando la Figura 4. 3, independientemente de los porcentajes de sustitución de cemento, se observa que la escoria M2 tiene una muy mala distribución de poros, por lo que aumentará la permeabilidad en el mismo. Por el contrario, se observa que M3, su distribución es menor que el resto de ellas, llegando hasta un 43% de mejora de resultados con respecto al hormigón convencional. Y en cuanto a M1 vemos que es prácticamente constante en todas las adiciones, disminuyendo en un 30% su porosidad en la sustitución al 40% con respecto del hormigón convencional.

#### 4.2.3.3 Absorción

Absorción				
	M0	M1	M2	M3
23%	0,73	0,66	1,20	0,41
25%	0,73	0,57	1,5	0,41
30%	0,73	0,61	1,27	0,36
40%	0,73	0,51	2,58	0,31

Tabla 4. 7 Datos obtenidos de los ensayos de absorción para cada una de las mezclas realizadas

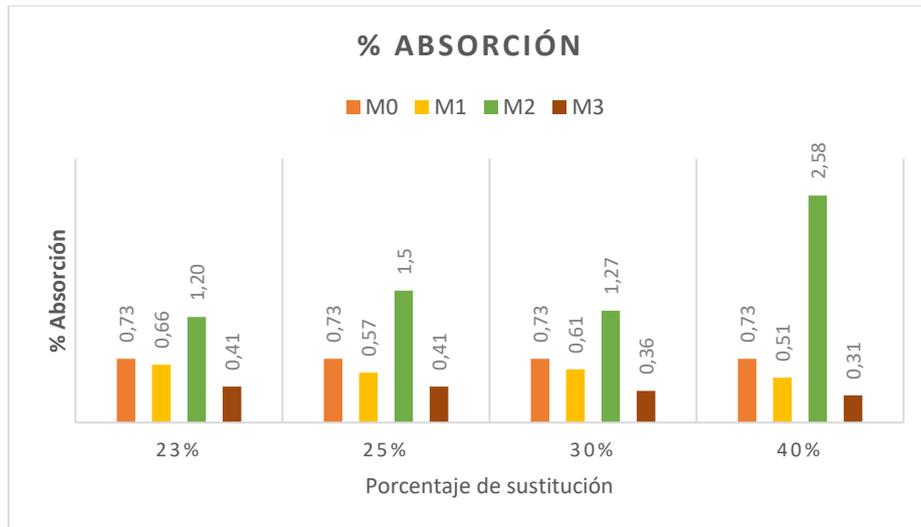


Figura 4. 4 Porcentaje de absorción media para cada una de las mezclas

Los resultados de absorción se muestran en la Figura 4. 4 y son coherentes con los resultados de densidad y porosidad, siendo la mezcla M2 la que presenta un mayor porcentaje de absorción de agua. El resto permanece por debajo del hormigón convencional y observando que M3 tiene una disminución de la absorción llegando a un 42% de disminución del mismo.

En general, se puede afirmar que el hormigón obtenido con las mezclas que emplean escoria tipo M2 resulta más poroso que el hormigón convencional y el obtenido con las mezclas M1 y M3, lo que implica una menor densidad y una mayor absorción de agua.

### 4.3. ENSAYO DE ABRASIÓN SUPERFICIAL

Es la capacidad de una superficie de hormigón para resistir el desgaste por frotamiento o fricción. Esta resistencia es proporcional a su resistencia a compresión Figura 4.5.

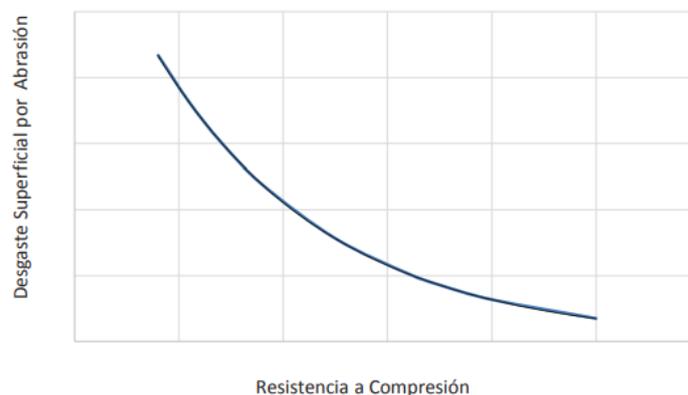


Figura 4. 5 Tendencia entre la resistencia a compresión y el desgaste superficial [14]

La resistencia a la abrasión del hormigón es un fenómeno progresivo. Esta resistencia es relevante para suelos tanto con tránsito vehicular como industrial. Aunque también el desprendimiento de polvo puede ser perjudicial para algunos tipos de servicio, ya que las partículas transportadas por el viento también es causa de abrasión superficial [15].

A medida que la mezcla se desgasta todos los agregados de la misma queda expuestos por lo que, tanto la abrasión como los impactos que se puedan producir, provocarán una degradación adicional que está unida a la resistencia de la adherencia entre la pasta y los agregados.

#### 4.3.1. Proceso de elaboración

Para la determinación de la resistencia a la abrasión se han ensayado 2 probetas cúbicas de 10 cm de arista para cada tipo de hormigón endurecido. La determinación del parámetro se ha realizado a más de 28 días de edad. El ensayo se realiza siguiendo las especificaciones indicadas en la norma EN 12808-2 [16].

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.

El material utilizado como abrasivo fue corindón blanco de grano 80. 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 4. 6).



Figura 4. 6 Equipo de abrasión superficial de la UCA.

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 (Figura 4. 7).



**Figura 4. 7** Probeta y material de medición para la abrasión superficial.

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 procede a la limpieza de la cara con un cepillo y posteriormente se rocía 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.

Para la medida de la huella (Figura 4. 8), se marcan los límites longitudinales exteriores de la huella y 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  $10\pm 1$  mm de los bordes.



**Figura 4. 8** Medición de la huella creada por el disco de abrasión.

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 4. 9).

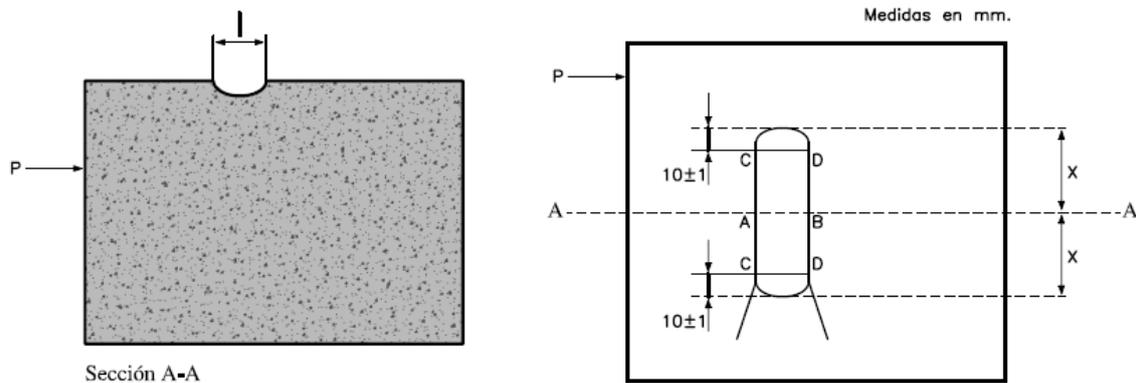


Figura 4. 9 Situación de las huellas de las líneas de medida en la huella del ensayo [16]

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<sup>3</sup>, de materia eliminada, según Figura 4. 10.

L mm	V mm <sup>3</sup>	L mm	V mm <sup>3</sup>	L mm	V mm <sup>3</sup>	L mm	V mm <sup>3</sup>	L mm	V mm <sup>3</sup>
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

Figura 4. 10 Relación entre valores de la cuerda L y el volumen de materia eliminada V [16]

### 4.3.2. Resultados

En la Tabla 4. 8 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de abrasión superficial realizados a las distintas probetas.

Resistencia a la abrasión superficial								
	M0		M1		M2		M3	
	L (mm)	V(mm <sup>3</sup> )	L (mm)	V(mm <sup>3</sup> )	L (mm)	V(mm <sup>3</sup> )	L (mm)	V(mm <sup>3</sup> )
<b>23%</b>	25	131	25,65	139	27,29	174	26,82	165
<b>25%</b>	25	139	25,45	139	26,95	165	25,08	131
<b>30%</b>	25	139	25,65	139	26,84	165	27,00	165
<b>40%</b>	25	139	25,55	139	29,63	215	28,53	194

Tabla 4. 7 Datos de la resistencia a la abrasión superficial.

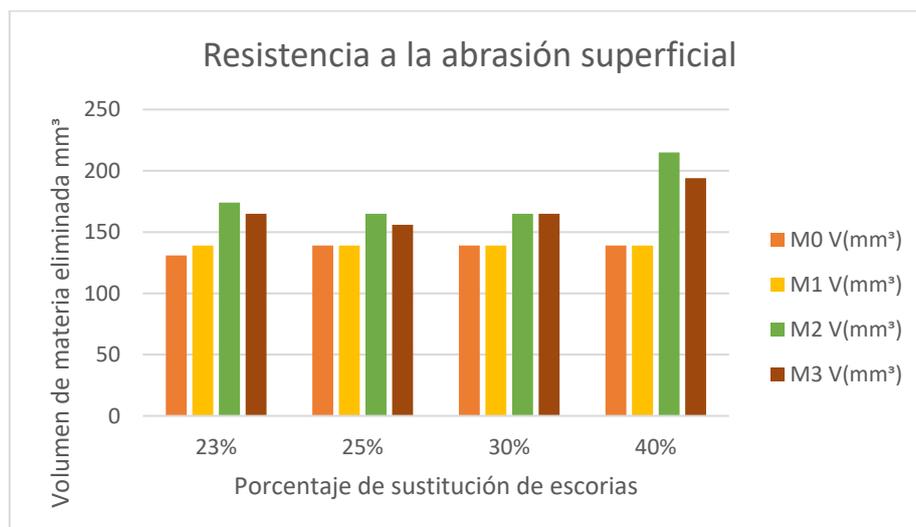


Figura 4. 11 Comparación de las mezclas con el hormigón convencional en la resistencia a la abrasión superficial.

Observamos en la Figura 4. 11, como con las escorias M1 (GGBFS) la resistencia a la abrasión superficial es prácticamente la misma que la M0; mientras que para las mezclas con los otros dos tipos de escorias de las acerías de arco eléctrico (LFS) la resistencia es menor, ya que sufre una mayor erosión cuando se somete al rozamiento con el material abrasivo.

#### 4.4. ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA SUCCIÓN

Es una propiedad que caracteriza la tendencia de un material poroso a absorber y transmitir agua a través de su masa por succión capilar. La succión capilar se produce como consecuencia de la acción de fuerzas de adhesión de las moléculas de agua a las paredes de los poros en el hormigón y otros materiales porosos. Una baja velocidad de succión indica, en general, un hormigón con propiedades de transporte satisfactorias para asegurar una vida útil aceptable de la estructura.

La absorción capilar es un caso especial de transporte inducido por la energía (tensión superficial) del agua actuando sobre los capilares del hormigón. Este ejerce acciones atractivas sobre las moléculas situadas en la superficie del líquido provocando con las mismas el llenado de los espacios existentes en su masa [17].

Este fenómeno se produce en las estructuras parcialmente saturadas sometidas a ciclos de humedecimiento y secado.

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) [18].

#### 4.4.1. Proceso de elaboración

El ensayo tiene como objetivo la capacidad de succión del nuevo material. Este representa la cantidad de agua por unidad de área que es capaz de absorber la muestra del ensayo hasta llegar a una masa constante.

Este ensayo se fundamenta en la norma argentina IRAM 1871. El coeficiente de succión se expresa con la siguiente fórmula:

$$\frac{W}{A} = S \times \sqrt{t} \quad (4.1)$$

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. Se utilizaron probetas cúbicas de 10 cm de arista (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).

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 misma. 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 4. 12.

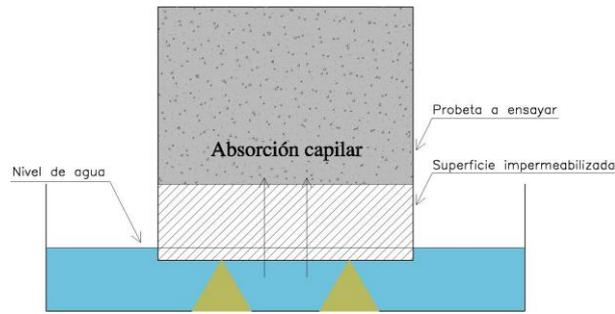


Figura 4. 12 Esquema del ensayo de succión capilar [12]

Para la superficie de absorción se utiliza 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 más de 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 48 horas.

Una vez acabado el proceso de secado se dejan enfriar hasta temperatura ambiente durante 24 horas. Realizada esta operación se procede al pesado de las probetas, obteniendo el peso seco de la muestra,  $P_s$ .

Seguidamente se introducen en el recipiente con agua (Figura 4. 13), de forma inclinada para facilitar la humectación de la superficie y con el objeto de evitar formación de burbujas de aire.



Figura 4. 13 Probetas del ensayo de succión

En los tiempos de 0 (inicio del ensayo), 5, 10, 30, 60, 90 min; 24 y 48 horas (final del ensayo), se retiran cuidadosamente cada una de las probetas del recipiente y se procede 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 P<sub>ht</sub>. Se realizan 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<sub>t</sub>, mediante la siguiente expresión:

$$C_t = \frac{P_{ht} - P_s}{A} \quad (4.2)$$

siendo:

C<sub>t</sub> incremento de masa por unidad de área de la sección transversal de la probeta en el instante de lectura t, en gramos/m<sup>2</sup>.

P<sub>ht</sub> Peso húmedo de la probeta en el instante de lectura t, en gramos.

P<sub>s</sub> Peso seco de la probeta, en gramos.

A superficie de la sección transversal de la probeta en contacto con el agua, en m<sup>2</sup>.

La capacidad de succión capilar de cada probeta, es el valor del incremento de masa por unidad de superficie de la sección transversal de la probeta, en el instante de medida t, determinado según la ecuación (4.2).

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 48 horas que dura el ensayo.

#### 4.4.2. Resultados

En la Tabla 4. 9, se muestran los resultados que se han obtenido una vez se han sometido las distintas probetas con escoria M1 a los ensayos de succión.

##### Escoria M1

Referencia	0 min	5 min	10 min	30 min	60 min	90 min	24 h	48 h
M000	0	605	770	880	1020	1195	2925	3430
M123	0	90	90	130	180	225	875	1110
M125	0	125	140	200	270	325	1245	1470
M130	0	115	140	200	260	310	1125	1400
M140	0	75	80	120	170	200	710	905

Tabla 4. 8 Valores medios de la capacidad de succión capilar del hormigón con escoria M1 (gramos/m<sup>2</sup>)

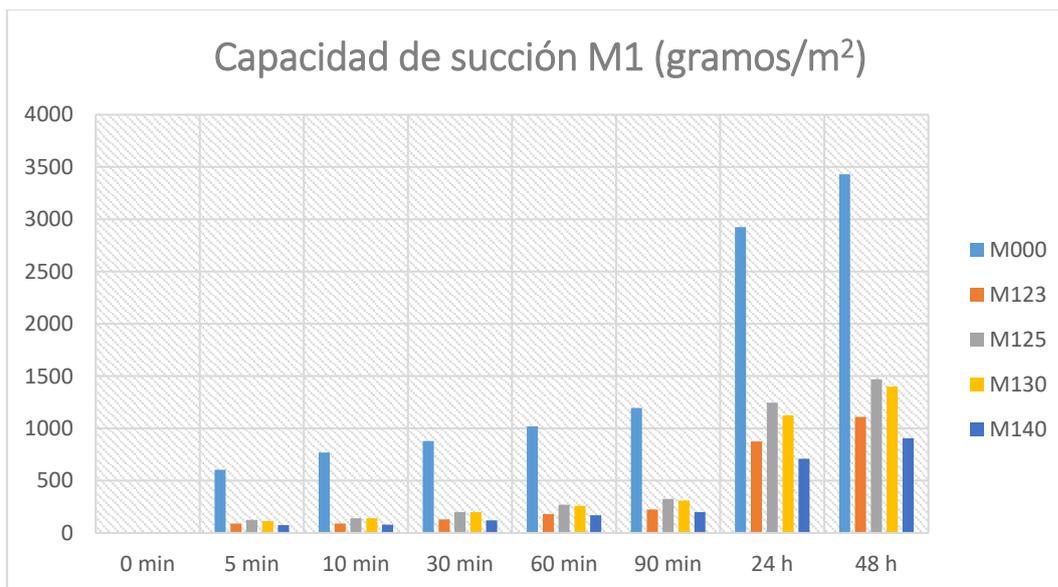


Figura 4. 14 Capacidad de succión capilar del hormigón con sustitución de escoria M1

Observamos en la Figura 4. 14, que la capacidad de succión de las mezclas M1 en sus distintos porcentajes de sustitución es muy similar entre ellas en los primeros 90 minutos del ensayo, y muy inferior a la succión observada por la mezcla patrón. El resultado es similar a las 48 horas, siendo esta capacidad de las mezclas M1 significativamente inferiores que la mezcla M0. Por otro lado, no se pueden sacar conclusiones significativas en relación a la influencia del porcentaje de sustitución en esta propiedad del hormigón resultante, dado que no se aprecia correlación entre el porcentaje de sustitución y la succión pasadas las 48 horas, siendo el resultado más favorable obtenido por la mezcla con un 40% de sustitución (mayor porcentaje), seguida de la mezcla del 23% (menor porcentaje).

### ➤ Escorias M2

En la Tabla 4. 10 se muestran los valores obtenidos de la capacidad de succión capilar para cada tipo de hormigón con escoria M2.

#### Escoria M2

Referencia	0 min	5 min	10 min	30 min	60 min	90 min	24 h	48 h
M000	0	605	770	880	1020	1195	2925	3430
M223	0	680	790	1045	1310	1440	3835	4660
M225	0	780	845	1095	1370	1585	4390	5260
M230	0	755	820	985	1280	1495	3935	4600
M240	0	715	805	1085	1415	1635	5165	6405
M240	0	715	985	1160	1530	1750	5815	7255

Tabla 4. 9 Valores medios de la capacidad de succión capilar del hormigón con escoria M2 (gramos/m²)

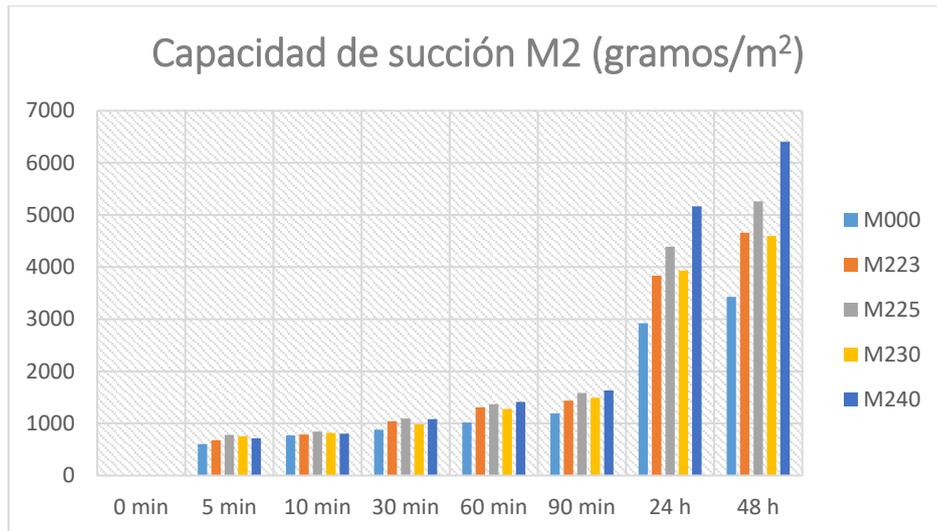


Figura 4. 15 Capacidad de succión capilar del hormigón con sustitución de escoria M2

Con este tipo de escoria observamos un comportamiento similar a la mezcla M0 en los primeros 90 minutos del ensayo. No obstante, a partir de 24h los resultados divergen de manera notable, mostrando una capacidad de succión superior para las mezclas que contienen escoria tipo M2 con respecto a la mezcla patrón, siendo la mezcla de mayor sustitución la que obtiene un resultado más desfavorable en este ensayo.

#### ➤ Escoria M3

En la Tabla 4. 11 se muestran los valores obtenidos de la capacidad de succión capilar para cada tipo de hormigón con escoria M3.

Escoria M3								
Referencia	0 min	5 min	10 min	30 min	60 min	90 min	24 h	48 h
M000	0	605	770	880	1020	1195	2925	3430
M323	0	350	455	520	585	645	1720	2225
M325	0	340	520	530	670	740	2125	2600
M330	0	300	350	385	500	550	1355	1730
M340	0	215	235	265	335	330	1040	1335

Tabla 4. 10 Valores medios de la capacidad de succión capilar del hormigón con escoria M3 (gramos/m²)

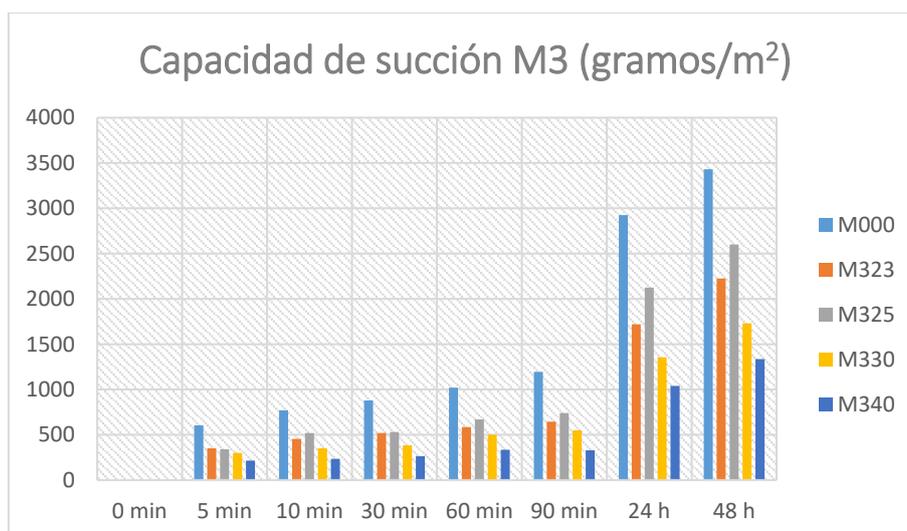


Figura 4. 16 Capacidad de succión capilar del hormigón con sustitución de escoria M3

El comportamiento observado en las mezclas con sustitución de escoria tipo M3 es más favorable que la mezcla patrón, mostrando una capacidad de succión inferior a lo largo de todo el ensayo. Además, se puede resaltar la correlación existente entre el porcentaje de sustitución y la disminución en la succión de agua, siendo la mezcla M340 la que obtiene el resultado más favorable en este ensayo.

En general, la absorción de agua capilar de todo el hormigón con sustitución de cemento por escoria no fue superior a la del hormigón convencional, con la excepción de las mezclas con escoria tipo M2, que mostraron una capacidad de succión superior al hormigón convencional para todos los porcentajes de sustitución.

A pesar de mostrar una mayor capacidad de absorción la escoria M2 que las restantes probetas realizadas, se muestran resultados similares al hormigón convencional. Respecto a las mezclas con escoria tipo M1 y M3, sí se observa un mejor comportamiento de esta propiedad con respecto al hormigón convencional, siendo M1 la escoria que, incorporada al hormigón como material cementante, le otorga unas mejores propiedades de succión de agua.

Los resultados son coherentes con los obtenidos en el apartado 4.2, dado que la mezcla M2 presenta una mayor porosidad y absorción de agua, estando estas propiedades correlacionadas con la succión de agua.

Como se comentó anteriormente, una baja succión capilar indica en general un hormigón con propiedades satisfactorias para asegurar una vida útil y aceptable. Por tanto, los resultados de la evaluación de la absorción de agua capilar durante 48 h de muestras de hormigón que se refleja en las tablas y gráficas anteriores, la absorción de agua capilar de todo el hormigón con sustitución de cemento por escoria no fue superior a la del hormigón convencional, siendo aceptables dichos resultados a excepción de la M2, que arrojó una succión superior a la de la muestra convencional.

#### 4.5. CONCLUSIÓN FINAL

Como conclusión final a este capítulo diremos que las mezclas fabricadas con las escorias M1, en las propiedades físicas del material, son las que mejores resultados han dado en todos los ensayos realizados. No sólo mejores que el resto de escorias, sino incluso mejores que las realizadas sin sustitución de las mismas.

#### 4.6. BIBLIOGRAFÍA

1. European Committee for Standardization EN 12350-2:2009 Testing fresh concrete. Slump-test.
2. Lutz, M. P.; Monteiro, P. J. .; Zimmerman, R. W. Inhomogeneous interfacial transition zone model for the bulk modulus of mortar. *Cem. Concr. Res.* **1997**, *27*, 1113–1122, doi:10.1016/S0008-8846(97)00086-0.
3. Ollivier, J. P.; Maso, J. C.; Bourdette, B. Interfacial transition zone in concrete. *Adv. Cem. Based Mater.* 1995, *2*, 30–38.
4. Hashin, Z.; Monteiro, P. J. M. An inverse method to determine the elastic properties of the interphase between the aggregate and the cement paste. *Cem. Concr. Res.* **2002**, *32*, 1291–1300, doi:10.1016/S0008-8846(02)00792-5.
5. Prokopski, G.; Halbiniak, J. Interfacial transition zone in cementitious materials. *Cem. Concr. Res.* **2000**, *30*, 579–583, doi:10.1016/S0008-8846(00)00210-6.
6. Federation internationale du béton Model Code 2010 Final draft 2012.
7. La, E. Une 83-311-86 O. **1986**, 1–4.
8. Galán Marín, M. del C.; Laffarga Briones, J.; Olivares Santiago, M.; Nadal, P. Evaluación de la resistencia mecánica de un hormigón según su porosidad. *Mater. construcción* **2004**, 21–33, doi:10.3989/mc.2004.v54.i273.220.
9. Howland, J. J.; Martín, A. R. Estudio de la absorción capilar y la sorptividad de hormigones con áridos calizos cubanos. *Mater. Construcción* **2013**, *63*, 515–527, doi:10.3989/mc.2013.04812.
10. Hummer, A. *Prontuario del Hormigón.*; S.A., T. A., Ed.; 2º Edición.; Barcelona, 1966; ISBN 9788471460561.
11. Powers, T. Physical properties of cement paste. *Proc. Chem. Cem.* **1960**, *2*, 577–613.
12. Cruz Carrasco, M. Estudio de la resistencia y reología de hormigones con adición de escorias de cobre como sustituto del árido fino, Tesis doctoral: Universidad de Málaga, 2014.
13. European Committee for Standardization EN 12390-7:2009 Testing hardened concrete. Density of hardened concrete 2009.
14. Carrera, G.; Guachamín, L. Análisis comparativo de la resistencia al desgaste

superficial por abrasión en pavimentos de hormigón, empleando fibras sintéticas de polipropileno virgen, usando dos tipos de curado: inmersión y envoltura plástica. **2016**, 256.

15. ACI 201 Guía para la Durabilidad del Hormigón. *Durabilidad del Hormig.* **2001**, 1–59.
16. European Committee for Standardization EN 12808-2 Grouts for tiles - Part 2: Determination of resistance to abrasion 2008.
17. Taus, V. Determinación De La Absorción Capilar En Hormigones Elaborados Con Agregados Naturales Y Reciclados. *Cienc. y Tecnol. del Hormigón* **2003**, 10, 7–16.
18. Bizzotto, M. B.; -Astori, R. E.; -Sanguinetti, B. M. Determinación de la absorción capilar en hormigones de alto desempeño elaborados con materiales de la región NEA.

# CAPÍTULO 5

**Resistencia mecánica**



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## Contenido

5.1. RESISTENCIA A COMPRESIÓN .....	<b>89</b>
5.1.1. Proceso de elaboración del ensayo.....	90
5.1.2. Resultados de los ensayos de la Resistencia a Compresión.....	91
5.1.2.1 Resultados de las probetas con escoria M1 .....	91
5.1.2.2 Resultados de las probetas con escoria M2 .....	94
5.1.2.3 Resultados de las probetas con escoria M3 .....	97
5.1.2.4 Comparación de las muestras de escorias M1, M2, M3.....	99
5.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	<b>100</b>
5.3. RESISTENCIA A FLEXIÓN .....	<b>108</b>
5.3.1. Proceso de elaboración .....	109
5.3.2.1 Resultados de las probetas con escoria M1 .....	110
5.3.2.2 Resultados de las probetas con escoria M2 .....	111
5.3.2.3 Resultados de las probetas con escoria M3 .....	112
5.4. COMPARACIÓN ENTRE TRACCIÓN Y COMPRESIÓN.....	<b>115</b>
5.5. CONCLUSIÓN FINAL DEL CAPÍTULO.....	<b>116</b>
5.6. BIBLIOGRAFÍA .....	<b>117</b>

### Índice de tablas:

Tabla 5. 1 Valores medios de la resistencia a compresión obtenida con escorias tipo M1.....	92
Tabla 5. 2 Valores medios de la resistencia a compresión obtenida con escorias tipo M2.....	95
Tabla 5. 3 Valores medios de la resistencia a compresión obtenida con escorias tipo M3.....	97
Tabla 5. 4 Módulo de elasticidad del hormigón con escoria M1 .....	102
Tabla 5. 5 Módulo de elasticidad del hormigón con escoria M2 .....	104
Tabla 5. 6 Módulo de elasticidad del hormigón con escoria M2 .....	106
Tabla 5. 7 Valores medios de la resistencia a flexión obtenida con escorias tipo M1 .....	110
Tabla 5. 8 Valores medios de la resistencia a flexión obtenida con escorias tipo M2 .....	111
Tabla 5. 9 Valores medios de la resistencia a flexión obtenida con escorias tipo M3 .....	113

### Índice de figuras

Figura 5. 1 Máquina para el cálculo de la resistencia a compresión .....	89
Figura 5. 2 Roturas satisfactorias en probetas cúbicas [2] .....	90
Figura 5. 3 Probeta preparada para su rotura a compresión .....	91
Figura 5. 4 Rotura de la probeta una vez finalizado el ensayo de rotura por compresión. ....	91
Figura 5. 5 Representación gráfica de las medias de la rotura a compresión de las probetas fabricadas con escoria M1.....	92

<b>Figura 5. 6 Comportamiento de la rotura a compresión con el porcentaje del 40% de la escoria M1 a lo largo de los días .....</b>	<b>93</b>
<b>Figura 5. 7 Porcentaje de aumento y disminución de resistencia para 1 día y 90 días de la escoria M1.....</b>	<b>94</b>
<b>Figura 5. 8 Representación gráfica de las medias de la rotura a compresión de las probetas fabricadas con escoria M2.....</b>	<b>95</b>
<b>Figura 5. 9 Comportamiento de la rotura a compresión con el porcentaje del 40% de la escoria M2 a lo largo de los días .....</b>	<b>96</b>
<b>Figura 5. 10 Porcentaje de aumento y disminución de resistencia para 1 día y 90 días de la escoria M2.....</b>	<b>97</b>
<b>Figura 5. 11 Representación gráfica de las medias de la rotura a compresión de las probetas fabricadas con escoria M3.....</b>	<b>98</b>
<b>Figura 5. 12 Comportamiento de la rotura a compresión con el porcentaje del 40% de la escoria M2 a lo largo de los días .....</b>	<b>98</b>
<b>Figura 5. 13 Porcentaje de aumento y disminución de resistencia para 1 día y 90 días de la escoria M3.....</b>	<b>99</b>
<b>Figura 5. 14 Comparación de los 3 tipos de escorias a 90 días .....</b>	<b>99</b>
<b>Figura 5. 15 Gráficos módulo de elasticidad de las escorias M1.....</b>	<b>103</b>
<b>Figura 5. 16 Gráficos módulo de elasticidad de las escorias M2.....</b>	<b>105</b>
<b>Figura 5. 17 Gráficos módulo de elasticidad de las escorias M3.....</b>	<b>107</b>
<b>Figura 5. 18 Ensayo con carga centrada a un tercio .....</b>	<b>109</b>
<b>Figura 5. 19 Ensayo con carga</b>	<b>109</b>
<b>Figura 5. 20 Rotura de la probeta a flexotracción .....</b>	<b>110</b>
<b>Figura 5. 21 Representación gráfica de las medias de la rotura a flexión de las probetas fabricadas con escoria M1.....</b>	<b>111</b>
<b>Figura 5. 22 Representación gráfica de las medias de la rotura a flexión de las probetas fabricadas con escoria M2.....</b>	<b>112</b>
<b>Figura 5. 23 Representación gráfica de las medias de la rotura a flexión de las probetas fabricadas con escoria M3.....</b>	<b>113</b>
<b>Figura 5. 24 Comparación de la resistencia a flexión de las tres escorias .....</b>	<b>114</b>
<b>Figura 5. 25 Porcentaje de pérdida y/o aumento de resistencia a flexión de los tres tipos de escoria a más de 90 días.....</b>	<b>115</b>
<b>Figura 5. 26 Comparación de la resistencia a flexión y compresión de los distintos tipos de hormigón con las diferentes escorias en función de su porcentaje de pérdida o ganancia de las mismas.....</b>	<b>116</b>

## 5.1. RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Aunque es el hormigón el material más empleado en la construcción, aún apenas se conoce en cuanto a su comportamiento mecánico a nivel elemental. El hormigón consta de dos fases: árido y pasta de cemento, y estas cantidades han debido ser calculadas en función al uso final que se vaya a dar.

Para la fabricación del que se va a desarrollar, se define desde el principio un modelo particular de dosificación con distintos porcentajes de sustitución de cemento por distinta tipología de escoria siderúrgica, que indicará el comportamiento del hormigón partiendo de proposiciones de leyes de mezclas reales y una justificación elástica admitiendo que todas las fracciones de volumen de los componentes están sujetos a la misma tensión y deformación.

La resistencia a la compresión del hormigón es la característica mecánica de medida principal del mismo, y se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área. Esta propiedad del material que presenta es la más elevada de todas, por lo que es la que mayor interés despierta. Es decir, se toma como un índice de magnitud de otras propiedades del mismo [1].

Los ensayos se realizan a 1, 7, 28 y 90 días y se lleva a cabo según las normas EN 12390-3 [2] y EN 12390-4 [3]. Su objetivo es evaluar la resistencia a compresión del hormigón. Este ensayo se realiza con una prensa automática de 2.000 kN de capacidad, controlado por ordenador mediante un sistema ETIWIN [4], con certificado de calibración ENAC (Entidad Nacional de Calibración).

Para la realización de este ensayo, la maquinaria está provista de una placa superior en la que está incorporada una rótula autoblocante esférica, con un centro de giro sobre la base de la placa. Esto evita que se produzcan esfuerzos laterales. Por lo tanto, las fuerzas se aplican de forma axial sobre las probetas de ensayo. Desde el ordenador se realiza un control automático cerrado desde 2.000 kg, y de esta forma, las cargas se aplican de manera uniforme y constante. Para controlar la fuerza aplicada, la máquina consta de un software que permite un control preciso del ensayo.



Figura 5. 1 Máquina para el cálculo de la resistencia a compresión

Tras ser sometida a la carga, evaluamos el tipo de rotura y determinamos si es satisfactoria o no según la norma EN 12390-3 [2]. Las que son consideradas como satisfactorias son las que se muestran en la Figura 5. 2.

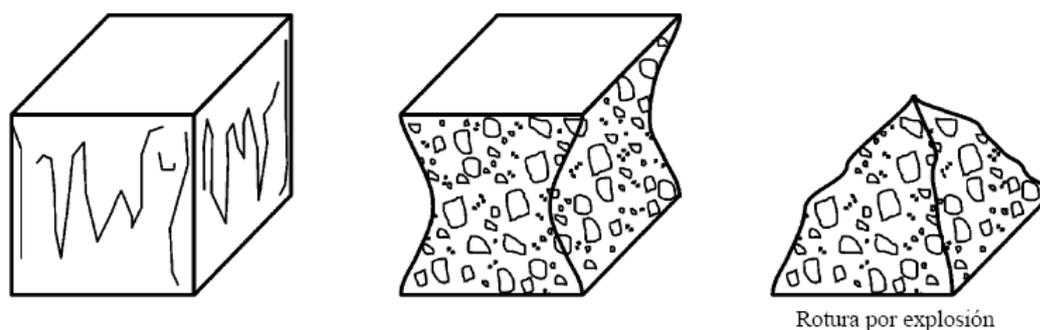


Figura 5. 2 Roturas satisfactorias en probetas cúbicas [2]

El modelo se fundamenta en la significación del carácter heterogéneo y discontinuo del hormigón, al estar compuesto de dos fases diferenciadas: mortero y árido. La concentración de tensiones que se origina en la interfase árido/mortero genera micro defectos alrededor de las partículas. Estos defectos impulsan un crecimiento de fisuras cuando el hormigón se somete a carga. En las etapas iniciales, el proceso de fisuración se encuentra muy distribuido, pero para ciertas trayectorias de carga estas microfisuras se limitan en bandas estrechas que bruscamente ocasionan planos bien definidos de rotura, como ocurre en la Figura 5. 2. Haciendo uso de la teoría de mezclas, es posible representar los aspectos fundamentales de la rotura a compresión del hormigón.

### 5.1.1. Proceso de elaboración del ensayo

Se han elaborado para el tratamiento del ensayo probetas de geometría cúbica de 10 cm de arista, tal y como se ha comentado en el Capítulo 3.

El procedimiento para la determinación de la compresión en cada una de las probetas ha sido el siguiente:

- Preparación y posicionamiento de las probetas. Deben estar completamente limpias y secas superficialmente de cualquier resto, para que al entrar en contacto con los platos de la máquina de compresión no causen ninguna distorsión a la hora de la rotura. Una vez se encuentre en las condiciones óptimas, se coloca en el plato inferior de manera que la carga se aplique perpendicularmente a la dirección del hormigonado (Figura 5. 3).



Figura 5. 3 Probeta preparada para su rotura a compresión

- Aplicación de la carga. Se selecciona una velocidad de carga constante dentro del rango  $0,6 \pm 0,2$  MPa/s, se aplica la carga a la probeta suavemente y se incrementa continuamente a la velocidad seleccionada  $\pm 10\%$ , hasta su rotura.
- Por último, se examina la rotura que ha tenido la probeta para comprobar que la misma fue satisfactoria, Figura 5. 4., ya que se obtiene una rotura parecida a la rotura central de la Figura 5. 2.



Figura 5. 4 Rotura de la probeta una vez finalizado el ensayo de rotura por compresión.

### 5.1.2. Resultados de los ensayos de la resistencia a compresión

A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada tipo de escoria.

#### 5.1.2.1 Resultados de las probetas con escoria M1

Se muestra la Tabla 5. 1, donde se encuentran las medias de la rotura a compresión a 1, 7, 28 y 90 días de las probetas elaboradas con la escoria M1.

Estas medias son las resultantes de la rotura de cuatro amasadas distintas y dos probetas de cada una de ellas. Los valores pueden variar entre  $\pm 5$  MPa, ya que la respuesta tensional es dependiente de las condiciones del ensayo.

COMPRESIÓN M1 (MPa)				
Días	1	7	28	90
M000	36,5	52,1	59,3	66,1
M123	26,9	53,8	62,9	68,4
M125	23,5	54,7	63,6	71,5
M130	22,8	54,3	64,4	72,5
M140	18,3	51,7	67,3	70,7

Tabla 5. 1 Valores medios de la resistencia a compresión obtenida con escorias tipo M1

Seguidamente se muestran las Figuras 5. 5 y 5. 6 de los resultados de la Tabla 5. 1, en las cuales se aprecian perfectamente el modo en el que evoluciona la resistencia para cada una de las roturas.

En la Figura 5. 6, además observamos con barras ascendentes y descendentes como es la evolución de estas mezclas con escoria M1.

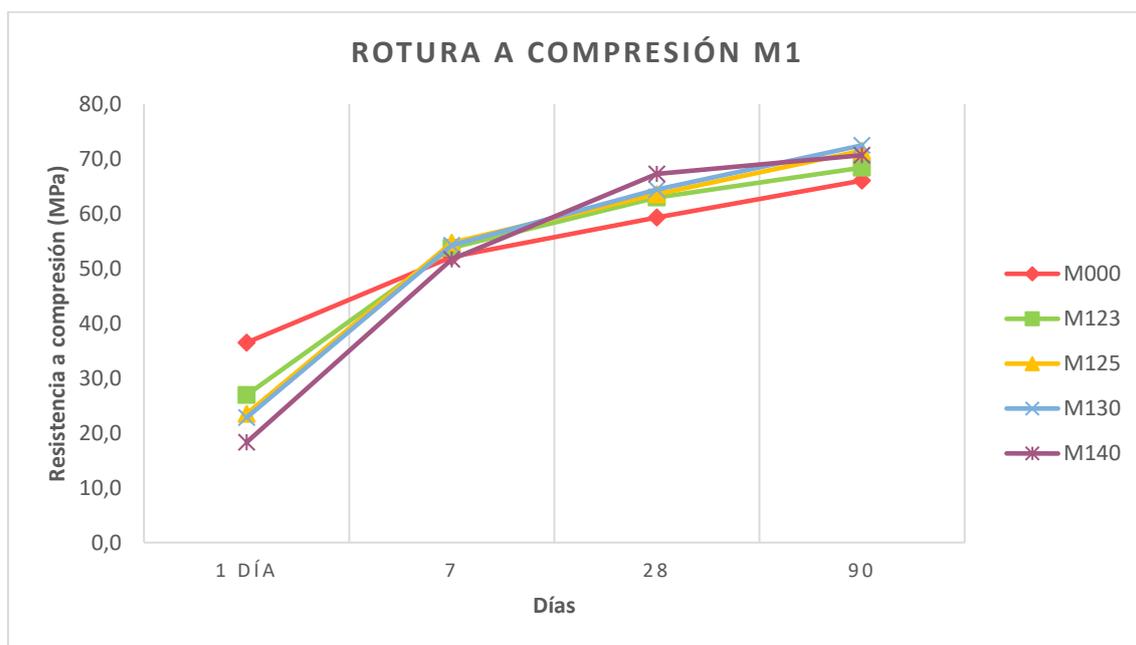


Figura 5. 5 Representación gráfica de las medias de la rotura a compresión de las probetas fabricadas con escoria M1

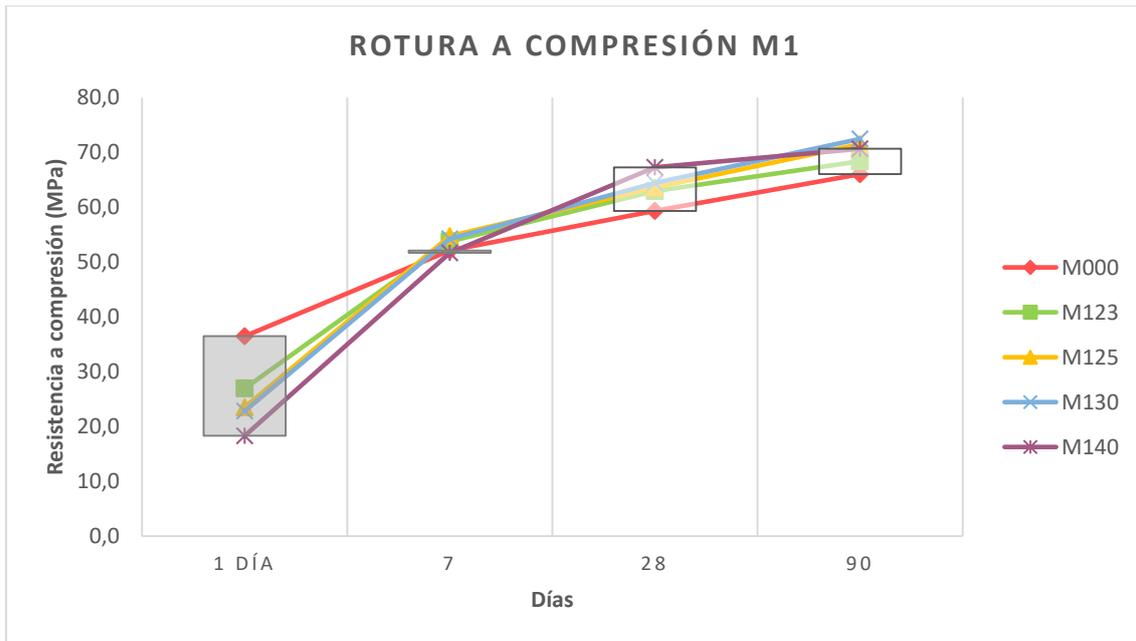


Figura 5. 6 Comportamiento de la rotura a compresión con el porcentaje del 40% de la escoria M1 a lo largo de los días

- \* La barra de color gris significa que la diferencia entre el hormigón con escoria y el convencional es negativo. Es decir, que el hormigón convencional tiene más resistencia que el M1. Al contrario ocurre si el color es blanco.

Se observa que la rotura a compresión en esta primera escoria M1, a un día, la resistencia para cada uno de los porcentajes va disminuyendo incluso en una proporción mayor al que se sustituye, al 40% de sustitución llega a perder hasta el 50% de resistencia tal y como vemos en la Figura 5. 7. A medida que pasan los días, este hormigón va alcanzando la resistencia hasta igualarse a lo largo del tiempo. El principal problema de este tipo de hormigón es que a edades tempranas el hormigón convencional adquiere con una mayor rapidez la resistencia a compresión. Por el contrario, con el paso del tiempo el porcentaje de resistencia aumenta llegando a 7 días a igualarse.

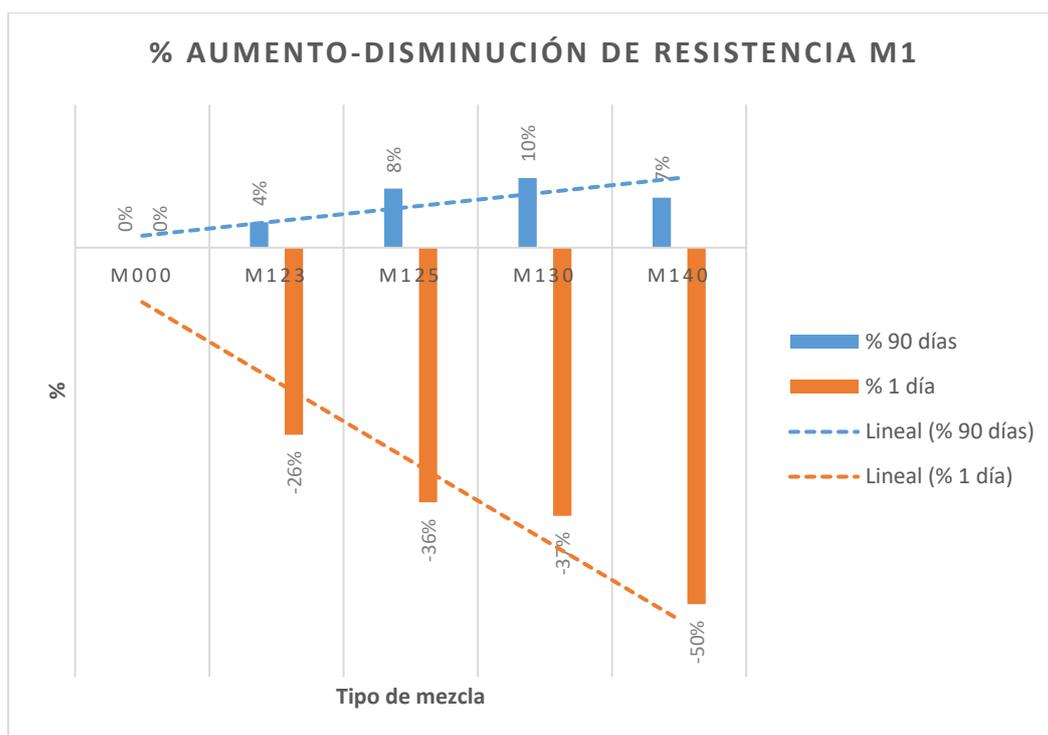


Figura 5. 7 Porcentaje de aumento y disminución de resistencia para 1 día y 90 días de la escoria M1

En algunas probetas la localización de deformaciones comienza por anomalías complejas de tipo constitutivo que causan un intenso ablandamiento del material. Es el caso del hormigón sometido a compresión en el régimen posterior a la carga máxima. Se debe abordar las interacciones químico-mecánicas y físicas-mecánicas que den respuesta a estas anomalías y que no es objeto en esta tesis.

Como conclusión final, diremos que el hormigón con sustitución de escoria M1 se comporta a partir de 7 días iguales e incluso mejor que el hormigón convencional en lo referente a la resistencia a compresión, sin importar el porcentaje de sustitución estudiados en este trabajo.

### 5.1.2.2 Resultados de las probetas con escoria M2

En la Tabla 5. 2 tenemos las medias de los resultados de la rotura de las probetas fabricadas con escoria M2. Esta media se ha realizado con la rotura de dos probetas de cada una de las cuatro amasadas realizadas. Los valores pueden oscilar entre  $\pm 5$  MPa.

COMPRESIÓN M2 (MPa)				
Días	1	7	28	90
M000	33,8	50,3	59,3	66,1
M123	22,3	37,2	38,2	49,8
M125	25,4	34,2	37,1	45,0
M130	18,8	30,6	35,0	35,1
M140	14,2	24,3	28,0	29,2

Tabla 5. 2 Valores medios de la resistencia a compresión obtenida con escorias tipo M2

A continuación se muestran las Figuras 5. 8 y 5. 9, en las cuales se representan los valores de la Tabla 5. 2 para ver de forma gráfica estos resultados. La Figura 5. 9 muestra con barras ascendentes y descendentes la diferencia de resistencia entre el hormigón convencional y el de mayor porcentaje (40%).

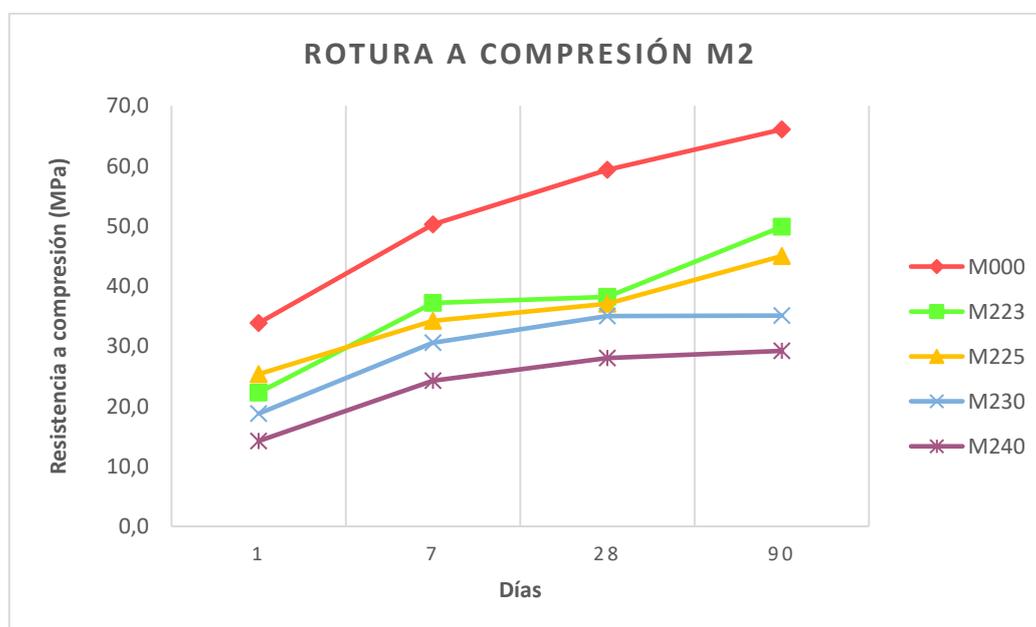


Figura 5. 8 Representación gráfica de las medias de la rotura a compresión de las probetas fabricadas con escoria M2

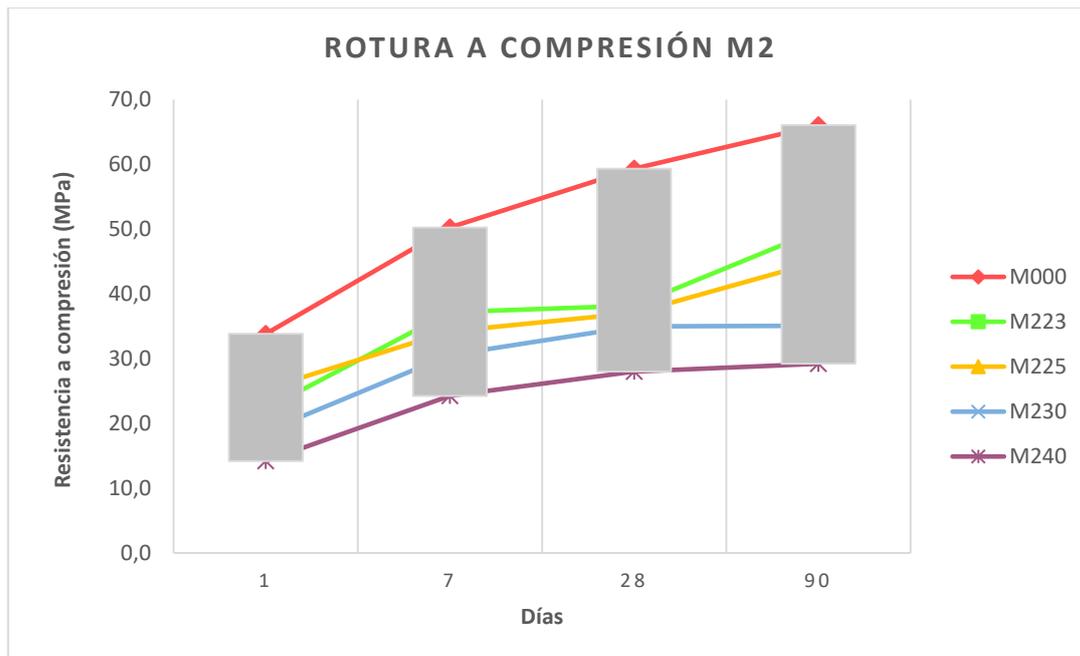


Figura 5. 9 Comportamiento de la rotura a compresión con el porcentaje del 40% de la escoria M2 a lo largo de los días

\* La barra de color gris significa que la diferencia entre el hormigón con escoria y el convencional es negativo. Es decir que el hormigón convencional tiene más resistencia que el M2. Al contrario ocurre si el color es blanco.

En los resultados de la escoria M2 observamos cómo hay una disminución de la resistencia a 1 día, pero en este caso la resistencia sigue disminuyendo a lo largo del tiempo. Perdiendo a 90 días y con una sustitución del 40% de cemento hasta casi un 60% de resistencia, tal y como se aprecia en la Figura 5. 10. Por lo tanto, este tipo de escorias a compresión no funcionan de la misma forma que el cemento, perdiendo un gran porcentaje de resistencia en todas sus sustituciones, pero su uso para determinado tipo de construcción en el que la resistencia a compresión no se considere como un valor fundamental, se vería justificado por el motivo ambiental.

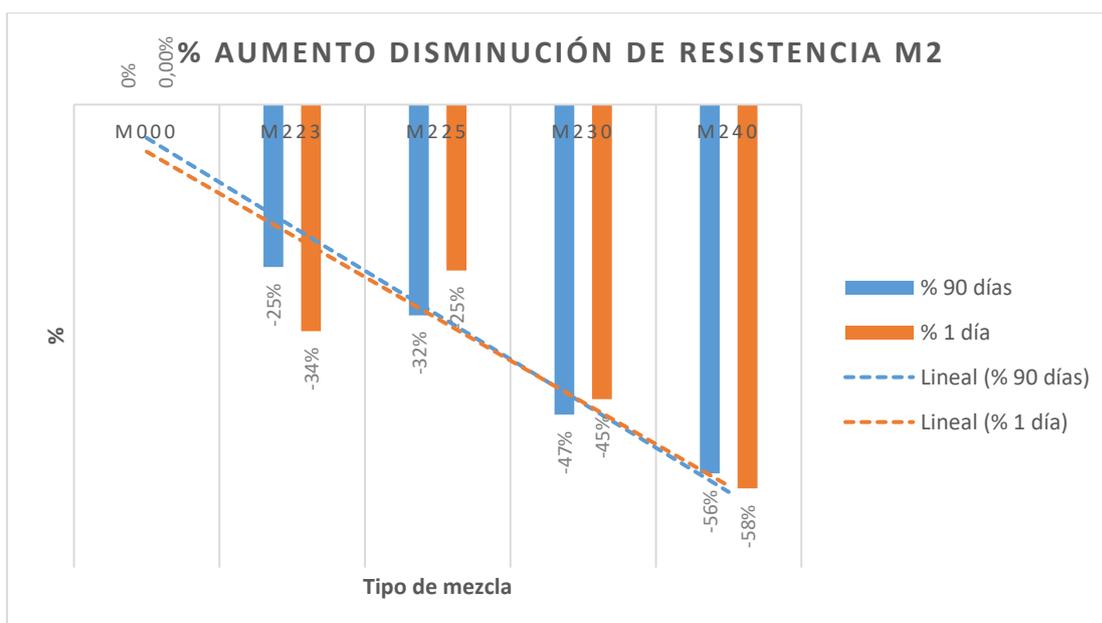


Figura 5. 10 Porcentaje de aumento y disminución de resistencia para 1 día y 90 días de la escoria M2

### 5.1.2.3 Resultados de las probetas con escoria M3

En la Tabla 5. 3 tenemos las medias de los resultados de la rotura de las probetas fabricadas con escoria M3. Esta media se ha realizado con la rotura de dos probetas de cada una de las cuatro amasadas realizadas. Los valores pueden oscilar entre  $\pm 5$  MPa.

COMPRESIÓN M3 (MPa)				
Días	1	7	28	90
M000	33,8	50,3	59,3	65,0
M323	23,3	38,6	52,4	55,4
M325	26,0	44,5	48,4	52,0
M330	25,5	35,5	43,3	50,2
M340	19,4	30,1	36,5	44,9

Tabla 5. 3 Valores medios de la resistencia a compresión obtenida con escorias tipo M3

En este apartado se muestran las Figuras 5. 11 y 5. 12, en las cuales se representan los valores de la Tabla 5. 3, para ver de forma gráfica estos resultados. La Figura 5. 12 muestra con barras ascendentes y descendentes la diferencia de resistencia entre el hormigón convencional y el de mayor porcentaje (40%).

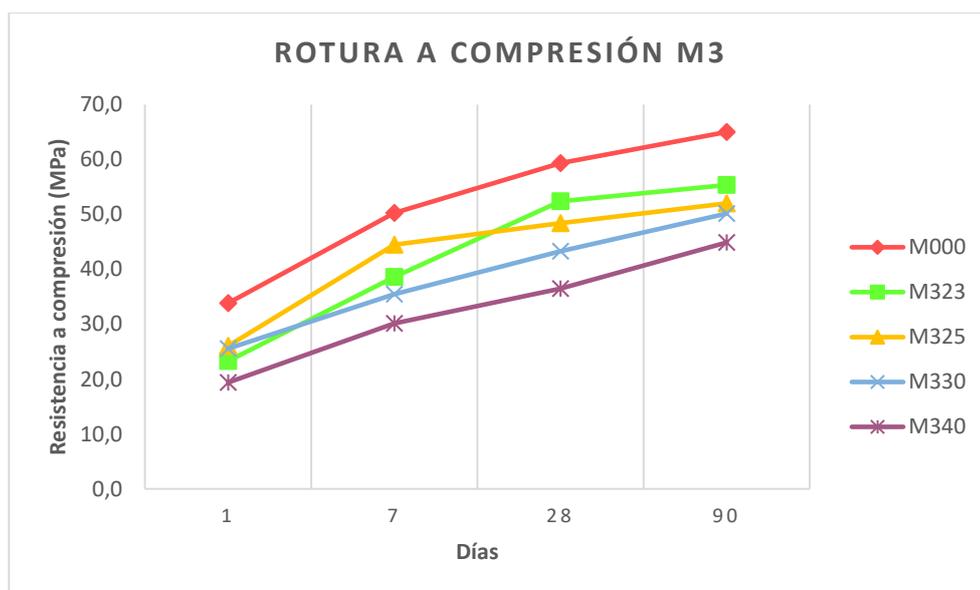


Figura 5. 11 Representación gráfica de las medias de la rotura a compresión de las probetas fabricadas con escoria M3

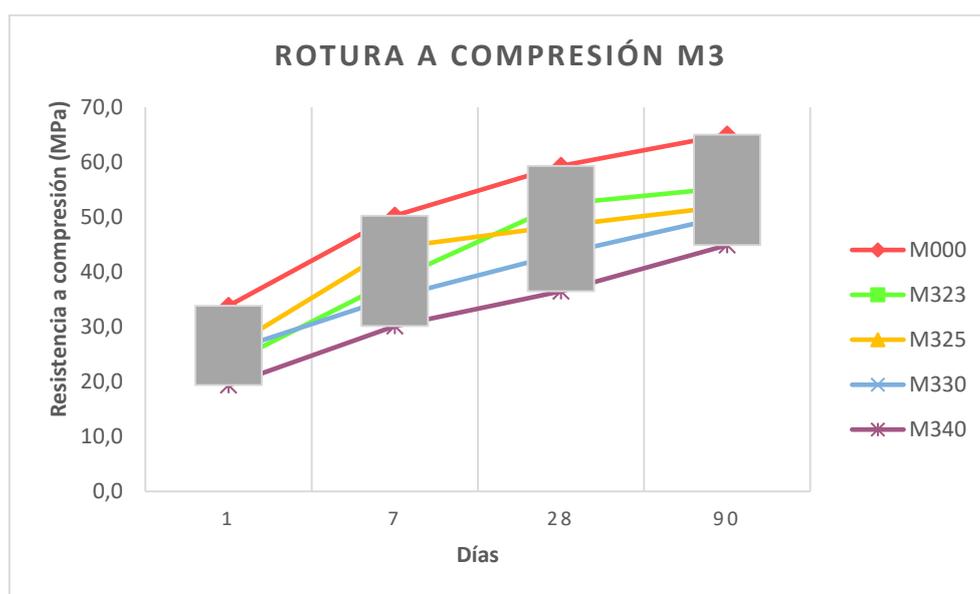


Figura 5. 12 Comportamiento de la rotura a compresión con el porcentaje del 40% de la escoria M2 a lo largo de los días

\* La barra de color gris significa que la diferencia entre el hormigón con escoria y el convencional es negativo. Es decir, que el hormigón convencional tiene más resistencia que el M2. Al contrario ocurre si el color es blanco.

En los resultados de la escoria M3 observamos, tal y como antes hemos visto en la M2, cómo hay una disminución de la resistencia a 1 día, pero en este caso la resistencia sigue disminuyendo a lo largo del tiempo. Perdiendo a 90 días y con una sustitución del 40% de cemento hasta casi un 40% de resistencia (Figura 5. 13). Igualmente, este tipo de

escorias a compresión no funcionan de la misma forma que el cemento, perdiendo un gran porcentaje de resistencia en todas sus sustituciones, aunque en menor proporción que la escoria M2, pero su uso para determinado tipo de construcción en el que la resistencia a compresión no se considere como un valor fundamental, se vería justificado por el motivo ambiental.

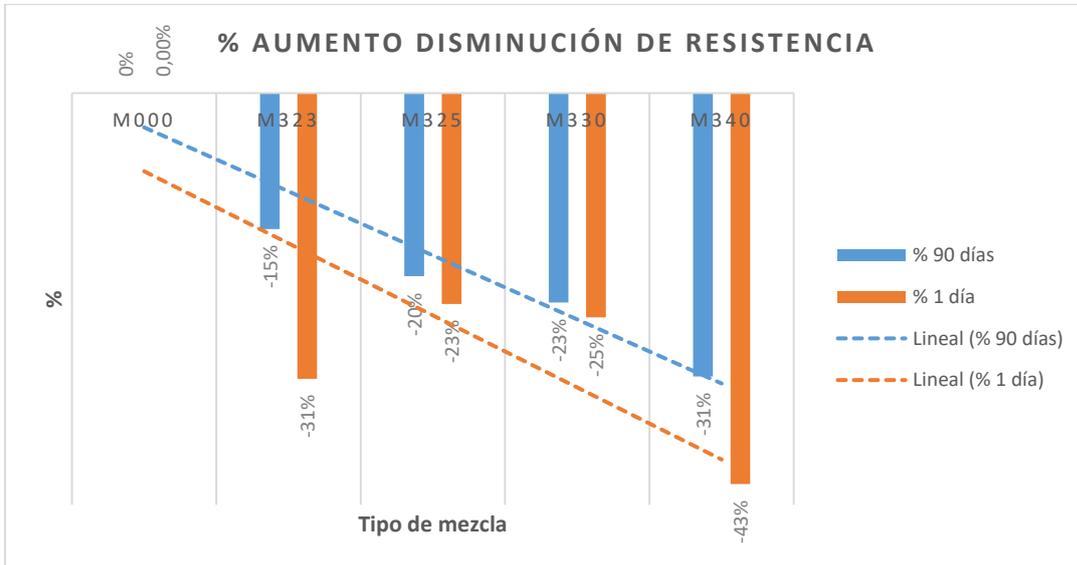


Figura 5. 13 Porcentaje de aumento y disminución de resistencia para 1 día y 90 días de la escoria M3

#### 5.1.2.4 Comparación de las muestras de escorias M1, M2, M3

La Figura 5. 14 es una comparación de la resistencia a compresión de cada una de las escorias a 90 días. Para así tener una visión global de capacidad resistente en cada una de ellas.

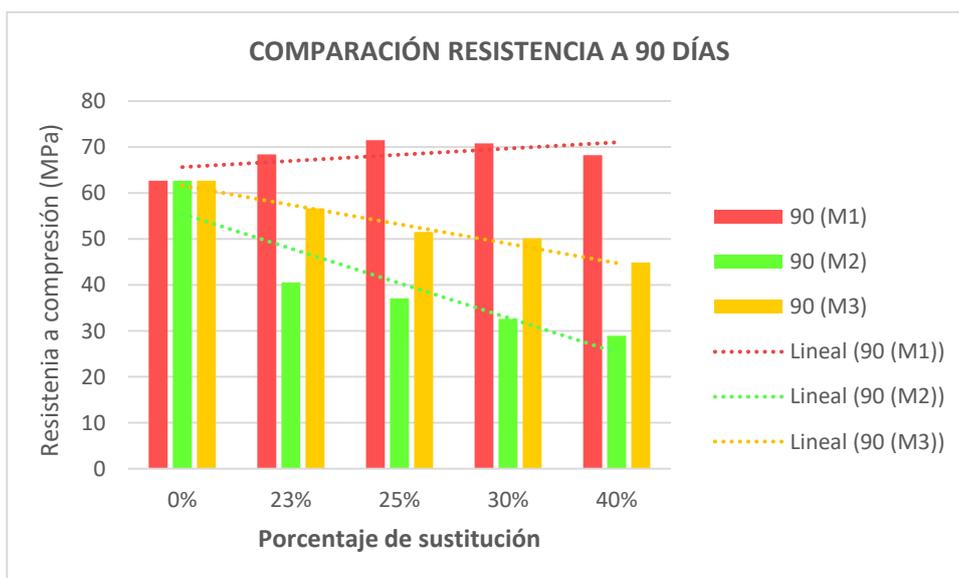


Figura 5. 14 Comparación de los 3 tipos de escorias a 90 días

Se verifica que las mezclas realizadas con la escoria M1 serían las adecuadas para su uso como sustitutivo del cemento. El resto de escorias se valoran para su utilización en determinados tipos de aplicaciones que no necesiten resistencia a compresión, como valorización o reciclaje de un residuo y hormigón con propiedades no estructurales. Ejemplos de éstos es el hormigón para aceras, bordillos y los hormigones de relleno.

## 5.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD.

El motivo del estudio del módulo de Young viene dado por varios factores, el principal es el cemento, con una microestructura extremadamente compleja, no se ha llegado a su análisis en profundidad, aunque si hay muchos estudios realizados. Para describir, por ejemplo, fenómenos de fluencia y retracción en cemento y hormigón, es esencial un conocimiento detallado de la estructura del cemento [5,6]. Para el propósito de esta tesis, sin embargo, se continuará a un nivel ligeramente más alto, aunque, cuando se trata de la interfaz entre el cemento y la escoria, la estructura del cemento se vuelve cada vez más importante.

La mecánica de fractura del hormigón es todavía un área relativamente joven de investigación. El modelo de Hillerborg [7], que desencadenó todas las actividades de investigación recientes en mecánica de fracturas, se remonta a 1976. Desde entonces, se han desarrollado muchos modelos numéricos que se aplican para el análisis estructural, que no es objeto de este trabajo.

La propiedad cinemática de deformación por tensión de cualquier material estructural se describe por medio de sus leyes de comportamiento. Una ecuación que describe la relación entre la tensión y la deformación ( $\sigma-\varepsilon$ ), incluidas las ramas de descarga, que es válida para todo el material y una ecuación en el contexto del medio continuo que explica la relación entre la tensión y su desplazamiento ( $\sigma-u$ ), que también incluye ramas de descarga, que da la deformación adicional debido a una zona de fisura. Para el hormigón se presupone que las dos curvas de una prueba de tensión son propiedades del material y que vienen relacionadas por la pendiente de su ecuación lineal deformante  $\sigma-\varepsilon$ , o de su ecuación de movimiento  $\sigma-u$ , en definitiva por su módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young.

Para determinar la variabilidad de cada hormigón producido M0, M1, M2, M3, en su resistencia a la compresión se dedujo este esquema de la desviación de resistencia que se incrementó con el aumento de escorias en la sustitución por cemento y las calidades y cualidades de estas.

Para establecer una relación entre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad de las mezclas de hormigón manufacturadas, se tendrán en cuenta diferentes modelos numéricos para determinar el módulo de Young que se relacionan a continuación (Tablas 5.4, 5.5, 5.6) y que vienen refrendados por numerosa bibliografía [8-14]. Se han realizado seis cálculos del módulo de elasticidad, algunos de ellos son

formulaciones sólo para hormigones convencionales y otras si incluyen hormigones reciclados.

EHE

		Ravindrarahaj and Tam		CEB-FIB		Ravindrarahaj		Takizaki		$f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ Mpa}$		$E_{cm} = 8500(f_{cm})^{1/3}$	
				Hormigón conv.		Hormigón Rec.		$d_s(\text{kg/dm}^3):$ 240		$\beta_E = 1.30 - f_{ck}/400 \leq 1.175$		$E_{cm}(t) = (f_{cm}(t)/f_{cm})^{0.3} E_{cm}$	
Días:	1	$E = 4.63f_{cy}^{0.5}$		$E = 6.6f_{cy}^{0.5}$		$E = 5.31f_{cy}^{0.5} + 5.83$		$E = 3.02f_{cy}^{0.5} + 10.67$		$E = 2.1(d_s/2.3)^{1.5}(f_c/200)^{0.5}$		$E = \beta_E E_{cm}(t)$	
Sustitución	$f_c$ (Mpa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)	E4 (MPa)	E5 (MPa)	$f_{cm}$ :	$E_{cm}$ :	$E_{cm}(t)$ :	$f_{ck}$ :	$\beta_E$ :	E6 (MPa)	
M100	36,48	27,96	39,86	37,90	28,91	43,80	59	33,09	28,65	51	1,1725	33,59	
M123	26,94	24,03	34,26	33,39	26,35	37,64	63	33,82	26,21	55	1,1625	30,47	
M125	23,50	22,44	31,99	31,57	25,31	35,15	64	34,00	25,17	56	1,16	29,20	
M130	22,81	22,11	31,52	31,19	25,09	34,63	64	34,00	24,95	56	1,16	28,94	
M140	18,30	19,81	28,23	28,55	23,59	31,02	67	34,52	23,39	59	1,1525	26,96	
Días:	7												
M100	52,12	33,42	47,65	44,16	32,47	52,35	59	33,09	31,88	51	1,1725	37,38	
M123	53,77	33,95	48,40	44,77	32,82	53,18	63	33,82	32,25	55	1,1625	37,49	
M125	54,73	34,25	48,83	45,11	33,01	53,65	64	34,00	32,44	56	1,16	37,63	
M130	54,25	34,10	48,61	44,94	32,91	53,41	64	34,00	32,36	56	1,16	37,53	
M140	51,69	33,29	47,45	44,01	32,38	52,14	67	34,52	31,94	59	1,1525	36,81	
Días:	28												
M100	59,34	35,66	50,84	46,73	33,93	55,86	59	33,09	33,15	51	1,1725	38,86	
M123	62,95	36,73	52,36	47,96	34,63	57,54	63	33,82	33,81	55	1,1625	39,31	
M125	63,59	36,92	52,63	48,17	34,75	57,83	64	34,00	33,93	56	1,16	39,36	
M130	64,43	37,17	52,98	48,45	34,91	58,21	64	34,00	34,07	56	1,16	39,52	
M140	67,28	37,98	54,14	49,39	35,44	59,48	67	34,52	34,57	59	1,1525	39,84	
Días:	90												
M100	66,05	37,63	53,64	48,99	35,21	58,94	59	33,09	34,23	51	1,1725	40,14	
M123	68,41	38,29	54,59	49,75	35,65	59,98	63	33,82	34,67	55	1,1625	40,30	
M125	71,51	39,15	55,81	50,73	36,21	61,32	64	34,00	35,15	56	1,16	40,77	
M130	72,49	39,42	56,19	51,04	36,38	61,74	64	34,00	35,30	56	1,16	40,94	
M140	70,68	38,92	55,49	50,47	36,06	60,97	67	34,52	35,08	59	1,1525	40,43	

Tabla 5. 4 Módulo de elasticidad del hormigón con escoria M1

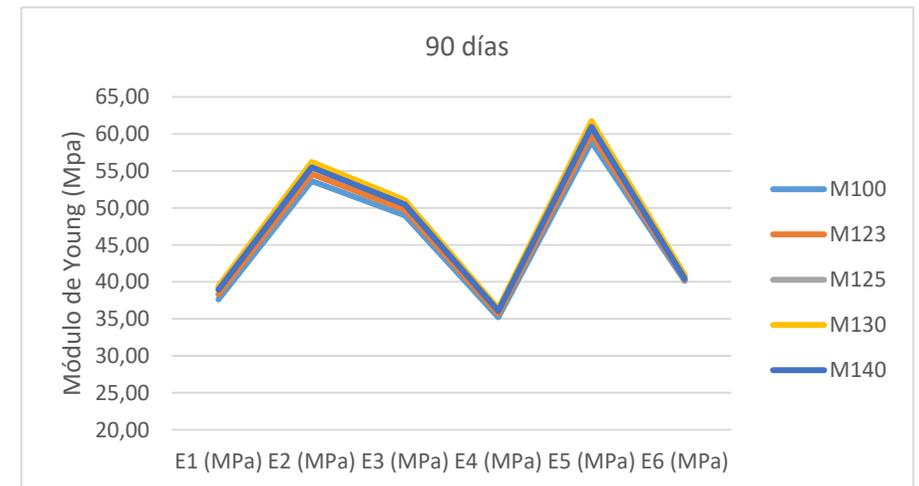
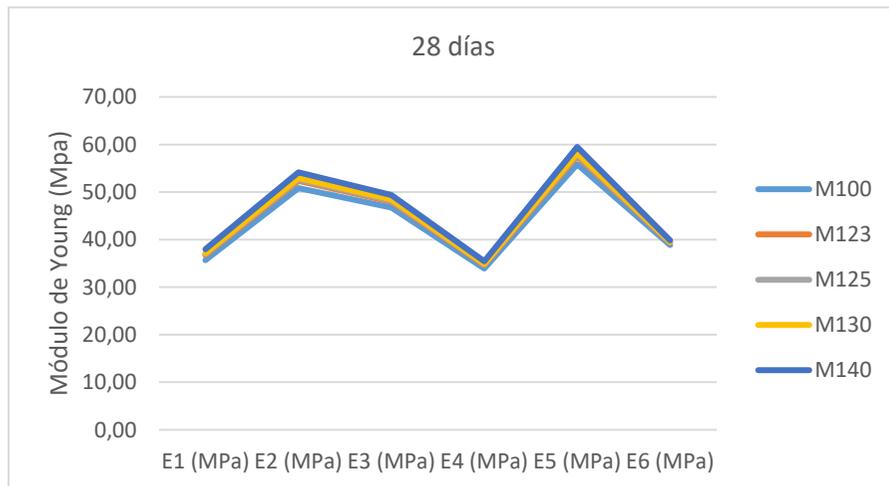
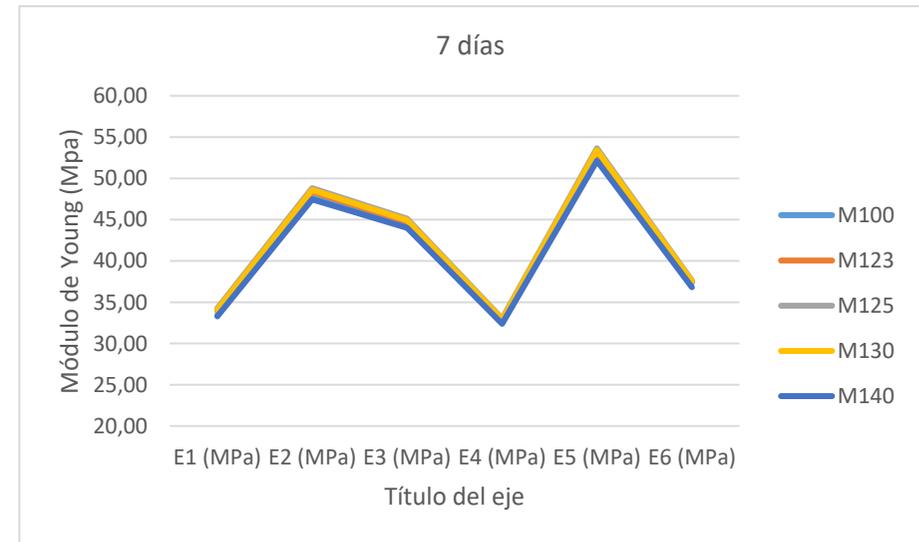
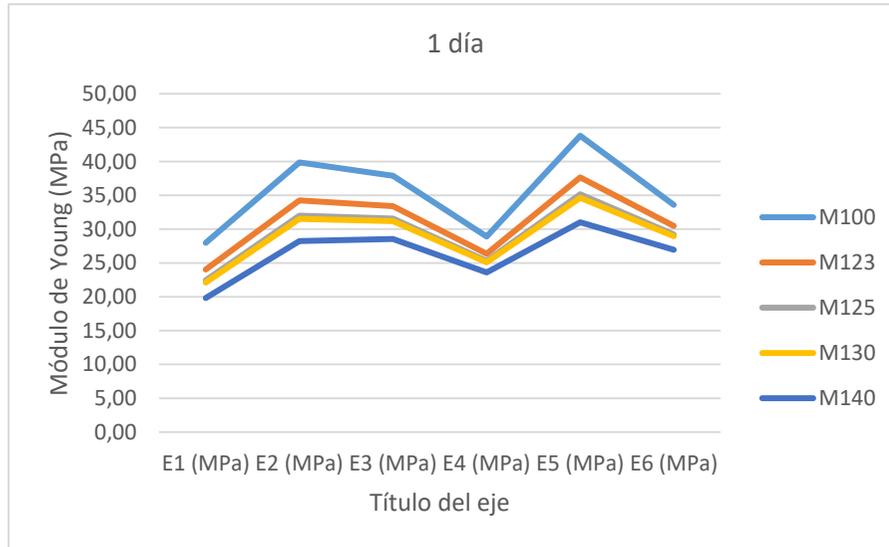


Figura 5. 15 Gráficos módulo de elasticidad de las escorias M1

EHE												
		Ravindrarahaj				Takizaki	$f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ Mpa}$			$E_{cm} = 8500(f_{cm})^{1/3}$		
		Ravindrarahaj and Tam	CEB-FIB	Hormigón conv.	Hormigón Rec.	$d_s(\text{kg/dm}^3):$ 240	$\beta_E = 1.30 - f_{ck}/400 \leq 1.175$			$E_{cm}(t) = (f_{cm}(t)/f_{cm})^{0.3} E_{cm}$		
Días:	1	$E = 4.63f_{cy}^{0.5}$	$E = 6.6f_{cy}^{0.5}$	$E = 5.31f_{cy}^{0.5} + 5.83$	$E = 3.02f_{cy}^{0.5} + 10.67$	$E = 2.1(d_s/2.3)^{1.5}(f_c/200)^{0.5}$	$E = \beta_E E_{cm}(t)$					
Sustitución	$f_c$ (Mpa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)	E4 (MPa)	E5 (MPa)	$f_{cm}:$	$E_{cm}:$	$E_{cm}(t):$	$f_{ck}:$	$\beta_E:$	E6 (MPa)
M001	33,84	26,93	38,39	36,72	28,24	42,18	59	33,09	28,01	51	1,1725	32,84
M231	22,25	21,84	31,13	30,88	24,92	34,21	38	28,58	24,34	30	1,175	28,60
M251	25,35	23,31	33,23	32,57	25,88	36,51	37	28,32	25,29	29	1,175	29,71
M301	18,77	20,06	28,59	28,84	23,75	31,42	35	27,80	23,06	27	1,175	27,10
M401	14,20	17,45	24,87	25,84	22,05	27,33	28	25,81	21,05	20	1,175	24,74
Días:	7											
M007	50,26	32,83	46,79	43,48	32,08	51,41	59	33,09	31,54	51	1,1725	36,98
M237	37,17	28,23	40,24	38,20	29,08	44,21	38	28,58	28,39	30	1,175	33,36
M257	34,22	27,08	38,61	36,89	28,34	42,42	37	28,32	27,67	29	1,175	32,51
M307	30,57	25,60	36,49	35,19	27,37	40,10	35	27,80	26,70	27	1,175	31,37
M407	24,26	22,80	32,51	31,98	25,54	35,72	28	25,81	24,72	20	1,175	29,05
Días:	28											
M0028	59,34	35,66	50,84	46,73	33,93	55,86	59	33,09	33,15	51	1,1725	38,86
M2328	38,21	28,62	40,79	38,65	29,34	44,82	38	28,58	28,62	30	1,175	33,63
M2528	37,07	28,19	40,18	38,16	29,06	44,15	37	28,32	28,34	29	1,175	33,30
M3028	35,00	27,39	39,04	37,24	28,54	42,90	35	27,80	27,80	27	1,175	32,67
M4028	28,02	24,51	34,93	33,94	26,66	38,39	28	25,81	25,82	20	1,175	30,33
Días:	90											
M0090	66,05	37,63	53,64	48,99	35,21	58,94	59	33,09	34,23	51	1,1725	40,14
M2390	49,85	32,69	46,60	43,32	31,99	51,20	38	28,58	31,00	30	1,175	36,43
M2590	45,01	31,06	44,28	41,45	30,93	48,65	37	28,32	30,04	29	1,175	35,30
M3090	35,10	27,43	39,10	37,29	28,56	42,96	35	27,80	27,83	27	1,175	32,70
M4090	29,23	25,03	35,68	34,54	27,00	39,20	28	25,81	26,14	20	1,175	30,72

Tabla 5. 5 Módulo de elasticidad del hormigón con escoria M2

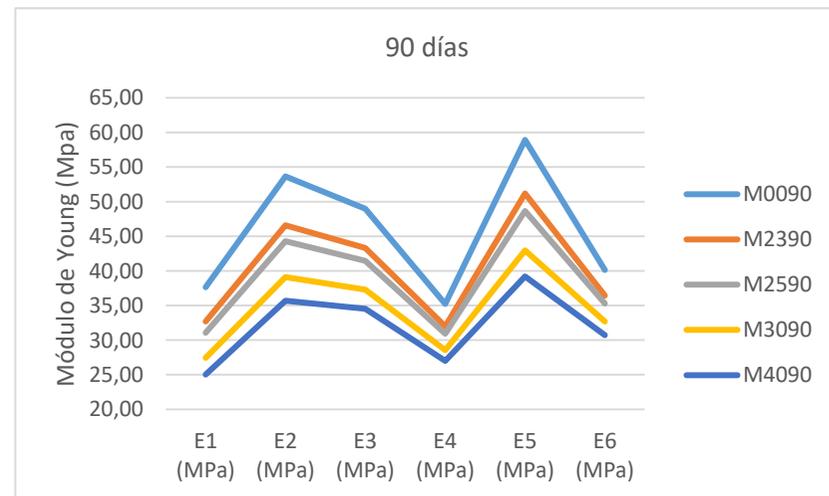
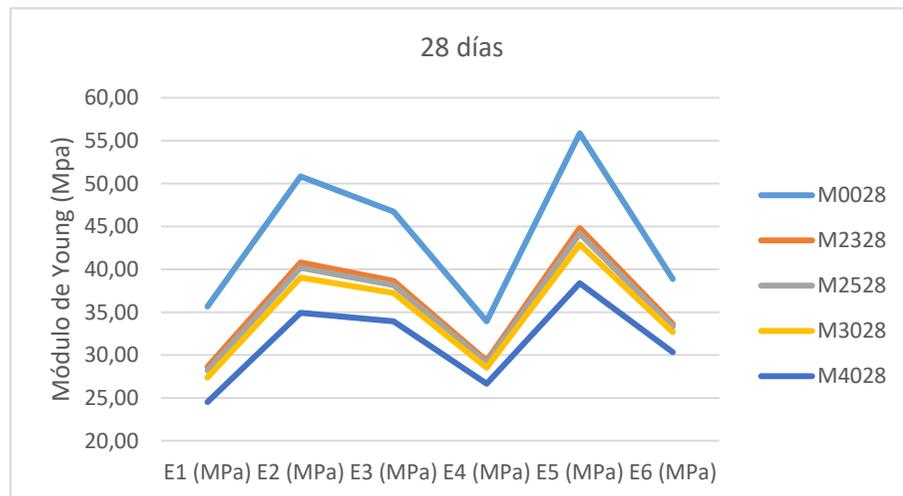
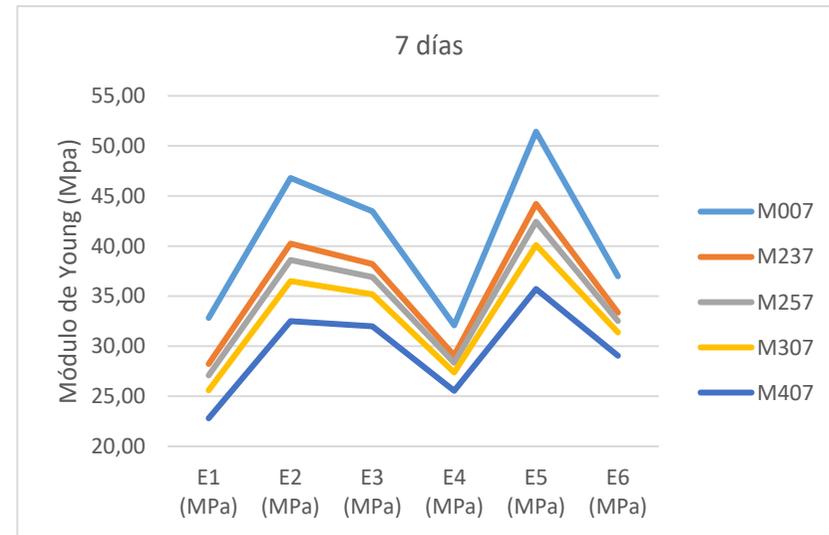
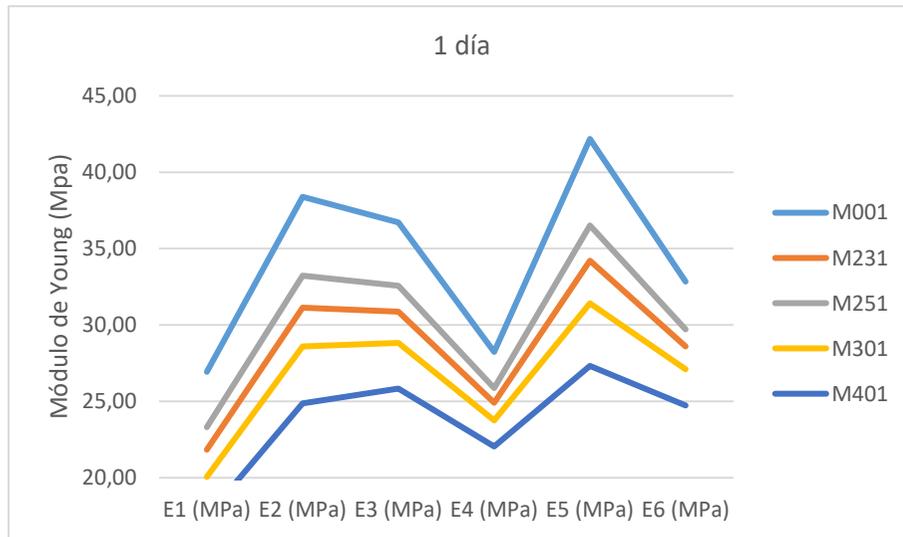


Figura 5. 16 Gráficos módulo de elasticidad de las escorias M2

EHE

		Ravindrarahaj				Takizaki	$f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ Mpa}$			$E_{cm} = 8500(f_{cm})^{1/3}$		
		Ravindrarahaj and Tam	CEB-FIB	Hormigón conv.	Hormigón Rec.	$d_s(\text{densidad}):$ 240	$\beta_E = 1.30 - f_{ck}/400 \leq 1.175$			$E_{cm}(t) = (f_{cm}(t)/f_{cm})^{0.3} E_{cm}$		
Días:	1	$E = 4.63f_{cy}^{0.5}$	$E = 6.6f_{cy}^{0.5}$	$E = 5.31f_{cy}^{0.5} + 5.83$	$E = 3.02f_{cy}^{0.5} + 10.67$	$E = 2.1(d_s/2.3)^{1.5}(f_c/200)^{0.5}$	$E = \beta_E E_{cm}(t)$					
Sustitución	$f_c$ (Mpa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)	E4 (MPa)	E5 (MPa)	$f_{cm}:$	$E_{cm}:$	$E_{cm}(t):$	$f_{ck}:$	$\beta_E:$	E6 (MPa)
M300	33,84	26,93	38,39	36,72	28,24	42,18	59	33,09	28,01	51	1,1725	32,84
M323	23,27	22,33	31,84	31,44	25,24	34,98	38	28,58	24,67	30	1,175	28,98
M325	26,04	23,63	33,68	32,93	26,08	37,01	37	28,32	25,49	29	1,175	29,95
M330	25,54	23,40	33,35	32,67	25,93	36,65	35	27,80	25,30	27	1,175	29,72
M340	19,38	20,38	29,05	29,21	23,96	31,92	28	25,81	23,11	20	1,175	27,16
Días:	7											
M300	50,26	32,83	46,79	43,48	32,08	51,41	59	33,09	31,54	51	1,1725	36,98
M323	38,61	28,77	41,01	38,82	29,44	45,06	38	28,58	28,71	30	1,175	33,74
M325	44,48	30,88	44,02	41,24	30,81	48,36	37	28,32	29,93	29	1,175	35,17
M330	35,47	27,57	39,30	37,45	28,65	43,19	35	27,80	27,91	27	1,175	32,80
M340	30,14	25,42	36,23	34,98	27,25	39,81	28	25,81	26,39	20	1,175	31,01
Días:	28											
M300	59,34	35,66	50,84	46,73	33,93	55,86	59	33,09	33,15	51	1,1725	38,86
M323	52,39	33,51	47,77	44,26	32,53	52,49	38	28,58	31,47	30	1,175	36,97
M325	48,42	32,22	45,92	42,78	31,68	50,46	37	28,32	30,70	29	1,175	36,08
M330	43,28	30,46	43,42	40,76	30,54	47,71	35	27,80	29,63	27	1,175	34,82
M340	36,48	27,96	39,86	37,90	28,91	43,80	28	25,81	27,94	20	1,175	32,83
Días:	90											
M300	65,03	37,34	53,22	48,65	35,02	58,48	59	33,09	34,07	51	1,1725	39,95
M323	55,37	34,45	49,11	45,34	33,14	53,96	38	28,58	31,99	30	1,175	37,59
M325	52,02	33,39	47,60	44,13	32,45	52,30	37	28,32	31,37	29	1,175	36,86
M330	50,15	32,79	46,74	43,43	32,06	51,36	35	27,80	30,97	27	1,175	36,39
M340	44,90	31,02	44,22	41,41	30,91	48,59	28	25,81	29,74	20	1,175	34,94

Tabla 5. 6 Módulo de elasticidad del hormigón con escoria M3

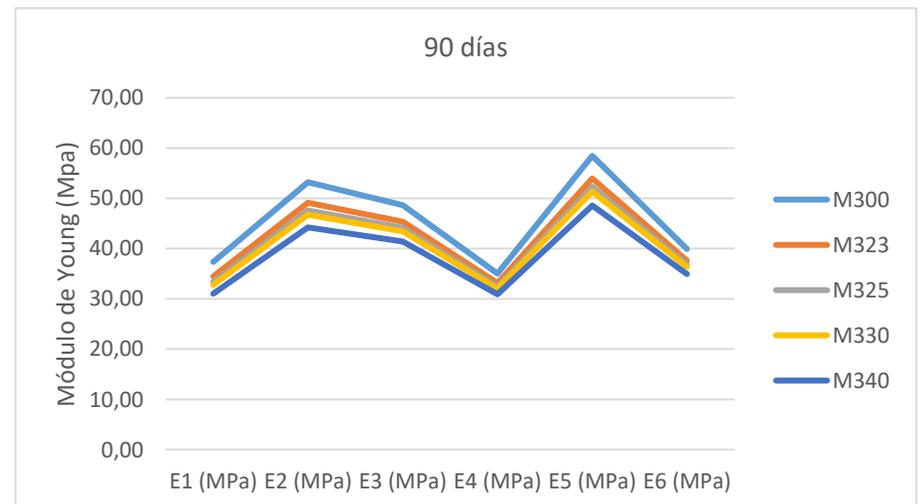
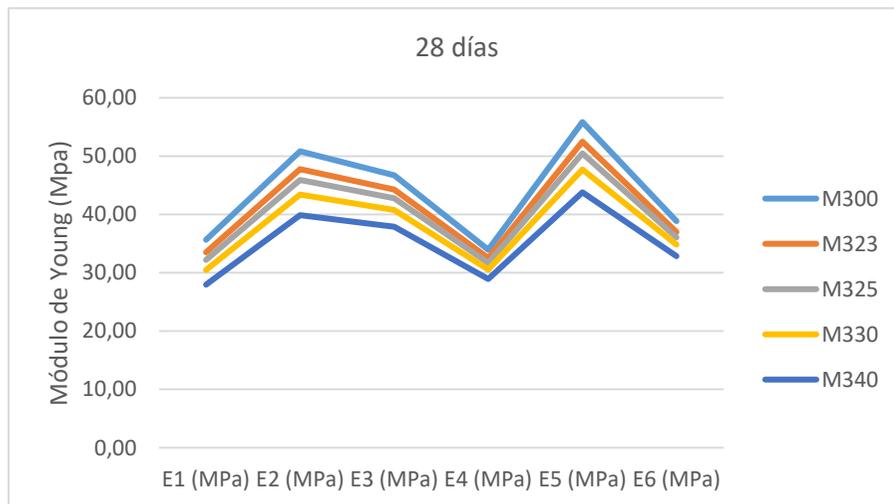
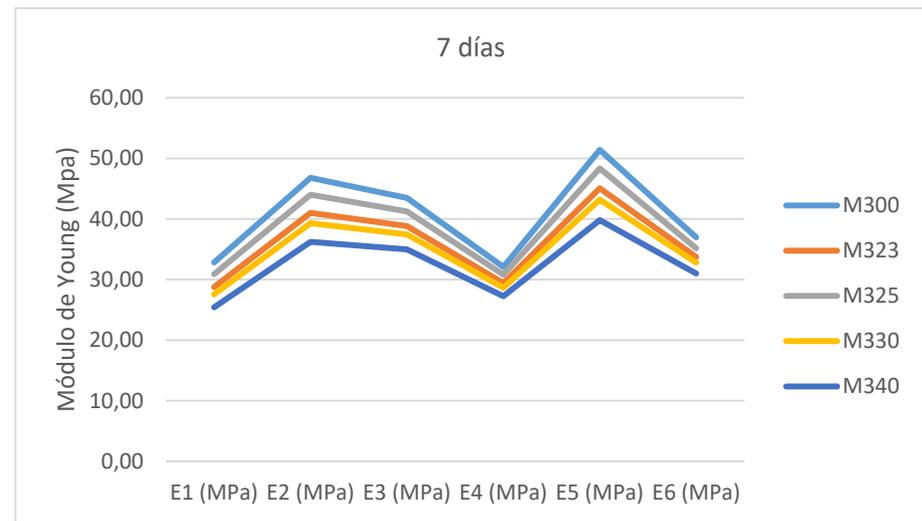
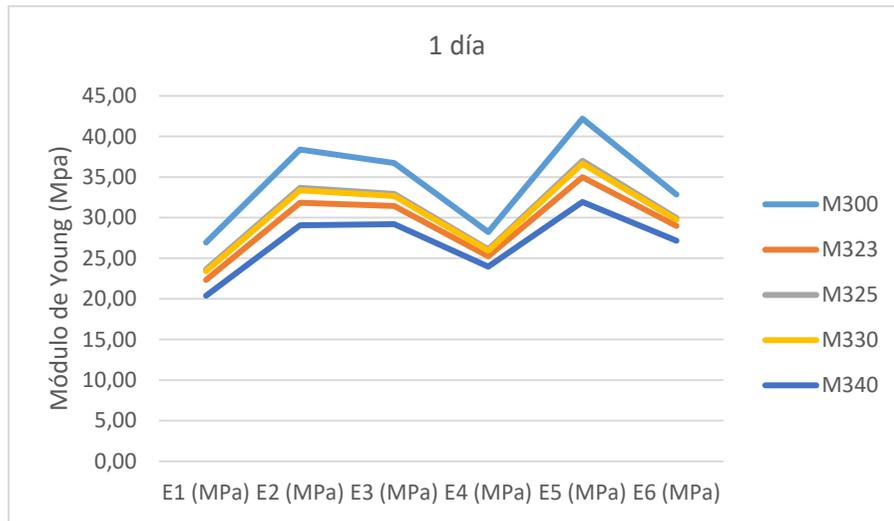


Figura 5. 17 Gráficos módulo de elasticidad de las escorias M3

La deformación máxima se corresponde con los vértices de tensión máxima, aunque en realidad, un material o estructura experimenta deformaciones solamente.

Los resultados alcanzados para el módulo de elasticidad de las distintas probetas de hormigón se representan en las tablas correspondientes a las Figuras 5. 15 a 5. 17 donde el decremento a las variaciones en el módulo de elasticidad de las mezclas de hormigón cuando se compara con el hormigón convencional se ponen de manifiesto en porcentajes que oscilan entre 10% y el 15% de referencia. Descontando la expresión de Takizaki que llega al 62% de diferencia con otras formulaciones y por ello no la vamos a tener en cuenta aunque sea la más aludida en la bibliografía actual. Hacer hincapié en que al menos mantiene iguales características que los demás procedimientos. Como se muestra, hay una ligera reducción del módulo de elasticidad para el hormigón con menores adiciones mientras que para el hormigón con adiciones mayores la pérdida es significativa, esto demuestra que el módulo de elasticidad disminuye con relación a la calidad de la escoria y el porcentaje sustituido.

El módulo de elasticidad del hormigón está intrínsecamente relacionado con la rigidez de las escorias adicionadas, la rigidez del mortero, su porosidad y enlace. Por lo tanto, para pequeñas relaciones de sustitución, es posible que la rigidez general no tenga una importancia significativa, porque la rigidez del mortero es solo uno de los varios factores de afectación, mientras que para mayor sustitución el mortero soporta una pérdida de rigidez tan grande que el módulo de elasticidad se ve considerablemente afectado.

En todas las investigaciones donde se establecen las leyes de comportamiento mecánico (modelos constitutivos) para materiales, este se considera como un elemento volumétrico representativo suyo. Se supone que el material se comporta como un medio continuo, es decir, como un material que tiene las mismas propiedades elásticas en cada punto. El hecho de que las diferentes particularidades estructurales se hallen en un material a diferentes niveles de observación conduce a la idea que gran parte del comportamiento advertido en un nivel se explique en términos de la estructura del material (y los cambios en el mismo) en un nivel inferior.

### **5.3. RESISTENCIA A FLEXIÓN**

El alcance de esta investigación tiene un objetivo principal, unir, analizar y evaluar el comportamiento del hormigón sobre el efecto de varios factores relacionados con el uso de distintas escorias en su resistencia a la compresión y a la flexión.

Anteriormente ya se ha procedido al estudio de la resistencia a la compresión. En este apartado se analizará la resistencia a flexión. Por último, y como objetivo adicional, se comparará la relación entre los esfuerzos de flexión y de las fuerzas a compresión, ya que hoy en día, constituye el enfoque preferente en la industrialización y diseño de estructuras de hormigón para estimar su resistencia a la tracción y predecir algunas situaciones de elementos estructurales solicitados a punzonamiento, o agotamiento.

Como el comportamiento a flexión y la fisuración están relacionados, es frecuente que los criterios de la Mecánica de la Fractura establecidos por Hillerborg (1978) [7] empiecen a incorporarse en las ecuaciones constitutivas del hormigón, permitiendo demostrar resultados experimentales complejos y contribuyendo a modelos numéricos no lineales en su cálculo.

La resistencia a flexión es la medida a la tracción del hormigón. Evalúa la resistencia que tiene el material no reforzado a la rotura, se denomina *módulo de rotura*, es un parámetro importante para los materiales frágiles. Este ensayo es interesante sobre todo para establecer estos modelos, o ecuaciones constitutivas, utilizando o métodos donde los parámetros se deducen a partir de las propiedades físicas de las fracciones volumétricas del hormigón o el método empírico en el que se intuye un modelo parametrizado que se ajusta a partir de resultados experimentales como los que se desarrollan en esta tesis.

### 5.3.1. Proceso de elaboración

Se somete la probeta prismática a un momento flector mediante la aplicación de una carga a través de rodillos superiores e inferiores, se registra la máxima carga aplicada y se calcula la resistencia a flexión. Este ensayo se debe realizar con una prensa que cumpla las especificaciones de la norma europea EN 12390-5 [15].

El ensayo tiene como objetivo determinar la resistencia a flexión del hormigón endurecido, mediante la aplicación uniforme de carga en una probeta prismática a través de dos rodillos que transmiten la presión perpendicular a la probeta apoyada sobre otros dos rodillos o ejerciendo la carga sobre un rodillo centrado entre apoyos, estos dos tipos de ensayos los vemos en las Figuras 5. 18 y 5. 19.

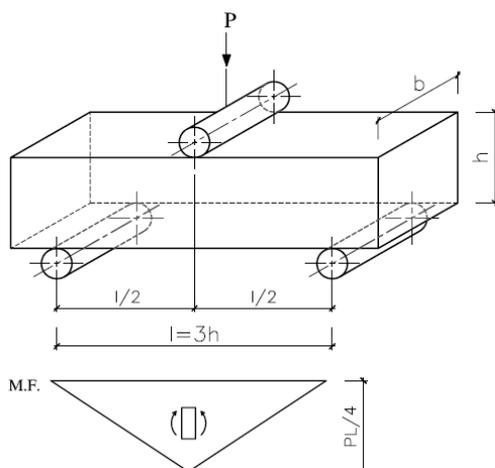


Figura 5. 18 Ensayo con carga centrada

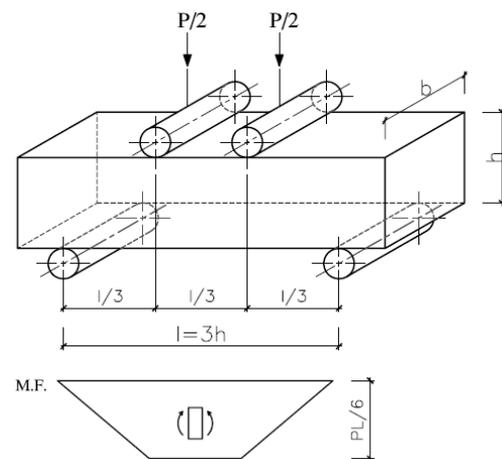


Figura 5. 19 Ensayo con carga a un tercio

Para este trabajo los ensayos se han realizado con la configuración de la Figura 5. 18, es decir, con una carga centrada. La tensión se calcula a partir del espesor de la probeta, el momento de flexión y el momento de inercia de la sección.

Estos ensayos se basan en la norma EN 12390-5 [15] mediante máquinas de ensayo controladas por ordenador. Las probetas utilizadas han sido prismáticas de 40×40×160 mm y han sido sometidas a una carga centrada y a una velocidad de aplicación de la misma de 50 N/s sobre la probeta biapoyada, como se muestra en la Figura 5. 20.



Figura 5. 20 Rotura de la probeta a flexotracción

### 5.3.2.1 Resultados de las probetas con escoria M1

En la Tabla 5. 4, se muestran los valores medios de la rotura a flexotracción de las probetas con sustitución de escoria M1. Para la obtención de estos valores se han roto dos probetas de cada una de las sustituciones de escoria, de las cuatro amasadas que se han elaborado. Los resultados pueden variar entre  $\pm 2$  MPa.

	FLEXIÓN (MPa)	
	28 días	Más de 90 días
<b>M000</b>	8,8	10,3
<b>M123</b>	7,9	10,7
<b>M125</b>	8,4	10,8
<b>M130</b>	8,5	10,4
<b>M140</b>	8,6	10,6

Tabla 5. 7 Valores medios de la resistencia a flexión obtenida con escorias tipo M1

La Figura 5. 21, muestran los valores mediante el diagrama de barras que se han obtenido en la Tabla 5. 7.

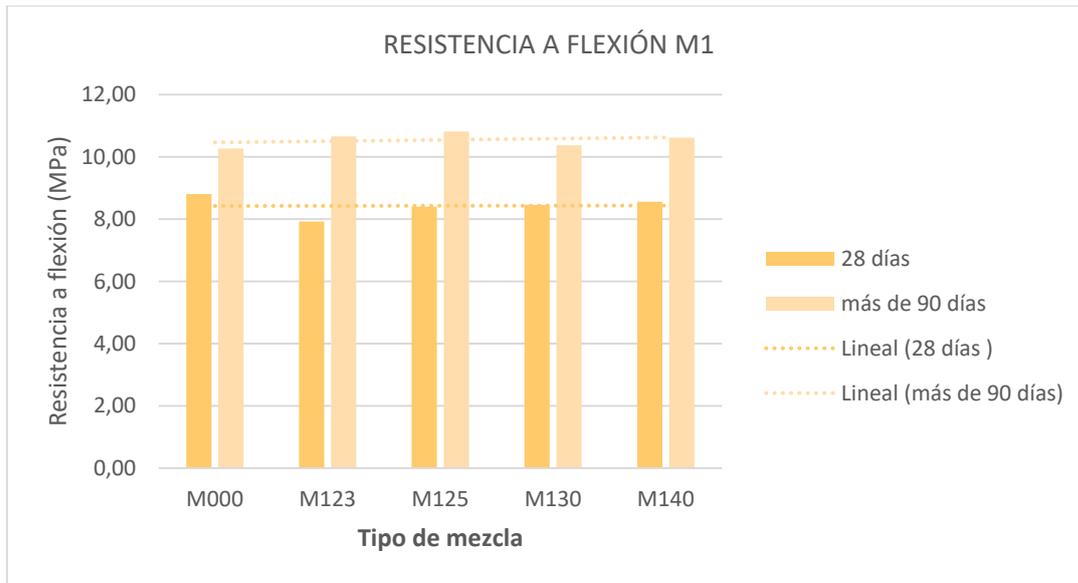


Figura 5. 21 Representación gráfica de las medias de la rotura a flexión de las probetas fabricadas con escoria M1

Para la resistencia a flexión y con este tipo de mezclas M1, observamos que ocurre lo mismo que para la resistencia a compresión, es decir, se mantiene en cualquiera de los porcentajes en los cuales se sustituye, tanto a 28 como a más de 90 días.

Se comprueba que estas escorias se comportan prácticamente de igual modo que las que las probetas no adicionadas, para una mayor fiabilidad se realizan nuevas roturas a más de 90 días, para el resto de escorias sólo se realizan las roturas a 28 días principalmente, añadiendo los resultados a 90 días para comprobar su disminución con la edad.

### 5.3.2.2 Resultados de las probetas con escoria M2

En la Tabla 5. 5, se muestran los valores medios de la rotura a flexotracción de las probetas con sustitución de escoria M2. Para estudiar estos valores se han roto dos probetas de cada una de las sustituciones de escoria, de las cuatro amasadas que se han elaborado. Los resultados pueden variar entre  $\pm 1$  MPa.

	FLEXIÓN (MPa)	
	28 días	Más de 90 días
<b>M000</b>	8,8	10,2
<b>M223</b>	8,9	9,5
<b>M225</b>	9,4	8,4
<b>M230</b>	7,3	7,5
<b>M240</b>	7,4	7,4

Tabla 5. 8 Valores medios de la resistencia a flexión obtenida con escorias tipo M2

A continuación, se muestra la Figura 5. 22, en la cual están representados mediante diagrama de barras los valores de la Tabla 5. 8.

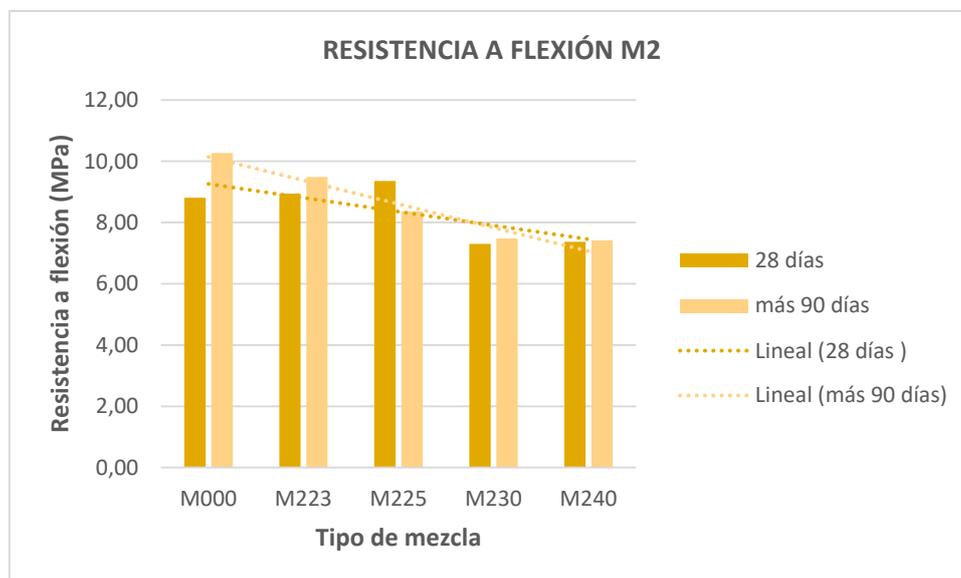


Figura 5. 22 Representación gráfica de las medias de la rotura a flexión de las probetas fabricadas con escoria M2

Con esta escoria, y al contrario que ocurre con las mezclas M1, en los porcentajes tanto a 23% como a 25% se mantiene la resistencia igual que en el hormigón convencional, siendo a partir del 30% cuando esta comienza a disminuir.

Para este tipo de escoria se daría como opción en la utilización de un hormigón que no esté sometido a esfuerzo de compresión, valorizando un residuo que es depositado en el vertedero.

### 5.3.2.3 Resultados de las probetas con escoria M3

En la Tabla 5. 6, se muestran los valores medios de la rotura a flexotracción de las probetas con sustitución de escoria M3. Para la obtención de estos valores se han roto dos probetas de cada una de las sustituciones de escoria, de las cuatro amasadas que se han elaborado. Los resultados pueden variar entre  $\pm 1$  MPa.

FLEXIÓN (MPa)		
	28 días	Más de 90 días
<b>M000</b>	8,8	10,2
<b>M323</b>	8,6	9,9
<b>M325</b>	9,3	9,7
<b>M330</b>	7,9	9,1
<b>M340</b>	7,8	8,2

Tabla 5. 9 Valores medios de la resistencia a flexión obtenida con escorias tipo M3

A continuación, se muestra la Figura 5. 23, en la cual están representados mediante diagrama de barras los valores de la Tabla 5. 9.

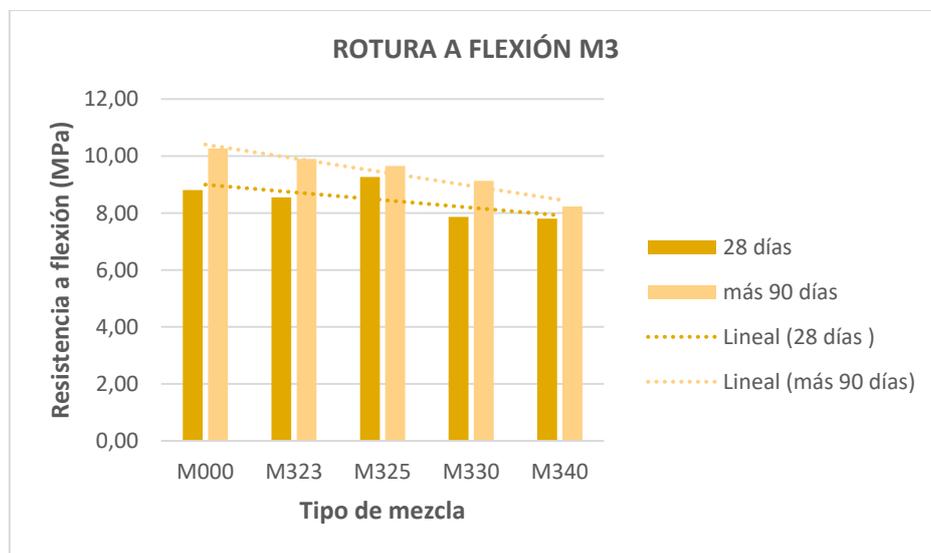


Figura 5. 23 Representación gráfica de las medias de la rotura a flexión de las probetas fabricadas con escoria M3

Al igual que la escoria anterior, ocurre lo contrario con la resistencia a compresión. La resistencia a flexión tiene un mejor comportamiento, estando los valores de la misma para cada uno de los porcentajes con una diferencia de 2 MPa. Es decir, tendríamos al 40% de sustitución sólo un 10% de pérdida de resistencia, así que concluiremos diciendo que este tipo de escorias se podrían valorizar al igual que las M2, para algún tipo de hormigón que no necesite estar sometido a la resistencia a compresión.

❖ **Comparación de todas las escorias**

La Figura 5. 24 es una comparación de la evolución de cada una de las escorias a 90 días. Apreciamos como la escoria M1 hace que aumente la resistencia a flexión, mientras que las mezclas de hormigón con escorias M2 y M3 hay una disminución, pero en un porcentaje de 10% aproximadamente.

En la Figura 5. 25 vemos los porcentajes de pérdidas o aumento de la resistencia a flexión donde no ocurre en la resistencia a compresión, ya que en este caso disminuye para las escorias M2 y M3, pero en un porcentaje menor. De igual manera la pérdida máxima de resistencia es la escoria M2, con una sustitución del 40% en flexión el descenso es del 28%, mientras que en el estudio a compresión fue del 40% con la misma sustitución.

Por otro lado, en la escoria M3 no se aprecian cambios considerables, comportándose de igual manera que M1 y aumentado entre un 1% y un 5% al igual que ocurre en la resistencia a compresión.

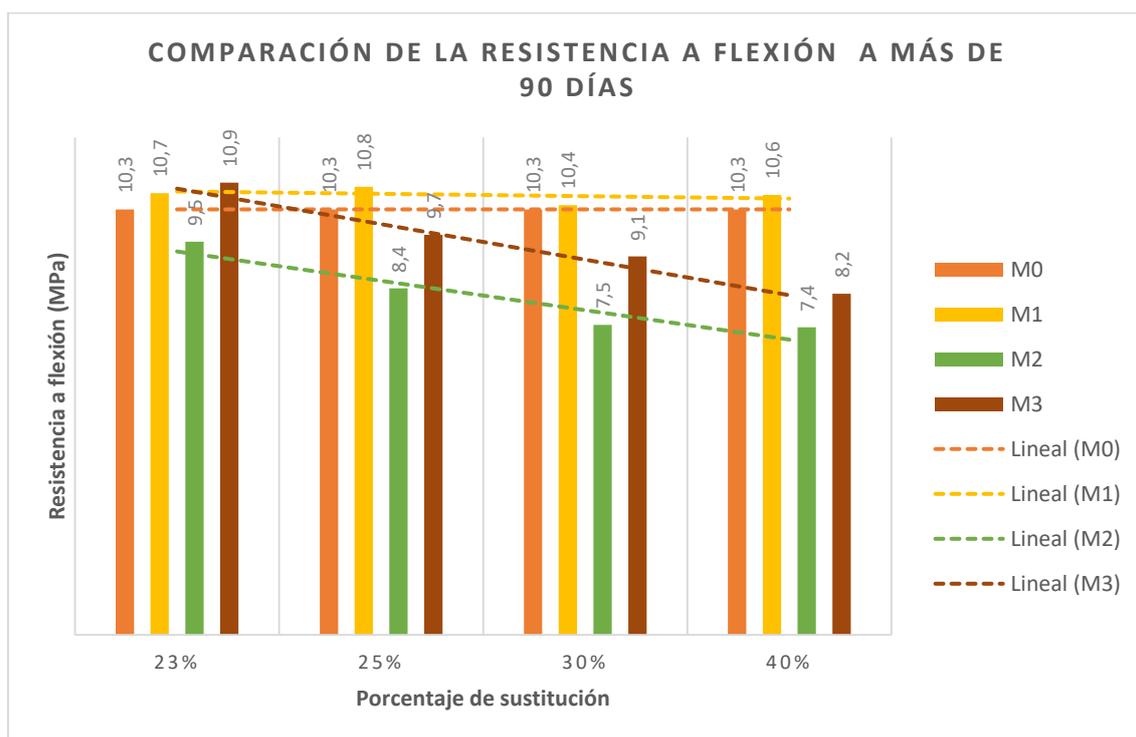


Figura 5. 24 Comparación de la resistencia a flexión de las tres escorias

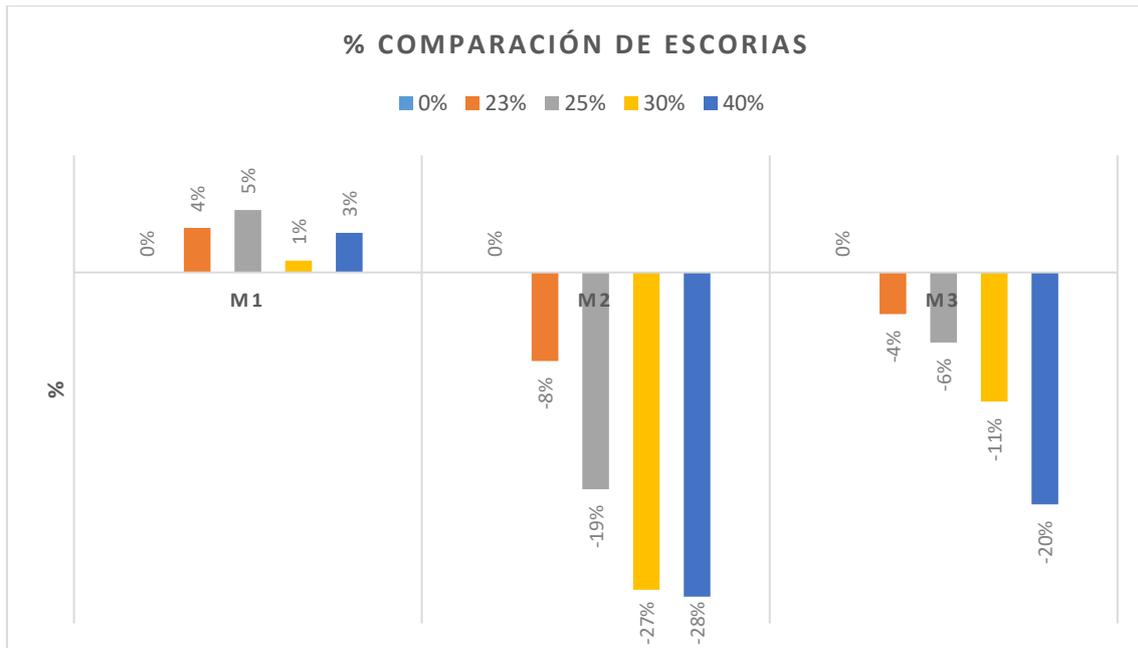


Figura 5. 25 Porcentaje de pérdida y/o aumento de resistencia a flexión de los tres tipos de escoria a más de 90 días

#### 5.4. COMPARACIÓN ENTRE FLEXOTRACCIÓN Y COMPRESIÓN

En la Figura 5. 26, se muestran los porcentajes de aumento o pérdida de resistencia tanto de la resistencia a flexión como la de compresión, y se ve de manera clara lo que hemos comentado anteriormente. Vemos como las mezclas con escorias M1 la resistencia a compresión aumenta en mayor porcentaje que la resistencia a flexión. En cambio, las escorias de alto horno M2 que pierden hasta casi un 60% en su mayor sustitución a compresión, vemos como a flexión su pérdida no llega al 30%. Con las mezclas con escorias M3, observamos que ocurre algo parecido que con las M2, pero en menor porcentaje, también pierden a compresión resistencia mientras que a flexión pierden en menor proporción.

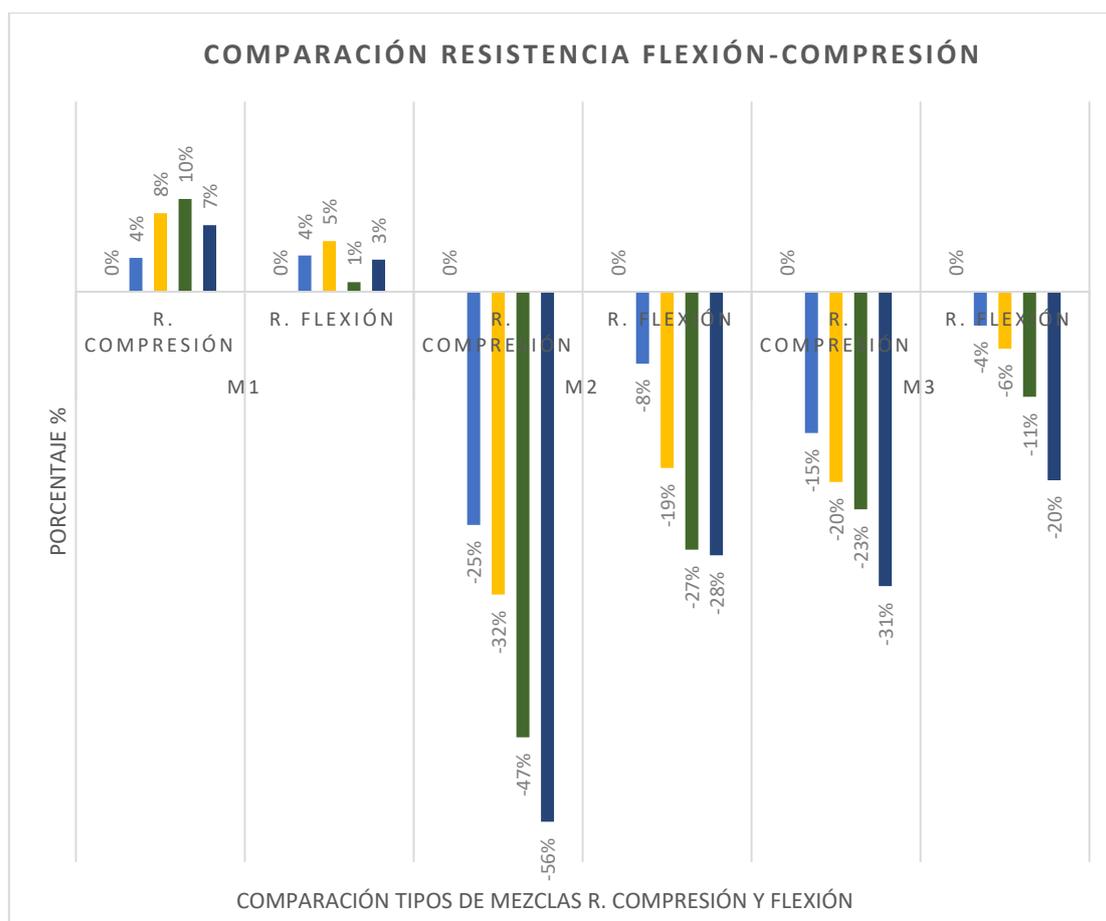


Figura 5. 26 Comparación de la resistencia a flexión y compresión de los distintos tipos de hormigón con las diferentes escorias en función de su porcentaje de pérdida o ganancia de las mismas.

En todas las investigaciones donde se establecen las leyes de comportamiento mecánico (modelos constitutivos) para materiales, éste se considera como un elemento volumétrico representativo suyo. Se supone que el material se comporta como un medio continuo, es decir, como un material que tiene las mismas propiedades elásticas en cada punto. El hecho de que las diferentes particularidades estructurales se hallen en un material a diferentes niveles de observación conduce a la idea que gran parte del comportamiento advertido en un nivel se explique en términos de la estructura del material (y los cambios en el mismo) en un nivel inferior.

### 5.5. CONCLUSIÓN FINAL DEL CAPÍTULO

En este capítulo, en el cual se desarrollan los ensayos de resistencia de las distintas mezclas elaboradas, se observa que la escoria que funciona de forma similar al cemento es la denominada M1, obteniéndose las mismas características e incluso mejores que para el hormigón sin sustitución.

Para las escorias M2 y M3 se comprueba que a compresión no funcionarían teniendo pérdidas de más de un 40% de resistencia a compresión. Por el contrario a flexión su comportamiento es parecido, perdiendo en el mayor de los porcentajes de sustitución un 10% de resistencia. Siendo factible buscar una solución para no depositar el residuo en un vertedero y poder reutilizarlo.

Tanto la resistencia a compresión como el módulo de elasticidad se ven reducido con el aumento de la relación de sustitución; sin embargo, los valores obtenidos para ambas propiedades siguen siendo aceptable, especialmente para niveles razonables de relación de sustitución en torno al 25%, siempre haciendo constar la dependencia de los factores de calidad de la escoria reemplazada.

Otro de los aspectos que se podría destacar es que entre el 23% de sustitución en todas las escorias estaría la optimización a flexotracción ya que la pérdida máxima de resistencia no llega al 10% con respecto al convencional.

## 5.6. BIBLIOGRAFÍA

1. Manuel Fernández Cánovas *Hormigón*; Garceta, Ed.; 10<sup>o</sup> Edició.; 2007; ISBN 9788415452508.
2. European Committee for Standardization EN 12390-3: 2001. Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens.
3. European Committee for Standardization EN 12390-4: 2009 Testing of hardened concrete. Part 4: Compressive strength Specification for testing machines.
4. Hormigones: Máquinas para ensayos a compresión, capacidad 6000 kN Prensa automática de 6000 kN de capacidad Available online: <https://www.mertind.com/bolivia/index.php/aplicacioneshidrologia/404/hormigones/máquinas-para-ensayos-a-compresión,-capacidad-6000-kn-prensa-automática-de-6000-kn-de-capacidad-detail> (accessed on Jul 1, 2018).
5. Xi, Y.; Bažant, Z. P.; Molina, L.; Jennings, H. M. Moisture diffusion in cementitious materials Moisture capacity and diffusivity. *Adv. Cem. Based Mater.* **1994**, *1*, 258–266, doi:10.1016/1065-7355(94)90034-5.
6. Saak, A. W.; Jennings, H. M.; Shah, S. P. A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow. *Cem. Concr. Res.* **2004**, *34*, 363–371, doi:10.1016/J.CEMCONRES.2003.08.005.
7. Hillerborg, A. Application of the fictitious crack model to different types of material. *Int. J. Fract.* **1990**, *51*, 95–102, doi:10.1007/978-94-011-3638-9\_7.
8. Evangelista, L.; de Brito, J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cem. Concr. Compos.* **2007**, *29*, 397–401, doi:10.1016/J.CEMCONCOMP.2006.12.004.
9. Kou, S. C.; Poon, C. S. Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *77*,

- 501–508, doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.12.035.
10. Etxeberria, M.; Vázquez, E.; Marí, A.; Barra, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cem. Concr. Res.* **2007**, *37*, 735–742, doi:10.1016/j.cemconres.2007.02.002.
  11. Faleschini, F.; Alejandro Fernández-Ruíz, M.; Zanini, M. A.; Brunelli, K.; Pellegrino, C.; Hernández-Montes, E. High performance concrete with electric arc furnace slag as aggregate: Mechanical and durability properties. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *101*, 113–121, doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.022.
  12. Topçu, İ. B.; Şengel, S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cem. Concr. Res.* **2004**, *34*, 1307–1312, doi:10.1016/J.CEMCONRES.2003.12.019.
  13. Tu, T.-Y.; Chen, Y.-Y.; Hwang, C.-L. Properties of HPC with recycled aggregates. *Cem. Concr. Res.* **2006**, *36*, 943–950, doi:10.1016/J.CEMCONRES.2005.11.022.
  14. Lye, C.-Q.; Dhir, R. K.; Ghataora, G. S. Elastic modulus of concrete made with recycled aggregates. *Proc. Inst. Civ. Eng. - Struct. Build.* **2016**, *169*, 314–339, doi:10.1680/jstbu.15.00077.
  15. European Committee for Standardization EN 12390-5:2009 Testing hardened concrete. Part 5: Flexural strength of test specimens.

# CAPÍTULO 6

## Durabilidad del hormigón y Lixiviado





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## Contenido

6.1. ENSAYOS DE PENETRACIÓN DE AGUA.....	<b>123</b>
6.1.1 Introducción.....	123
6.1.2 Proceso de elaboración .....	123
6.1.3 Resultados.....	124
6.1.4 Discusión de estos resultados y su relación con la absorción y porosidad .....	128
6.2. CARBONATACIÓN.....	<b>130</b>
6.2.1 Proceso de elaboración .....	130
6.3. COMPORTAMIENTO AMBIENTAL DEL HORMIGÓN CON ESCORIA. LIXIVIADO .....	<b>133</b>
6.3.1 Generalidades sobre la lixiviación .....	133
6.3.2 Detalles de la muestras .....	136
6.3.3 Resultados.....	136
6.4. BIBLIOGRAFIA .....	<b>140</b>

## Índice de Tablas

Tabla 6. 1 Tabla de los valores obtenidos en el ensayo de penetración de la escoria M1 ....	124
Tabla 6. 2 Tabla de los valores obtenidos en el ensayo de penetración de la escoria M2 ....	125
Tabla 6. 3 Tabla de los valores obtenidos en el ensayo de penetración de la escoria M3 ....	126
Tabla 6. 4 Relacionando los valores entre penetración media, porosidad y absorción .....	129
Tabla 6. 5 Resultados de los ensayos de lixiviado ofrecidos por el laboratorio con las desviaciones estándar para cada elemento .....	137
Tabla 6. 6 Valores de los ensayos de lixiviado en mg/l y mg/kg, comparando con los valores máximos admisibles de la norma UNE 14405. ....	139

## Índice de Figuras

Figura 6. 1 Penetración máxima y media del hormigón según EHE-08 .....	123
Figura 6. 2 Penetración máxima y media de las sustituciones con escoria M1.....	125
Figura 6. 3 Penetración máxima y media de las sustituciones con escoria M2.....	126
Figura 6. 4 Penetración máxima y media de las sustituciones con escoria M3.....	127
Figura 6.5 Comparación de la penetración media del hormigón sustituyendo un 30% de escorias con cada uno de los tipos.....	128
Figura 6. 6 Esquema de recinto para el ensayo de carbonatación .....	130
Figura 6. 7 Probetas M1 rociadas con fenolftaleína .....	131
Figura 6. 8 Probetas M2 rociadas con fenolftaleína .....	132
Figura 6. 9 Probetas M3 rociadas con fenolftaleína .....	132

**Figura 6. 10 Probetas de lixiviado a) Probeta antes de ser introducida en agua destilada b) Probetas en agua destilada. .... 137**  
**Figura 6. 11 Formula para el cálculo de la cantidad liberada de materia seca en volúmenes de lixiviados ..... 138**

## 6.1. ENSAYOS DE PENETRACIÓN DE AGUA

### 6.1.1 Introducción

El ensayo tiene como objetivo determinar la profundidad de penetración de agua bajo presión en la masa de hormigón endurecido. La impermeabilidad al agua del hormigón es una condición necesaria, pero no suficiente, para lograr un buen comportamiento frente a los agentes agresivos. Por tanto, es importante la medida de este parámetro para garantizar su durabilidad, siendo esta característica una protección de las armaduras frente a la corrosión.

Según la EHE-08, capítulo VI, artículo 37.3.3 [1], un hormigón se considera suficientemente impermeable al agua si los resultados del ensayo de penetración cumplen simultáneamente los valores de la siguiente tabla:

Clase de exposición ambiental	Especificación para la profundidad máxima	Especificación para la profundidad media
IIIa, IIIb, IV, Qa, E, H, F, Qb (en el caso de elementos en masa o armados)	50 mm	30 mm
IIIc, Qc Qb (solo en el caso de elementos pretensados)	30 mm	20 mm

Figura 6. 1 Penetración máxima y media del hormigón según EHE-08 [1]

### 6.1.2 Proceso de elaboración

Se realiza la medida en 2 probetas para cada tipo de hormigón y siempre fabricadas en la misma amasada.

Las probetas utilizadas en el ensayo tienen geometría cilíndrica de 15×30 cm. Estas han sido curadas en un baño de 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 pertinentes en la norma EN 12390-8 [3].

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, se colocan en el equipo de ensayo, de forma que no se aplique el agua a presión sobre la cara fratasada de las mismas. Estando en su posición correcta se aplica agua a una presión de  $500 \pm 50$  kPa durante un tiempo de  $72 \pm 2$  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 observa presencia de agua, por lo que los ensayos son 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.

Los resultados de los ensayos de penetración de agua bajo presión según norma UNE 12390-8 [3] son los siguientes, según cada una de las escorias:

### 6.1.3 Resultados

En el Capítulo 4 se han visto distintos apartados en los que la permeabilidad y la absorción en el hormigón son 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 que un fluido penetraría en dicha masa.

#### ➤ Escorias M1

En la Tabla 6. 1 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos realizados a las probetas cilíndricas de las escorias M1.

M1	Penetración máxima (mm)	Penetración media (mm)
M000	28,25	15,75
M123	23,5	13,75
M125	24,5	13
M130	23,75	11,75
M140	26,5	12,75

Tabla 6. 1 Tabla de los valores obtenidos en el ensayo de penetración de la escoria M1

Observamos en la Figura 6. 2 como este tipo de mezclas tienen una mayor resistencia a la penetración de agua que las mezclas sin sustitución. La línea de tendencia en función de la sustitución de escorias vemos que es descendiente (Figura 6.2). Por lo tanto, diremos que en nuestros ensayos, a medida que se sustituye mayor porcentaje de cemento por escoria tipo M1, estas mezclas ofrecen una mayor resistencia a la penetración de agua a presión.

Por ello, para este tipo de escorias, no sólo se cumpliría la norma sino que mejora la penetración respecto del hormigón convencional.

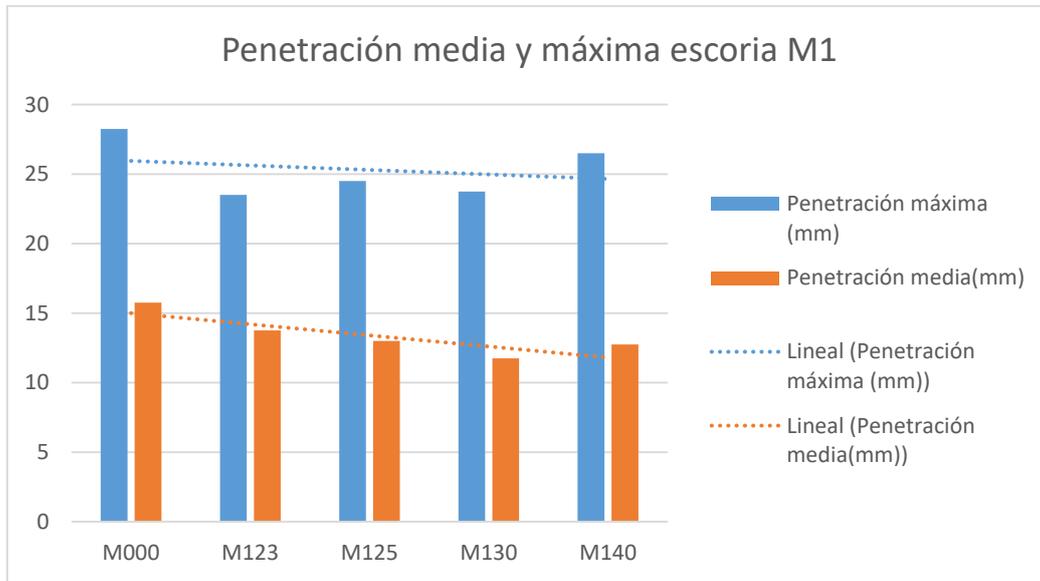


Figura 6. 2 Penetración máxima y media de las sustituciones con escoria M1

### ➤ Escorias M2

En la Tabla 6. 2 se muestran los valores obtenidos en los ensayos de penetración de agua de las mezclas con escorias M2.

M2	Penetración máxima (mm)	Penetración media (mm)
M000	28,2	15,75
M223	27,5	14,18
M225	25	15,27
M230	27,5	16,51
M240	38	26,98

Tabla 6. 2 Tabla de los valores obtenidos en el ensayo de penetración de la escoria M2

Con este tipo de escorias, al contrario que ocurre con las escorias M1, observamos que en la penetración de agua tanto la máxima como la media aumentan. Este aumento no nos debe sorprender, ya que en el Capítulo 4 vimos como las mezclas con este tipo de escorias eran las que tenían mayor porosidad. Por lo tanto, es normal que la penetración de agua también sea mayor. En la Figura 6. 3 vemos como, además, ocurre lo mismo que con la porosidad, que a medida que aumenta el porcentaje también aumenta la cantidad de agua que penetra.

En este caso, aunque la penetración de agua haya sido peor que en la del hormigón convencional, también estaría dentro de la normativa.

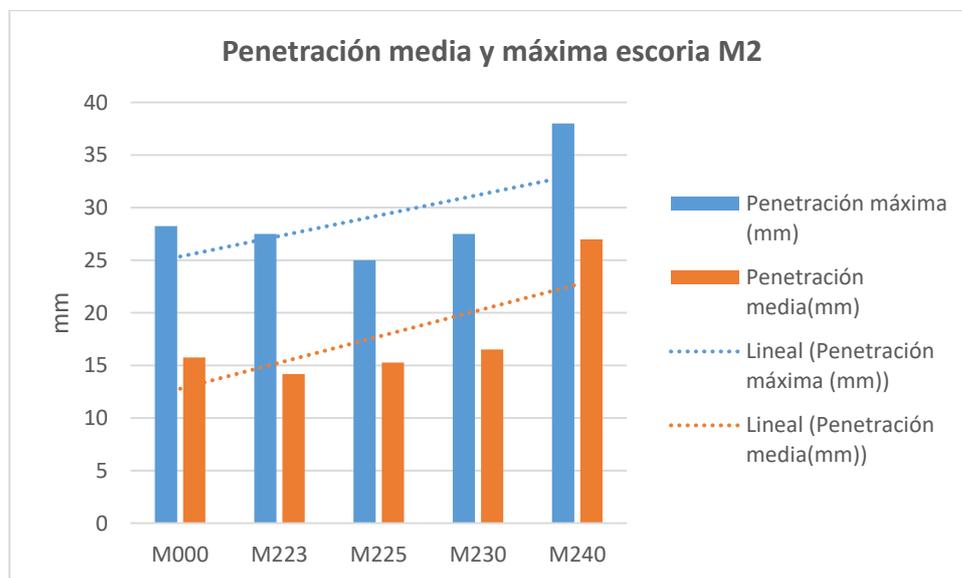


Figura 6. 3 Penetración máxima y media de las sustituciones con escoria M2

➤ **Escorias M3**

A continuación, en la Tabla 6. 3 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de penetración de agua realizados a las mezclas con escoria M3:

M3	Penetración máxima (mm)	Penetración media (mm)
<b>M000</b>	28,25	15,75
<b>M323</b>	90,5	48,64
<b>M325</b>	101,5	57,82
<b>M330</b>	162	156,8
<b>M340</b>	193,5	189,02

Tabla 6. 3 Tabla de los valores obtenidos en el ensayo de penetración de la escoria M3

Este es el caso más raro de todos, ya que para este tipo de escorias la penetración de agua es mucho mayor, ya no sólo que la mezcla convencional, sino también que las otras dos escorias. Lo peculiar es que estas escorias son las que menos porosidad abierta tenían, por lo que nos lleva a pensar que la penetración de agua es debida a una porosidad cerrada. Es decir, que los poros que se encuentran en la mezcla fuesen formados por gel (CHS) de tal forma que, al inyectar agua a presión, ha roto los enlaces y ha permitido el paso del agua.

En la Figura 6. 4, observamos como la línea de tendencia es ascendente, por lo tanto nos indica que a mayor cantidad de escoria mayor entrada de agua y esto puede ocurrir por ser el hormigón más seco de todos ya que, al tener menor consistencia, esto hizo que se generaran más cantidad de poros, los cuales no estaban unidos por enlaces lo suficientemente fuertes, con lo que al inyectar agua los ha roto o ha desplazado partículas que estaban unidos por ellos y ha dejado pasar el agua. En el punto 6.1.4 veremos una comparación de todas las escorias y la porosidad, absorción y penetración de agua.

Para este tipo de mezclas, al tener una penetración de agua tan alta, no sería admisible por la norma. Por lo tanto no podría armarse, ya que la armadura se vería afectada.

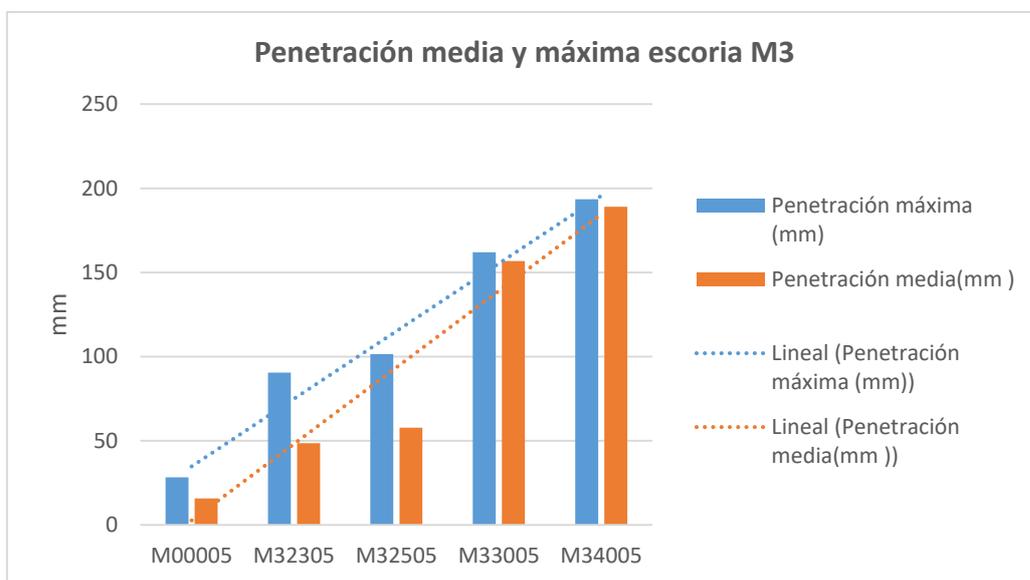


Figura 6. 4 Penetración máxima y media de las sustituciones con escoria M3

#### ❖ Comparación de la penetración media de todas las escorias con una sustitución del cemento del 30%

En la Figura 6. 5 observamos como el hormigón fabricado con escoria M3 tiene una penetración al agua mucho mayor que las otras dos, por lo que no sería factible utilizarla para el armado.

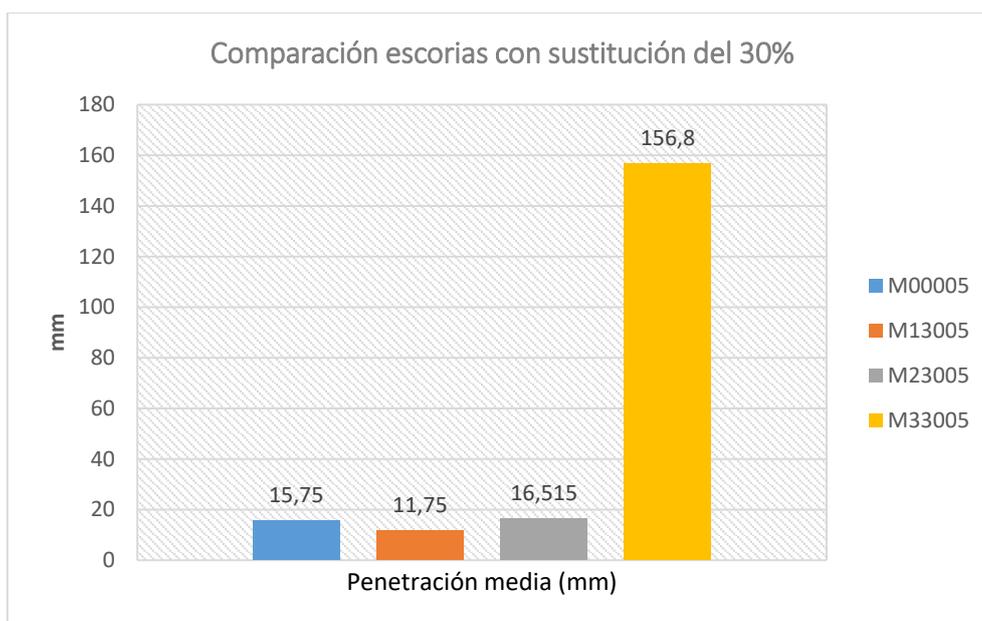


Figura 6.5 Comparación de la penetración media del hormigón sustituyendo un 30% de escorias con cada uno de los tipos.

- \* Se compara solamente un porcentaje ya que se observan en todas la misma diferencia entre las escorias.

#### 6.1.4 Discusión de estos resultados y su relación con la absorción y porosidad

En las siguientes tablas (Tabla 6. 4) se establecen la correspondencia entre los factores que proporcionan la durabilidad del hormigón en función de su afectación por el agua en ambientes agresivos.

M1	Penetración media (mm)	Porosidad %	Absorción %
M000	15,75	1.81	0.73
M123	13,75	1.64	0.66
M125	13	1.42	0.57
M130	11,75	1.51	0.61
M140	12,75	1.27	0.51

(a)

M2	Penetración media (mm)	Porosidad %	Absorción %
M000	15,75	1,81	0,73
M223	14,185	2,95	1,20
M225	15,27	3,65	1,50
M230	16,515	3,12	1,27
M240	26,98	6,1	2,58

(b)

M3	Penetración media (mm)	Porosidad %	Absorción %
M000	15,75	1,81	0,73
M323	48,64	1,03	0,41
M325	57,82	1,04	0,41
M330	156,8	0,91	0,36
M340	189,02	0,78	0,31

(c)

Tabla 6. 4 Relacionando los valores entre penetración media, porosidad y absorción

La Tabla 6. 4 (a), muestra los valores entre el hormigón convencional y el hormigón adicionado con la escoria M1. Mantiene las mismas proporciones de descenso en los factores analizados, suponiendo por tanto que su comportamiento mejora su durabilidad, menor sortividad y absorción de agua, factor que se encuentra relacionado con la conductividad hidráulica saturada y su sorción y retención capilar. La absorción de agua capilar de todo el hormigón confeccionado con la escoria M1 no fue superior al no adicionarlo.

En la Tabla 6. 4 (b), el incremento de las medidas entre porosidad, absorción y penetrabilidad son proporcionales. Debido a la relación agua-cemento equiparable en todo el proceso y en las probetas de hormigón, el aumento de la cantidad de agua (en peso) en las muestras, a las 48 horas es notable con respecto al peso seco de las mismas.

El comportamiento de todos estos tipos de hormigón podría considerarse inadecuado en cuanto su durabilidad, y cabría un estudio en el que su relación agua/cemento contemple la reducción de cemento y su aplicación directa en la reducción de agua para que este parámetro de especial importancia en la que la dosificación permanezca estable en los porcentajes adicionados de escoria.

En la Tabla 6. 4 (c) la disparidad entre una fuerte penetración media conforme aumenta la sustitución de la escoria M3 frente a unos parámetros equiparables en cuanto a su absorción y porosidad, nos lleva a pensar en los comentarios realizados en el apartado 4.2 del Capítulo 4, donde ya se pone de manifiesto que cuando el hormigón fragua se forma una estructura de poros que definirá el comportamiento del mismo con la agresividad del medio. Dicha porosidad es muy importante, no solo por el tamaño y distribución de los poros, sino por la conexión que existe entre ellos, como ya hemos comentado anteriormente, y de este modo, tener la característica de no permitir el paso al agua y así llegar hasta la armadura.

## 6.2. CARBONATACIÓN

Se define como carbonatación a la reacción de los componentes alcalinos del material con el dióxido de carbono atmosférico. Esto conlleva a una disminución del pH y a la disminución de la protección del hormigón a la armadura por agentes externos.

### 6.2.1 Proceso de elaboración

Para realizar los ensayos de carbonatación se somete a probetas de hormigón de todos los porcentajes de sustitución a un proceso de envejecimiento en ambiente natural según la norma UNE 83993-1 [4], durabilidad del hormigón. Esto consiste en sacar las probetas del lugar de curado y tenerlas al aire en el ambiente del laboratorio durante una semana. Una vez pasado este tiempo, se tendrán durante tres meses en un recinto expuesto al ambiente natural y protegido de la acción directa de la lluvia (Figura 6. 6).

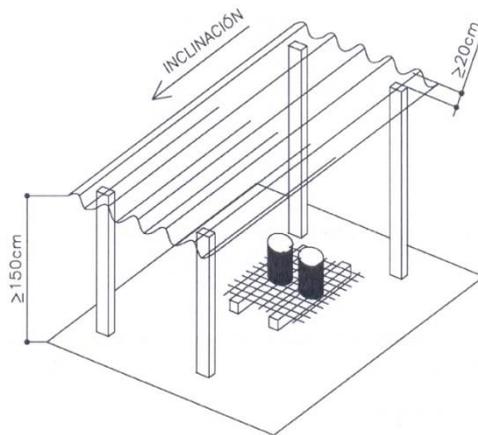


Figura 6. 6 Esquema de recinto para el ensayo de carbonatación [4].

Una vez cumplida la edad de la exposición, se retiran las probetas y se parten por su generatriz utilizando el ensayo de tracción indirecta o método brasileño, según normativa EN 12390-6 [5], y a partir de ahí se estudia la capa carbonatada, para la cual nos basamos en la norma UNE 112011 [6], corrosión de armaduras determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicios. Para ello se utiliza una disolución de fenolftaleína al 1% disuelta en alcohol etílico al 70%. La fenolftaleína toma un 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.

La aplicación de fenolftaleína se realiza mediante un pulverizador para extender homogéneamente la solución y en una capa fina.

Las siguientes imágenes son el resultado de la carbonatación para cada una de las probetas con las distintas escorias.

### 6.2.2 Resultados

A continuación se muestran las fotografías realizadas a los ensayos de carbonatación a cada una de las probetas, en las que se aprecia fácilmente los resultados obtenidos.

#### ➤ Escorias M1



Figura 6. 7 Probetas M1 rociadas con fenolftaleína

La Figura 6. 7 muestra que para las escorias M1 no existe carbonatación alguna, incluso llegando al punto de que en las sustituciones al 40% las probetas alcanzan un tono púrpura intenso, de lo que se deduce que las probetas tienen un pH mayor de 9,5, siendo la mezcla mucho más básica. Esto es interesante a la hora de la durabilidad ya que, al contener un pH alto, evita la existencia de oxígeno en la probeta haciendo más difícil la oxidación de las armaduras.

➤ Escorias M2

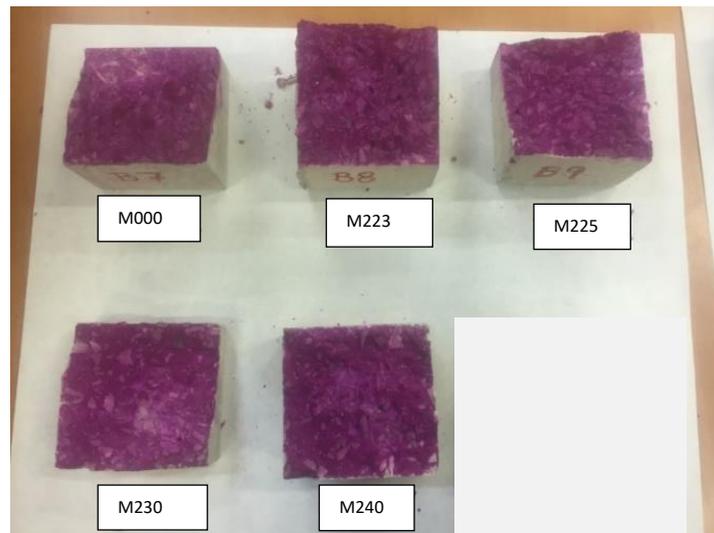


Figura 6. 8 Probetas M2 rociadas con fenolftaleína

En la Figura 6. 8 tenemos las probetas con escorias M2, las cuales tampoco carbonatan, pero en comparación con las M1 no tienen ese color púrpura intenso, estando el pH entre 8 y 9,5. Siendo este tipo de escorias válidas para el armado de las estructuras sin que penetre oxígeno que deteriore la armadura.

➤ Escorias M3

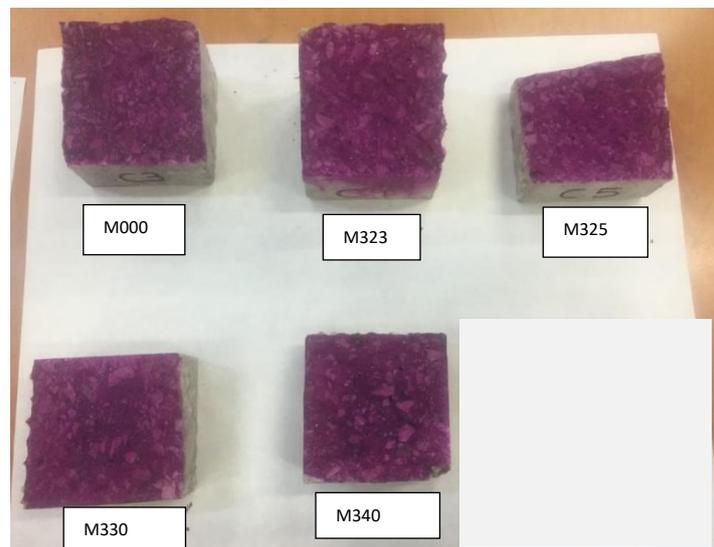


Figura 6. 9 Probetas M3 rociadas con fenolftaleína

Por último, las probetas con escoria M3 (Figura 6. 9), que al igual que las anteriores no carbonatan, tienen colores purpuras en toda su superficie como las escorias M2, pero menos intenso que M1, por lo que este tipo de hormigón no se vería afectado por la carbonatación.

### 6.3. COMPORTAMIENTO AMBIENTAL DEL HORMIGÓN CON ESCORIA. LIXIVIADO

La posibilidad de utilización de un residuo se evalúa, no solamente desde el punto de vista de las características técnicas necesarias para la aplicación que se plantea, sino desde la perspectiva del posible impacto ambiental que pueda causar.

Cuando los materiales sólidos entran en contacto con un líquido, algunos de sus componentes pueden disolverse en menor o mayor extensión, siendo de interés el grado de disolución para cada constituyente individual. La lixiviación de los materiales puede ocurrir en el lugar en que está aplicado, por infiltración natural de aguas, por lluvias, exposición a agua de mar, etc.

En este apartado veremos los principios generales de la lixiviación, los ensayos realizados a las probetas y los resultados obtenidos de los mismos.

#### 6.3.1 Generalidades sobre la lixiviación

Existe un gran número de factores que influyen en la relación en que los constituyentes de un material son disueltos del material matriz. Según el profesor Van der Sloot [7], estos factores pueden ser divididos en físicos y químicos.

- Los factores físicos que influyen en la lixiviación son:
  - Tamaño de partícula, que está, en parte, relacionada con la superficie expuesta a lixiviación.
  - Homogeneidad o heterogeneidad de la matriz sólida en términos de fases minerales.
  - Tiempo de exposición.
  - Flujo del lixivante.
  - Temperatura.
  - Porosidad de la matriz.
  - Forma geométrica y tamaño del material, cuando la lixiviación es controlada predominantemente por difusión.
  - Permeabilidad de la matriz.
  - Condiciones hidrogeológicas.
  
- Los factores químicos que influyen en la lixiviación contienen:
  - Equilibrio o control de la velocidad de salida del elemento.
  - Potencial de lixiviación de los constituyentes.
  - El pH, del material o impuesto por el ambiente.
  - Condiciones redox, del material o impuesto por el ambiente.
  - Procesos de adsorción.
  - Factores biológicos capaces de afectar al pH o al redox.

Diversas normativas proponen ensayos de lixiviación para clasificar el residuo o la matriz que contiene el residuo, en cuanto a la peligrosidad ambiental. A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de lixiviación, se desarrolla la investigación de las posibilidades de utilización del mismo. Así, cuando el residuo presenta contenidos elevados de iones en la extracción de una sustancia absorbida desde el lecho poroso, la investigación se debe centrar en estabilizar o solidificar el residuo, que son procesos que pueden ser descritos como tecnologías que consisten en inmovilizar, aislar o confinar un contaminante, generalmente inorgánico, en una matriz rígida y compacta.

Por el contrario, cuando el residuo no presenta un alto contenido de iones de lixiviado de la muestra, el estudio se puede dirigir directamente al desarrollo del producto mercantil.

Actualmente existen varias legislaciones en la normativa europea en las que se encuentran IV.39/9.34 2000/532/CE, y por la que se establece una lista de residuos peligrosos.

Según la normativa española, se consideran peligrosos aquellos que aparecen en el anexo 2 del Real Decreto 952/1997, de 20 de junio, donde aparece el listado de residuos peligrosos aprobado por la Decisión 94/904/CE, del Consejo, de 22 de diciembre, de acuerdo con el apartado 4 del artículo 1 de la Directiva 91/689/CEE.

Una de las opciones para reducir la solubilidad de los metales pesados presentes en las escorias es la realización de algún tipo de tratamiento antes de depositarlo en vertederos o de su reutilización.

Estos tratamientos se pueden clasificar en (DIN 38414) [8]:

- Estabilización: Tratamiento del residuo con agentes químicos para reducir la movilidad de los componentes, tales como, cal o fosfórico. La cal actúa manteniendo el pH del posible “extractante” (agua de lluvia) dentro de un rango donde la solubilidad del plomo y del cadmio son mínimas. La ventaja que presenta es la capacidad de formar precipitados insolubles con muchos metales multivalentes. La adición de ácido fosfórico da lugar a la precipitación del plomo en forma de fosfato.
- Solidificación. Consiste en confinar en una matriz de baja permeabilidad. En este caso se pretenden mejorar las propiedades mecánicas y disminuir la superficie de contacto de los residuos con el posible agente “lixiviante”. Este proceso no implica una interacción química, sino una unión de tipo mecánico a la matriz.
- Vitrificación: Tratamiento a elevada temperatura que tiene por objeto fundir las cenizas y generar vidrio. Las temperaturas que se deben alcanzar son de unos 1.500°C, lo que hace que sea un tratamiento muy caro.

- Extracción química. Tratamiento que consiste en lavar los metales contenidos en las cenizas con diferentes extractos líquidos.

Los tratamientos generalmente utilizados son de estabilización/solidificación, que combinan la interacción química y mejoran las propiedades del residuo. Los objetivos de estos procesos son mejorar las propiedades físicas del material, aumentar el tamaño de las partículas para reducir la interacción con el agua, obtener sólidos sin agua libre, mejorar las características de manejo y reducir la movilidad de contaminantes.

Este tipo de tratamientos está enfocado a la inmovilización de metales, ya que las moléculas orgánicas no se incorporan fácilmente a estructuras cristalinas y es más difícil que formen precipitados insolubles. Los procesos de estabilización y solidificación son muy utilizados en la gestión de residuos peligrosos.

Los diferentes sistemas de estabilización/solidificación se pueden clasificar en orgánicos e inorgánicos, según los reactivos utilizados en el proceso. Los más utilizados son los inorgánicos basados en la utilización de cemento, como son silicatos, arcilla, cal, etc.

Cuando se ha tratado el residuo se debe evaluar la eficiencia del proceso de inertización, analizando el residuo sin tratar y tratado mediante análisis químicos, o los llamados “test de lixiviado”, que consisten en poner en contacto la muestra con un agente “lixivante” durante un determinado periodo de tiempo. De esta forma se puede comparar el contenido total del residuo con el de la matriz “inertizada” y lo que realmente se libera en contacto con el agente “extractante”.

El test de lixiviación se utiliza para simular situaciones de campo y, aunque los resultados obtenidos no sean extrapolables directamente, si permiten identificar los elementos “lixiviables”, verificar la eficiencia de un determinado tratamiento y estimar el posible impacto del residuo a depositar.

En base a estos datos, nos centraremos en el estudio del residuo en hormigones, para asegurar la estabilización de los metales pesados en la matriz de cemento e identificar la migración de los elementos a largo plazo. Nos referiremos a la norma EN 12920:2007 [9]. Se han aplicado los diferentes procesos y pasos a seguir según esta normativa.

Esta norma proporciona una metodología para determinar el comportamiento de lixiviación de un residuo bajo condiciones específicas, es decir, en un escenario de solidificación/estabilización dentro de un marco de tiempo específico, en nuestro caso correspondiente a 100 años. Se efectuará una selección de ensayos dependiendo del problema y el escenario a evaluar.

Se ha realizado un análisis de lixiviado en la sustitución de escoria por cemento al 30% de las 3 escorias y se ha hecho una adicional con las escorias M1 sustituyendo el 40% de las mismas, ya que proporcionan al material similares características. Por lo tanto se ha querido hacer este último ensayo adicional con su mayor porcentaje estudiado.

Este ensayo se ha llevado a cabo en el laboratorio de los Servicios Centrales de Investigación Científica y Tecnológica de la Universidad de Cádiz, en la división de Espectroscopia.

EL instrumental utilizado ha sido Espectrómetro ICP-MS modelo X serie 2 de Thermo Elemental.

### **6.3.2 Detalles de la muestras**

Se rompen las probetas para introducirlas en 1 litro de agua destilada en las condiciones más desfavorables. Estuvieron sumergidas durante 48 h y se mandaron a analizar a la Universidad de Cádiz, al laboratorio de División de Espectroscopía, en tarros esterilizados (Figura 6. 10). El tratamiento que se le realizó a la muestra de agua en el laboratorio fue filtrar la muestra con 0.45  $\mu\text{m}$  y acidificarlas a  $\text{pH} < 2$  con ácido nítrico ultrapuro. Una vez realizado este proceso se introdujo en el espectómetro.

### **6.3.3 Resultados**

Los valores de la Tabla 6. 5 son el resultado expresado como el valor medio de 3 medidas instrumentales  $\pm$  desviación estándar.

ELEMENTOS	M00005	M13005	M14005	M23005	M33005
[Na] mg/l	11,6 ± 0,4	18,1 ± 0,2	9,30 ± 0,20	3,60 ± 0,02	7,90 ± 0,10
[K] mg/l	47,8 ± 1,7	63,0 ± 1	31,2 ± 0,6	21,0 ± 0,1	32,0 ± 0,4
[Ca] mg/l	185 ± 6	118 ± 1	74,1 ± 1,3	116 ± 1	96,0 ± 0,6
[Mg] µg/l	20,2 ± 1,0	21,3 ± 0,2	28,1 ± 1,0	26,0 ± 1,2	31,3 ± 1,0
[Al] µg/l	170 ± 5	271 ± 9	472 ± 5	172 ± 2	210 ± 3
[Si] µg/l	8,60 ± 0,33	13,1 ± 1,0	13,3 ± 1	9,30 ± 0,40	7,90 ± 0,73
[Ti] µg/l	< 0,100	< 0,100	< 0,100	< 0,100	< 0,100
[Cr] µg/l	15,6 ± 0,6	1,10 ± 0,05	0,394 ± 0,013	0,673 ± 0,040	0,162 ± 0,23
[Mn] µg/l	0,100 ± 0,010	0,180 ± 0,010	0,190 ± 0,04	0,150 ± 0,020	0,101 ± 0,01
[Fe] µg/l	18,2 ± 0,7	17,0 ± 0,2	10,6 ± 0,03	1,82 ± 0,03	8,23 ± 0,20
[Ni] µg/l	0,270 ± 0,030	0,510 ± 0,020	0,280 ± 0,012	0,150 ± 0,013	0,270 ± 0,021
[Cu] µg/l	1,92 ± 0,10	4,3 ± 0,6	8,80 ± 0,033	1,50 ± 0,03	4,00 ± 0,04
[Zn] µg/l	6,60 ± 0,20	6,10 ± 0,12	3,90 ± 0,20	2,92 ± 0,10	4,40 ± 0,14
[As] µg/l	< 0,200	< 0,200	< 0,200	< 0,200	< 0,200
[Cd] µg/l	< 0,100	< 0,100	< 0,100	< 0,100	< 0,100
[Sn] µg/l	< 0,100	< 0,100	< 0,100	< 0,100	< 0,100
[Pb] µg/l	0,543 ± 0,022	2,02 ± 0,02	0,230 ± 0,010	0,190 ± 0,001	0,333 ± 0,002

Tabla 6. 5 Resultados de los ensayos de lixiviado ofrecidos por el laboratorio con las desviaciones estándar para cada elemento

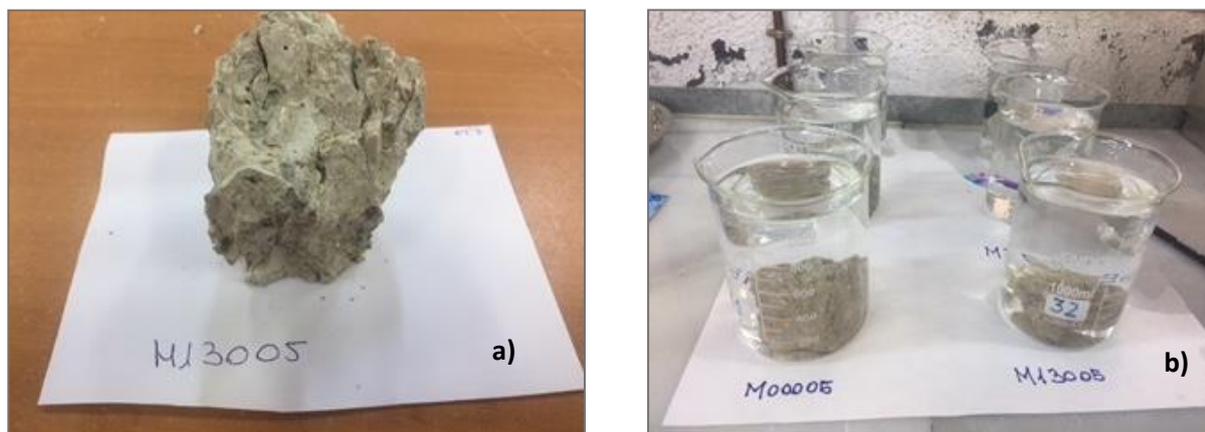


Figura 6. 10 Probetas de lixiviado a) Probeta antes de ser introducida en agua destilada b) Probetas en agua destilada.

Interpretación de los resultados:

En la Tabla 6. 5 se muestran los resultados obtenidos por el laboratorio, en el cual comparando estos con el hormigón convencional, observamos que la cantidad de elementos químicos estudiados se mantienen semejantes a excepción de dos de ellos,

como son el Cromo que se reduce en la sustitución al 40% con la escoria M1 casi en su totalidad no llegando ni a 1 micra por litro de agua. En el caso contrario tenemos el Aluminio, que aumenta la cantidad casi por tres en el caso de la sustitución al 40% de la escoria M1, por lo tanto con este metal se verá mediante normativa si los valores de aluminio que lixivia están permitidos.

Para ello se ha elaborado la Tabla 6. 6, en la cual encontramos los valores de la Tabla 6. 5 obteniendo la cantidad de materia seca, pasando los mg/l a mg/kg, añadiendo una columna más con los valores máximos exigidos por la Disposición General 4291 en la que se modifican los anexos I, II, III, del Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, de los residuos admisibles sin realización previa de pruebas en vertederos para residuos inertes [10].

La fórmula utilizada para el cambio es la siguiente (Figura 6. 11):

$$U_i = \frac{(V_i \times c_i)}{(m_0)}$$

**Figura 6. 11 Fórmula para el cálculo de la cantidad liberada de materia seca en volúmenes de lixiviados (Normativa EN 14405)[11].**

Donde:

U: es la cantidad liberada de un componente por cantidad de muestra para análisis en la fracción de eluido, en mg/kg de materia seca;

V: Volumen de la fracción de eluido, en litros.

C: Concentración de componente en cuestión en la fracción de eluido, en mg/l.

M: es la masa seca de la proporción del ensayo en la columna en kg.

ELEMENTOS	M00005 (mg/l)	M00005 (mg/kg)	M13005 (mg/l)	M13005 (mg/kg)	M14005 (mg/l)	M14005 (mg/kg)	M23005 (mg/l)	M23005 (mg/kg)	M33005 (mg/l)	M33005 (mg/kg)	Valores máximos permitidos DG 4291 (mg/kg)
Peso de la muestra (kg)	0,3476		0,2766		0,1762		0,1698		0,2465		
[Na] mg/l	11,6	33,3716916	18,1	65,4374548	9,3	52,7809308	3,6	21,2014134	7,9	32,0486815	-
[K] mg/l	47,8	137,514384	63	227,765727	31,2	177,07151	21	123,674912	32	129,817444	-
[Ca] mg/l	185	532,220944	118	426,608821	74,1	420,544835	116	683,156655	96	389,452333	-
[Mg] µg/l	0,0202	0,05811277	0,0213	0,07700651	0,0281	0,15947787	0,026	0,15312132	0,0313	0,12697769	-
[Al] µg/l	0,17	0,48906789	0,271	0,97975416	0,472	2,67877412	0,172	1,01295642	0,21	0,85192698	-
[Si] µg/l	0,0086	0,02474108	0,0131	0,04736081	0,0133	0,07548241	0,0093	0,05477032	0,0079	0,03204868	-
[Ti] µg/l	< 0,0001	-	< 0,0001	-	< 0,0001	-	< 0,0001	-	< 0,0001	-	-
[Cr] mg/l	0,015	0,04315305	0,011	0,03976862	0,000394	0,0022361	0,000673	0,00396349	0,000162	0,0006572	0,5
[Mn] mg/l	0,0001	0,00028769	0,00018	0,00065076	0,00019	0,00107832	0,00015	0,00088339	0,000101	0,00040974	-
[Fe] mg/l	0,0182	0,05235903	0,017	0,06146059	0,0106	0,06015891	0,00182	0,01071849	0,00823	0,03338742	-
[Ni] µg/l	0,00027	0,00077675	0,00051	0,00184382	0,00028	0,0015891	0,00015	0,00088339	0,00027	0,00109533	0,4
[Cu] µg/l	0,00192	0,00552359	0,0043	0,01554591	0,0088	0,04994325	0,0015	0,00883392	0,004	0,01622718	2
[Zn] µg/l	0,0066	0,01898734	0,0061	0,02205351	0,0039	0,02213394	0,00292	0,0171967	0,0044	0,0178499	4
[As] µg/l	< 0,0002	-	< 0,0002	-	< 0,0002	-	< 0,0002	-	< 0,0002	-	2
[Cd] µg/l	< 0,0001	-	< 0,0001	-	< 0,0001	-	< 0,0001	-	< 0,0001	-	1
[Sn] µg/l	< 0,0001	-	< 0,0001	-	< 0,0001	-	< 0,0001	-	< 0,0001	-	-
[Pb] µg/l	0,000543	0,00156214	0,00202	0,00730296	0,00023	0,00130533	0,00019	0,00111896	0,000333	0,00135091	0,5

Tabla 6. 6 Valores de los ensayos de lixiviado en mg/l y mg/kg, comparando con los valores máximos admisibles de la norma UNE 14405.

Comprobamos en la Tabla 6. 6, que el Aluminio no tiene restricciones en el medio, por lo tanto aunque sea un valor que aumenta, no nos impide que nuestro hormigón se ponga en servicio.

Se observa que el cromo total disminuye con respecto al hormigón convencional, lo que se interpreta como que en el encapsulamiento de la escoria se diluye en la matriz cementosa absorbiendo este metal, sin generar peligro ambiental alguno en su puesta en obra.

Como conclusión, diremos que el encapsular las escorias en el hormigón es una forma fácil de deshacerse de un residuo y valorizarlo en un subproducto, ya que ambientalmente por sí solo contamina más que depositándolo en vertedero.

#### **6.4. CONCLUSIÓN FINAL**

Como conclusión final, es claro que al igual que en los capítulos anteriores las escorias M1, escorias de alto horno, son las que mejor se comportan tanto en los ensayos de durabilidad del hormigón como en los de lixiviados, a excepción del Aluminio que como hemos visto no influiría a la hora de ponerlo en servicio, ya que la norma no tiene restricciones acerca del este elemento.

Las otras dos escorias en estos ensayos hemos visto como la M2, cumple los ensayos de durabilidad y lixiviado. Mientras que la escoria M3, en la penetración de agua sus resultados han sido muy negativos en este estudio, por lo que habrá que ver en estudios posteriores si con una consistencia menor, esta propiedad mejora.

#### **6.5. BIBLIOGRAFÍA**

1. Gobierno de España. Ministerio de Fomento *Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 serie normativas*; 2011;
2. European Committee for Standardization EN 12390-8:2009 Testing hardened concrete. Part 8: Depth of penetration of water under pressure.
3. Asociación Española de Normalización Y Certificación (AENOR) UNE 83993-1:2013. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la velocidad de penetración y carbonatación en el hormigón endurecido. Parte 1: Método natural.
4. European Committee for Standardization EN 12390-6: 2009 Testing hardened concrete. Part 6: Tensile splitting strength of test.
5. Asociación Española de Normalización Y Certificación (AENOR) UNE 112011: 2011. Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de

- carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio. 2011, 9–11.
6. Van der Sloot, H. A.; Heasman, L.; Quevauviller, P. Chapter 2: General principles for the leaching and extraction of materials. *Stud. Environ. Sci.* **1997**, *70*, 13–39, doi:10.1016/S0166-1116(97)80111-2.
  7. Din 38414-17 German standards methods for the examination of water , waste water and sludge - group S (sludge and sediment) ; determiation of leachability (S4). *Institut für Normung, Berlin* **2004**, 1–10.
  8. Asociación Española de Normalización Y Certificación (AENOR) EN-12920:2007 Metodología para la determinación del comportamiento en la lixiviación de residuos en condiciones específicas. **2007**.
  9. Ministerio de Medio Ambiente “Real Decreto 1481 / 2001 , de 27 de diciembre , por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.” *Boe* **2013**, *25*, 1–46.
  10. European Comittee for Standardization EN 14405: 2017 Characterization of waste - Leaching behaviour tests - Up-flow percolation test (under specified conditions) 2017, 25.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



# CAPÍTULO 7

**Aplicación práctica de la nueva matriz  
cementante**



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## Contenido

<b>7.1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>147</b>
<b>7.2 PRUEBAS</b> .....	<b>149</b>
7.2.1. Resultados de las pruebas .....	150
<b>7.3 CONCLUSIÓN</b> .....	<b>155</b>
<b>7.4 BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>155</b>

Figura 7. 1 a) Moldes para la elaboración de las dovelas b) Dovelas fabricadas con escorias M1 al 30% de sustitución de cemento, por la empresa Drace Infraestructuras en su fábrica de Sagunto (Valencia).....	147
Figura 7. 2 Traviesas fabricadas con escorias M1 al 30% de sustitución de cemento, por la empresa Drace Infraestructuras en su fábrica de Sagunto (Valencia) .....	147
Figura 7. 3 Pruebas de rotura de la empresa Drace Infraestructuras en su fábrica de Sagunto .....	148
Figura 7. 4 Fabricación de traviesas de hormigón .....	150
Figura 7. 5 Resultados de las probetas de hormigón sin sustitución de escoria .....	151
Figura 7. 6 Resultados de las probetas de hormigón con un 30% de sustitución de escoria. ....	151
Figura 7. 7 Resultados de las probetas de hormigón con un 50% de sustitución de escoria. ....	152
Figura 7. 8 Comparación de las roturas a compresión de las probetas .....	152
Figura 7. 9 Comparación rotura a flexotracción de las probetas .....	153
Figura 7. 10 Ensayos estáticos realizados a las traviesas. 1 Sección central; 2 Sección bajo carril (fisura); 3 sección bajo carril (rotura) .....	153
Figura 7. 11 Ensayos estáticos realizados a las traviesas en la fábrica de Sagunto. ....	154
Figura 7. 12 Probetas de hormigón realizadas en la fábrica de Sagunto.....	154
Figura 7. 13 Dovelas de hormigón fabricadas en Sagunto. ....	155



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## 7.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo veremos los elementos prefabricados realizados por la empresa Drace Infraestructuras para el proyecto conjunto que se llevó a cabo en los años 2017-2018 y por el cual esta tesis ha sido posible. El objetivo principal del proyecto era evaluar la posibilidad de aprovechamiento y desarrollo de elementos prefabricados a partir de estudios realizados a nivel de laboratorio.

Todas estas pruebas se realizaron en la fábrica de traviesas de Drace Infraestructuras en Sagunto. Las pruebas se han realizado con una sola escoria, la de alto horno, escoria M1 en nuestro estudio, ya que una vez sometidas a pruebas de laboratorio eran las que mejor funcionaban.

Se realizaron elementos prefabricados tales como dovelas y traviesas (Figura 7. 1 y 7. 2), y sólo se hicieron dos sustituciones, que fueron al 30% y al 50% (esta sustitución es mayor que la que se encuentra en la tesis, pero la empresa quiso ir a un porcentaje de sustitución mayor que el del 40%).



Figura 7. 1 a) Moldes para la elaboración de las dovelas b) Dovelas fabricadas con escorias M1 al 30% de sustitución de cemento, por la empresa Drace Infraestructuras en su fábrica de Sagunto (Valencia)



Figura 7. 2 Traviesas fabricadas con escorias M1 al 30% de sustitución de cemento, por la empresa Drace Infraestructuras en su fábrica de Sagunto (Valencia)



Figura 7. 3 Pruebas de rotura de la empresa Drace Infraestructuras en su fábrica de Sagunto

Los materiales que se usaron en la fábrica para la realización del trabajo fueron los siguientes:

- **Cemento:** Portland CEM I 52,5 R (ba),  $\%Na_2O_{EQUIVALENTE} = \%Na_2O + 0,658\%K_2O < 0,60$
- Se utiliza este tipo de cemento ya que al carecer de cualquier tipo de adición no enmascara el resultado, tomando así ese patrón como referencia, y es el utilizado en fábrica para la producción de traviesas para ferrocarril.
- **Áridos:** Se han utilizado áridos de naturaleza caliza, obtenidos mediante machaqueo. La relación de diámetros de los mismos es: arena 0/2 sílicea, arena 0/4 caliza de machaqueo, grava 4/10 y 10/18 caliza-dolomítica.
- **Agua:** Procedente de red.
- **Aditivo:** Viscocrete 20 HE. Aditivo para hormigón UNE EN 934-2
- El tipo de escoria utilizada para la realización de los ensayos ha sido escoria M1 de acero al carbono, secada y molida.

## 7.2 PRUEBAS

La factoría realiza las pruebas según la especificación para traviesas ET 03.360.571.8 5ª Edición: diciembre 2014 – erratum (julio 2015) de Adif “Traviesas monobloques de hormigón pretensado” [1]. Se dividen en dos partes:

- Se le realizan pruebas en el laboratorio de la fábrica de compresión, tracción indirecta y flexotracción al hormigón en masa, utilizando moldes de 15x15x15 cm.
  - Una segunda fase de ensayos, donde ya se realizan ensayos de la flexión estática de la Sección Central y flexión estática de la Sección Bajo Carril completo hasta llegar a rotura.
- \* A las dovelas no se le ha realizado ningún ensayo ya que, al ser la normativa antes comentada tan restrictiva a la hora de ejecutar las traviesas, se han dado por buenos los ensayos realizados en el primer punto de la normativa. Es decir, se han tomado los mismos valores de las probetas rotas a flexión y a compresión. Por otra parte, sólo se han sometido a una observación visual.

Como hemos comentado anteriormente se han realizado dos tipos de sustituciones:

- Dosificación tipo en la que se utiliza un 70% de Cemento y un 30% de Escoria.
- Dosificación tipo en la que se utiliza un 50% de Cemento y un 50% de Escoria.

Para estas pruebas se realizan amasadas entre 24 y 30 litros de hormigón y se fabrican probetas para romper a compresión y a flexotracción (Figura 7. 4).



DOSIFICACIÓN 50%



DOSIFICACIÓN 30%



Figura 7. 4 Fabricación de traviesas de hormigón

Algunas de las observaciones que se tuvieron en cuenta cuando se realizaron las pruebas fueron:

- El material fluidifica más cuando se le adiciona escoria por encima del hormigón convencional.
- Aunque parecía sangrado, no se ve agua superficial.
- Actúa bien con la vibración, no segregando.
- Es un material muy cohesivo, difícil de coger con la pala.

### 7.2.1. Resultados de las pruebas

A continuación se muestran las tablas facilitadas por la empresa Drace Infraestructuras de los resultados de las pruebas a las que han sido sometidas las distintas piezas:

<b>DOSIFICACION HABITUAL TRAVIESAS</b>		CEMENTO	380 kg	
		ESCORIA	0 kg	
<b>HORMIGON</b>		litros		
Agua amasado		98		
Agua aporta <u>aridos</u>		42		
	total	140		
<b>RESISTENCIA DEL HORMIGON</b>		N/mm <sup>2</sup>		
Compresión (15x15x15)	48 H	83,07	77,2	> 46 N/mm <sup>2</sup>
Compresión (15x15x15)	28 D	99,3	100,1	> 60 N/mm <sup>2</sup>
Flexotracción (70x10x15)	7 D	11,9	11,78	> 6,5 N/mm <sup>2</sup>
Brasileño (15Øx30)	28 D	6,6	6,5	> 4,5 N/mm <sup>2</sup>
<b>TRAVIESA ANCHO METRICO</b>				
<b>ENSAYOS ESTATICOS TRAVIESAS</b>		KN		
Sección Central (aparición fisura) (2 traviesas MM)		73,25	83,22	>23 kN
Sección Bajo Carril (aparición fisura)(2 traviesas MM)		200,42	220,18	>100 kN
Sección Bajo Carril (rotura) (1 traviesa MM)		200	340	370
		$F_{t0} > 100$	$F_{t0,28} > 162$	$E_{t0} > 224,6$

Figura 7. 5 Resultados de las probetas de hormigón sin sustitución de escoria

<b>DOSIFICACION HABITUAL TRAVIESAS</b>		70% CEMENTO	266 kg	
<b>CEMENTO 70% + ESCORIA 30%</b>		30% ESCORIA	114 kg	
<b>HORMIGON</b>		litros		
Agua amasado		100		
Agua aporta áridos		35		
	total	135		
<b>RESISTENCIA DEL HORMIGON</b>		N/mm <sup>2</sup>		
Compresión (15x15x15)	48 H	45,87	48,65	> 46 N/mm <sup>2</sup>
Compresión (15x15x15)	28 D	85	86,6	> 60 N/mm <sup>2</sup>
Flexotracción (70x10x15)	7 D	9,58	9,15	> 6,5 N/mm <sup>2</sup>
Brasileño (15Øx30)	28 D	4,8	5,5	> 4,5 N/mm <sup>2</sup>
<b>TRAVIESA ANCHO METRICO</b>				
<b>ENSAYOS ESTATICOS TRAVIESAS</b>		KN		
Sección Central (aparición fisura) (2 traviesas MM)		63,22	63,2	>23 kN
Sección Bajo Carril (aparición fisura)(2 traviesas MM)		141,69	132,17	>100 kN
Sección Bajo Carril (rotura) (1 traviesa MM)		200	320	320
		$F_{t0} > 100$	$F_{t0,28} > 162$	$E_{t0} > 224,6$

Figura 7. 6 Resultados de las probetas de hormigón con un 30% de sustitución de escoria

<b>DOSIFICACION HABITUAL TRAVIESAS</b>		50% CEMENTO	190 kg	
<b>CEMENTO 50% + ESCORIA 50%</b>		50% ESCORIA	190 kg	
<b>HORMIGON</b>		litros		
Agua amasado		100		
Agua aporta áridos		35		
	total	135		
<b>RESISTENCIA DEL HORMIGON</b>		N/mm <sup>2</sup>		
Compresión (15x15x15)	48 H	38,43	38,33	> 46 N/mm <sup>2</sup>
Compresión (15x15x15)	28 D	84,1	78,9	> 60 N/mm <sup>2</sup>
Flexotracción (70x10x15)	7 D	9,5	9,88	> 6,5 N/mm <sup>2</sup>
Brasileño (15Øx30)	28 D	5,3	5,5	> 4,5 N/mm <sup>2</sup>
<b>TRAVIESA ANCHO METRICO</b>				
<b>ENSAYOS ESTATICOS TRAVIESAS</b>		KN		
Sección Central (aparición fisura) (2 traviesas MM)		73,2	78,23	>23 kN
Sección Bajo Carril (aparición fisura)(2 traviesas MM)		212,73	150,5	>100 kN
Sección Bajo Carril (rotura) (1 traviesa MM)		190	350	350
		$F_{t0} > 100$	$F_{t28} > 162$	$F_{t0} > 224,6$

Figura 7. 7 Resultados de las probetas de hormigón con un 50% de sustitución de escoria

Si observamos las Figuras 7. 5, 7. 6 y 7. 7, donde se muestran los valores obtenidos en los ensayos realizados a las probetas de hormigón (Figura 7. 12), a 1 día ocurre lo mismo que en las pruebas que se realizaron en el laboratorio de la Universidad. Pero en nuestro estudio se ve como a 28 días la resistencia con este tipo de escoria se igualaba, mientras que en los ensayos de la fábrica no llega a alcanzar la misma resistencia que el hormigón convencional, aunque si cumpliría de sobra con la especificación técnica de traviesas por la que se rige. En la Figura 7. 8 y 7. 9, tenemos comparados en una gráfica estos datos. Los datos se han tomado de la media de los dos datos que se han facilitado para cada uno de los ensayos.

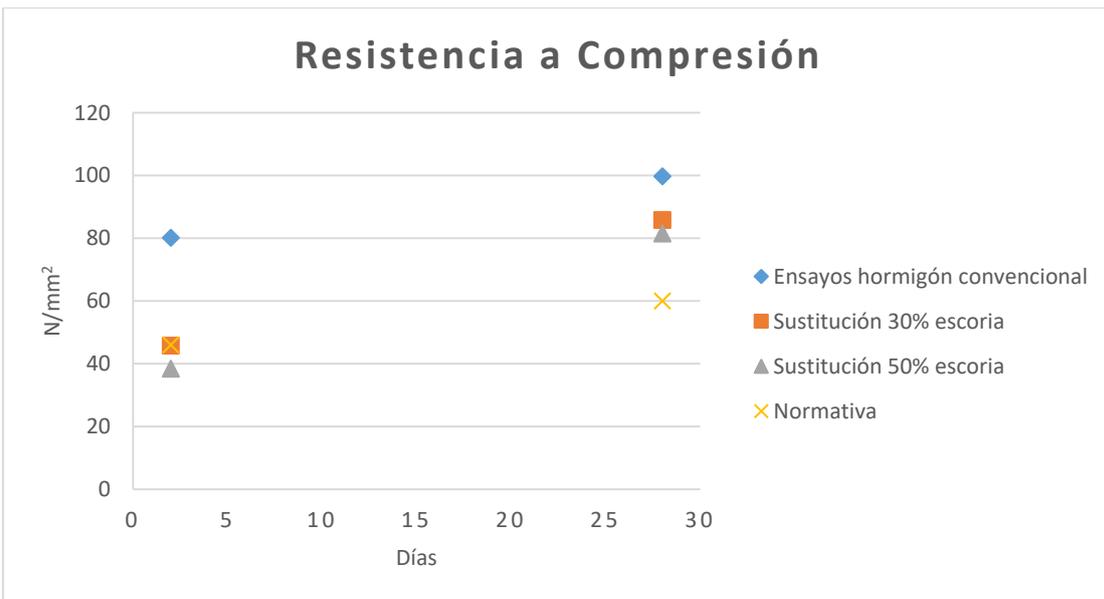


Figura 7. 8 Comparación de las roturas a compresión de las probetas

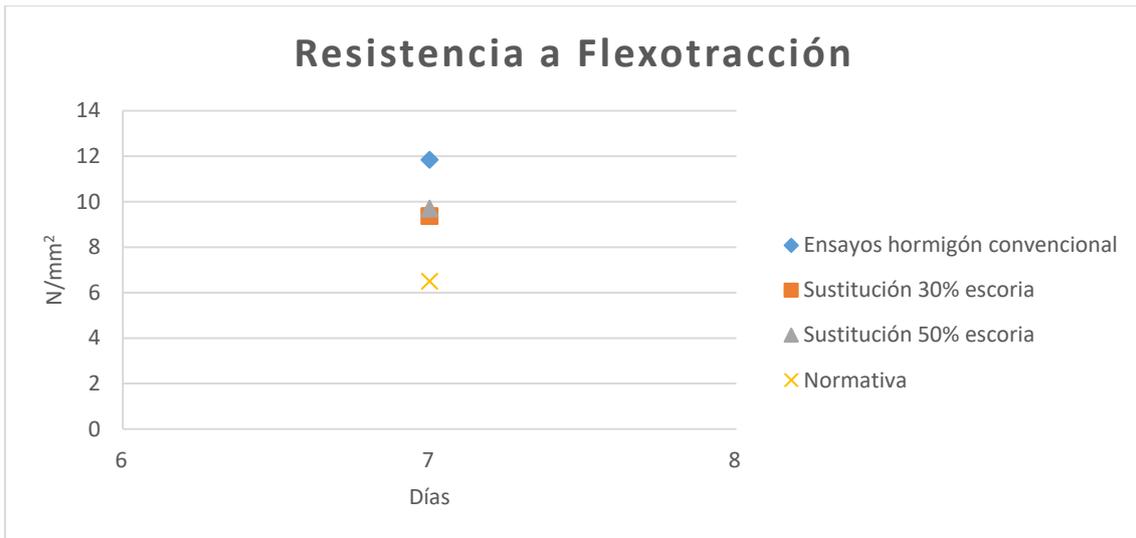


Figura 7. 9 Comparación rotura a flexotracción de las probetas

En los ensayos estáticos (Figura 7. 11) también ocurre lo mismo: no llegan a alcanzar las mezclas con sustitución los valores de las del hormigón convencional, pero si cumplen con la especificación técnica. Lo que también apreciamos es que se obtienen mejores resultados con las sustituciones al 50%, en la Figura 7. 10, tenemos la gráfica con las comparaciones de estos ensayos. Los datos se han tomado de la media de los dos datos que se han facilitado para cada uno de los ensayos.

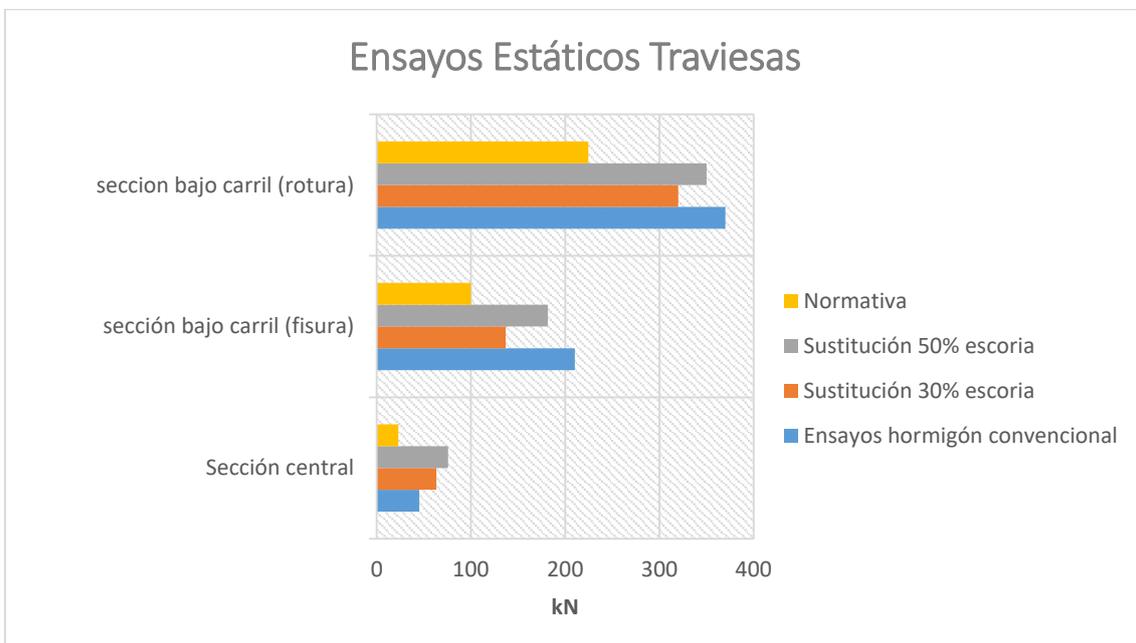


Figura 7. 10 Ensayos estáticos realizados a las traviesas. 1 Sección central; 2 Sección bajo carril (fisura); 3 sección bajo carril (rotura)



Figura 7. 11 Ensayos estáticos realizados a las traviesas en la fábrica de Sagunto.



Figura 7. 12 Probetas de hormigón realizadas en la fábrica de Sagunto.

Como hemos comentado anteriormente, los resultados de las probetas de hormigón también nos valen para los resultados de las dovelas ya que su normativa es menos restrictiva que la de las traviesas. Se le hizo un examen visual, y el aspecto de la dovela es bueno, sin coqueras ni oclusiones (Figura 7. 10).



Figura 7. 13 Dovelas de hormigón fabricadas en Sagunto.

### 7.3 CONCLUSIÓN

Como conclusión final, decir que se pueden fabricar dovelas y traviesas sustituyendo un porcentaje importante de escoria, ya que cumpliría la especificación técnica por la que se rige, mostrando especial interés en la resistencia a 48 h, a la cual habría que buscar algún aditivo de aceleración de fraguado para que pudiese cumplir también ese punto.

### 7.4 BIBLIOGRAFÍA

1. *Adif Especificación Técnica 03.360.571.8. Traviesas monobloque de hormigón pretensado.*; 5º Edición.; 2015;



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

# CAPÍTULO 8

**Conclusiones finales y futuras líneas de  
investigación.**



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## Capítulo 8. Conclusiones finales y futuras líneas de investigación

<b>8.1. INTRODUCCIÓN/ INTRODUCTION.....</b>	<b>161</b>
<b>8.2. CONCLUSIONES GENERALES/GENERAL CONCLUSIONS.....</b>	<b>161</b>
8.2.1 Propiedades de las escorias utilizadas en esta tesis / Properties of the slags used in this thesis .....	162
8.2.2 Propiedades físicas del hormigón obtenido / Physical properties of the resultant concrete.....	163
8.2.3 Propiedades mecánica-resistentes del hormigón obtenido / Mechanical properties of the concrete mixtures .....	164
8.2.4 Durabilidad y Comportamiento medioambiental del hormigón con sustitución de escorias / Durability and environmental behavior of concrete with slag substitution .....	166
<b>8.3. CONCLUSIÓN FINAL / FINAL CONCLUSION .....</b>	<b>166</b>
<b>8.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN / FUTURE LINES OF RESEARCH .</b>	<b>167</b>
<b>8.5. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>169</b>



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

### **8.1. INTRODUCCIÓN/ INTRODUCTION**

Esta tesis es el resultado de dosificar una matriz cementosa con sustitución del conglomerante hidráulico por escorias de tres siderúrgicas españolas seleccionadas entre varias con el fin de que exista un contraste en cuanto a los resultados esperados.

Cabe señalar que el hormigón fabricado para este estudio se elaboró a partir de mezclas especialmente fabricadas en laboratorio, y de cada una de las escorias se sustituyen cuatro porcentajes distintos, 23%, 25%, 30% y 40%. Según esta dosificación se han obtenido los kilogramos de cemento y/o escoria por m<sup>3</sup> de hormigón fabricado, que se trasladó a la trituración controlada y tamizado de las escorias empleadas. Se presume que este hormigón probablemente tendrá partículas de desechos que podría reducir su rendimiento y enmascarar ciertos resultados. Sin embargo, la extracción última de escorias para la manufactura de los elementos de hormigón prefabricados evitará tales problemas y proporcionará una mayor fiabilidad del producto.

This thesis is the result of the definition of a concrete mix design incorporating slags from three steel factories located in the Southern part of Spain as hydraulic conglomerate replacement. The slags were specially selected in order to cover a wide range of them and to compare the physical and mechanical properties of the resultant concrete mixtures.

Four different percentages of cement replacement were studied for each type of slag: 23 %, 25 %, 30 % and 40 %. According to each cement replacement percentage, the quantity of cement and slag per m<sup>3</sup> of each concrete mixture was obtained. Then, the slags used in this work were crushed and sieved. It is assumed that this concrete will probably have waste particles that could reduce its mechanical performance and could lead to uncertain results. However, the final extraction of the slag for the production of prefabricated concrete elements will avoid such problems and will provide a greater reliability of the product.

### **8.2. CONCLUSIONES GENERALES/GENERAL CONCLUSIONS**

De acuerdo con la fase experimental llevada a cabo en este estudio, las conclusiones obtenidas se han dividido con respecto a cuatro considerandos distintos:

According to the experimental phase carried out in this study, the following conclusions have been obtained:

### 8.2.1 Propiedades de las escorias utilizadas en esta tesis / Properties of the slags used in this thesis

La principal característica química que diferencian nuestras tres escorias es el alto contenido en dióxido de silicio -  $\text{SiO}_2$ - (32,5%) que presenta la escoria granulada procedente de alto horno M1, sobre las escorias procedentes de vertedero M2 (13,7%) y M3 (18,8%). La capacidad de generar tobermorita (hidrosilicatos de calcio (C-S-H)), a través de la reacción con la portlandita (compuesto de hidratación mineral del hormigón) en materiales cementosos, le aporta resistencia adicional a esta mezcla de la escoria M1 con respecto a los dos restantes.

Por otro lado, el óxido de calcio - $\text{CaO}$ - tiene una mayor presencia tanto en M2 como en M3 (55%), mientras que en M1 apenas alcanza 47%. Esto indica que los esqueletos de la matriz del material conformado por las escorias de vertedero están dotados de un mayor poder aglomerante, proporcionando mayor consistencia en su dosificación a esta tipología de hormigón, como se describirá en el siguiente apartado 8.2.4.

La disposición geométrica de los granos de cemento en el agua, si la conglomeración ocurre o no, se verá desequilibrada en parte por la presencia de las escorias, creando previsiblemente un cambio en el gradiente de la relación agua/cemento, siempre en función del porcentaje sustituido y de que escoria se trate. La cristalización preferencial de hidratos correspondiente a los iones más móviles, etríngrita y portlandita, según el proceso de hidratación de Le Chatelier [1], dará paso a la redistribución de C-S-H, siendo menor debido a la menor movilidad de los iones de silicato. La evolución de los perfiles a 28 días no es similar para los dos hidratos: la difusión de iones de calcio parece estar más influenciado por empaquetarse en la zona interfacial de transición del hormigón (ITZ) durante la hidratación a como lo hacen los iones de silicato.

Finalmente, como los poros, de las mezclas M2 y M3, a rellenar son más grandes, la porosidad, en todas las edades, se mantendrá más alta tanto en la escoria M3 como, sobre todo, en la M2.

The main difference between the three slags used in this work is the high content of silicon dioxide -  $\text{SiO}_2$  - (32.5%) which presents the granulated slag from blast furnace M1 in comparison with the slag from landfill M2 (13.7%) and M3 (18.8%). The capacity to generate tobermorite (calcium hydrosilicates (CSH)), by means of the reaction with the portlandite (mineral hydration compound of the concrete) in cementitious materials adds additional resistance to M1 mixture with respect to the other two mixtures.

On the other hand, calcium oxide -  $\text{CaO}$  - has a greater presence in both M2 and M3 (55%) slags, while in M1 barely reaches a 47%. This indicates that the matrix skeleton of

the material formed by the slag are endowed with a greater binder power, providing greater consistency to this type of concrete, as will be described in section 8.2.4 .

The geometrical arrangement of the cement grains in the water will be unbalanced partly by the presence of the slag, whether the conglomeration occurs or not. In addition, it will probably create a change in the gradient of water / cement ratio, always depending on the percentage of substitution and the type of slag. The preferential crystallization of hydrates corresponding to the most mobile ions (etringita and portlandita) will lead to the redistribution of CSH according to the hydration process of Le Chatelier [1], being smaller due to the lower mobility of the silicate ions. The evolution at 28 days is not the same for the two hydrates: diffusion of calcium ions seems to be more influenced by packaging in the Interfacial Transition Zone (ITZ) of concrete during the hydration process as the silicate ions.

Finally, as the pores of the mix M2 and M3, to be filled are larger, the porosity in all ages will remain higher in both M3 and M2 slags (especially in the last one).

### **8.2.2 Propiedades físicas del hormigón obtenido / Physical properties of the resultant concrete**

Para el estudio de las propiedades físicas del hormigón nos situamos en el nivel microestructural. Para la consistencia del mortero de cemento con una cantidad limitada de agua, en nuestro caso la relación agua/cemento es fijada en 0,5, la zona más importante de la microestructura de la pasta de cemento en el hormigón es la región próxima a la superficie de contacto con los áridos, o zona *ITZ*, siendo su influencia en el comportamiento físico del hormigón notoria. El comportamiento de la escoria M1, con un idéntico potencial hidráulico que el cemento, justifica la similitud en cuanto a la consistencia del hormigón convencional. Sin embargo, las escorias M2 y M3 tienen un mayor poder aglomerante y su consistencia aumenta significativamente, obteniendo como conclusión general que su adhesión al resto de los componentes del hormigón cambiará las propiedades y características mecánico-resistente del mismo. La densidad permanece prácticamente inalterable en todos los ensayos y sustituciones.

Para el estudio de la permeabilidad y absorción del hormigón distinguimos que la absorción represente la capacidad máxima de contener agua en relación con una condición de sequedad predeterminada, mientras que la permeabilidad está relacionada con la ecuación de transporte del agua a través de la masa, es decir, la facilidad con la cual el agua penetra en dicha masa.

La porosidad está unido a la permeabilidad, cuanto mejor sea la distribución de los poros así disminuirá la penetración del agua. Indiferente a los porcentajes de sustitución de cemento, la escoria M2 tiene una pésima distribución de poros, por lo que aumentará

su permeabilidad. En la escoria M3, la distribución es menor y mejora un 50% los resultados del hormigón convencional, mientras que la escoria M1 es constante disminuyendo un 30% respecto del hormigón no adicionado.

Se confirma que el hormigón obtenido con las mezclas que emplean escoria tipo M2 resulta más poroso que el hormigón convencional; y el obtenido con las mezclas M1 y M3, presenta una menor densidad y una mayor absorción de agua.

The study of the physical properties of the concrete mixtures studied was performed at microstructural level. The ITZ is the most important zone of the microstructure of the cement matrix, and it also has a great influence on the consistency of concrete with a limited amount of water (in this case a water/cement ratio of 0.5). For these reasons, the physical properties of the resultant concrete mix are highly influenced by this zone. The mechanical behavior of M1 slag (which has a similar hydraulic potential than cement) is the responsible of the similar consistency of both M1 and traditional concretes. On the other hand, M2 and M3 slags have a higher binder power and the consistency of the resultant concrete increases considerably. As general conclusion, it can be said that the adhesion of M2 and M3 slags to the rest of the components of the concrete will change its physical properties and mechanical-resistant characteristics. The density remains virtually unchanged in all tests and substitutions.

The absorption represents the maximum water-holding capacity in relation to a condition of predetermined dryness. On the other hand, permeability is related to the the ability of concrete to allow water to pass through it.

The porosity is related to the permeability in concrete, because the distribution of pores can decrease water penetration. M2 slag has a poor distribution of pores regardless the percentage of cement replacement, so its permeability increases. In the case of M3 slag, a better distribution of pores was observed and the results of traditional concrete are improved by 50%. Finally, the permeability of M1 slag was approximately constant, decreasing by 30% compared to the traditional concrete.

It can be concluded that the concrete produced with M2 slag is more porous than conventional concrete. Otherwise, concrete mixtures incorporating M1 and M3 slags presented a lower density and a greater water absorption.

### **8.2.3 Propiedades mecánica-resistentes del hormigón obtenido / Mechanical properties of the concrete mixtures**

El hormigón obtenido con dosificación mediante sustitución de cemento por distintas escorias se examinó como un material continuo sin estructura interna, como por ejemplo fue propuesto por Vecchio y Collins [2,3], evitando que el comportamiento de compresión esté influenciado por la fisuración lateral. Por lo tanto, el papel para nuestra experiencia es doble. En primer lugar, se necesitan ensayos para determinar las

propiedades de los materiales, y segundo, se necesitan experimentos con prototipos para validar el cálculo del modelo propuesto.

De las escorias tratadas, la que funciona en su sustitución de forma similar al cemento es la denominada M1, obteniéndose las mismas características e incluso mejores resistencias que para el hormigón sin sustitución o convencional. Para las escorias M2 y M3 observamos que a compresión no funcionarían tan bien como la M1, teniendo pérdidas de más de un 40% de resistencia a compresión (dependiendo de la proporción de sustitución aumentan las pérdidas).

El módulo de elasticidad, la retracción, y la fluencia son las propiedades que más se ven afectadas con la sustitución de escoria por cemento en la dosificación. Así, la docilidad aumenta progresivamente con el contenido de escoria reciclada y; con la misma relación agua-cemento, el módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young disminuye hasta un 15% de promedio; y la retracción, aumenta hasta un 20% de media para sustituciones del 40%.

Por último tenemos la resistencia a flexión donde, al igual que en ensayos anteriores, se comprueba que las mezclas con escoria M1 aportan la misma resistencia que las mezclas convencionales. Posteriormente se estudian las escorias M2 y M3, donde estas mezclas pierden resistencia, hasta casi un 30% más que el hormigón convencional; pero que en sustituciones hasta el 25% no llegan a perder un 10% de la resistencia.

The concrete mixtures studied in this work were analyzed as continuous materials without internal structure (as proposed by Vecchio and Collins [2, 3]). By doing so, the compression behavior is not influenced by lateral cracking. Some tests are needed to determine the properties of the materials and experiments with prototypes are needed to validate the calculation of the proposed model.

M1 slag works in a similar manner to cement unlike M2 and M3 slags, obtaining the same characteristics and even better compressive and tensile strength than conventional concrete. M2 and M3 slags showed a worse compression strength than M1 mixes (reaching a difference of more than 40% depending on the substitution ratio).

The modulus of elasticity, shrinkage and creep were the properties that were most affected by the partial substitution of cement by slags. Thus, the workability of the resultant concrete increases progressively with the slag content. In addition, the Young's modulus decreases up to 15% on average maintaining the same water/cement ratio. Finally, shrinkage increases up to 20% on average for 40% substitutions.

M1 slag mixture showed approximately the same flexural strength than the traditional concrete. On the other hand, the flexural strength of M2 and M3 concrete mixtures was reduced up to 30 % in comparison with traditional concrete. However, in cement replacement up to 25 % the loss of flexural strength is approximately 10 %.

#### **8.2.4 Durabilidad y Comportamiento medioambiental del hormigón con sustitución de escorias / Durability and environmental behavior of concrete with slag substitution**

Los ensayos de penetración de agua y carbonatación, que son los que nos dan una idea de cómo se comporta el hormigón una vez armado y puesto en servicio (es decir, durante su vida útil), fueron satisfactorios para todas las mezclas, a excepción del ensayo de penetración de agua para las escorias M3. Por lo que este tipo de escorias se le tendría que hacer un estudio exhaustivo del comportamiento interno de sus partículas ya que, como hemos visto, con su porosidad esto no ocurre.

En los ensayos de carbonatación todas las escorias funcionaron bien. No se observó carbonatación en ninguna de ellas.

El ensayo de lixiviado confirmó que las escorias, al ser encapsuladas en la matriz cementante, no causa perjuicio al medio ambiente, ya que los valores de lixiviado no aumentan a la hora de la fabricación del hormigón con escoria.

El único valor por encima del lixiviado del hormigón convencional, sería el Aluminio, pero en este caso no es preocupante ya que no es un metal que tenga restricciones por la normativa.

The tests of water penetration and carbonation were satisfactory for all the mixtures, with the exception of M3 slag mixtures. For this reason, M3 slags need to be studied in deeper way, analyzing the internal behavior of its particles.

No carbonation was observed in any of concrete mixture studied.

Leaching test confirmed that the slags does not cause damage to the environment. The results of the leaching tests of concrete mixtures with slags are similar to the results of traditional concrete with the exception of the Aluminum. However, this metal has no restrictions by the current regulations.

### **8.3. CONCLUSIÓN FINAL / FINAL CONCLUSION**

Como conclusión final, es claro que las escorias de alto horno son adecuadas para la elaboración de un hormigón sostenible, y en sustitución del cemento, ya que se ha

comprobado como aporta las mismas características a la mezcla que el cemento. Tanto a nivel de laboratorio, como puesto en servicio con piezas prefabricadas.

Para los otros dos tipos de mezclas con escorias, se les puede buscar una aplicación no estructural, ya que de este modo se pondría en valor un residuo y se evitaría el consumo de materia prima.

La realización de hormigón con escoria es un claro ejemplo de economía circular, ya que para la fabricación de estructuras es necesario el acero, y con el residuo producido por el mismo se fabrica el hormigón para la realización de distintas estructuras.

As a final conclusion, it is clear that blast furnace slags are suitable for the production of a sustainable concrete used as a substitute for cement. The results of this thesis has proven that this slags provides to concrete the same effect as cement. The concrete mixtures employed in this work was produced in the Laboratory of Material of the University of Cádiz, and they were also used in precast concrete members.

The other two types of concrete mixtures with slags are more oriented to a non-structural application. By doing so, a waste material can be used reducing the raw material consumption.

The production of concrete with slags as cement replacement is a clear example of circular economy, because steel production is needed for construction and the waste materials that it provokes are introduced in concrete.

#### **8.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN / FUTURE LINES OF RESEARCH**

Las futuras líneas de investigación son muchas y muy variadas:

- Una línea de investigación interesante sería la viabilidad que tienen estas escorias, es decir, si la transformación del residuo en producto es viable tanto económica como medioambientalmente.
- Las preguntas principales que aún no se han respondido se centran en la cuantificación de propiedades mecánicas y de transferencia en la zona de transición ITZ. Es decir, estudiar el material y de qué forma se organizan sus partículas.

Este trabajo se debe incorporar al estudio de la influencia de la fracción volumétrica de cada sustitución, su correspondencia con la relación agua-cemento y su módulo elástico.

Es decir, si estamos sustituyendo un 40% de cemento parece que la correspondencia con la resistencia característica en cuanto a esta dosificación se

vería influenciada si se mantiene la misma relación agua-cemento. Esta puerta a la exploración más aproximativa continúa abierta y esperamos para los próximos proyectos de investigación incorporarla.

Igualmente, hacer un estudio de la microscopía electrónica para ver la distribución y comportamiento de las partículas de las mezclas; ver los enlaces y compuestos químicos que se forman a la hora de la hidratación, y ver como esta hidratación evoluciona a lo largo de los días de curado.

- Otra línea de investigación sería intentar conseguir un hormigón lo más ecológico posible, retirando la mayor cantidad de materia prima, tanto áridos como cemento, por escoria siderúrgica de distintas procedencias y ver hasta qué porcentajes sería posible llegar para que fuese apto para la puesta en servicio.
- Toda esta investigación se puede extrapolar a otro tipo de matrices cementantes, como son, las lechadas de agua-cemento, o distintos tipos de hormigón como los Hormigones de muy alto rendimiento (HMAR).

The future research line are the following:

- An interesting research line would be the economical and environmental viability of these slags.
- The main questions out of the scope of this thesis that have not yet been answered are related to the quantification of mechanical and transfer properties in the ITZ.

This work should also include the influence of the volumetric fraction of each substitution, its correspondence with the water/cement ratio and its elastic modulus.

If a 40 % of cement is replaced by slags, it seems that the correspondence with the characteristic strength would be influenced if the same water/cement ratio is kept constant. This option remains open and it will be studied in future research projects.

A study of the distribution of the different particles of the slag mixtures using the electron microscopy can be a future research line. The analysis of chemical bonds and the structure of the chemical compounds that are formed during the hydration process would be interesting.

- Another research line would be to find an environmentally friendly concrete, removing raw materials such as both aggregate and cement, and introducing steel slag and other materials.

- All this research can be extrapolated to other type of cementitious matrices, such as cement based grouts, or different types of concrete such as high-performance concretes (HPC).

### 8.5. BIBLIOGRAFÍA

1. Ollivier, J. P.; Maso, J. C.; Bourdette, B. Interfacial transition zone in concrete. *Adv. Cem. Based Mater.* 1995, 2, 30–38.
2. Vecchio, F.J.; Ollins M.P. The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear. *ACI J. Proc.* **1986**, 83, doi:10.14359/10416.
3. Vecchio, F. J.; Collins, M. P. Compression response of cracked reinforced concrete. *J. Struct. Eng.* **1993**, 119, 3590–3610, doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:7(1151).



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA