

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE EDIFICACIÓN



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



Escuela Técnica Superior de
Ingeniería de Edificación



AIDICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO
DE LA CONSTRUCCIÓN

PROYECTO FIN DE GRADO

**HORMIGÓN DE BAJO IMPACTO AMBIENTAL
ELABORADO CON MATERIALES ACTIVADOS
ALCALINAMENTE PARA SU USO EN FIRMES
COMPACTADOS CON RODILLO.**

AUTORA:

PAULA IBORRA BOSCH

DIRECTORES:

LUIS MIGUEL ORDOÑEZ BELLOC
LUIS VICENTE GARCIA BALLESTER
JOSÉ RAMÓN ALBIOL IBÁÑEZ

VALENCIA, JUNIO 2011



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



Escuela Técnica Superior de
Ingeniería de Edificación



AIDICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO
DE LA CONSTRUCCIÓN

Los resultados que se exponen en el presente trabajo son fruto de los trabajos de investigación realizados en el marco del Proyecto CLEAM, subvencionado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI) dentro del programa CENIT. Dichos resultados son, pues, propiedad exclusiva de las empresas que promueven/promovieron dicho proyecto y que constituyen la Agrupación de Interés Económico CLEAM-CENIT, A.I.E.

DIRECTORES ACADÉMICOS;

- **Luis Vicente García Ballester**

Profesor titular en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería en Edificación, en la Universidad Politécnica de Valencia

Departamento de Construcciones Arquitectónicas

- **José Ramón Albiol Ibáñez**

Profesor titular en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería en Edificación, en la Universidad Politécnica de Valencia

Departamento de Construcciones Arquitectónicas

TUTOR DE LA EMPRESA;

- **Luis Miguel Ordoñez Belloc**

Coordinador de la División de Cementos, Morteros y Hormigones.

Unidad Técnica de Investigación de Materiales

Empresa: AIDICO, Instituto Tecnológico de la Construcción.

Para mis abuelos,
en especial a Paco.

ÍNDICE

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Aspectos generales del hormigón.	2
1.2. Aplicación del hormigón en firmes y carreteras.	3
1.3. Exigencias al hormigón compactado con rodillo.	5
1.4. Sostenibilidad del hormigón.	14
1.5. Hormigones sostenibles con materiales hidráulicos activados alcalinamente.	15
1.5.1. <i>Desarrollo histórico y hormigones obtenidos por activación alcalina.</i>	15
1.5.2. <i>Aspectos químicos.</i>	15
1.5.3. <i>Aplicaciones y especificaciones.</i>	19
1.5.4. <i>Ventajas e inconvenientes de este material.</i>	19
1.5.5. <i>Normativa y especificaciones para cementos y hormigones activados alcalinamente y sus productos.</i>	20
2. OBJETIVOS DEL PFC	23
3. MATERIAS PRIMAS	25
3.1. Activadores alcalinos.	25
3.1.1. <i>Hidróxido sódico.</i>	26
3.1.2. <i>Carbonato sódico.</i>	26
3.1.3. <i>Silicato sódico.</i>	27
3.2. Escorias de alto horno.	27
3.2.1. <i>Composición química de las escorias de alto horno.</i>	28

3.2.2.	<i>Clasificación de las escorias de alto horno</i>	29.
3.2.3.	<i>Influencia de las escorias de alto horno sobre las propiedades del hormigón.</i>	31
3.3.	Cenizas volantes	31
3.3.1.	<i>Composición química de las CV.</i>	32
3.3.2.	<i>Clasificación de las CV.</i>	33
3.3.3.	<i>Influencia de las CV sobre las propiedades del hormigón.</i>	34
3.4.	Filler calizo	34
3.4.1.	<i>Influencia del filler calizo sobre las propiedades del hormigón.</i>	34
3.5.	Áridos	35
3.6.	Agua	37
4.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	39
4.1.	Diseño del hormigón compactado con rodillo.	39
4.1.1.	<i>Dosificación de los áridos.</i>	40
4.1.2.	<i>Preparación del activador.</i>	40
4.1.3.	<i>Tecnología del mezclado.</i>	40
4.1.4.	<i>Condición de curado de las probetas.</i>	41
4.1.5.	<i>Ensayo de consistencia.</i>	41
4.1.6.	<i>Compactación de las probetas.</i>	42
4.1.7.	<i>Ensayo Resistencia a compresión.</i>	43
4.1.8.	<i>Ensayo Vibro-compresión.</i>	45
4.1.9.	<i>Ensayo CBR (California Bearing Ratio).</i>	45

4.1.10. <i>Retracción del hormigón en estado fresco y Endurecido</i>	45
4.2. Características del hormigón compactado aplicadas en losetas, mediante la compactación con rodillo.	46
4.2.1. <i>Ensayo flexo-tracción</i>	46
4.2.2. <i>Obtención de testigos</i>	48
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
5.1. Dosificación	51
5.2. Compactación “Apisonado proctor modificado”	53
5.3. Resistencia a compresión	54
5.4. Resistencia a flexo-tracción	54
5.5. Resistencias testigos	57
5.6. Ensayo CBR	59
5.7. Evolución de la retracción	60
6. CONCLUSIONES	63
7. BIBLIOGRAFÍA	65

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Aspectos generales del hormigón.

El hormigón [1] se puede definir como un material compuesto por un esqueleto granular y una matriz cementicia que tiene la función de ligante de todos los materiales. El esqueleto granular está compuesto por una serie de áridos de distintas granulometrías. La matriz cementicia está compuesta por un aglomerante, ya sea cemento o algún aglomerante hidráulico distinto, agua, cualquier adición activa o inerte, y aditivos.

Este material se usa principalmente en la edificación e ingeniería civil, aunque cada vez más se está extendiendo su uso a otras aplicaciones debido a la aparición de nuevos aditivos que le confieren propiedades especiales al mismo.

El proceso de fabricación de los materiales de construcción, así como de los productos de los cuales muchos están formados, ocasiona un impacto ambiental. Este impacto tiene su origen en la extracción de los recursos naturales necesarios para su elaboración, incluyendo el proceso de fabricación y el consumo de energía, que deriva en emisiones tóxicas a la atmósfera.

El hormigón basado en Cemento Portland Convencional (CPC) es uno de los materiales de construcción más importantes desde la era industrial. Su producción anual, en el mundo industrializado, se encuentra entre 1.5 y 3 Toneladas per cápita.

La principal ventaja del hormigón, es la alta resistencia a compresión que soporta. En contra, este material ofrece poca resistencia a tracción siendo en algunos casos necesario el empleo de barras de acero para mejorar dicha propiedad. Es casi el único material que llega en bruto a obra, esta característica hace que sea muy útil en construcción ya que puede moldearse de muchas formas.

Otra de las ventajas es la existencia de diferentes tipologías de hormigón (ordinario, en masa, armado, pretensado, ciclópeo, aireado...), surgidas a partir de las exigencias en las diferentes aplicaciones; proyectado, estructural, impreso, para pavimentos, de limpieza o nivelación... A todas estas ventajas, si se añade la facilidad de obtención de los materiales y la simplicidad y rapidez del proceso de fabricación, se obtiene un material económico y sin competencia alguna en la industria de la construcción.

Los primeros que emplearon hormigón fueron los egipcios, usando una mezcla de yesos y cales como material aglutinante. Más adelante, los romanos hicieron construcciones empleando un compuesto que sería el primer hormigón de la historia, compuesto por caliza calcinada, agua, arena y piedras trituradas. Poca evolución tuvo el hormigón hasta la aparición del cemento Portland hacia el siglo XIX, el cual mejoraba notablemente las cualidades del hormigón, creando una nueva era en materiales de construcción.

1.2. Aplicación del hormigón en firmes y carreteras.

Se define como firme [2] a la sucesión de capas superpuestas, relativamente horizontales, de unos centímetros de espesor y adecuadamente compactados. Este se apoya sobre una explanada previamente compactada. El firme deberá soportar las cargas de tráfico sin agrietarse o deformarse y ofreciendo a los usuarios comodidad y seguridad. Existen diferentes tipos de firmes; capas granulares, suelos estabilizados y de gravas, mezclas bituminosas, pavimentos de hormigón, adoquines...

El hormigón que se emplea en este tipo de pavimentos es similar al hormigón convencional vibrado. La diferencia es la humedad contenida y el proceso de vertido. A los hormigones empleados en pavimentos se les llama hormigones compactados con rodillo, ya que tras su puesta en obra, estos son compactados con rodillos vibradores. Estos rodillos se emplean para reducir al máximo el aire ocluido, consiguiendo una mayor resistencia y con ello unas mejores características mecánicas.

El pavimento [3] de hormigón queda definido como el constituido por un conjunto de losas de hormigón en masa separadas por juntas transversales, o por una losa continua de hormigón armado, en ambos casos eventualmente dotados de juntas longitudinales; el hormigón se pone en obra con una consistencia tal, que requiere el empleo de vibradores internos para su compactación y maquinaria específica para su extensión y acabado superficial.

La normativa que rige sus ensayos y los materiales que se emplean son; el Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG3), las normas españolas UNE, ISO y ASTM (American Society of testing Materials).

La ejecución del pavimento de hormigón incluye las siguientes fases:

- Estudio y obtención de la fórmula de trabajo.
- Preparación de la superficie de asiento.

- Fabricación del hormigón.
- Transporte del hormigón.
- Colocación de elementos de guía y acondicionamiento de los caminos de rodadura para la pavimentadota, compactadora y los equipos de acabado superficial.
- Colocación de los elementos de las juntas.
- Puesta en obra del hormigón y colocación de armaduras en pavimento continuo de hormigón armado.
- Ejecución de juntas en fresco.
- Terminación.
- Numeración y marcado de las losas.
- Protección y curado del hormigón fresco.
- Ejecución de juntas serradas.
- Sellado de las juntas.

Antecedentes

En el siglo XIX se inició el uso de firmes de hormigón [4] compactado con rodillo, hay antecedentes que datan del año 1930 en Suecia donde se aplicó en zonas de gran superficie como presas, zonas de aparcamiento, carreteras de tráfico ligero y aeropuertos. Sin embargo, el mayor uso para la construcción de pavimentos fue en Canadá, Bélgica y EEUU en 1980, consiguiendo un hormigón competente en cualquier tipo de pavimento, ya sea su tráfico ligero o pesado.

Entre las experiencias realizadas en España cabe destacar, en primer lugar una plataforma en el Puerto de Tarragona, en la que se dispuso un pavimento de hormigón vibrado HP-40 de 30 centímetros de espesor y, en segundo lugar un tramo experimental de 1.200 metros de longitud y 23 centímetros de espesor, dispuesto sobre una base de grava cemento.

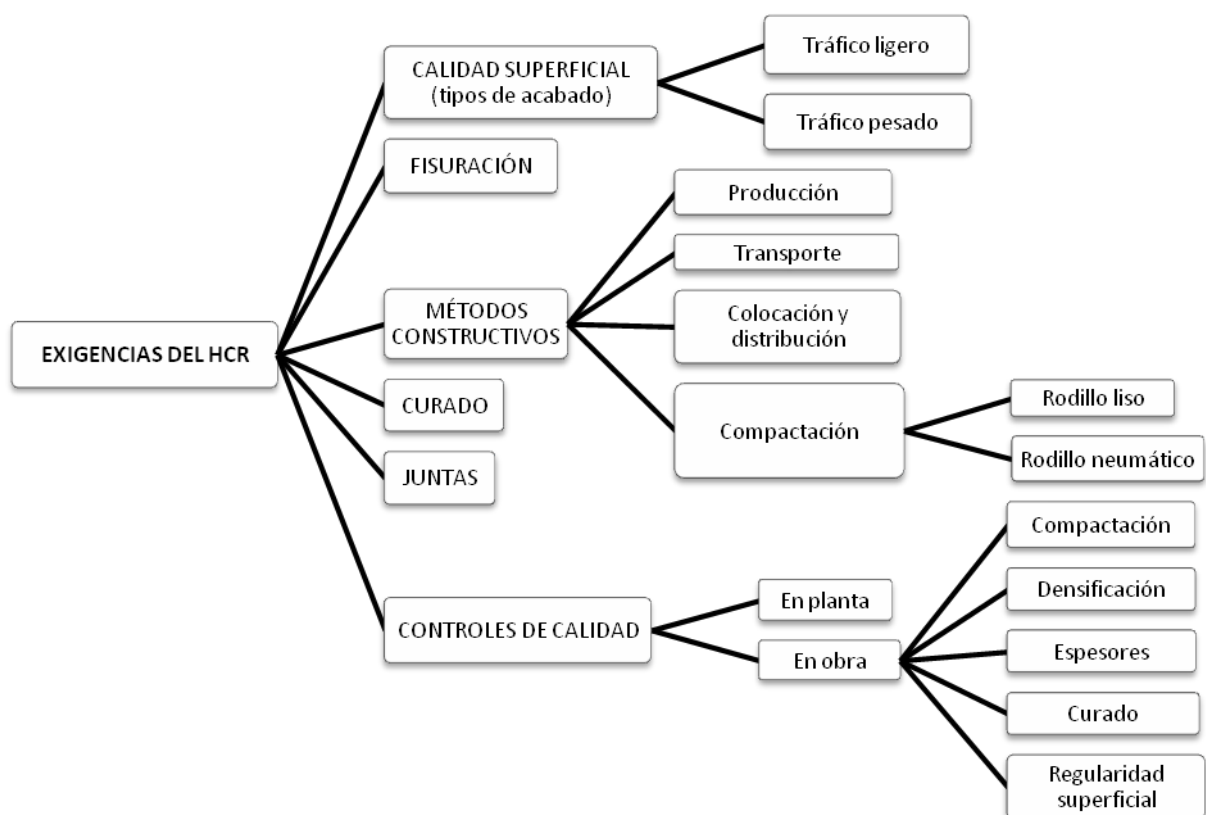
En España esta técnica está en desuso, se utilizan pavimentos bituminosos, es decir, un firme de hormigón pero que como acabado superficial se emplea asfalto. Si comparamos ambos pavimentos encontramos mayores y mejores ventajas de los pavimentos de hormigón. Estas ventajas no son solo a nivel constructivo, sino también a nivel económico y ambiental.

- El hormigón es un producto nacional siempre al alcance de cualquiera, en cambio, cuando se habla del asfalto, se depende del petróleo y de la inflación que sufre el mismo en cuanto a los precios.

- Dentro de la contaminación que ambos pavimentos producen, el asfalto en su puesta en obra contamina la explanada sobre la que se coloca y a elevadas temperaturas emite gases altamente tóxicos. Además este tipo de pavimentos no precisa de moldes laterales para su contención, ya que su propia consistencia inicial lo mantiene conformado adecuadamente.

- El hecho de poder obtener firmes de tonos claros, nos permite que la reflexión del sol no influyan en la temperatura superficial y con ello el efecto albedo. Ante la amenaza del cambio climático y las elevadas temperaturas que ello conlleva, sabiendo que siempre adquieren mayor temperatura los colores oscuros será esta otra ventaja para los pavimentos de hormigón, ya que sí se puede hablar de hormigones de tonos claros, pero no de asfaltos con estas características.

1.3. Exigencias al hormigón compactado con rodillo.



- **Calidad superficial;** las exigencias varían según si la losa se destinará a ser recubierta o no. En el caso de que vayan a ser recubiertas las exigencias disminuyen, y varían para recubrimientos con tratamientos o asfálticos.

La granulometría de los áridos, conviene un tamaño no mayor de 19'5 mm, con el equipo de distribución que se emplee. Es recomendable que se use un equipo de acabado con pre-compactación del material y distribuirlo con motoniveladora, seguido por el equipo de compactación, rodillos vibratorios.

Se pueden clasificar varias posibilidades de acabado superficial:

- En el caso de tránsito ligero, que circulan a velocidades lentas (calles dentro del casco urbano), el sistema de acabado superficial que se ha empleado hasta el momento en España es un fratasado mecánico con llanas girando a gran velocidad (también conocidos como helicópteros). Otra opción es dejar el mismo riego de curado, o bien un tratamiento superficial.
- Para el caso de tránsitos pesados o con elevadas velocidades, el tratamiento a disponer dependerá de la puesta en obra. En el caso de no alcanzar la regularidad superficial deseada, una buena solución siempre ha sido una capa de varios centímetros de material asfáltico para absorber irregularidades.

- **Fisuración;**

La fisuración está directamente ligada a la retracción, ya que es esta la que produce la disminución del volumen del hormigón durante el proceso de fraguado al evaporarse el agua y produciéndose de este modo las fisuras. Será fundamental una correcta caracterización del hormigón (cantidad finos y cemento, relación A/C, espesor, temperatura ambiental...) para reducir al máximo las fisuras.

Para conocer la retracción del hormigón los métodos de cálculo se realizan en función del tiempo desde el acabado del hormigonado, y depende básicamente de tres factores;

- Humedad ambiental
- Espesor de la solera
- Evolución de la retracción en el tiempo.

Analizando las experiencias realizadas hasta el momento y valorando los resultados obtenidos se puede afirmar que a mayor resistencia del hormigón mayor va a ser la retracción que se produzca; que el hormigón en masa retrae más que el hormigón armado; que a mayor temperatura ambiental también será mayor la retracción; que la

retracción crecerá cuanto menor sea el espesor de la pieza hormigonada y que cuanto mayor sea la superficie del elemento habrá más retracción.

Actualmente se realiza una técnica diferente, en la que no se realizan juntas y procediendo posteriormente al sellado de las fisuras. Pero aun así cuando se emplea como capa de rodamiento es aconsejable aplicar el método clásico de las juntas ya que el tiempo de comienzo de la fisuración es mayor que en el hormigón clásico.

- Métodos constructivos;

Se ha comprobado que en todas las experiencias realizadas hasta el momento y las que hay actualmente en programación se han orientado, en lo que respecta a la construcción del pavimento, en la experiencia europea, pero adaptándola a nuestra modalidad de trabajo, materiales y equipamiento, para así lograr una tecnología propia.

Las etapas constructivas, detalladas brevemente son:

- Producción; se puede producir en plantas mezcladoras del tipo empleado para suelo (dosifican por volumen) y también en plantas hormigoneras de paletas móviles (dosifican por peso).
- Transporte; se realiza con camiones voladores sin ningún tipo de dispositivo especial. Se deberá evitar la segregación del material y las variaciones de humedad provocadas por alta temperatura, viento...Para ello suele ser conveniente cubrir con un toldo adecuado el material.

La altura de caída desde la planta al camión debe cuidarse que resulte la mínima posible para evitar problemas de segregación.

La distancia de transporte debe también considerarse en lo que representa como consumo de parte del "tiempo de trabajo". Este concepto de "tiempo de trabajo" es importante en la tecnología de los hormigones compactados con rodillo y se define como el tiempo transcurrido desde el comienzo de la producción en hormigonera o en mezcladora, cuando se incorpora el agua al hormigón, hasta el comienzo del fraguado del cemento, en el cual debe realizarse totalmente el transporte, la puesta en obra u la compactación hasta su terminación. Debe conocerse entonces el tiempo de comienzo de fragüe del cemento que se va a emplear, y en base a este dato y la planificación del trabajo a ejecutar se determinará la conveniencia o no de agregar aditivo del tipo retardador de fraguado.

- Colocación y distribución; previo a esta operación se verificará la calidad de la base de apoyo, en cuanto a sus características geométricas y a su capacidad portante,

de manera tal que no ceda al ser compactado y provoque una compactación deficiente de las capas inferiores del hormigón, que son las que tienen la misión resistente mayor.

Sobre la base aprobada se realizará, antes del volcado del hormigón, un riego con agua, utilizando camión regador, especialmente si la base está constituida por material drenante.

La distribución del hormigón puede realizarse desde la forma más elemental que consiste en el empleo de motoniveladora hasta la más avanzada con terminadora. La distribución se realiza por carriles, de acuerdo con el ancho que permite al equipo, siempre se tratará de terminar en una línea para todos los carriles a objeto de formar una sola junta transversal de construcción. Se trabajará con un espesor inicial, de manera que una vez compactado el material, se logre el espesor exigido.

En esta etapa es conveniente disponer de un equipo para riego con agua por pulverización, por si se produjera el secamiento de la superficie.

○ Compactación; el HCR se compacta en una sola capa, para lo cual se emplean los mismos equipos que se utilizan en la compactación del concreto asfáltico. Ellos son:

- *rodillo liso vibrante*, convenientemente con carga estática igual o mayor a 30 kg/cm de generatriz, con tracción en el rodillo vibrante. Es el que provee la compactación al HCR, que permitirá una pronta capacidad portante al tránsito, junto a una excelente resistencia mecánica a la tracción en la fase del endurecimiento.
- *rodillo neumático*, a emplearse con una carga de 3000 kg por rueda y presión de inflado mayor o igual a 8 kg/cm². Es el que provee el “amasado y terminación superficial” que el rodillo liso vibratorio no puede lograr.

Se comienza con el rodillo estático y luego se trabaja vibrando con el número de pasadas (trayecto de ida y vuelta del rodillo) suficientes para lograr la densidad especificada. Ésta debe ser igual o mayor al 97% de la densidad máxima obtenida para la mezcla.

No hay un número fijo de pasadas de rodillo liso ni del rodillo neumático; debe realizarse una experiencia previa a la obra, en un tramo elegido expresamente donde se verifique el número de pasadas necesarias, que puede variar entre 10 a 20; pero como queda indicado, todo depende de las características de la base, del material y del equipo disponible, del espesor y del clima.

Finalmente se pasa el rodillo neumático (10 a 12 pasadas) cuya misión es mejorar la terminación de la losa borrando las pequeñas deficiencias que pueden quedar luego del paso del rodillo liso y borrar o corregir las fisuras superficiales.

También para esta etapa es necesario disponer de un equipo para regar agua por aspersión por si fuera necesario, de manera de poder mantener la humedad óptima, asegurando que la superficie permanezca húmeda, pero sin formar charcos. Esto debe realizarse especialmente en días de verano y ventosos.

La compactación de los bordes es un punto importante. En el caso de los bordes laterales, de ser posible, se utilizan unos cordones (caso de los pavimentos urbanos), pues resultará tanto mejor la compactación. Pero, en el caso de que no tenga cordones, lo que hay que hacer es extender previamente el material de la banquina y ejecutar una primera pasada. Ya con el material de la banquina, y antes de la compactación, se efectúa una primera pasada con el rodillo a caballo de la banquina y el hormigón seco, y una segunda pasada también similar sobre el hormigón seco.

Luego se prosigue la compactación normalmente, pero siempre disponiendo una contención lateral al borde para evitar la descompactación del mismo. Si se trabaja por carriles hay que dejar sin compactar una tira longitudinal central de aproximadamente 40 cm de ancho que actúa de contención, luego al compactar el segundo carril se compactará esta tira. Para la contención lateral se trabaja en igual forma realizándose la compactación de la tira junto con el material de banquetas.

○ Curado

Se realiza inmediatamente después de terminada la compactación, con el objetivo de evitar las pérdidas de humedad y lograr que el conglomerante pueda desarrollar las reacciones que conducen al fraguado (hidratación del cemento). Se aconseja emplear emulsión asfáltica aniónica distribuida con camión regador sin transitar por el HCR. Si se va a liberar al tránsito, lo que puede hacerse no bien rompa la emulsión, es un riego con arena, 8 en un espesor de 2 - 6 mm aproximadamente, en una proporción del orden de unos 4 a 7 litros/m², para evitar que el asfalto sea levantado por las ruedas de los vehículos.

En el caso de que el HCR no vaya a liberarse inmediatamente al tránsito, se han desarrollado algunos productos de curado especial en base a polímeros que, al mismo tiempo que impiden la evaporación del agua, se ha comprobado que reaccionan con la capa superficial (algunos mm) del material puesto en obra, dando así una superficie más resistente.

- Juntas

Si el pavimento de HCR va a ser cubierto con una capa asfáltica no se marcará ningún tipo de junta, salvo la transversal de construcción de fin de jornada o alguna exigida por paralizaciones del equipo distribuidor por tiempo superior al período de trabajabilidad.

La junta transversal de construcción se cortará de manera tal que sus paredes queden perfectamente verticales, a una profundidad de 1/5 del espesor. Una práctica usual en Francia, para lograr este propósito es la siguiente: como se trata de una junta de final del día, lo que hacen primero es extender una cuña de hormigón seco para facilitar la salida de los equipos de compactación. Después con una motoniveladora cortan un poco de este hormigón seco y rellenan el espacio adyacente con grava. Estas motoniveladoras dejan los bordes verticales, compactan y al día siguiente, antes de iniciar los trabajos, retiran esta grava sin tratar y la cuña de hormigón seco.

Si el pavimento de HCR no va a ser cubierto, podrá disponerse al corte de juntas transversales de contracción, entre 12 m y 15 m de separación, por los sistemas tradicionales, o permitir que se produzcan libremente sin corte previo.

Si se trabaja por carriles, para evitar la formación de juntas longitudinales en la unión de dos carriles contiguos, se dejará sin compactar, en el primer carril, un cordón longitudinal central con un ancho del orden de los 40 cm, el cual se compactará al ejecutar el segundo carril.

- Sección de ensayo;

Antes de iniciarse los trabajos se debe construir una sección de ensayo, con ancho y espesor igual al de la calzada a pavimentar, y una superficie equivalente al menos a medio día de trabajo. En ella se probará el equipo y se determinará el plan de compactación, de forma tal que se consigan los siguientes grados de compactación:

- Densidad media de la capa, mayor o igual que el noventa y siete por ciento (97%) de la Densidad máxima obtenida en Laboratorio.
- Densidad media en el fondo de la capa, mayor o igual que el noventa y cinco por ciento (95%) de la Densidad máxima obtenido en Laboratorio.
- Valores de medidas individuales de densidad media y densidad en el fondo superiores al noventa y cinco por ciento (95%) y noventa y tres por ciento (93%) respectivamente.

Esta sección de ensayo servirá igualmente para determinar el espesor con que será distribuido el material, de manera de lograr una vez compactada correctamente, el espesor exigido para la estructura definitiva.

Se tomarán muestras de HCR y se analizarán para determinar su conformidad con las condiciones especificadas sobre humedad, porcentaje de cemento, resistencia a tracción por compresión diametral y demás requisitos exigidos.

Si los resultados no son satisfactorios se procederá a la realización de sucesivos tramos de ensayo, introduciendo las oportunas variaciones en planta, en equipos y métodos de trabajo hasta obtener la calidad exigida.

- Controles de calidad;

La finalidad de estos controles es verificar la buena ejecución de la obra, detectando realizaciones defectuosas. Se los clasifica en dos categorías: Controles en planta y controles en obra.

- Controles en planta

Además del correcto calibrado de la planta, sea ésta por pesada o por volumen, y de los controles específicos para cada material acoplado, es importante el control de granulometría de la mezcla. Para ello se tomará material mezclado seco, antes del ingreso del agua, y se determinará su granulometría para compararla con la mezcla granulométrica tipo, realizando las correcciones que corresponden si fuera necesario.

El porcentaje de humedad de la mezcla debe también controlarse en planta, retirando material del camión cargado para su transporte a obra.

La periodicidad de estos dos controles depende del ritmo de avance de la obra, pero en condiciones normales la granulometría debe verificarse tres veces al día, por la mañana, al mediodía y por la tarde. En el caso del porcentaje de humedad, dada la alta sensibilidad del HCR a las variaciones del agua, es conveniente un control estricto. Puede realizarse, por ejemplo, cada hora de trabajo; este intervalo de tiempo variará según la normalidad que se verifique en los valores obtenidos, también debe atenderse a las condiciones climáticas en que se está desarrollando la obra.

Debe tenerse en cuenta que del mismo camión que se retiró material para analizar, se volverá a retirar una vez que éste llegue a la obra, para determinar un nuevo porcentaje de humedad que permitirá valorar las pérdidas que pudieran ocurrir durante el trayecto de la planta a la obra.

Se moldearán probetas con material extraído en planta, para luego de curadas, ensayarlas a rotura a tracción por compresión diametral (con edades de 7 y 28 días), lo que permitirá verificar la calidad estructural de la mezcla.

Queda sobreentendido que todas estas operaciones de control deben realizarse empleando la misma metodología que fue usada en la etapa inicial de evaluación y diseño.

- Controles en obra

Como se expresara anteriormente, se hará con material del mismo camión de donde se extrajo para igual control en planta.

El *control de compactación* se realizará, siempre que sea posible, utilizando registradores gráficos continuos instalados en los equipos de compactación, que permitan controlar la velocidad de avance, la frecuencia de vibración, el tiempo de trabajo y la distancia recorrida.

El *control de la densificación y del porcentaje de humedad* durante la compactación con rodillo se realiza por intermedio de núcleos densímetros, los que permiten medir densidad húmeda y seca del material y el porcentaje de humedad, control que se puede realizar a distintas profundidades dentro del espesor de la capa. El control de densidad de efectuará como mínimo cada 100 metros cuadrados sobre el material compactado en el día, verificando que se cumplan las exigencias indicadas para la sección de ensayo. En el caso del control de la humedad, se efectuarán todos los días un mínimo de cinco determinaciones en correspondencia con las efectuadas en el control de producción.

Se acostumbra controlar también la densidad por el método de la arena, para efectuar las comparaciones de valores obtenidos.

A título indicativo se puede decir que con un descenso del 5% en la densidad, la resistencia desciende en un 25%, y con un descenso del 3%, es decir, si se está en un 97% de densidad, el descenso de resistencia es del 15%, con lo cual también hay que controlar cuidadosamente la compactación obtenida en obra, sobre todo en el caso de carreteras importantes.

El *control de espesores* debe realizarse cada diez metros de longitud, sobre el material sin compactar o con una previa precompactación parcial, mediante un clavo provisto de escala o tope indicador. Se deberá tener en cuenta la disminución que sufrirá la capa debido a la compactación, que fue determinada en la sección de ensayo. Este

control se realiza desde la máquina distribuidora, a medida que ésta avanza, de manera que cualquier error pueda corregirse inmediatamente.

Posteriormente se extraerán testigos con máquina caladora, de 15 cm de diámetro, aproximadamente cada 50 m, en forma alternada para cada carril. Este espesor no debe ser en ningún punto inferior en más de 15 mm al fijado. Los orificios producidos en la losa de HCR por la extracción de testigos serán rellenados con hormigón de igual calidad que el utilizado para la losa, el que será correctamente compactado y enrasado. Además, con estas probetas se deben realizar ensayos a tracción por compresión diametral, para determinar las resistencias a flexión (edad: 28, 60, 90 días), las cuales deben resultar iguales o mayores que las especificaciones para las edades de ensayo. La resistencia a tracción por compresión diametral a 28 días no debe ser inferior a 2,8 Mpa para rutas de tránsito medio, y a 3,3 Mpa para rutas de tránsito pesado.

El *control de curado* consiste en controlar que la superficie de HCR se encuentra saturada de humedad antes del riego con el producto de curado, a los efectos de que éste no penetre en el hormigón terminado.

El *control de regularidad* superficial varía según la terminación que se le dé al HCR. Si la capa de rodamiento consiste en un tratamiento superficial tipo doble, la superficie terminada de HCR no deberá presentar diferencias de más de 5 mm respecto a una regla de 3 m apoyada sobre la superficie en cualquier dirección, y si consiste en una capa de concreto asfáltico en caliente, la superficie terminada de HCR no deberá presentar diferencias de más de 10 mm determinadas en la misma forma.

Las zonas en que no se cumplan las tolerancias antedichas, o que retengan agua sobre su superficie deberán corregirse de acuerdo con lo siguiente:

- El perfilado y recompactación de la zona alterada sólo podrá hacerse si se está dentro del tiempo de trabajabilidad del material.
- Si se hubiera excedido dicho plazo, se reconstruirá totalmente la zona afectada. Se exceptúa el caso en que el incumplimiento de las anteriores tolerancias sea debido únicamente a la existencia de puntos altos, los cuales entonces podrán ser eliminados empleando equipos con elementos abrasivos
- Si la rasante de HCR queda por debajo de la teórica en más de las tolerancias admitidas, se reconstruirá la zona afectada, o se incrementará el espesor de la capa inmediatamente superior.

1.4. Sostenibilidad del hormigón.

Desarrollo Sostenible es aquel que satisface las necesidades actuales sin poner en peligro la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades [5].

La Construcción Sostenible puede entenderse como el desarrollo de la Construcción tradicional pero con una responsabilidad considerable con el Medio Ambiente por todas las partes y participantes. Este hecho implica un interés creciente en todas las etapas de la construcción, considerando las diferentes alternativas en el proceso, en favor de la minimización del agotamiento de los recursos, previniendo la degradación ambiental o los prejuicios, y proporcionando un ambiente saludable, tanto en el interior de los edificios como en su entorno.

El proceso de fabricación de los materiales de construcción, así como de los productos de los cuales muchos están formados, ocasiona un impacto ambiental. Este impacto tiene su origen en la extracción de los recursos naturales necesarios para su elaboración, incluyendo el proceso de fabricación y el consumo de energía, que deriva en emisiones tóxicas a la atmósfera.

No obstante la industria de la construcción, debido a su alto nivel de producción en términos globales, debe enfrentarse a ciertos problemas de gran trascendencia social: económico-energéticos (uso de combustibles fósiles cada vez más caros y escasos) y ecológicos (1 T. Cemento \approx 1.5 T Materias primas \approx 0.8 T. CO₂). Así, se estima que entre el 6-7% de las emisiones totales de CO₂ a la atmosfera a escala mundial se deben a la industria cementera.

Por otro lado, hay que tener presente que los hormigones elaborados hasta el momento, en base cemento Portland presentan algunos problemas de durabilidad (ataque por sulfatos, corrosión de armaduras, reacción árido-álcali, baja resistencia al fuego, etc.) de difícil solución, lo cual hace que un 40-50% del presupuesto de la industria de la construcción este destinado a reparaciones. Todo ello hace que la búsqueda de materiales cementantes alternativos, que disminuyan las emisiones de CO₂ a la atmósfera y que además mejoren algunas de las prestaciones ante las cuales se ha visto que el cemento Portland presenta deficiencias, sea este uno de los principales objetivos de la comunidad científica que lleva ya años trabajando en el desarrollo de materiales y tecnologías que permitan avanzar hacia un desarrollo de la industria de la construcción más sostenible. Tal es el caso de los hormigones sostenibles.

Para obtener un hormigón sostenible, no solamente hay que conseguir la sustitución parcial del cemento por materiales activos, sino que también se debería trabajar en el empleo de áridos reciclados, o en el caso de llevar armaduras, se debería investigar en que su proceso de fabricación no fuera tan contaminante.

Cierto es si decimos que hasta el momento no se ha logrado conseguir un hormigón totalmente sostenible, es decir, no contaminante. Pero sí se ha conseguido reducir la cantidad de cemento sustituyéndola por adiciones como escorias de alto horno, cenizas volantes o filler calizo obteniendo de este modo un hormigón con correctas características físico-mecánicas y con menor porcentaje materiales con mayor impacto ambiental.

1.5. Hormigones sostenibles con materiales hidráulicos activados alcalinamente.

1.5.1. Desarrollo histórico de los cementos y hormigones obtenidos por activación alcalina.

El primer uso de disoluciones alcalinas para la obtención de materiales cementantes que se conoce data de 1930, por el investigador alemán Kuhl, el cual estudió el endurecimiento de cenizas molidas con hidróxido potásico. Posteriormente, A. O. Purdon (1940) [6] midió la reactividad de escorias utilizando hidróxido sódico y potásico e hizo el primer estudio sobre cementos sin clinker a partir de escorias y disoluciones alcalinas (mezclas de hidróxidos y sales alcalinas). En 1957, V. D. Glukhovsky [7] descubrió la posibilidad de obtener materiales cementantes a partir de aluminosilicatos con bajo o ningún contenido en calcio y disoluciones alcalinas. Dicho autor, hizo una importante distinción entre dos tipos de materiales: $M_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ y $M_2O-MO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$, basados en la misma tecnología pero con distinta química. En 1981, J. Davidovits [8] produjo materiales cementantes a partir de la activación alcalina de caolín calcinado, caliza y dolomía, obteniendo materiales del primer tipo descrito por Glukhovsky. En 1994, Krivenko [9] comprobó que en medios acuosos suficientemente alcalinos, sales alcalinas, silicatos y aluminosilicatos (de origen natural o artificial) y en ausencia de Calcio, reaccionaban para dar lugar a un material resistente al agua y de naturaleza similar a las zeolitas y micas.

1.5.2. Aspectos químicos

A pesar de existir un gran parecido a nivel composicional con los cementos tradicionales, existen diferencias notables a nivel estructural. Los productos de reacción de los cementos Pórtland son silicatos cálcicos hidratados (también

denominados gel CSH) y Portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$, mientras que los cementos obtenidos por activación alcalina, se caracterizan por tener una estructura tridimensional polimérica de tetraedros de Al^{3+} y Si^{4+} , mayoritariamente amorfa, y en cuyos huecos se sitúan cationes monovalentes (Na^+ o K^+ principalmente) cuya misión es la de neutralizar la carga negativa asociada a los tetraedros de Al^{3+} .

Existen dos tipos en función de la ausencia o presencia (en bajas concentraciones) de Calcio:

a) $\text{M}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$

Dicho sistema se caracteriza por su ausencia de Calcio y comúnmente se les conoce por el nombre de Cemento de suelo (V.D. Glukhovsky [7]), geopolímeros (J. Davidovist [8]), geocementos (Krivenko [9]). Se obtienen a partir de la mezcla de aluminosilicatos (sin Calcio) (arcillas, generalmente caolín o metacaolín, o cenizas volantes sin calcio) y disoluciones alcalinas.

b) $\text{M}_2\text{O}-\text{MO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$

Sistemas que incorporan Calcio en bajas concentraciones en la red tridimensional y suelen denominarse cementos activados alcalinamente y suelen obtenerse a partir de mezclas de aluminosilicatos (con Calcio) (como escorias o cenizas volantes) y disoluciones alcalinas. En ocasiones, si el contenido en Calcio es muy elevado se pueden formar mezclas de estructuras (características de estos sistemas y de los geles CSH).

En cuanto a la reacción química que se produce, podría esquematizarse de la siguiente forma [3]:

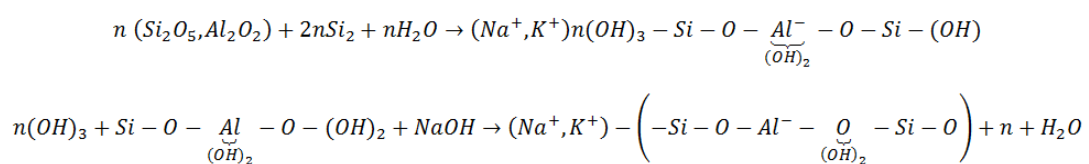


Figura 1. Reacción de activación alcalina de aluminosilicatos

Dicha reacción es característica del primer tipo (Geopolímeros) y describe un primer proceso de disolución de los aluminosilicatos en un medio alcalino y con un aporte extra de silicio (que puede ser proporcionado por un silicato). A continuación los monómeros de Si y Al condensan formando unidades discretas de (dímeros, trímeros) también denominados precursores geopoliméricos. Estos van creciendo en número y concentración, y condensando entre ellos para finalmente dar lugar a estructuras cada vez más complejas a lo largo del espacio. Dicho proceso es tan rápido que no da

tiempo a estas estructuras a organizarse en forma cristalina, dando lugar a estructuras amorfas (partículas acomodadas en forma irregular). Si las condiciones fuesen propicias (en medios acuosos con exceso de álcali y suficiente tiempo) dichas estructuras evolucionarían hacia estructuras zeolíticas. Sin embargo, la estructura amorfa es la que confiere las propiedades mecánicas y de durabilidad características de este tipo de material cementante.

A nivel calorimétrico se distinguen tres etapas que podemos denominar como se indica en la figura y que coinciden con lo descrito anteriormente.

1. Etapa de disolución. Fuertemente exotérmica. Debida a la disolución de los aluminosilicatos de partida.
2. Etapa de nucleación. Periodo de inducción, durante el cual no se intercambia calor. Durante la cual se están formando unidades discretas o precursores.
3. Etapa de policondensación. Exotérmica. Se produce la precipitación del material y se forman por condensación de los precursores formados en la etapa anterior, estructuras tridimensionales y amorfas.

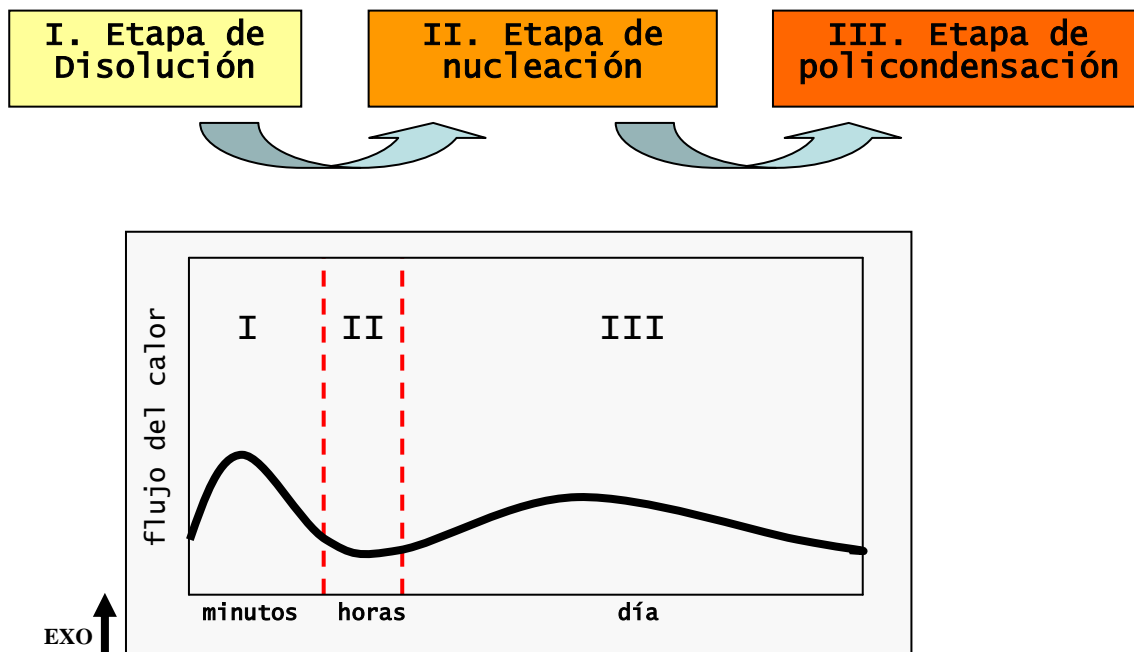


Figura 2. Proceso calorimétrico de la reacción de activación alcalina.

El calor de reacción es dependiente de la concentración de álcali, relación agua/sólido y temperatura. El periodo de inducción y el calor total desprendido en la reacción aumenta con la concentración de activador alcalino y la relación agua/sólido. Por otro lado, el periodo de inducción se acorta al aumentar la temperatura.

Escorias como material hidráulico:

Los cementos y hormigones de escoria de alto horno activados alcalinamente [11], han sido y son objeto de estudio por parte de un gran número de investigadores. Estos cementos y hormigones se caracterizan por presentar una serie de ventajas frente a los cementos Portland tradicionales como por ejemplo, más rápidas y mayores resistencias mecánicas, menor calor de hidratación [12], mejor impermeabilidad y comportamiento frente a la carbonatación, mayor resistencia a altas temperaturas [13], mayor resistencia al ataque químico, mayor resistencia de la interfase árido-matriz, mayor protección de las armaduras metálicas, resistencia bacteriológica y biocida, etc. No obstante estos cementos y hormigones también presentan algunas desventajas respecto a los portland tradicionales, tales como un fraguado más rápido, una mayor formación de microfisuras y variabilidad en las resistencias.

La producción de escorias de alto horno en España se sitúa alrededor de unos 5 millones de toneladas/año. De esta escoria sólo una pequeña parte (un 20%) se granula para ser utilizada como adición al cemento (dando lugar a los cementos denominados tipo II, III y V de acuerdo a la norma UNE-80 301 88; Cementos. Definiciones, clasificación y especificaciones). La mayor parte de la escoria queda almacenada cerca de las plantas siderúrgicas, creando importantes problemas de tipo ecológico.

La activación alcalina de escorias para la fabricación de cementos y hormigones, aparte de producir unos materiales con unas adecuadas características tecnológicas, tiene también un gran interés tanto desde el punto de vista económico como ecológico. Económicamente, la fabricación de cementos de escorias activadas alcalinamente presenta, frente al proceso de clinkerización del cemento Portland, una reducción de hasta un 80% en los costes de producción.

Ecológicamente, el beneficio es doble por un lado, se da salida a un subproducto industrial, cuyo almacenamiento crea serios problemas y por otro, se evita la destrucción de canteras naturales para obtener materias primas.

Cenizas volantes como material hidráulico:

Las cenizas volantes, empleadas adecuadamente, constituyen una adición activa que puede mejorar las propiedades durables y mecánicas de los hormigones en la mayoría de los casos.

La incorporación de cenizas volantes afecta las propiedades del hormigón fresco y endurecido. Las variaciones de ambos estados pueden afectar a la durabilidad del hormigón. Las propiedades más valoradas de los hormigones con cenizas volantes en estado fresco son su mayor docilidad [14], lo que permite relaciones agua/cemento más bajas, y la reducción en el calor de la hidratación por la disminución del contenido de cemento. Al endurecer desarrollan bajas resistencias a edades tempranas [15], pero su resistencia al largo plazo suele ser igual o mayor a la de los hormigones equivalente sin cenizas. Esto se debe a la lenta velocidad de la reacción puzolánica de las cenizas, que va aumentando la formación de compuestos hidratados y densificando la microestructura a medio plazo (28-180 días).

1.5.3. Aplicaciones y especificaciones

Dichos materiales han sido empleados principalmente como materiales de construcción (hormigón estructural, ladrillos de albañilería, tuberías...) y para el encapsulamiento de residuos radiactivos.

En la antigua Unión Soviética se han desarrollado 60 especificaciones y normas relacionadas con el desarrollo de cementos y hormigones de esta naturaleza y que abarcan desde materias primas, cementos, hormigones y estructuras, así como producción de cementos de escorias activadas alcalinamente. Sin embargo, esta normativa no se ha extendido a otros países.

Actualmente se ha creado un Comité Técnico de Activación Alcalina (CTAA), enmarcado dentro del RILEM (Asociación técnica que desarrolla el conocimiento de las propiedades de materiales y funcionamiento de estructuras), en el cual se ha formado un grupo de trabajo encargado del aspecto normativo de estos nuevos cementos y hormigones.

1.5.4. Ventajas e inconvenientes de este material.

Muchas son las ventajas que presentan estos materiales, aunque todavía quedan algunos inconvenientes por resolver, tales como:

- Eflorescencias, debido a la carbonatación de los álcalis por reacción con el CO_2 atmosférico.
- Retracción en el secado de las piezas, que generalmente aumenta con el decrecimiento en el contenido de CaO .
- Se necesita más investigación sobre el efecto de la reacción agregados-álcalis y la expansión que puede producir. Dicho efecto dependerá de la naturaleza del árido.

1.5.5. Normativa y especificaciones para cementos y hormigones activados alcalinamente y sus productos.

Actualmente no existe normativa europea que regule los cementos de escorias activados alcalinamente. La única normativa existente que regula este tipo de cementos es de la antigua URSS y de la actual Ucrania.

Recientemente se ha creado un Comité Técnico de Activación Alcalina (AATC) enmarcado en el RILEM, cuya finalidad es la de dar soporte a este tipo de materiales. Se han creado tres grupos de trabajo, uno de los cuales se dedicará al desarrollo de normativa, partiendo de la normativa existente y vigente en Ucrania.

A continuación se describe la normativa existente sobre:

Especificaciones para activadores alcalinos

Una condición necesaria para que un compuesto alcalino sea válido para su uso como activador es que tras su disolución en agua de lugar a una disolución alcalina. Normalmente se emplean productos comerciales ampliamente conocidos y ya descritos, pero también pueden utilizarse residuos industriales descritos y clasificados por Glukhovsky [10] en cuatro grupos:

- Grupo I. Aquellos que no necesitan pretratamiento antes de su uso.
- Grupo II. Baja concentración de álcalin, requieren preconcentración y eliminación de residuos tóxicos.
- Grupo III. Se encuentran en forma de lodo y deben utilizarse después de la eliminación de compuestos tóxicos.
- Grupo IV. Procedentes generalmente de la obtención del aluminio.

Existen diferentes especificaciones que regulan su uso [16,17,18,19,20]

La preparación de las disoluciones alcalinas se regula en la norma RST 5024-83 (1983) y OST 67-11-84 (1984). La dosificación del activador se controla en función de la densidad del activador y esta a su vez la resistencia del cemento u hormigón, por tanto la densidad del activador alcalino debe ser controlada, teniendo en cuenta la humedad del árido, tal como especifica la norma RSN 336-84 (1984).

Especificaciones para hormigones de escorias activadas alcalinamente.

Se pueden obtener hormigones para todos los usos a partir de escorias activadas alcalinamente. Existe normativa que proporciona los requisitos necesarios para su obtención en función de la resistencia requerida y los clasifica en función de la misma.

Estos hormigones también se clasifican en función de su resistencia a la helada, permeabilidad, deformación, retracción...

Se puede utilizar como árido grueso grava o piedra molida, arena como árido fino, arena ultrafina o residuos industriales en menos del 25% del total de peso. Polvo o arcillas como finos siempre que no excedan del 5%. El empleo de áridos que contengan yeso o anhidrato no está permitido.

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo de este trabajo es la evaluación preliminar de la viabilidad técnica de dos formulaciones de Hormigón elaborados con residuos activados alcalinamente para el desarrollo de firmes de carretera compactados a rodillo de bajo impacto ambiental.

Los materiales empleados son residuos de cantera como cenizas, volantes o escorias, o materiales naturales como el filler calizo. El hormigón elaborado para dicha finalidad deberá cumplir las características mínimas exigidas por la normativa que rige los firmes y ser tecnológicamente viable. Continuamente se trabajará con dos tipos de dosificaciones; una con ceniza volante como adición para mayores resistencias y otra con filler calizo para obtener hormigón blanco y de esta forma poder en un futuro adquirirle el color deseado mediante pigmentos.

Para lograr este objetivo, se han seguido las siguientes etapas fundamentales;

- Una primera etapa que consiste en la obtención de una dosificación optimizada para las características necesarias a partir de una dosificación de referencia. Para ello se realizarán todo tipo de ensayos modificando la dosificación en caso que sea necesario.

- Una segunda etapa en la que se realicen los mismos ensayos pero empleando el activador junto con los materiales hidráulicos, en lugar del cemento Portland o convencional.

- Una tercera etapa que consiste en la valoración de los resultados planteando soluciones a los posibles resultados adversos.

3. MATERIAS PRIMAS

3. MATERIAS PRIMAS

Para llevar a cabo este proyecto se ha utilizado, ceniza volante (CV), escorias de alto horno (GGBFS), filler calizo (FC), áridos convencionales de naturaleza caliza y silicia, agua potable y un activador alcalino. El tipo de material y la procedencia se adjunta en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipología y procedencia de materiales.

Material	Tipo	Procedencia
Escoria Granulada Molidad de Altos Hornos (GGBFS)	Residuo industrial	ORCEM (Holanda)
Ceniza Volante Silicea (CV)	Residuo industrial	Central Térmica Andorra (Teruel)
Filler calizo (FC)	Adición inerte	Omyacarb Clariana S.A.
Grava rodada 11/22	Árido Calizo	Gravera Castellana
Grava rodada 8/12		
Grava rodada 4/8		
Arena 0/4 Triturada		SOINVAL
Arena 0/1	Árido Silíceo	Áridos Cervera
Carbonato sódico	Activador alcalino	Sigma Aldrich
Silicato sódico		
Hidróxido sódico		

3.1. Activadores alcalinos

Como activadores alcalinos se puede utilizar cualquier álcali cáustico o sal alcalina. Glukhovsky [10] los clasificó en 6 grupos:

- Álcalis cáusticos: MOH
- Sales de ácidos débiles (no silicato): M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4 , MF...
- Silicatos: $M_2O.nSiO_2$
- Aluminatos: $M_2O.nAl_2O_3$.
- Aluminosilicatos: $M_2O.Al_2O_3.(2-6)SiO_2$
- Sales de ácidos fuertes (no silicatos): M_2SO_4

De todos ellos los más utilizados por su disponibilidad y por su coste son: NaOH, Na_2CO_3 , $Na_2O.nSiO_2$ y Na_2SO_4 . Algunos autores apuntan la utilización de los compuestos de Potasio en lugar de Sodio por tener mejor comportamiento frente al fuego, pero como no es el caso que nos ocupa debido al uso final de los hormigones que se van a desarrollar en este proyecto, nos centaremos en los compuestos de sodio por ser más económicos y encontrarse más disponibles en el mercado.

En este proyecto se han utilizado como activadores el hidróxido sódico, el carbonato sódico y el silicato sódico.

3.1.1. Hidróxido Sódico

Es uno de los reactivos químicos más utilizados en la industria química y se puede encontrar en el mercado en forma líquida, sólida, polvo, lentejas...

Este compuesto tiene un punto de fusión de 318 °C, con una solubilidad de aproximadamente el 53% a 20°C. Su disolución libera una gran cantidad de calor (proceso exotérmico) por lo que se requieren ciertas precauciones si se prepara una disolución en grandes concentraciones (añadir la sosa sobre el agua (30-40 °C), lentamente y en agitación continua). También aumenta su viscosidad con la concentración (1.72 cp al 10%, 4.5 cp al 20%) y disminuye ligeramente con la temperatura.

Dicho compuesto se ha utilizado para acelerar la reacción de hidratación de los cementos, pero disminuye la resistencia a 7 y 14 días.

3.1.2. Carbonato sódico

Consiste en un polvo blanco con un 58% de Na₂O (comercial). Su obtención puede ser a partir de fuentes naturales (minerales con distinta proporción) o sintético (el proceso más extendido es el de Solvay). Se encuentra en diversas formas: anhidro e hidratado (con 1, 7 o 10 moléculas de agua).

Su solubilidad depende de la temperatura. Se alcanza su solubilidad máxima (33%) a 35.4 °C.

El Na₂CO₃ anhidro desprende calor al disolverse (más calor cuanto mayor es la concentración), mientras que el hidratado absorbe calor.

La densidad disminuye con la temperatura y con la concentración

Este compuesto se utiliza como aditivo al cemento convencional. Si la dosificación es baja, actúa como acelerante, y si esta es alta, actúa como retardante. También actúa como activador alcalino de materiales cementantes.

3.1.3. Silicato sódico

Es el nombre genérico de una serie de compuestos con la fórmula $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$. Dicho valor, n , puede ser variable y en los silicatos comerciales varía entre 1,6 y 3,85. Fuera de este intervalo la disolución no es estable.

Dicho producto también se denomina “water glass” y se utiliza como pegamento, cemento, pinturas, detergentes, endurecedor de piedra artificial y natural....

Sin embargo, sus propiedades son muy sensibles a su composición y requieren unas condiciones de almacenamiento adecuadas. Si dichas condiciones no son apropiadas, su aplicación puede afectar considerablemente a las propiedades del producto final.

El proceso de fabricación consiste en fundir arena y carbonato sódico a temperaturas 1350-1450 °C y el vidrio se disuelve en un autoclave a 140-160 °C bajo condiciones de presión controlada. Teóricamente SiO_2 y Na_2O se puede combinar en cualquier proporción, sin embargo las comerciales se encuentran entre 1,6 y 3,85. Una proporción superior tiene baja solubilidad y por debajo es muy inestable.

El silicato sódico es ampliamente utilizado como un acelerador en hormigones convencionales. También es un efectivo activador alcalino de materiales cementantes.

3.2 Escorias de alto horno.

Definición EN 197-1: Las escoria granulada de alto horno (E) se obtiene por enfriamiento rápido de la escoria, residuo de la extracción del hierro, constituida al menos 2/3 de su masa por escoria vítrea y posee propiedades hidráulicas cuando se activa de manera adecuada.

$$(\text{CaO} + \text{MgO}) / \text{SiO}_2 \geq 1$$

La escoria de alto horno [21] se produce cuando el mineral de hierro se reduce a coque alrededor de los 1350-1550 °C en los altos hornos. El hierro fundido, es el producto principal de un alto horno y se forma a partir del mineral, mientras que los otros componentes forman una escoria líquida. En su trayecto hacia la parte inferior del horno, la escoria líquida forma una capa por encima del hierro fundido debido a que la escoria tiene una menor densidad. Después de haber sido separada del hierro fundido, la escoria líquida se enfría al aire o con agua y se prepara para su uso posterior. Normalmente, alrededor de 220 a 370 kilogramos de escorias de altos hornos son producidas por tonelada de arrabio.

La escoria empleada en este proyecto, fue importado de Holanda, procedente de la empresa Orcem B.V.

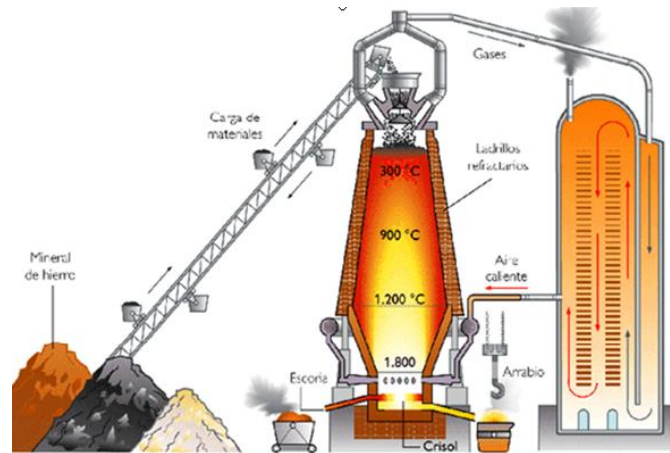


Figura 3. Obtención de la escoria de alto horno.

3.2.1. Composición química de las escorias de alto horno:

Como se ha dicho, se generan durante el proceso de obtención del hierro y por ello su composición varía en función del tipo de mena utilizada y la operación del sistema de horno. Por tanto, no existe una composición fija y puede variar considerablemente según su procedencia. Puede ser representada en función del diagrama cuaternario $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$.

Está formada por silicoaluminatos ricos en CaO [22], son silicatos y aluminosilicatos de calcio y magnesio, algunos idénticos al C_2S y otros similares a los del clínker portland, que poseen propiedades hidráulicas cuando se activan de manera adecuada. Aportan resistencia mecánica a largo plazo; y además dan compuestos hidratados menos vulnerables a los ataques químicos (SO_4^{2-} y Mg^{2+}).

La activación de las escorias puede realizarse de tres formas diferentes: activación sulfática, activación alcalina y activación cemento portland (la más habitual).

En la tabla 2 y figura 4 se muestran respectivamente la composición química y mineralógica de la muestra original de escoria GGBFS. De acuerdo a los requerimientos establecidos en la norma EN 197, la suma de CaO , MgO y SiO_2 (81.8%) es al menos dos tercios del total y la relación $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$ es superior a 1 (1.9). Por otro lado, también se cumple el requerimiento de que el contenido de material vítreo es al menos dos tercios de la composición total, tal y como se muestra en el difractograma de la figura 4.

Tabla 2. Composición química de la escoria GGBFS

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	ZrO ₂	BaO	SrO	S ²⁻	PC
34.7	13.1	0.5	39.3	7.8	0.3	0.5	0.7	0.4	0.1	0.1	0.1	1.2	>0

PC: Pérdida por calcinación

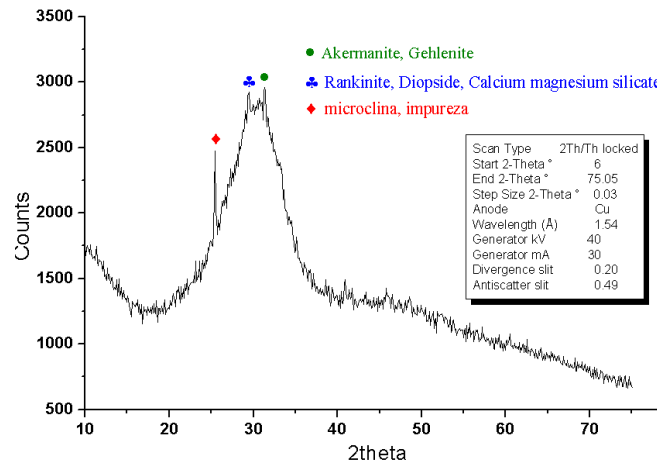


Figura 4. Diffractograma de la muestra GGBFS

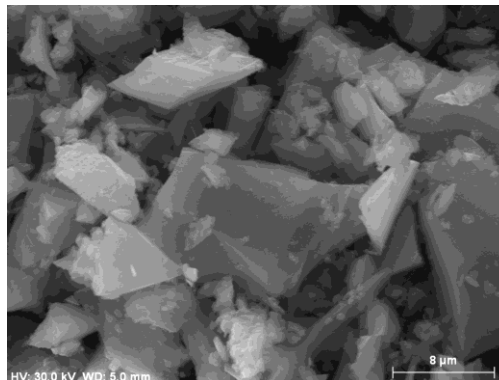


Figura 5. Imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido de las muestras de escoria GGBFS

3.2.2. Clasificación de las escorias de alto horno:

- Escorias enfriadas.

La escoria es producida mediante un enfriado parcial con agua y más tarde aireando el material. Este tipo tiene una mayor forma vidriada a la anterior, alrededor de un 50%. Se suele emplear en el cemento como materia prima.

- Escorias enfriadas lentamente.

Este tipo de enfriamiento produce escorias con un contenido en fase amorfa. Existen varios métodos de enfriamiento. El más ampliamente utilizado en la actualidad es el pelletizado y consiste en enfriar con agua y después arrojarlo dentro de un tambor que gira a 300rp. De esta forma se consigue reducir el consumo de agua por tonelada producida (a 1 m³), la energía de producción y disminuir el porcentaje de humedad.

- Escorias enfriadas rápidamente.

Dichas escorias tienen un porcentaje de fase cristalina muy importante (95%) y su composición mineralógica depende de su composición química. De todas las fases cristalinas posibles que pueden formarse, tan solo la β -CS₂ tiene propiedades hidráulicas, por lo que dicho material no funciona bien como cemento hidráulico pero si como agregado, ya que tiene unas propiedades mecánicas parecidas al basalto. Normalmente, las más empleadas para su uso en hormigones son las escorias granuladas molidas de alto horno (GGBFS, de su denominación en inglés "ground granulated blastfurnace slag"), estas se obtienen de saciar la escoria líquida con gran cantidad de agua para producir granulados como la arena y molidas a polvo fino. En este proyecto se emplearán este último tipo de escorias.

- Propiedades de la GGBFS.

Los óxidos principales en las GGBFS [16] son la cal (CaO), silicatos (SiO₂), alúmina (Al₂O₃), magnesia (MgO) y otros más en menores cantidades. Mientras que la composición de GGBFS puede variar de un alto horno a otro, la composición de un mismo horno se mantiene constante. Si lo comparamos con la composición típica del clinker, generalmente las GGBFS contienen menor cantidad de cal, y mayor de sílica, alúmina y magnesia que el clinker.

La escoria es conocida por tener la propiedad de hidraulicidad latente, esta reacciona con el agua, pero solo a un ritmo tan lento que es normalmente mezclado con otras sustancias llamadas activadores, que pueden acelerar notablemente la reacción de la escoria.

Algunos de los activadores se pueden tomar simplemente como catalizadores de la reacción de la escoria, ya que son altamente solubles y difícilmente pueden reaccionar con los óxidos en la escoria para formar productos sólidos.

En cuanto a la normativa existente para determinar la actividad hidráulica de las escorias, existen dos normas ASTM (American Society for testing and material), la ASTM C 597 donde se determina su actividad en morteros de cemento Pórtland con sustitución parcial de escoria y se compara con morteros de cemento Pórtland, y la ASTM C 1073, donde se obtienen probetas de morteros de 100% de escoria según la norma ASTM C 109 pero sustituyendo el agua por una disolución del 20% de NaOH, lo que da lugar a una relación agua cemento igual a 0.45 en peso.

El descubrimiento del potencial hidráulico de las escorias de alto horno molidas (GGBFS) se produjo en Alemania en 1862 por parte de Emil Lancen. Ya en 1865 se produjeron comercialmente escorias activadas alcalinamente con cal, y 1880 cuando se combinaron con cemento portland [23]. En 1945 comenzó a emplearse, en el mercado alemán, como conglomerante debido a una escasez de cemento portland y desapareció a principios de la década 70. Sin embargo, una nueva investigación muestra que este cemento supone una buena oportunidad para reducir las emisiones de CO₂ y producir un conglomerante sostenible y ecológico con aplicaciones prácticas.

Las escorias de alto horno tienen una composición química y una constitución mineralógica tales que les confieren una hidraulicidad latente, esto es, una capacidad de fraguar y endurecer por sí mismas, sobre todo cuando se someten a un proceso de activación que se puede producir por medio de dos tipos de agentes activadores: los álcalis y los sulfatos. Por tanto, aportan resistencia mecánica a largo plazo; además dan productos de hidratación menos vulnerables a los ataques del agua de mar: sulfatos y aguas magnésicas [24].

3.2.3. Influencia de las escorias de alto horno sobre las propiedades del hormigón:

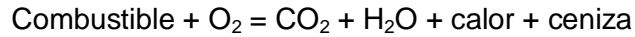
- Disminuye el calor de hidratación
- Aporta resistencia mecánica a largo plazo
- No vulnerable frente a ataques químicos (SO₄²⁺, Mg²⁺)
- Baja permeabilidad

3.3 La ceniza volante.

Las cenizas volantes son los residuos sólidos que se recogen por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de

combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas por carbones pulverizados [25].

Es decir, es el material incombustible que queda después de la reacción de combustión tal y como se muestra en la siguiente reacción:



Se denomina ceniza volante a cualquier partícula recogida de los gases producidos en los hornos industriales alimentados por combustibles sólidos. Las propiedades de las CV dependen de la naturaleza del combustible, de la velocidad de enfriamiento de la ceniza, y del tamaño, tipo y temperatura del horno.

La primera referencia sobre su uso se remonta a los años 30 en EEUU por una parte, y por otra, la primera aplicación a gran escala fue en el año 1948, cuando se usó en la construcción de la presa de Hungry Horse. Desde entonces, su uso fue creciendo de una manera espectacular, hasta llegar a ser la puzolana artificial más empleada en la construcción en las últimas dos décadas.

El uso de cenizas volantes [26] como adición del hormigón está ampliamente extendido por dos razones: el ahorro económico que supone la reducción del cemento empleado y los cambios microestructurales motivados por la adición. Sobre este segundo punto existe consenso en considerar que las cenizas generan un hormigón más compacto y una reducción del tamaño medio del poro.

En este proyecto, se da una salida a este producto residual cuyo volumen es importante y creciente (2008, 194.421 toneladas de escoria producida) y así facilitar un futuro aprovechamiento, además de reducir su impacto ambiental.

El tipo de ceniza volante empleado es el tipo F son clasificadas de este modo por la norma UNE debido a su bajo contenido en calcio y su procedencia de la Central Térmica de Andorra, cuya composición química se presenta en la siguiente tabla.

3.3.1. Composición química de las cenizas volantes:

La ceniza volante está formada mayoritariamente por SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , aunque también contiene otros compuestos tales como CaO , MgO , MnO , TiO_2 ... Su pérdida al fuego se produce debido a la descomposición de los carbonatos presentes, a la pérdida de agua combinada presente en el CaO hidratado y en las arcillas residuales,

a la oxidación se sulfuros y a la combustión de carbón libre (inquemado). Asimismo, la presencia de éste último depende de los siguientes factores:

- Velocidad y temperatura de combustión.
- Granulometría del carbón (combustible)
- Relación entre combustible y comburente
- Tipo de carbón

El contenido de las cenizas volantes oscila entre 0.5-12%, y es el responsable de absorber los aditivos, aumentar la demanda de agua y de dotar al hormigón de energía.

En la tabla 3 se muestra la composición química de la muestra original de las cenizas volantes y en la Figura 6 la micrografía de las cenizas volantes.

Tabla 3. Composición química de las Cenizas Volantes

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
42.7	27.10	19.00	4.99	1.18	0.20	1.39

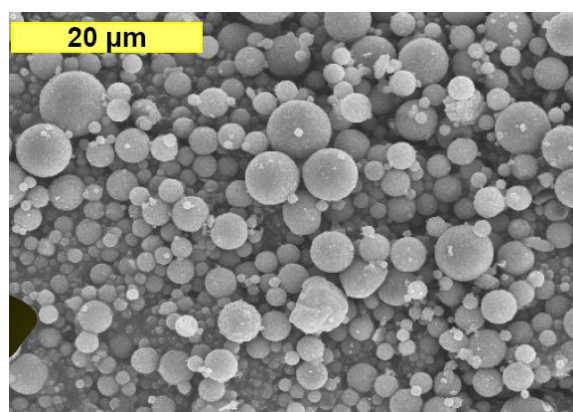


Figura 6. Micrografía de cenizas volantes.

3.3.2. Clasificación de las cenizas volantes:

Las cenizas volantes se pueden clasificar en dos tipos:

- Las denominadas clase F, silicoaluminosas o puzolánicas tienen un contenido de óxido de calcio menor del 10%; además de que la suma de óxidos de sílice, de aluminio y de hierro es superior al 70%.
 - $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 > 70\%$
 - $CaO < 10\%$

- Las denominadas clase C, sulfocálcicas o autocementantes tienen un contenido en óxido de calcio superior al 10%, pero la suma de óxidos de sílice, aluminio y hierro se sitúa por debajo del 70%.

- $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 < 70\%$
- $\text{CaO} > 10\%$

3.3.3. Influencia de las CV sobre las propiedades del hormigón:

- Con el incremento del tiempo, se desarrollan mayores resistencias que el concreto sin cenizas.
- Las cenizas no influyen negativamente en el comportamiento estructural de las piezas de hormigón.
- El hormigón es más liviano, menos permeable y con un mejor acabado.
- El calor de hidratación [27] se reduce.
- Los áridos derivados de la ceniza muestran una excelente adhesión en hormigones, contribuyendo favorablemente a su comportamiento y durabilidad.
- Adquiere resistencia al ataque del sulfato y a la reacción sílice-álcali.
- Incompatibilidad con algunos cementos y productos químicos aditivos puede causar un endurecimiento prematuro de la masa

3.4 El filler calizo

El filler calizo se define por un carbonato cálcico natural molido, fabricado a partir de una caliza marmórea de gran pureza química, procesada con equipos de alta tecnología, que permiten obtener, por vía seca, un filler de altas especificaciones técnicas, muy uniforme, de elevada blancura y baja absorción en aceite [25].

El filler otorga sustancialmente al hormigón fluidez, resistencia a la segregación y resistencia a compresión, no manifestando un efecto negativo en la retracción. La mejora de las resistencias es debida a que la finura del filler calizo aumenta la densidad del hormigón.

En este proyecto se emplea para obtener hormigón blanco ya que de este modo absorberá menor temperatura, tendrá un menor deterioro y por lo tanto se obtendrá un mayor periodo de vida tanto a los pavimentos como a los neumáticos que circulen sobre el mismo.

El filler calizo empleado para este proyecto ha sido suministrado por la empresa OMYA CLARIANA S.L.U. De entre toda la variedad que esta empresa ofrece se ha escogido el OMYACARB-10-BE.

3.4.1 Influencia del filler calizo sobre las propiedades del hormigón:

- Trabajabilidad
- Segregación
- Exudación
- Aire ocluido
- Densidad
- Calor de hidratación
- Retracción
- Durabilidad

3.5. Los áridos

El árido cumplirá las prescripciones del artículo 610 del PG3 (Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes). Para las arenas que no cumplan con la especificación del equivalente de arena, se exigirá que su valor de azul de metileno, según la UNE-EN 933-9, deberá ser inferior a seis para obras sometidas a clases generales de exposición I, IIa o IIb, definidas en la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE) o bien inferior a tres para el resto de los casos.

Los áridos no serán susceptibles de ningún tipo de meteorización o alteración física o química apreciable bajo las condiciones más desfavorables que, presumiblemente, puedan darse en el lugar de empleo. Tampoco podrán dar origen, con el agua, a disoluciones que puedan causar daños a estructuras u otras capas del firme, o contaminar el suelo o las corrientes de agua.

Tabla 4.- Áridos empleados

Áridos	Tamaño (mm)	Composición	Procedencia
G1	11/22	Caliza	Graveras Castellana
G2	8/12	Caliza	Graveras Castellana
G3	4/8	Caliza	Graveras Castellana
S1	0/4	Caliza	Graveras Castellana
S2	0/1	Silíceo	Cervera

En la Tabla 4 se muestra las fracciones de grava y arena empleadas así como su procedencia y composición.

En la Figura 7 se representa mediante un gráfico la granulometría empleada, siendo en la tabla 5 donde estos valores quedan plasmados según el pasante acumulado en cada tamiz.

Tabla 5.- Características arenas

CODIGO	50150	50131	MEZCLA
P_{ssd} (mg/m^3)	2.65	2.63	
P_r (mg/m^3)	2.64	2.6	
Absorción (%)	0.3	1.4	
Compacidad	0.61	0.70	
% Humedad	1.52		

Tabla 6- Granulometría arenas

Apertura tamiz (mm)	Pasa acumulado (%)		
	50150	50131	MEZCLA
125	100	100	100
63	100	100	100
40	100	100	100
20	100	100	100
16	100	100	100
8	100	100	100
4	100	100	100
2	100	69	78
1	100	43	60
0.5	88	28	46
0.25	41	20	26
0.125	5	14	11

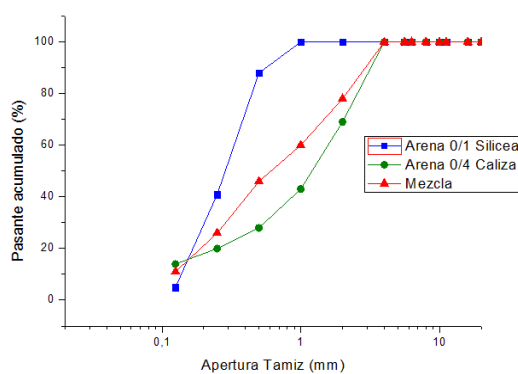


Figura 7.- Granulometrías arenas y mezcla

3.6 El agua

El agua utilizada en los proyectos para la elaboración de amasadas y probetas procede de la red de agua potable que llega al laboratorio de la empresa. El agua cumple las prescripciones del artículo 280 del PG3.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

Los componentes del hormigón se controlan en tres fases:

- Ajuste de la dosificación a partir de exigencias mínimas especificadas en normativa.
- Elaboración y obtención de las muestras de ensayo
- Evaluación de las prestaciones del hormigón en estado fresco y endurecido.

4.1. Diseño de un hormigón compactado con rodillo (Estudios previos).

Para diseñar un hormigón existen distintos métodos que se pueden agrupar en dos conjuntos. Por una parte están aquellos que fijan unas características mínimas a las que llegar, y a partir de estas buscar las cantidades necesarias de material para alcanzar dichas características, y por otra parte encontramos las que a partir de una dosificación tipo, se va corrigiendo hasta alcanzar el nivel de consistencia, trabajabilidad, resistencia...adecuadas para la aplicación deseada [27]. La opción escogida en este proyecto es la segunda.

En base a estudios previos realizados a este trabajo se emplearon formulaciones de materiales aglomerantes de resistencias equivalentes a las aportadas por cementos de categoría resistente 32.5 y 42.5 [9]. Para ello, se empleó una mezcla de los tres activadores (5.78% SiO₂ y un 3% Na₂O), un 30% de escoria granulada molida de altos hornos y un 70% de filler activo o inerte. En este trabajo se evaluó el uso de filler calizo como filler inerte y de ceniza volante como filler activo

En la tabla 6 se resumen los ensayos realizados y las normas aplicadas para tal fin.

Tabla 6. Resumen de ensayos realizados en este trabajo

Ensayo	Norma	Observaciones
Consistencia del Hormigón	UNE EN 12350-2: 2009 [28]	--
Densidad en estado fresco	UNE-EN 103501:1994 [30]	Probetas cilíndricas Ø125mm compactadas mediante apisonado proctor
Obtención de testigos en losa	UNE-EN 12504-1:2001 [31]	--
Resistencia a compresión	UNE EN 12350-3 2009 [29]	Probetas cilíndricas Ø125mm compactadas mediante apisonado proctor según UNE-EN 103501
		Testigos cilíndricos Ø75mm extraído del firme de hormigón
Resistencia a flexo-tracción	UNE 12390-5 2001 [32]	Realizado sobre testigos extraídos de losas de Hormigón de 600x150x150 mm
Retracción	--	Realizado en mortero. Medición en continuo en canales de retracción de Schleibinger Geräte.
Microestructura del hormigón en lámina delgada mediante microscopía óptica	--	--

4.1.1 Dosificación de los áridos.

Los áridos (arenas y gravas) suponen alrededor del 60 al 90% del volumen del hormigón. La selección apropiada del tipo de áridos y su correcta distribución de tamaños afecta directamente a las propiedades del hormigón (trabajabilidad en estado fresco, resistencia mecánica, permeabilidad, durabilidad y coste total), por lo que se trata sin duda de una tarea esencial a la hora de diseñar u optimizar la mezcla de hormigón. Por consiguiente sea cual sea el método escogido, el primer paso para diseñar un hormigón compactado con rodillo, es dosificar de manera adecuada los áridos para obtener el esqueleto granular con el mínimo volumen de huecos, lo que garantiza resistencias más elevadas.

4.1.2 Preparación del activador.

Debido a que el hormigón que se va a emplear es un hormigón activado alcalinamente, es necesario preparar el activador previamente al proceso de amasado. Los compuestos empleados para la elaboración del activador han sido los siguientes:

- Na_2CO_3
- Na_2SiO_3
- NaOH al 50%

El proceso de obtención del activador es el siguiente:

- 1- Se pesa en un recipiente la cantidad de Na_2CO_3 a añadir.
- 2- Se añade al recipiente el agua necesaria para la disolución y se agita hasta homogeneización completa.
- 3- Se cierra el recipiente herméticamente y se deja reposar durante un tiempo.
- 4- Se añade en el recipiente el segundo compuesto, el Na_2SiO_3 . Se agita hasta homogeneización completa.
- 5- Se cierra el recipiente herméticamente y se deja reposar durante un tiempo.
- 6- Se añade en el recipiente el tercer compuesto, el NaOH 50%. Se agita hasta homogeneización completa.
- 7- Finalmente el activador se deja reposar hasta el día siguiente para que se estabilice su temperatura.

4.1.3. Tecnología del mezclado.

El proceso de amasado del hormigón empleado en este trabajo fue el siguiente:

- 1- Se vertieron las gravas y las arenas, junto con la adición empleada en la amasadora.
- 2- Se homogeneizan los áridos durante 30 s en seco.

- 3- A los 30 s se añade el agua de premojado.
- 4- Se deja amasando hasta los 2 min.
- 5- A los 2 minutos se detuvo y se dejó en reposo durante 2 minutos más.
- 6- Durante el periodo de reposo se mezcló el activador con la escoria en un recipiente aparte, agitándose en todo momento para una correcta homogeneización.
- 7- Finalmente, a los 4 minutos se vertió la mezcla y se amasó hasta los siete minutos.

Tabla 7. Proporción de componentes en el Hormigón compactado a rodillo diseñado mediante activación alcalina de residuos

Material	Con Ceniza Volante (%) HCR-CV	Con Filler Calizo (%) HCR-FC
Grava	52.0	51.0
Arena	25.0	24.5
Finos (Escoria Granulada Molida de altos Hornos + filler)	14.0	14.2
Activadores	2.9	2.8
Agua	5.5	6.3

4.1.4. Condición de curado de las probetas

Una vez desmoldadas las probetas, éstas son marcadas con un código e introducidas en la cámara a temperatura (20°C) y humedad (99%) constantes. Las probetas se envuelven con film transparente para que no se deterioren por la zona superficial. Así permanecerán en la cámara hasta el momento de su rotura.

4.1.5. Ensayo de consistencia.

El ensayo de consistencia del hormigón se ha realizado de acuerdo a las pautas establecidas en la norma UNE 12350-2 2009 “Ensayo de hormigón Fresco, Parte 2: Ensayo de asentamiento”.



a) Introducción de masa en tres fracciones.



b) Picado de la masa (25 golpes) introducida.



c) Retirada del cono.



d) Medición de la consistencia.

Figura 8. Procedimiento ensayo de consistencia

Como los resultados que se deseaban conseguir eran de un cono entre 0-2 y del cono de abrahams no se obtuvieron valores fiables debido a la consistencia de la masa, se realizó una prueba adicional empleando la mesa de sacudidas de este modo el hormigón se asienta y se pueden apreciar valores diferentes.

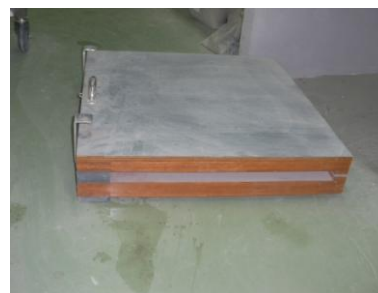


Figura 9. Mesa de sacudidas

La mesa de sacudidas está formada por dos tablas de madera de un espesor aproximado de 4 cm unidas dos bisagras por uno de sus lados. En la parte opuesta unos ángulos a modo de tope, permiten que cuando se ejecute el ensayo sea siempre de igual manera.

El ensayo consiste en realizar el cono de abrahams sobre la superficie de la mesa y una vez producida la retirada del cono, someter el hormigón al asentamiento mediante sacudidas con la mesa. El número de sacudidas debe ser siempre el mismo, normalmente se realiza con 10 y/o 15 golpes.

4.1.6. Compactación de las probetas.

La compactación de las probetas de hormigón se ha realizado de acuerdo a las pautas establecidas en la norma NLT-108/98 "Apisonado proctor modificado". El ensayo consiste en las siguientes fases:

- 1- Pesar y registrar la masa del molde vacío sin collar.
- 2- Determinar la capacidad volumétrica del molde.
- 3- Colocar el molde con su collar sobre la placa base.
- 4- Llenar el molde como se indica:
 - Colocar una capa de material de aproximadamente un quinto de la altura del molde más el collar.
 - Compactar la capa con 56 golpes.
 - Repetir la compactación en 5 capas dejando un exceso de material sobre el borde en la última capa.
- 5- Retirar el collar y enrasar con la regla al nivel del borde del molde. (Véase figura 8b, 8c)
- 6- Pesar el molde con el suelo compactado. Restar el peso del molde para obtener el peso del suelo compactado solo.
- 7- Determinar la densidad húmeda del suelo compactado dividiendo el peso del suelo por el volumen del molde.

Las herramientas empleadas en el Ensayo Proctor Modificado son las siguientes:

- Moldes: son metálicos y de forma cilíndrica, pueden estar constituidos por una pieza completa o hendida por una generatriz, o por dos piezas semicilíndricas ajustables.

- Collar: cada molde lleva un collar de aproximadamente 60 mm de altura, el cual tiene un rebaje de modo que ajusta firmemente al molde y alas para sujetarlo a la placa base.
- Placa base: está constituida por una placa metálica en la que se asegura el molde y el collar, por medio de las alas que éstos tienen, a pernos con tuerca tipo mariposa solidarios a la placa.
- Pisón metálico: es un cilindro metálico con una cara circular de 50 mm y con una masa de 4500 g. Está equipado con una guía tubular para controlar la altura de caída a 460 mm. La guía tiene cuatro perforaciones de 10 mm a 20 mm de cada extremo, separadas en 90°.
- Balanzas: se usan para pesar las muestras de cada ensayo para calcular el contenido de humedad real.
- Regla de acero: se usa para enrasar el suelo al nivel del molde, luego de compactado y extraído el collar.



a) Equipo proctor



b) Retirada del anillo superior.



c) Enrasado de la probeta.

Figura 10. Procedimiento compactación proctor.

4.1.7. Ensayo resistencia a compresión.

El ensayo de resistencia a compresión se ha realizado de acuerdo a las pautas establecidas en la norma UNE EN 12390-3 2009: "Ensayos de hormigón endurecido, Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas".

El procedimiento empleado para la correcta ejecución del ensayo comienza limpiando los platos de carga de la máquina, debiendo retirarse cualquier resto de gravilla u otro material extraño de las superficies de la probeta que han de estar en contacto con los platos.

A continuación se seca la superficie de las probetas a ensayar antes de colocarla en la maquinaria para eliminar el exceso de humedad. Cuando se colocan las probetas se centran respecto al plato inferior con una aproximación de $\pm 1\%$ de la dimensión normalizada del diámetro normalizado de la probeta cilíndrica.

En el equipo se selecciona una velocidad de carga constante dentro del rango de 0.6 ± 0.2 MPa/s ($N/mm^2 \cdot s$). Se aplica la carga inicial, que no debe exceder de aproximadamente el 30% de la carga de rotura. Después de esto, se aplica la carga a la probeta sin brusquedades y se

incrementa continuamente, a la velocidad seleccionada $\pm 10\%$, hasta que no soporte más carga. Se registra la carga máxima indicada en kN.

Una vez producida la rotura de la probeta se analiza que su rotura se encuentre entre las satisfactorias expresadas en la Figura 11, citadas en la norma:

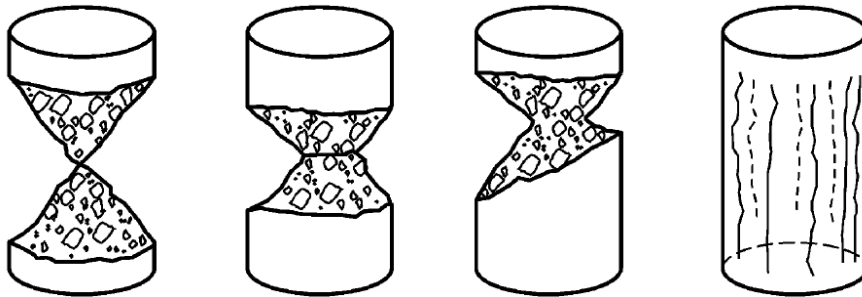


Figura 11. Roturas satisfactorias en probetas cilíndricas.

Para cada familia de probetas se realizaron dos semiprismas de cada edad de rotura. Se definió como resultado de ensayo la media aritmética de las determinaciones.

Para la aceptación del ensayo se tuvo en cuenta lo siguiente: si dentro de las probetas ensayadas una de ellas difiere de la media $\pm 10\%$, se desecha este resultado y se calcula la media de los restantes. Si un nuevo resultado de estas determinaciones difiere en más de un 10%, se desecha esta serie.

La resistencia a compresión en N/mm^2 se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$R_c = F_c / 1600$$

R_c = Carga máxima de la resistencia a compresión (N/mm^2)

F_c = Valor medio de la carga máxima de rotura (N)

1600 = 40mm x 40mm, que corresponde a la superficie de los platos o placas auxiliares (mm^2)



a) Pulido de probetas.

b) Equipo rotura compresión

b) Ensayo compresión.

Figura 12. Procedimiento ensayo probetas.

4.1.8. Ensayo vibro-compresión.

Para este ensayo se empleó un equipo diseñado por la propia empresa. Mediante unos moldes de dimensiones reducidas, se encarga simultáneamente de comprimir y vibrar la masa de hormigón. El equipo permite regular tanto los bares de presión como la frecuencia de vibrado, es por ello que se intentó simular la vibro-compresión de un rodillo.

El ensayo se realizó en dos tipos de molde, prismático y cúbico.



Figura 13. Procedimiento ensayo vibrocompresión.

4.1.9. Ensayo CBR (California Bearing Ratio).

Este ensayo mide la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo y para poder evaluar la calidad del terreno para subrasante, sub base y base de pavimentos, se ha realizado de acuerdo a las pautas establecidas en la norma UNE 10350-2 1995 “Ensayo para la determinación del índice CBR, en laboratorio.”



Figura 14. Equipo ensayo CBR.

4.1.10. Retracción del hormigón en estado fresco y endurecido.

La retracción es la disminución del volumen de hormigón durante el proceso de fraguado y endurecimiento del mismo. Principalmente, dicho cambio de volumen se produce bien como consecuencia de que los productos de hidratación poseen un volumen inferior a la suma del volumen de los productos anhidros y del agua inicial, o bien como consecuencia de la evaporación de agua residual presente en el hormigón.

Dependiendo de la cantidad de finos, de la cantidad y tipo de cemento, de la relación agua-cemento, del espesor de la solera, de la temperatura y humedad ambiental así como de la velocidad del viento, la retracción puede ser mayor o menor, dando lugar a fisuras e incluso a grietas.

Los métodos de cálculo para conocer la retracción se realizan en función del tiempo desde el acabado del hormigonado, y depende básicamente de tres coeficientes: del coeficiente de la humedad ambiental, del coeficiente del espesor de la solera y del coeficiente de la evolución de la retracción en el tiempo.

Para conocer el coeficiente de retracción de los hormigones con los que trabajamos, se estudió mediante un equipo específico el comportamiento de tres muestras de morteros.

El equipo consta de un molde llamados canales de ensayo de dimensiones 24 x 6 x 4 cm., en el que uno de los laterales es móvil, para que con la ayuda de un pequeño muelle, se obtengan a través de un ordenador la evolución de las retracciones y expansiones del mortero durante los primeros días.



Figura 15. Canal de ensayo

4.2. Características del hormigón compactado aplicadas en losetas, mediante la compactación con rodillo.

4.2.1. Ensayo de flexo-tracción.

El ensayo se ha realizado de acuerdo a la norma 12390/5 2001 "Resistencia a flexión de probetas".

- Preparación de las probetas;

Las probetas de flexión tendrán las siguientes dimensiones: 0.60x0.15x0.15m. Para la obtención de estas probetas, simulando la compactación realizada en obra, se construyó un encofrado de dimensiones 1.00x0.60x0.15 m del cual se extraerán las probetas prismáticas.

Tras el vertido del hormigón se valoraron dos posibilidades para simular su compactación en obra; por una parte, compactación mediante martillo compactador neumático, y por otra parte rodillo vibrante. Se valoraría en un futuro que procedimiento sería el más adecuado para compararlo con su real puesta en obra.

Una vez compactado se trató con producto filmógeno para un correcto curado y a las 24 horas se desencofró para proceder al corte de las probetas a partir de la loseta. Se conservaron las probetas en cámara a temperatura y humedad constantes, hasta su edad de ensayo.

- Realización del ensayo;

El equipo empleado es una prensa para ensayos de rotura a flexión de probetas de hormigón de 0.60x0.15x0.15m y fabricada por IBERTEST.

Está formado por una caja de mecanismos en cuyo bastidor se apoya el puente inferior de carga, que a su vez es el soporte del usillo elevador. En la parte trasera se aloja el interruptor general, el cable de conexión a la red y el fusible de protección. En el puente superior, que es regulable en altura mediante un sistema de pinzas, se sitúa un rodillo móvil y en la parte inferior dos rodillos, uno móvil y uno fijo.

El equipo cumple las especificaciones contenidas en la norma UNE 80-101-89 en lo que refiere a diseño, construcción y prestaciones tales como velocidad de ensayo y carga máxima admisible, precisión de lectura de la carga y forma y dimensiones del dispositivo de flexión de la misma, para la realización del ensayo al que se refiere dicha norma

Se coloca el prisma en el dispositivo para rotura a flexo-tracción, con una cara lateral sobre los rodillos soporte y con su eje longitudinal normal a los soportes. Se aplica la carga sobre la cara lateral opuesta del prisma y se incrementa uniformemente hasta su rotura.

Para el ensayo de cada familia de probetas se utilizaron tres probetas, obteniéndose como resultado el valor medio de los mismos. El resultado se calcula con la siguiente ecuación:

$$R_f = \frac{1.5 \times F_f \times l}{b^3}$$

F_{f1} , F_{f2} , F_{f3} ; carga aplicada en el medio del prisma en la rotura

$N = 3$; número de probetas ensayadas

F_f = Valor medio de la carga aplicada en el medio del prisma N .

Para la aceptación del ensayo tendremos en cuenta lo siguiente: si dentro de las tres determinaciones uno de los resultados difiere de la media $\pm 10\%$, se desecha este resultado y se calcula la media de los dos restantes. Si el nuevo resultado difiere de la media en más de un $\pm 10\%$, se desecha esta serie.

La resistencia a flexo-tracción R_f (en N/mm^2) se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$F_f = \frac{(F_{f1} + F_{f2} + F_{f3})}{N}$$

R_f = Valor medio de la carga aplicada en el medio del prisma.

l = Distancia entre soportes (mm)

$b = 150$; Lado de la sección cuadrada del prisma (mm)



a) Colocación de probeta.



b) Rotura a flexo-tracción

Figura 16. Ensayo flexotracción

4.2.2 Obtención de testigos.

La obtención de testigos se rige por la norma UNE-EN 12504-1 “Ensayo de hormigón en estructuras, Parte 1; Testigos, Extracción, examen y ensayo a compresión.”

La maquinaria empleada está provista de un dispositivo de rotación, el cual permite que el cilindro encargado de la perforación del pavimento, tenga mayor facilidad de penetración junto con un movimiento manual de compresión. El motor de rotación está fijado a una barra longitudinal regulable que permite fijar y nivelar la maquinaria para su posterior uso. Cuenta con un nivel incorporado mediante el cual deberá ser nivelado respecto al pavimento del que se extraerán los testigos. Para el uso de la misma es necesaria la conexión de una toma de agua para refrigerar constantemente la zona de fricción.

El cilindro extractor, no tiene una dimensión determinada sino que puede cambiarse según la dimensión de los testigos a extraer. En este caso las dimensiones de los testigos fueron de altura 0.15 metros y 0.75 de diámetro.

La losa se organizará de forma esquemática por zonas para tener localizadas los testigos obtenidos y poder valorar los resultados según su localización. Para ello se trazará una malla en la que se localizarán los testigos a medida que se van ejecutando. (Véase figura 17b)



a) Máquina extracción de testigos

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A										
B										
C										
D										
E										
F										

b) Tabla localización de testigos.

Figura 17.

Se realizó una comparación entre testigos conservados en temperatura y humedad controladas en cámara y los testigos expuestos a la agresividad y temperatura ambiente. A continuación mediante la figura 18 se representa el procedimiento de extracción de los testigos.



a) Perforación de la loseta



b) Obtención testigo



c) Disposición testigos

Figura 18. Procedimiento extracción de testigos.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Dosificación.

Se empleó una dosificación existente de activación alcalina para más tarde según resultados obtenidos, ajustarla a las características deseadas. Las características que se buscan son:

- 1- Relación agua/cemento baja.
- 2- Consistencia cono 0-2.
- 3- Resistencia a compresión a 28 días superior a 30 MPa.
- 4- Resistencia a tracción a 28 días superior a 4 MPa.

Se trabaja básicamente con dos tipos de dosificaciones, una primera con ceniza volante como adición y otra con filler calizo.

El uso de cenizas volantes como adición del hormigón está ampliamente extendido por dos razones: el ahorro económico que supone la reducción del cemento empleado y los cambios microestructurales motivados por la adición. Sobre este segundo punto existe consenso en considerar que las cenizas generan un hormigón más compacto y una reducción del tamaño medio del poro.

El uso de filler calizo no está casi extendido, ya que no aporta apenas resistencia aunque si consistencia y trabajabilidad.

Las dosificaciones base que se emplearon fueron las siguientes:

Tabla 8.- Dosificación empleada

Material	HCR-CV (Kg/m ³)	HCR-FC (Kg/m ³)
G1	574.0	572.4
G2	302.2	301.4
G3	406.7	405.6
S1	432.5	431.3
S2	185.3	184.9
C1	358.6	356.8
30%GGBFS	107.6	107.6
70%Adición	251.0	251.0
Agua libre	125.1	129.8

Na₂CO₃ (sólido)	11.8	11.7
Na₂SiO₃	36.7	36.6
NaOH 50%	22.4	22.4

Sobre estas dosificaciones se han hecho diversas amasadas de 25 litros hasta conseguir en el hormigón las características deseadas. El parámetro que se tuvo en cuenta para el ajuste de la dosificación fue la consistencia. En la Tabla 9 se muestran las dosificaciones probadas en ambos casos; ceniza volante y filler calizo.

Tabla 9.- Dosificaciones de prueba

MATERIAL	HCR CV				HCR-FC
	HCR-1-a (Kg/m ³)	HCR-1-b (Kg/m ³)	HCR-1-c (Kg/m ³)	HCR-1-d (Kg/m ³)	HCR-2-a (Kg/m ³)
Arido grueso					
G1	574.0	578.3	583.7	587.2	575.3
G2	302.2	304.5	306.8	309.2	302.9
G3	406.7	409.8	412.9	416.1	407.7
Aridos finos					
S1	432.5	435.7	439.1	442.4	433.5
S2	185.3	186.7	188.2	189.6	185.8
Adición C1					
30%GGBFS	107.6	108.4	109.2	110.1	107.6
70% FC/CV (Adición)	251.0	252.9	254.9	256.8	251.0
Total	358.6	361.3	364.1	366.9	358.6
Agua añadida	125.1	118.3	111.4	104.4	125.4
Activador Alcalino					
Na₂CO₃ (sólido)	11.8	11.8	11.9	12.0	11.8
Na₂SiO₃	36.7	37.0	37.3	37.6	36.8
NaOH 50%	22.4	22.6	22.8	23	22.5
A/C total	0.44	0.42	0.40	0.38	0.44
Consistencia (cm)	16	8.3	1.5	2.0	2.3
Consistencia mesa sacudidas (10 golpes)	--	--	8.0	7.3	5.8
Consistencia mesa sacudidas (15 golpes)	--	--	10.7	8.8	7.5

Se emplearon dos tipos de ensayo para la determinación de la consistencia ya que se precisaba obtener valores de consistencias muy bajas, dato difícil de determinar solamente con el cono de Abrams (se obtienen valores similares), se empleó la mesa de sacudidas para trabajar con valores más dispersos.

Una vez obtenidas las diferentes consistencias de los hormigones, se escogieron dos de ellos para seguir realizando los ensayos oportunos y optimizar la dosificación de los mismos. Como se quiere obtener un hormigón de elevada compacidad, deberemos basarnos en esta característica para la elección de las dosificaciones con las que trabajar.

Por parte de las que contienen ceniza volante se seleccionan la HOC-1-d y la HOC-1-c, de este modo, conforme se vaya avanzando y obteniendo resultados en los demás ensayos finalmente nos decantaremos por una de las dos. El criterio de elección empleado ha sido la consistencia ya que según el PG3 se precisan de consistencias entre 0 y 2. Como se comprueba son a la vez las que menor relación agua/cemento contienen.

Entre las dosificaciones que contienen filler calizo, continuaremos con la primera que se ha obtenido ya que como se calculó a partir de la HOC-1-d se obtuvieron buenos resultados desde el primer momento.

5.2. Compactación. “Apisonado Proctor modificado”.

Se determinan las dimensiones de los moldes.

Tabla 10.- Dimensiones moldes

MOLDES	Diámetro (mm)	Radio (mm)	Altura (mm)	Volumen (l)
1	151.7	75.8	127.4	2.30
2	152.0	76.0	127.6	2.31
3	152.2	76.1	127.3	2.31
4	152.0	76.0	127.2	2.31
5	151.9	75.9	126.4	2.29
6	152.1	76.0	126.0	2.29

Se obtienen pesos de las probetas obtenidas.

Con los pesos obtenidos y los volúmenes conocidos se haya la humedad real y la densidad del hormigón en estado fresco y endurecido.

Tabla 11.- Humedades y densidades obtenidas con Proctor

	Molde	Volumen molde (ml)	Humedad real (%)	Densidad húmeda (g/ml)	Densidad seca (g/ml)
HOC-1-c	1	2318	37	2519	1835
	2	2318	26	2477	1958
	3	2310	33	2464	1853
	4	2294	31	2476	1886
	5	2291	26	2496	1971
Medias		2306	30	2487	1901

HOC-1-d	1	2318	44	2492	1731
	2	2318	61	2518	1556
	3	2310	37	2489	1805
	4	2294	46	2417	1723
	5	2291	32	2523	1902
Medias		2306	44	2508	1743

HOC-2-a	1	2318	38	2452	1766
	2	2318	26	2458	1939
	3	2310	40	2448	1745
	4	2294	37	2471	1792
	5	2291	36	2464	1810
Medias		2306	36	2459	1811

Este método no se empleó con la única finalidad de compactar las probetas, sino que para más tarde poder obtener las resistencias. Aunque con los datos obtenidos se pudieron obtener diferentes datos como; contenido de humedad, humedad real, densidad seco...

Las mayores densidades se consiguen con las dosificaciones que contienen cenizas volantes, y como se ha puede ver en el apartado anterior también son las que menor grado de consistencia tienen.

5.3. Resistencia a compresión.

En este apartado se mide la evolución de resistencia a compresión de probetas cilíndricas, de 4 a 28 días, calculando los efectos de las adiciones sobre el hormigón.

Tabla 12.- Resistencia a compresión

Código	WK (mm)	RESISTENCIA COMPRESIÓN (154x125 mm)					Fecha Amasado
		Edad	1	2	X (MPa)	STD (MPa)	
HOC-1-c	1.5	4	19.2	18.3	18.8	0.6	23/07/2010
		28	46.7	48.0	47.4	0.9	
		40	50.2	50.1	50.2	0.0	
HOC-1-d	2.0	3	15.3	15.2	15.3	0.0	24/07/2010
		28	47.1	47.9	47.5	0.6	
HOC-2-a	2.0	4	17.3	18.9	18.1	1.1	05/08/2010
		28	31.5	35.2	33.3	2.6	

*Cámara a 20°C y 99% Humedad; Aire libre, hormigón expuesto al aire libre

Las dosificaciones con ceniza volante son las de resistencias mayores, el hormigón adquiere esta característica pasados los 20 días, esto es debido que reacciona con posterioridad. El filler calizo en cambio, supera resistencias mínimas pero no llega a los valores de las cenizas.

5.4. Resistencia a flexo-tracción.

Para la realización de este ensayo se han diseñado dos experimentos. Ambos constan en la obtención de una losa de 15x60x100 cm de dimensiones, la cual se ha compactado por dos medios distintos. De esta losa de hormigón mediante cortado con sierra se obtendrán las probetas prismáticas con las dimensiones anteriormente especificadas. Se ha empleado un hormigón control, con un cemento I-52.5-R, y con la misma granulometría que el hormigón experimental.

Los dos experimentos realizados son:

Compactación mediante un Martillo Compactador. Se ha sujeta el encofrado al suelo mediante barras metálicas para que las paredes de este aguantaran los golpes. Se compactó en 2 capas. En cada capa se aplicó el martillo compactador hasta compactación completa (visual). Se desencofró a las 24 h y se cortaron las probetas a las dimensiones adecuadas. Las probetas se dejaron en una cámara a 20°C y 99% humedad hasta el ensayo a flexión. Se las identificó con el código CON1. En la Figura 20 queda representado mediante imágenes el procedimiento del experimento.



a) Encofrado.



b) Martillo compactador.



c) Acabado superficial.



d) Producto filmógeno.

Figura 19. Procedimiento ejecución de las losetas con martillo compactador

Compactación mediante un Rodillo Vibrante: Para este ensayo el encofrado se ha enterrado en el suelo de forma que una vez lleno quedara rasante a la superficie. De esta forma se consigue que el rodillo pase sin tener que elevarse y también que las paredes del encofrado aguantan a la vibración. Se compactó en 1 capa, aplicando las pasadas de rodillo necesarias hasta compactación completa. Se desencofró a las 24 h y se cortaron las probetas a las dimensiones adecuadas. Las probetas se dejaron en una cámara a 20°C y 99% humedad hasta el ensayo a flexión. Se las identificó con el código CON2. Cuando se realizó la primera loseta, se determinaron el número de “pasadas”, con y sin vibración, para de este modo estandarizar la forma de ejecutar las losetas y realizarlas todas exactamente del mismo modo. En la Figura 21 queda representado mediante imágenes el procedimiento del experimento.



a) Encofrado introducido en el firme b) Vertido del hormigón c) Rodillo compactador d) Acabado superficial

Figura 20. Procedimiento ejecución de las losetas con rodillo compactador

Tras cortar las probetas se pesaron y midieron para comprobar su densidad en estado endurecido. Los resultados se muestran a continuación:

La resistencia a flexión se ha determinado a los 7 días y a los 28 días. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 13.- Resistencias a Flexión en probetas 15x15x60 cm

		CON-1	CON-2	HCR-FC		HCR-CV	
Curado		Cámara	Cámara	Cámara	Aire libre	Cámara	Aire libre
Edad (Días)	7	5.1 ± 0.2	7.8 ± 0.1	3.8 ± 0.3		4.7 ± 0.7	--
	28	5.7 ± 0.9	8.0 ± 0.7	4.6 ± 0.1	4.4 ± 0.2	6.3 ± 1.3	--
Fecha Amasado		15/09/2010	16/09/2010				

*Cámara a 20°C y 99% Humedad; Aire libre, hormigón expuesto al aire libre

Se han obtenido las siguientes conclusiones de cada experimento:

Experimento 1:

- El martillo compactador es dificultoso en el manejo para un molde de dichas dimensiones.
- El correcto acabado de la superficie era casi imposible de ejecutar con este método.
- Tras compactar la segunda capa, el encofrado empezó a abrirse, teniendo que corregir la abertura con una maza.
- Una vez producido el corte de las probetas se observa un grado de porosidad importante.
- Las secciones cortadas muestran una correcta homogeneización de la masa.
- La densidad alcanzada por el hormigón, 2338 kg/m³, es un poco inferior a la alcanzada en los ensayos Proctor para el hormigón experimental, que era de alrededor de 2450 kg/m³ en arriba.
- Las resistencias a flexión servirán como base de comparación para las que se obtengan con el hormigón experimental.

Experimento 2:

- El rodillo vibratorio ha mostrado ser más útil y de mayor manejabilidad.
- Se consiguió un mejor acabado en la superficie. No obstante se relleno el encofrado por encima de su volumen procediendo a su corte después.
- No hubo problemas durante la vibración en el encofrado, demostrándose eficiente enterrar el encofrado a ras de suelo.
- Se observó una disminución de la porosidad en comparación con el hormigón obtenido en el experimento 1.
- La densidad alcanzada, de 2459 kg/m^3 es muy parecida a la obtenida en los ensayos Proctor para el hormigón experimental, de 2450 kg/m^3 , demostrándose que las pasadas de rodillo realizadas han sido suficientes (10 pasos con vibración).

Al igual que antes, las resistencias a flexión servirán como base de comparación para las que se obtengan con el hormigón experimental.

Atendiendo a los resultados obtenidos en ambos experimentos, se ha decidido emplear como método de compactación el empleado en el Experimento 2, es decir, mediante el rodillo vibratorio.

Si estudiamos los resultados obtenidos tanto en el ensayo de compresión como en el de flexotracción se deduce;

- ✓ Se han obtenido valores que cumplen con el mínimo exigido por el PG3 tanto para la resistencia a flexión como a compresión
- ✓ La resistencia a compresión y flexión del HCR-CV fue superior a la obtenida en el HCR-FC (véase Figura 21). La actividad alcalina por la presencia de sílice y alumina en la ceniza volante proporciona productos de hidratación de naturaleza geopolimérica que contribuyen a la disminución de la permeabilidad del hormigón, dando lugar a una microestructura más compacta. Por el contrario, la actividad inerte del filler calizo no contribuye a la mejora de las prestaciones del hormigón. En la figura 22 se muestran 2 imágenes obtenidas por microscopía óptica de dos secciones de lámina delgada con resina fluorescente de los hormigones desarrollados mediante activación alcalina y donde se aprecia que el hormigón con ceniza volante presenta una microestructura mucho más densa (imagen más oscura) que la observada en el hormigón con filler calizo.
- ✓ El curado realizado al ambiente proporcionó una ligera disminución de resistencia en la mayoría de edades evaluadas, pero siempre por encima de los requerimientos de diseño establecidos.

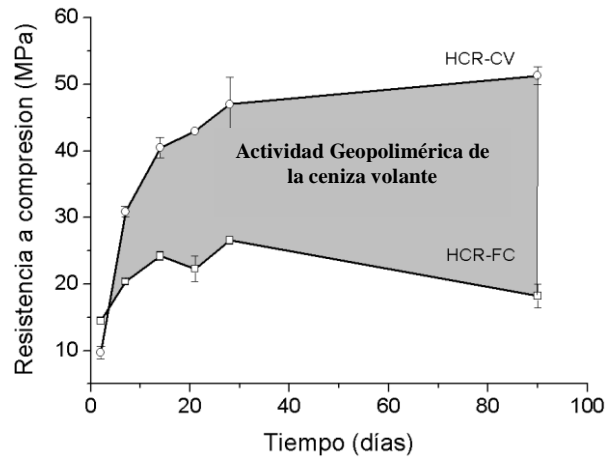


Figura 21. Evolución de la resistencia a compresión de los Hormigones Compactado a Rodillo con aglomerantes activados alcalinamente.

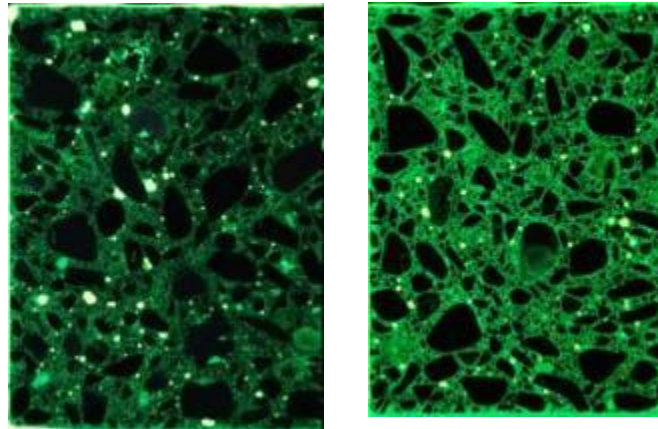


Figura 22. Imagen de la microestructura mediante microscopía óptica de los hormigones embutidos en resina fluorescente: izquierda: HCR-CV, derecha: HCR-FC.

5.5. Extracción de testigos.

Se produjo la extracción de testigos basada en la cuadrícula planteada, debido a la complicada ejecución de la actividad se obtuvieron testigos aleatoriamente localizándolos más tarde en la red.

El problema surgido fue que al intentar extraer los testigos la maquinaria debía estar fijada o bien a una cimentación o a un tope superior. En el primer caso como los testigos son de varias zonas habría que crear una cimentación diferente para cada zona de la losa, y en el segundo como debe estar fijado a un tope se debe ir posicionando la pieza según de donde se quiera extraer el testigo. Finalmente se realizó de la segunda forma, por ello los testigos no entran exactamente en los recuadros de la red, pero sirve igualmente ya que son de diferentes zonas.

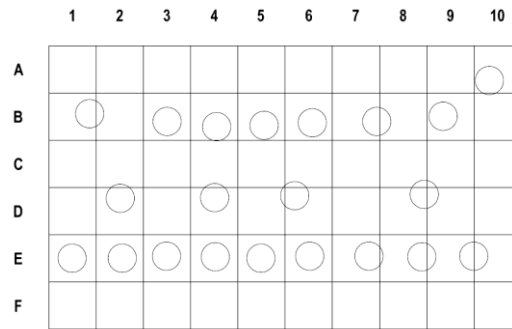


Figura 23. Disposición de los testigos

En la Tabla 14 se muestran los resultados obtenidos en la resistencia a compresión de los testigos para los dos hormigones. Ambos resultados se encuentran representados en la Figura 24.

		Resistencia Compresión (MPa)			
		HOC-2-a		HOC-1-d	
Curado		Cámara	Aire libre	Cámara	Aire libre
Edad (Días)	2	14.5 ± 0.5	--	9.7 ± 0.9	--
	7	--	--	30.9 ± 0.8	--
	14	24.2 ± 0.7	--	40.5 ± 1.5	--
	21	22.3 ± 1.9	--	43.0 ± 0.0	34.0 ± 0.7
	28	26.6 ± 0.6	25.1 ± 1.8	39.4 ± 4.1	19.0 ± 1.2
	90	18.2 ± 1.8	--	51.3 ± 1.3	49.3 ± 0.3
Wk (cm)		2.3		2.0	
Fecha Amasado		29/09/2010		03/11/2010	

Tabla 14.- Resistencias testigos

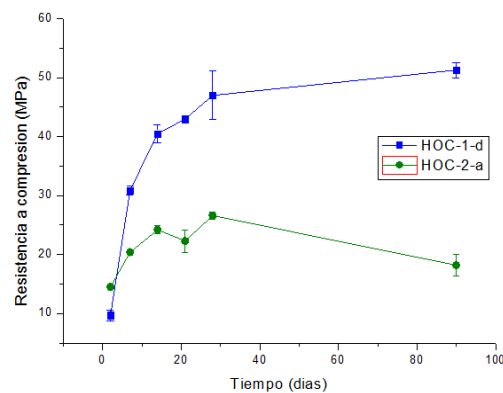


Figura 24. Evolución resistencia testigos

En este ensayo se pretendía observar la evolución de la resistencia de los testigos según su localización, teniendo en cuenta la dirección del vertido, y controlando la homogeneidad de la masa.

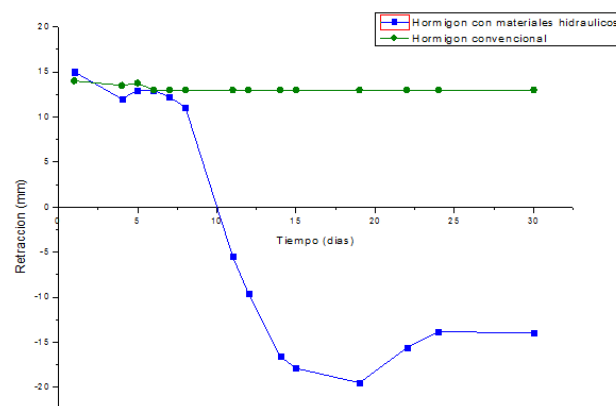
Como resultado se han obtenido valores que cumplen con el mínimo exigido por el PG3, siempre obteniéndose resistencias mayores en la dosificación con cenizas volantes, aunque esta característica se adquiriera a largo plazo.

5.6. Ensayo CBR

El ensayo se realizó con uno de los moldes compactados mediante Proctor, y se conservó en cámara durante aproximadamente 40 días para realizar las lecturas necesarias. En la Figura 25 se representan los valores obtenidos durante los primeros 30 días.

FECHA	Día	Hormigón con materiales hidráulicos (mm)	Hormigón convencional (mm)
23/07/2010	1	15	14
26/07/2010	4	12	13.5
27/07/2010	5	13	13.75
28/07/2010	6	13	13
29/07/2010	7	12.2	13
30/07/2010	8	11.1	13
02/08/2010	11	-5.5	13
03/08/2010	12	-17.9	13
05/08/2010	14	-16.3	13
06/08/2010	15	-18.6	13
10/08/2010	19	-13.8	13
11/08/2010	20	-13.9	13
12/08/2010	21	-13.6	13
31/08/010	40	-14.0	13
01/09/2010	41	-14.0	13

Tabla 15.- Lectura probeta retracción.



*Cámara a 20°C y 99% Humedad; Aire libre, hormigón expuesto al aire libre

Figura 25. Comparación de la retracción con hormigón convencional.

Con los resultados obtenidos, comprobamos que se produce en los primeros 5 días una expansión notable hasta un máximo de 4.99 mm y a partir del mismo empieza la retracción llegando al máximo el día 15. A partir de este momento el hormigón se expande de nuevo hasta estabilizarse en un periodo de 5 días. Por lo tanto se puede deducir que el hormigón desde su vertido hasta su posterior estabilización, tiene un margen de 33 mm y unos 20 días.

Hay que tener en cuenta que el ensayo se realiza bajo condiciones controladas por lo tanto durante su puesta en obra, estos datos pueden variar considerablemente, siempre dependiendo de las condiciones climáticas en las que se produzca el vertido.

5.7. Evolución de la retracción.

En la figura 2 se muestra la evolución de la retracción; medida desde el comienzo del proceso de hidratación, para tres muestras de mortero elaboradas cada una de ellas con Cem I-42.5-N (M-Ref), 30%GGBFS+70%FC (M-FC) y 30%GGBFS+70%CV (M-CV). El mortero de referencia con cemento convencional fue elaborado de acuerdo al proceso y proporciones que se establecen en la norma UNE-EN 196:1, utilizando como árido arena normalizada. Los morteros con aglomerantes activados alcalinamente se elaboraron de igual modo, incorporando los activadores en la misma proporción que la establecida en los hormigones. Una vez amasado el mortero, éste fue emplazado en el interior de un canal de medición. La retracción fue evaluada sobre probetas curadas con y sin parafilm sobre la superficie expuesta al aire, con el fin de evaluar el efecto de la retracción química y la producida por el proceso de secado. El curado y mediciones de la retracción fueron llevados a cabo a $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ y $65\pm 5\%$ de Humedad relativa.

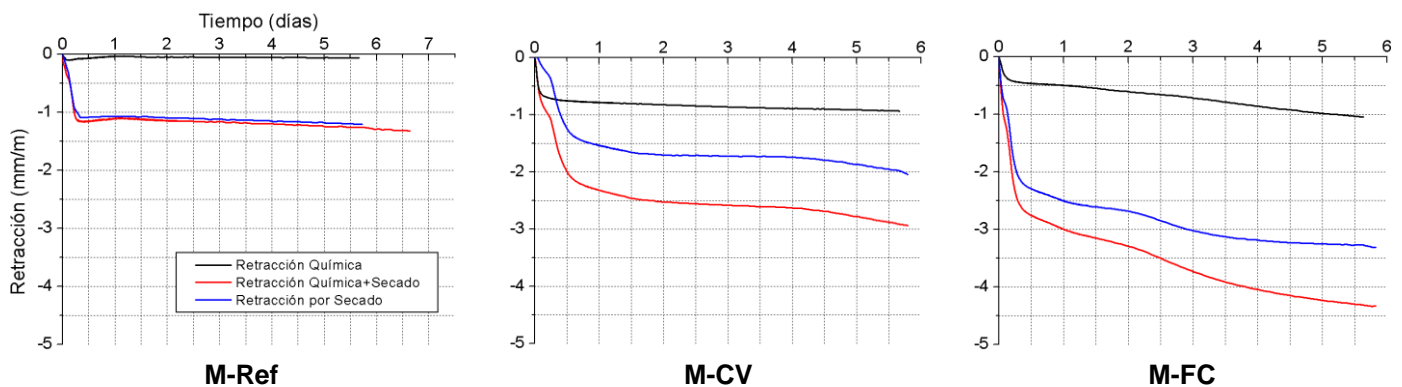


Figura 26. Evolución de la retracción química y por secado de morteros con aglomerantes activados alcalinamente y comparación con un mortero elaborado con cemento convencional (Cem I-42.5-N)

De los resultados obtenidos de la figura 25 se deduce que:

- ✓ La retracción química es aproximadamente 5 veces mayor en los aglomerantes activados alcalinamente en comparación con el mortero elaborado con cemento convencional.
- ✓ La retracción química de los dos aglomerantes activados alcalinamente es similar ($\approx 1\text{mm/m}$ a 5 días de curado) como consecuencia de que el proceso hidráulico está gobernado en dicha

etapa inicial por la activación de la escoria granulada molida de altos hornos, que se encuentra en la misma proporción en ambos morteros.

✓ La retracción por secado es mayor en el siguiente sentido: M-FC>M-CV>M-Ref. Este específico fenómeno está relacionado por la cantidad de agua presente en el mortero y la accesibilidad a evaporarse.

✓ Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la necesidad de tener un elevado cuidado de ejecución en las tareas de curado de los firmes de hormigón elaborados con aglomerantes activados alcalinamente, siendo necesario el uso de filmógenos y cubiertas de plástico, así como la realización de cortes o juntas en el firme, con el fin de crear retículas para eliminar las tensiones de tracción y la posible aparición de fisuras o grietas.

6.CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo ponen de manifiesto aspectos tecnológicos que caben prever la viabilidad de uso de hormigones con aglomerantes activados alcalinamente para en firmes compactados a rodillo. La principal ventaja con respecto a los hormigones convencionales compactados a rodillo es el uso de aglomerantes de menor impacto ambiental, al emplear residuos industriales y materias primas naturales, sin involucrar un proceso de producción altamente energético y con emisiones de gases con efecto invernadero tal y como se produce durante la producción de clinker. Los aglomerantes obtenidos mediante activación alcalina de materiales puede ser una alternativa con respecto a los aglomerantes convencionales en aquellos lugares en los que el análisis de ciclo de vida de los productos que se obtienen a partir de los mismos así lo demuestren. En este sentido, se están desarrollando estudios de durabilidad que permitan responder a las expectativas de vida útil de este tipo de hormigones.

En cuanto a las diferencias entre las dosificaciones empleadas; las de ceniza volante alcanzan resistencias a muy largo plazo (40 días), sin embargo con el filler se obtienen resistencias que cumplen las exigencias de la normativa en plazos más cortos. Teniendo en cuenta que la aplicación de este material es para firmes de hormigón, deberemos tener en cuenta que es conveniente una rápida ejecución y posterior uso, es por ello que aunque se alcancen menores resistencias el filler sería el material óptimo.

Si hablamos del acabado, el color que otorga el filler al hormigón es un tono muy claro con lo que se puede emplear para agregar al mismo pigmentos de diferentes colores, de este modo aumentar sus posibilidades en el mercado ya que se podrían realizar pavimentos de diferentes colores, según la finalidad que se le otorgue.

Las cenizas aunque no sean el material óptimo para carreteras pueden emplearse en aquellas aplicaciones que se precise de una elevada resistencia como para tráfico pesado, grandes transportes, en zonas como puertos, aeropuertos, pantanos...en los que el tiempo de ejecución no es un factor importante.

En el tema económico se ha realizado un breve estudio, calculando los precios por tonelada de hormigón, tanto para mezclas con cemento, como para mezclas en las que como material cementante se ha usado un activador alcalino. El material cementante de hormigones tradicionales (cemento), por cada tonelada que se emplee, según el tipo de cemento puede costar entre 50 y 90 €, por el contrario si empleamos activador alcalino puede llegar a costar 150€ la Tonelada.

Si se tiene en cuenta los precios es lógico que de momento ninguna empresa del sector se haya planteado la sostenibilidad sobre la economía, ya que aunque hablemos del uso de residuos y de reciclar materiales sigue siendo antieconómico. Es por ello que se debe continuar con la investigación de todos estos materiales para que en un futuro se pueda alcanzar una rentabilidad económica y ecológica.

6. BIBLIOGRAFÍA

7. BIBLIOGRAFÍA

1. J.M. Ruiz-Roman, C.Alonso Santo., (2000) "Aprovechamiento de las cenizas volantes, clase F, de centrales térmicas para la fabricación de materiales cerámicos". *Universidad politécnica de Madrid*.
2. Carrascón S., (2006), "Introducción al uso de cemento en explanadas y capas de firme", *Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones IECA*.
3. PG3 "Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes." 2ª Edición, Sep. 2001.
4. Portland Cement Association, (2004), "Guide specification for construction of Roller-Compacted concrete Pavements", *www.cement.org*
5. Informe Brundtlandt "*Nuestro futuro común*" (1987)
6. A. O. Purdon, (1940) The action of alkalis on blast furnace slag. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 59, 191-202.
7. V. D. Glukhovsky. (1959) *Soil Silicates, (Gruntosilikaty)* (Kiev, URSS: Budivel'nik Publisher).
8. J. Davidovits, (1981) Synthetic mineral polymer compound of the silicoaluminates family and preparation process, US. Patent, 4.472.
9. P.V. Krivenko, (1986) Synthesis of Cementitious Materials in a System $R_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ with Required Properties. DSc(Eng) Thesis, Kiev Civil Engineering Institute, Kiev, Ukraine..
10. Glukhovsky, V. D., Krivenko, P.V, Rumyna, G. V. and Gerasimchuk, V. L., (1988) *The Manufacture of Concretes and Structures from Slag Alkaline Binders*, Budivel'nik Publisher, Kiev.
11. Collins, F. G. and Sanjayan, J. G, (1999) Workability and Mechanical Properties of Alkali-Activated Slag Concretes, *Cement and Concrete Research*, 29 (3), pp. 455-458
12. Bensted, J., (1983) "Early Hydration of Portland Cement, Effects of Water/Cement Ratio", *Cement and Concrete Research*, 1 (1), 35-44.
13. Fernandez, A. and Puertas, F., (1997) Influence of the activator concentration on the kinetics of the alkaline activation process of a blast furnace slag. *Materiales de Construcción*. 47 (246), 31-41.
14. Malquori, G. (1960) Portland Pozzolan cement. 4th International Symposium on the Chemistry of Cement, Washington, USA, II, 983-1000.
15. Collins, F. G. and Sanjayan, J. G, (1999) Effect of ultrafine materials on workability and strength of concrete containing alkali-activated slag as the binder. *Cement and concrete Research*, 29 (2), pp. 459-462

16. TU 6-18-35-85 (1985)
17. TU 14-14-145-85 (1985)
18. TU 6-16-29-45-86 (1986)
19. TU 37.002.0442-88 (1988)
20. TU 6-46-91 (1991).
21. Wei Chen, (2006), "Hydration of slag cement", *University of Twente the Netherlands*.
22. Glukhovsky; Raksha. (1979), "Alkaline and Alkaline-Alkali-Earth Hydraulic Binder and Concretes", In Glukhovshy (ed.), Kiev: Vysscha Shkola Publisher, pp. 121-124,
23. Payá, J; Monzó, J; Borrachero, M.V. (1997), "Mechanical treatment of fly ashes: Part III. Studies on strength development of ground fly ashes, Cement and Concrete Research. 27 (9). pp. 1009 – 1377.
24. Talero, R., (2008), "Diferenciación cinética y morfológica de Ettringitas mediante Metakaolín, cementos Portland y el ensayo ASTM C 452-68. Parte I: diferenciación cinética". *Materiales de Construcción*, nº 292, vol. 58, pp. 45-68
25. EHE-08 "Instrucción de hormigón estructural" Edición 2008
26. Molina B., Omar I., (2008), "La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento Portland en la durabilidad del hormigón", *Tesis doctoral Universidad Politécnica de Madrid*
27. Gary J., Beatrix K., (2006), "Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement". *Center of Transportation Research and Education*.
28. UNE-EN 12350-2:2009 "Ensayo de hormigón Fresco, Parte 2: Ensayo de asentamiento".
29. UNE-EN 12350-3:2009 "Ensayos de hormigón endurecido, Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas".
30. UNE-EN 103501:1994 "Ensayo de compactación. Proctor modificado."
31. UNE-EN 12504-1:2001 "Ensayo de hormigón en estructuras, Parte 1; Testigos, Extracción, examen y ensayo a compresión."
32. UNE-EN 12390-5:2001 "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas".
33. Jimenez P., García Á. y Morán F., (2000), "Hormigón armado", Ed. Gustavo Gili.
34. Bonansea A. "Aplicación vial del Hormigón Compactado con Rodillo", ICPA
35. Galizzi M., Aubert C., "Hormigón compactado con Rodillo de uso vial", ICPA Experiencia Argentina
36. Jofré C., Conferencia (1995) "El hormigón seco compactado en la construcción de carreteras", Congreso Argentino de Viabilidad y Tránsito.

37. UNE-EN 12350-2:2009 *“Ensayo de hormigón Fresco, Parte 2: Ensayo de asentamiento”*.
38. UNE-EN 12350-3:2009 *“Ensayos de hormigón endurecido, Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas”*.
39. UNE-EN 103501:1994 *“Ensayo de compactación. Proctor modificado.”*.
40. UNE-EN 12504-1:2001 *“Ensayo de hormigón en estructuras, Parte 1; Testigos, Extracción, examen y ensayo a compresión.”*
41. UNE-EN 12390-5:2001 *“Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas”*.