

Universidad Politécnica de Cartagena

Escuela de Arquitectura e Ingeniería de Edificación



Universidad
Politécnica
de Cartagena



Proyecto Final de Carrera

ESTUDIO DE LA RESISTENCIA Y EL
COMPORTAMIENTO FRENTE A
ATAQUE IÓN CLORURO Y
CARBONTACIÓN DE HORMIGONES
CON ESCORIAS DE ALTO HORNO

Autor: Jose Manuel Lorente Pina

Director: Carlos Parra Costa

Universidad Politécnica de Cartagena

Escuela de Arquitectura e Ingeniería de Edificación



Universidad
Politécnica
de Cartagena



Proyecto Final de Carrera

ESTUDIO DE LA RESISTENCIA Y EL
COMPORTAMIENTO FRENTE A
ATAQUE IÓN CLORURO Y
CARBONTACIÓN DE HORMIGONES
CON ESCORIAS DE ALTO HORNO

Autor: Jose Manuel Lorente Pina

Director: Carlos Parra Costa

Agradecimientos

A todos los que con su tiempo han hecho que sus enseñanzas hayan hecho mella, sobre mi testaruda persona, guiándome en la dirección correcta.

A D. Carlos Parra por su infinita paciencia.

A mi familia, por haber estado siempre apoyándome, especialmente a mis padres, Josefa y Manuel y a mi hermana María Dolores.

A Isabel, por el apoyo incondicional a lo largo de todo el proyecto.

Y a ti, Virginia, la última, pero no la menos importante, gracias por ayudarme a ver entre la espesura del bosque, el camino.

Resumen

El presente trabajo, tiene como finalidad estudiar las propiedades del hormigón con escorias de alto horno: resistencia a compresión, a tracción y a flexión; y el comportamiento frente al ataque frente a ión cloruro y a carbonatación.

También se ha tenido presente, la influencia de otras adiciones, llevando al estudio, los conglomerantes ternarios, con el que se ha hecho una comparativa de los parámetros básicos que influyen en la propiedades estudiadas.

El uso de subproductos en la construcción, en las últimas décadas, la reutilización de materiales, el menor gasto energético, la menor cantidad de CO₂ liberada en la atmósfera, el crecimiento que ha evolucionado la población, y la mayor demanda de materia prima, que son finitas y los cambios legislativos, facilitaron el camino para la investigación y el desarrollo de nuevos productos que suponen un ayuda al medio ambiente.

La variabilidad de resultados encontrados relativos a las propiedades se debe a las diferencias de composición química de la escoria. Aunque se trate del mismo horno y el mismo proceso de molienda, se obtienen valores distintos de índice de basicidad e hidraulicidad con distintas finuras de molido. Los modificadores de fraguado, la dosificación, los inclusores de aire, los activadores alcalinos, las

condiciones ambientales, así como la sustitución de parte de cemento por otras adiciones influyen sobre conglomerantes con escorias de alto horno. La dispersión de los datos obtenidos obliga al estudio de caso por caso.

Palabras clave: escorias , binarios, ternarios, ión cloruro, carbonatación.

Abstract

Title: Study of strength and behavior to ion chloride attack and carbonation en concrete and mortar with ground granulated blast furnace.

Author: Jose Manuel Lorente Pina.

Tutor: Carlos Parra Costa.

This work studies the properties of concrete and mortar with ground granulated blast-furnace slags as binary blended cement. The main topics are: compressive strength, tensile strength, flexural strength, resistance against ion chloride attack and carbonation.

The influences of other cementitious materials have been taken into account. Ternary blended cements have been studied in this work. The key properties that influence in the durability of concrete and mortar are studied.

At the last decades, some factors have been pave the way to the research and development of new products that help the environmental issues, such as: the use of by-product in construction, the re-use of

materials; the need to control CO₂ emission to the atmosphere in the manufacturing processes, the grow of population in the world, increasing the demand of the raw material and the implementation of changes in the legislation.

The variability of the results related to properties and behavior of the concrete and mortar with GGBS is due to the differences of ground granulated blast-furnace slag's chemical composition: the water-reducing admixture, the dosage, the air entraining agents, alkaline activators and the environmental conditions, just like, the influence of other cementitious materials as replacement for blended cements with GGBS. A specific study case by case is highly recommended because of the deviation of the obtained data.

Keywords: slags, binary, ternary, chloride ion, carbonation.

Índice

Índice de contenido

Capítulo 1.- Introducción.....	1
Aspectos generales.....	1
1.2. Objetivos	6
1.2.1. Objetivos generales.....	6
1.2.2. Objetivos específicos.....	6
1.3. Estructura de proyecto.....	7
Capitulo 2.- Escorias granuladas de alto horno (EGAH).....	9
2.1. Introducción.....	9
2.2. La escoria y su clasificación.....	10
2.3. Clasificación de las escorias.....	12
2.3.1. En función de su procedencia.....	12
2.3.2. En función del enfriamiento de la escoria.....	13
2.4. Escoria de alto horno.....	21
2.5. Composición química de la escoria.....	22

2.6. Composición mineralógica.....	24
2.8. Estructura vítrea de la escoria granulada de alto horno.....	27
2.9. Reactividad de la escoria.....	29
2.10. Usos de las escorias en morteros y hormigones.....	32
2.10.1. Como adición parcial total o parcial de cementos.....	33
2.10.2. Como árido	34
Capítulo 3. Propiedades en estado endurecido.....	37
3.1. Introducción.....	37
3.2. Resistencia a compresión.....	37
3.2.1 .Introducción.....	37
3.2.1.1. Clases de exposición en las normativas ACI, UNE y EHE.....	37
3.2.1.1.1. Clases de exposición recogidas en ACI 318...37	
3.2.1.1.2. Clases de exposición recogidas UNE EN206 40	
3.2.1.1.3. Clases de exposición en EHE.....	47
3.2.1.2. Resistencia en las normativas ACI, UNE y EHE.....	50
3.2.1.2.1. Resistencia característica o especificada del proyecto.....	50
3.2.1.2.2. Resistencias de cálculo.....	51
3.2.2.Material cementante.....	53

3.2.2.1.Especificaciones de las escorias de alto horno para su uso en cemento UNE-206 y EHE.....	53
3.2.2.1.2.Prescripciones de la ASTM para las escorias granuladas de alto horno.....	61
3.2.2. Factores influyentes de la resistencia.....	65
3.2.2.1. Cantidad de material cementante y sustitución por EGAH.....	65
3.2.2.2. Influencia con respecto al curado.....	70
3.2.2.3. Relación agua/cemento.....	75
3.2.2.3.1. Agua no evaporable.....	76
3.2.2.3.2. Uso de aditivos.....	77
3.2.2.3.2.1. Modificadores de fraguado.....	78
3.2.2.3.2.2. Interacciones con otros aditivos.....	80
3.2.3. Conglomerantes ternarios.....	83
3.2.3.1. Cenizas volantes.....	84
3.2.3.2. Humo de sílice.....	88
3.3. Resistencia a tracción.....	91
3.3.1. Introducción.....	91
3.3.2. Adherencia pasta-árido.....	92
3.3.2.1.Introducción.....	92
3.3.2.2. Tipos de adherencia.....	93

3.3.2.3. Comportamiento de la interfase árido pasta con adiciones de EGAH.....	94
3.3.2.4. Comparaciones con otras adiciones	95
3.4. Resistencia a flexión.....	98
3.4.1. Resistencias de cálculo.....	98
3.4.2. Módulo de elasticidad.....	98
3.4.2.1. Definición y tipos de módulo de elasticidad.....	99
3.4.2.3. Aspectos normativos.....	101
3.4.3. Factores influyentes.....	103
3.4.4. Consecuencias de la utilización de EAGH.....	104
Capitulo 4.- Durabilidad.....	107
4.1. Carbonatación.....	107
4.1.1. Introducción.....	107
4.1.2. Factores influyentes.....	109
4.1.3. Influencia del uso de EGAH como sustitución del cemento	110
4.1.2.1. En el curado.....	110
4.1.2.2. Humedad relativa concentración de CO ₂	111
4.1.2.3. Tipo de cemento, características del cemento con EGAH.....	113

4.1.2.4. Porosidad.....	118
4.2. Ataque ión cloruro.....	120
4.2.1. Introducción.....	120
4.2.2. Conglomerantes binarios.....	124
4.2.3. Conglomerantes ternarios	134
4.2.4. Resistencia a hielo-deshielo.....	136
Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras de investigación.....	145
5.1. Introducción.....	145
5.2. Conclusiones.....	145
5.2.1. Conclusión general.....	148
5.3. Trabajos futuros.....	149
Capítulo 6.- Referencias bibliográficas.....	151
Anejos.....	165
Simbología.....	165

Índice de figuras

Capítulo 2. Escorias granuladas de alto horno

Figura 1: Escoria granulada de alto horno	9
Figura 2: Diagrama de flujo genérico del proceso siderúrgico para el manejo de las escorias.....	11
Figura 3: Clasificación de escorias según su procedencia (Amaral, 1999).....	12
Figura 4: Clasificación de las escorias en función del enfriamiento.....	13
Figura 5: Separación de los espectros de silicio 2p en la superficie granular de la EGAH con una superficie específica de 4680 cm ² /g (Tsuyuki & Koizumi, 1999).....	14
Figura 6: Obtención de las escorias en un alto horno Sanjuán et al., 2011.....	21
Figura 7: Diagrama SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -CaO (Alonso , 2011).....	24
Figura 8: Esquema de la estructura de melilita. Gelenita (izquierda) y Akermanita (derecha).....	27
Figura 9: Definición de oxígeno no puenteado por cationes coordinados tetraédricamente (NBO/T).....	28
Figura 10: Reactividad de la EGAH.....	30
Ilustración 11: Proceso de obtención para distintos formatos de EGAH Tsuyuki & Koizumi, 1999.....	32

Capítulo 3. Propiedades en estado endurecido

Figura 1: Comparación entre la resistencias calculadas y medidas Papadakis & Tsimas, 2002.....	65
Figura 2: Desarrollo de resistencia en función del tanto por ciento de sustitución de EGAH y activador alcalino (Acevedo-Martínez et al,2012).....	68
Figura 3: Datos de resistencia a compresión ordenados según cantidad de sustitución de EGAH.....	70
Figura 4: Ábacos de la resistencia a compresión de las pastas con 40% de escoria a)2 días, b) 7 días, c)28 días.....	71
Figura 5: Ábacos de la resistencia a compresión de las pastas con 80% de escorias, a)2 días, b)7días, c)28 días.....	72
Figura 6: Energías de activación aparentes en función del % de sustitución de EGAH (Barnett et al, 2006).....	73
Figura 7: Resistencia a compresión simple para los hormigones de CEM I y CEM III (Ferrer et al,2012).....	74
Figura 8: Ábacos de las resistencia a compresión de los morteros, a) 2 días, b)7 días, c)28 días , y d) 90 días.....	76
Figura 9: Agua no evaporable de las pastas : a)cemento pórtland, b) cemento pórtland más el 40% de escorias y c) cemento pórtland con un 80% de escorias.....	77
Figura 10: coeficiente de permeabilidad para un mortero M20, en en función del tanto por de sustitución de EGAHTamilarasan et al, 2012	79
Figura 11: Coeficiente de permeabilidad de un mortero M25, en función del tanto por ciento de sustitución de EGAH.....	79

Figura 12: Resistencia a compresión de mezclas binarias con EGAH, sin (A,B,C,D) y con inclusor de aire (E,F) Kelly & Murphy, 2010.....	80
Figura 13: Datos de resistencia a compresión a los 28 días ordenados según relación a/c y contenido de cemento.....	81
Figura 14: Datos de resistencia a compresión ordenados según relación a/c y contenido de cemento con %de sustitución de EGAH..	82
Figura 15: Valores de resistencia a compresión en Lane & Ozyildirim, 1999.....	84
Figura 16: Valores obtenidos de resistencia a compresión obtenidos en McNally&Sheils, 2012.....	86
Figura 17: Gráfico de densidad de tamaño de partículas de McNally&Sheils, 2012.....	87
Figura 18: Imagen procedente de SEM de cenizas volantes (izquierda) y EGAH (derecha) de pastas de cemento a los 7 días de curado Gao et al, 2005.....	87
Figura 19: Contenido de superfluidificante en función de la muestra de control, para distintas adiciones y varios grados. Bagheri et al, 2012	89
Figura 20: Valores de resistencia a compresión de conglomerantes ternarios Bagheri et al, 2012.....	90
Figura 21: Imagen SEM de EGAH curada a los 7 días Gao et al, 2005	94
Figura 22: Relación entre los valores de dureza y distancia a la superficie del árido, con distintos grados de sustitución de EGAH y finura de molido. Gao et al, 2005.....	95

Figura 23: Relación entre la dureza y la distancia de la superficie del árido con distintas mezclas de EGAH y humo de sílice.....	96
Figura 24: Perfiles de composición de la experimentación y la simulación (a) a 50 μ m y (b) a 15 μ m Gao et al,2013	97
Figura 25: Diagrama tensión-deformación de material con comportamiento no elástico no linear Neville, 2010.....	100
Figura 26: Representación esquemática de la relación tenso-deformación del hormigón EHE,2008.....	101
Figura 27: Módulos de elasticidad para hormigones tipo CEM I y CEM III con diferentes exposiciones ambientales Ferrer et al,2012	104
Figura 28: Ratios de ductilidad y de resistencias últimas a flexión con respecto a las elásticas Udoeyo et al, 2012.....	106

Capítulo 4. Durabilidad

Figura 1: Resistencia a compresión simple para hormigones CEM I y CEM III extraído de Ferrer et al,2012.....	111
Figura 2: Grado de carbonatación del hormigón en función de la HR atmosférico de exposición Becker, 2003.....	113
Figura 3: Influencia del curado en la profundidad de carbonatación para pastas de cemento (6 meses, 0,03% CO ₂)de cemento Pórtland y cementos mixtos con ceniza volante y escorias de alto horno Page et al, 1991	114
Figura 4: Pasta CEM II/A-S 52,5 N exterior no protegida. CaCO ₃ , parcialmente cristalizado.....	117

Figura 5: Pasta CEM II/A-S 52,5 N exterior no protegida. Escoria rodeada de carbonatos.....	117
Ilustración 6: Efectos de la permeabilidad, fijación y coeficiente de difusión de cloruros en función del grado de sustitución de EGAH Dhir et al,1996.....	123
Figura 7: Relación entre el diámetro del poro, la resistencia a compresión y el volumen total de poro (Moon et al, 2006.....	125
Figura 8: Evolución del contenido total de cloruros totales y libres de especímenes expuestos a ciclos de humedad-deseccación con relación a/c igual a 0,45 (Bouteiller et al., 2012).....	126
Figura 9: Evolución del contenido total de cloruros totales y libres de especímenes expuestos a ciclos de humedad-deseccación con relación a/c igual a 0,65 (Bouteiller et al., 2012).....	127
Figura 10: Valores de carga pasada a través de mortero M20 con distintos grados de sustitución de EGAH con y sin superplastificante (Tamilarasan et al, 2012).....	128
Figura 11: Profundidad de penetración de ión cloruro (Yiğiter et al, 2007).....	129
Figura 12: Diseño de las mezclas (Lizarazo & Claise, 2011).....	132
Figura 13: Coeficientes aparentes de difusión medidos en m ² /s Lizarazo & Claise, 2011.....	132
Figura 14: Histograma de porosidad en relación del diseño de las mezclas (Lizarazo & Claise, 2011).....	134
Figura 15: Ratio de penetración de ión cloruro en mezclas con 30% de EGAH y diferentes grados sustitución de humo de sílice Bagheri et al, 2012.....	135

Figura 16: % de pérdida de masa en 28 ciclos hielo-deshielo (las muestras A y B se disgregaron antes de los 28 ciclos) extraído de Kelly & Murphy, 2010.....	139
Figura 17: Gráfica de la velocidad de pulsos ultrasónicos a lo largo de los ciclos de hielo-deshielo en Kelly & Murphy, 2010.....	141
Figura 18: Factores de durabilidad después de 300 ciclos de hielo-deshielo en solución con 2% de cloruro sódico(Lane & Ozyildirim, 1999).....	142
Figura 19: Pérdida de masa después de 300 ciclos de hielo-deshielo en una solución del 2% de cloruro sódico (Lane & Ozyildirim, 1999)	143

Índice de tablas

Capítulo 2. Escorias granuladas de alto horno

Tabla 1: Consecuencias de distintos activadores alcalinos con diferentes concentraciones	19
Tabla 2: Componentes mineralógicos de las escorias (Batagin & Esper,1988; Puertas,1993).....	25
Tabla 3: Formulas de actividad hidráulica de la EGAH.....	31

Capítulo 3. Propiedades en estado endurecido

Tabla 1: Categoría F. Hielo y deshielo.....	38
---	----

Tabla 2: Categoría S. Sulfatos.....	39
Tabla 3: Categoría P. Requisitos de baja permeabilidad.....	39
Tabla 4: Categoría C. Protección de las armaduras frente a la corrosión.....	40
Tabla 5: Sin riesgo de corrosión o ataque.....	41
Tabla 6: Corrosión inducida por carbonatación.....	41
Tabla 7: Corrosión inducida por carbonatación.....	42
Tabla 8: Corrosión inducida por cloruros procedentes del agua de mar	43
Tabla 9: Ataque hielo-deshielo con o sin agentes de deshielo.....	44
Tabla 10: Ataque químico.....	45
Tabla 11: Valores límite para clases de exposición para ataque químico de suelos naturales y aguas subterráneas.....	46
Tabla 12: Clases generales de exposición relativas a la corrosión y sus equivalencias.....	48
Tabla 13: Clases específicas de exposición a otros procesos de deterioro distinto de la corrosión y sus equivalencias.....	49
Tabla 14: Coeficientes parciales de seguridad	51
Tabla 15: Valores de la reducción de resistencia ρ	52
Tabla 16: Cementos con escorias de alto horno recogidos en laUNE-EN 197-1:2011	54
Tabla 17: Cementos utilizados en la bibliografía con adiciones de EGAH.....	55

Tabla 18: Exigencias mecánicas y físicas dadas como valores característicos.....	56
Tabla 19: Exigencias químicas dadas como valores característicos.....	57
Tabla 20: Prescripciones para cementos resistentes al agua de mar. .	59
Tabla 21: Prescripciones para los cementos resistentes a sulfatos.....	60
Tabla 22: Prescripciones para la clasificación del grado de reactividad de la escoria,	62
Tabla 23: Requisitos para hormigones expuestos a la clase de exposición F3 recogida en ACI 318:2008.....	64
Tabla 24: Coeficientes de eficacia K para distintas adiciones.....	66
Tabla 25: Mezclas realizadas en McNally&Sheils, 2012.....	85
Tabla 26: Mezclas realizadas en Bleszinsky et al, 2002	88
Tabla 27: Mezclas de las muestras ensayadas y módulos de elasticidad en Udoeyo et al, 2012.....	105

Capítulo 4. Durabilidad

Tabla 1: Requisitos normativos mínimos de hormigones en clases de exposición con riesgo corrosión inducida por carbonatación.....	108
Tabla 2: Contenido de ión cloruro en los componentes de Yazici et al, 2010.....	120
Tabla 3: Requisitos normativos para hormigones en clases de exposición con ataques ión cloruro	122

Tabla 4: Comparativa de las prescripciones para la dosificación de hormigones resistentes a las heladas..... 136

Tabla 5: Contenido total de aire para hormigones expuestos a ciclos hielo-deshielo según EHE,2008..... 137

Tabla 6: Mezclas realizadas en Kelly & Murphy, 2010..... 140

1. Introducción

Capítulo 1.- Introducción

Aspectos generales

El alto consumo de recursos naturales, la producción de gran cantidad de desechos industriales y la contaminación del medio ambiente requieren la obtención de nuevas soluciones para un desarrollo sostenible.

El desarrollo sostenible se puede lograr si se aumenta la eficiencia de los recursos. El incremento de eficiencia de los recursos es posible gracias a la reducción en el uso de energía y materiales (Aguado & Gálvez, 2011).

La generación de residuos sólidos se ha convertido en un problema medioambiental global que está tomando proporciones indeseables. Esta situación merece una gran atención debido al impacto negativo que esto produce en el medio ambiente.

En España la fabricación de acero produce grandes cantidades de residuos industriales. Según la Federación Española de Asociaciones de Fundidores, existen dos grandes zonas de actividad en España. Por un lado la Asociación de Fundidores del País Vasco y Navarra y por otro la Asociación de Fundidores de Cataluña. Con una producción total en el 2006 de 1.177.427 T, de los cuales el 81% (948.174 T)

corresponden a fundición de hierro, el 8% (85.144 T) corresponden a fundición de acero y el 12% restante (144.109 T) corresponden a fundición no férrea CEDEX, 2011.

En términos de generación total de residuos en Chile, las fundiciones ferrosas generan aproximadamente 15.790 toneladas mensuales, mientras que las fundiciones no ferrosas generan del orden de 2.470 toneladas mensuales (Guía técnica para el manejo de escorias de fundiciones). De los totales antes mencionados, los residuos más importantes, en términos de cantidad, son los siguientes:

Escorias metalúrgicas: 6.862,5 Ton/mes.

Arenas de descarte: 4.219,5 Ton/mes.

Polvos de filtro: 681,2 Ton/mes.

Los residuos generados por esta industria, en su mayor parte se depositan en vertederos, causando serios problemas económicos y medioambientales a los sectores implicados.

Si analizamos la producción mundial de hormigón al año, en el 2006 se fabricaron 1600 millones de toneladas, generando

aproximadamente el 7% de la carga global del dióxido de carbono¹ en la atmósfera (Hernández-Castañeda & Mendoza-Escobedo, 2006).

En total, la industria del hormigón usa 12,6 billones de toneladas de materia prima por año, siendo el mayor usuario de recursos naturales del mundo. A nivel mundial emplean aproximadamente 10 billones de toneladas de arena y roca natural, a la vez que genera más de 1 billón de toneladas de residuos de construcción y demolición cada año (Mehta, 2002).

La extracción de materias primas de las arcillas, calizas, etc., frecuentemente resultan una deforestación excesiva y pérdida de suelos².

1 El CO₂ del proceso de fabricación del cemento se produce por la producción del clinker a partir del calentamiento de la caliza. La cantidad total de CO₂ producido varía del tipo de cemento. La producción de una tonelada de cemento requiere aproximadamente de 4 GJ de energía y la manufactura del clinker de cemento Portland descarga aproximadamente una tonelada de dióxido de carbono a la atmósfera (Mehta, 2002).

2 De acuerdo con Canadian Standards Association, citado por Mendoza y Castro, 2009 indican que la concentración atmosférica de dióxido de carbono (CO₂) ha aumentado en un 31% desde 1750. La concentración actual de CO₂ no se había superado en los últimos 420.000 años y es probable que tampoco en los últimos 20 millones de años. Unas tres cuartas partes de las emisiones antropógenas de CO₂ en la atmósfera durante los últimos 20 años se deben a la quema de combustibles de origen fósil. El resto se debe principalmente a cambios en el uso de la tierra, especialmente la deforestación.

El hormigón también requiere grandes cantidades de agua, se estima que el agua de mezclado requerida asciende anualmente a 10⁹ de metros cúbicos (Hernández-Castañeda & Mendoza-Escobedo, 2006).

La creciente degradación del medio ambiente, la preocupación de la industria para cumplir con la nueva legislación³ y la responsabilidad por la degradación ambiental causada por la producción de residuos, hacen que residuos industriales (escoria de alto horno y cenizas volantes) sean cada vez más utilizados para sustituir una parte de cemento o como árido reciclado en la producción de hormigón. La posibilidad de reutilizar estos subproductos industriales en el sector de la construcción está muy condicionada por su posible inestabilidad volumétrica, debido a la presencia de ciertos compuestos no deseados (Frías et al, 2010).

El impacto ambiental de la industria del hormigón puede reducirse si se incrementa la productividad del recurso mediante la conservación de materiales y energía para elaborar el hormigón, mediante la utilización de áridos reciclados procedentes de la construcción, residuos metalúrgicos como escorias de alto horno, de acería, de cobre, etc. como adiciones o áridos en la fabricación de hormigones

3 Por lo reflejado en el R.D. 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, resulta cada vez más costoso económicamente la eliminación mediante disposición en vertedero de estos residuos. En la normativa también se refleja una situación futura en la que se prohibirá el vertido de residuos que sean recuperables. Por ello, se ha creído que el presente estudio es necesario e importante para dar una salida sostenible y económicamente interesante a los mismos.

(Mehta & Monteiro, 2006) que minimice los efectos medioambientales del sector.

El objetivo de esta investigación es el estudio de las propiedades de de hormigones y morteros con escorias granuladas de alto horno:

Búsqueda de información sobre distintas formas de utilización de las EGAH, y los distintos procesos que han de realizarse para ello.

Se plantea el uso de distintos cementos con distintas composiciones, con los que se puede comprobar la influencia de estos, de forma aislada y conjunta con las EGAH.

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

La utilización de residuos siderúrgicos como árido en el hormigón, implicaría además un ahorro en emisiones de CO₂ importantes, sumado a la valorización y reciclaje del residuo, obteniendo un producto más sostenible y con características mecánicas y de durabilidad aceptables, incluso superiores en algunos casos.(Berridi, 2008; Yuksel et al, 2006).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos generales

Esta investigación se enfoca en la búsqueda de información con la cual se pueda corroborar que las escorias de alto horno, se pueden considerar como un producto con unas características normalizadas, capaz de ser fabricado en cualquier lugar.

Así mismo, se pretende analizar y dar especificaciones técnicas relativas a las propiedades mecánicas y de durabilidad de morteros y hormigones con escorias de alto horno , que definan patrones de comportamiento para las escorias de alto horno.

1.2.2. Objetivos específicos

Para lograr el objetivo general, es necesario alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una revisión general de las distintas investigaciones y trabajos, sobre los aspectos relacionados con la escorias granulada de alto horno.
- El establecimiento de las características más destacables de los cementos con EGAH con respecto al Pórtland de referencia..

- Analizar las propiedades de conglomerantes binarios y ternarios que contengan escorias de alto horno.

1.3. Estructura de proyecto

El proyecto de fin de carrera constará de los siguientes capítulos:

El capítulo 1, presenta la fundamentación de este trabajo, la fundamentación del mismo, la descripción del objetivo general, los objetivos específicos y la estructura, en la que se haya éste.

El Capítulo 2, aborda los aspectos generales de la escoria granulada de alto horno partiendo de una clasificación, la cual dependerá de su proceso o método de fabricación, se estudiará de sus propiedades tanto químicas como físicas en un aspecto general y la aplicación como adición del cemento.

El Capítulo 3, tratará las propiedades en estado endurecido de hormigones y morteros con adiciones de EGAH, como conglomerantes binarios y ternarios: resistencia a compresión, tracción y flexocompresión.

El Capítulo 4, tratará sobre aspectos referentes a la durabilidad de hormigones y morteros con EGAH, haciendo una reflexión más profunda sobre carbonatación y ataque ión cloruro

En el capítulo 5, se recogen las principales conclusiones obtenidas del presente trabajo y las propuestas futuras.

2. Escorias granuladas de alto horno

Capítulo 2.- Escorias granuladas de alto horno (EGAH)

2.1. Introducción

El incremento de la producción industrial de metales (industria siderúrgica), en la cual se produce desde hierros, aceros, fundiciones de minerales naturales hasta chatarras, ha generado un problema ambiental por la cantidad de residuos generados (residuos siderúrgicos), entre los cuales se encuentran las escorias siderúrgicas, polvos de acería, arenas de fundición entre otros, formando un conjunto no homogéneo de subproductos, cuyo aprovechamiento se presenta en una primera aproximación de un modo relativamente asequible y teóricamente sencillo.



Figura 1: Escoria granulada de alto horno

El objetivo principal de este capítulo es enfocarnos al estudio de las escorias siderúrgicas, partiendo de una clasificación, la cual dependerá de su proceso o método de fabricación u obtención, se estudiará así sus propiedades tanto químicas como físicas en un aspecto general, y las aplicaciones que hasta ahora se han realizado, de acuerdo a estas propiedades.

2.2. La escoria y su clasificación

La escoria siderúrgica da nombre al material fundido obtenido tras las reacciones químicas entre la materia prima, los materiales añadidos al horno y las impurezas oxidadas durante el refinado del metal (Amaral, 1999).

En el proceso de fusión en el horno, por decantación debido a la diferencia de densidad, una cierta cantidad de material no metálico por lo general, se genera y acumula, y se conoce con el nombre de escoria. Las cenizas del coque, los productos de oxidación, materiales refractarios consumidos y otros, contribuyen a la formación de escoria.

La escoria se genera de la fabricación de hierro, acero, níquel, manganeso, cromo, cobre, etc, contando todas ellas con funciones metalúrgicas semejantes, variando en gran medida sus propiedades físicas y químicas. Siendo las más utilizadas en el campo de la construcción las de la fabricación del hierro y del acero, por lo que serán estas últimas las estudiadas en este trabajo y de forma más exhaustiva las provenientes de los Altos Hornos en la fabricación de hierro.

En términos de porcentaje, la proporción de escoria generada respecto de la materia prima utilizada tampoco es constante. Para las fundiciones no ferrosas se obtiene un promedio de 10 % de escoria. Para las fundiciones ferrosas, el porcentaje promedio de escoria generada respecto a la chatarra ingresada al proceso es del 12%, con variaciones entre un 4,5 y un 24%. Esta variación es dependiente

del tipo de horno de fusión utilizado y de la calidad de la materia prima (Guía técnica para el manejo de escorias de fundiciones).

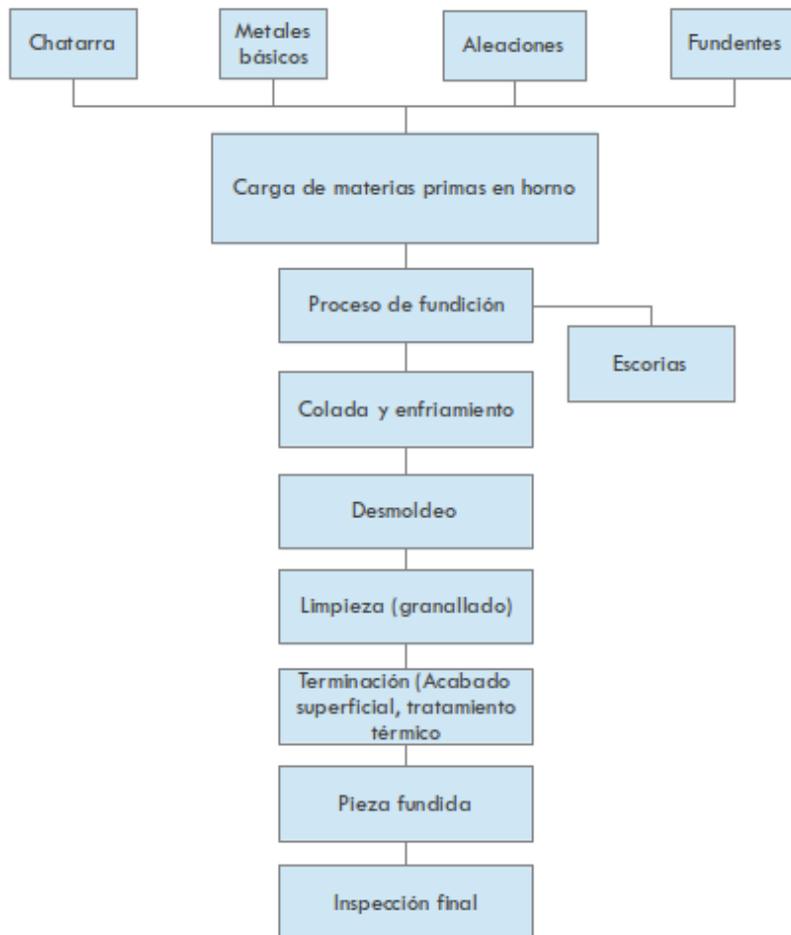


Figura 2: Diagrama de flujo genérico del proceso siderúrgico para el manejo de las escorias

2.3. Clasificación de las escorias

2.3.1. En función de su procedencia

Según Amaral, 1999 las escorias se pueden clasificar según su procedencia, en dos grupos principales, dependiendo del material que se desee obtener.

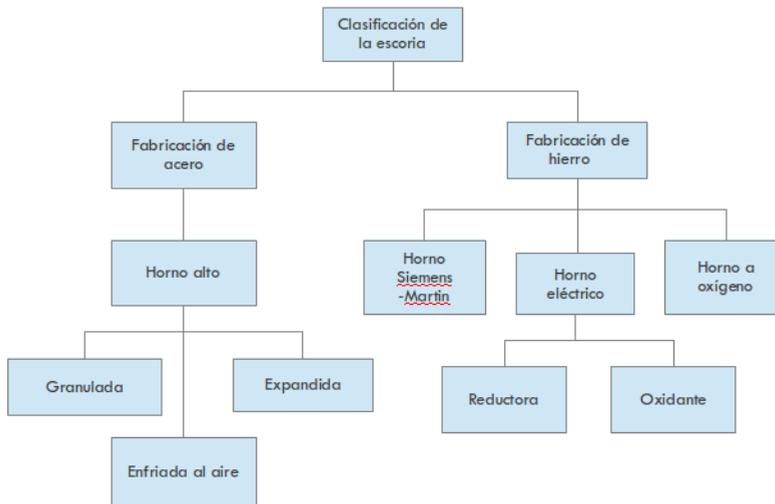


Figura 3: Clasificación de escorias según su procedencia (Amaral, 1999)

2.3.2. En función del enfriamiento de la escoria

Escorias con misma composición química pueden presentar diferente actividad hidráulica conforme el proceso de enfriamiento utilizado , ya que pueden poseer distintos contenidos en fase vítrea. De la misma forma, para un mismo proceso de enfriamiento, según la composición química, se obtienen escorias con diferente actividad hidráulica.

Como resultado del enfriamiento, se pueden encontrar dos tipos de partículas de escoria principales : partículas vítreas reactivas “escorias granuladas”; y “escorias cristalizadas”, no reactivas (Batagin & Esper,1988).



Figura 4: Clasificación de las escorias en función del enfriamiento

También contempla un tercer tipo de partícula de escoria: partícula vítrea que contienen de cristales de varias formas, más reactivas que las vítreas puras, que se denominan “escorias dilatadas”.

La escoria granulada presentan las partículas vítreas ($SiO_2(I)$), en la siguiente ilustración), que representa entre un 85y un 95% del total del peso en Tsuyuki & Koizumi, 1999, aunque en Puertas, 1995, considera que está en función de la historia térmica experimentada; y dentro de las partículas cristalinas, mediante una espectrometría fotoelectrónica de rayos X, haya dos fases diferenciadas:

- Fase cristalina cálcarea-carbonatada $CaO-SiO_2(SiO_2(II))$: es la mayoritaria, de las cristalinas, y la que menor energía de unión presenta.
- Fase cristalina alúmina-carbonatada $Al_2O_3-SiO_2(SiO_2(III))$

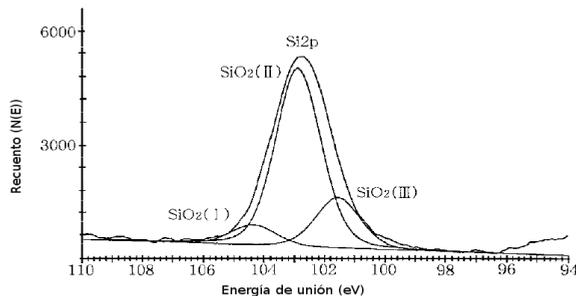


Figura 5: Separación de los espectros de silicio 2p en la superficie granular de la EGAH con una superficie específica de $4680\text{ cm}^2/\text{g}$ (Tsuyuki & Koizumi, 1999)

Según Rodríguez et al, 1996:

- Si el **enfriamiento es lento** (escoria cristalizada), se obtienen productos con la estructura esencialmente cristalina, formados por silicatos (Ca-Mg-Al), que no tienen propiedades hidráulicas. Pueden ser molidas y granuladas para obtener granos con dureza muy elevada y resistente, lo que permite su uso como árido de primera calidad. Las propiedades del árido van a depender de la composición y de la velocidad de enfriamiento. Las escorias ácidas generalmente producen un árido más denso que las escorias básicas que producen una estructura vesicular o celular con masa específica aparente menor ($2000-2800\text{kg/m}^3$) (Edgar; 2001).

Por lo que respecta al uso de escoria siderúrgica, como árido para la fabricación de hormigones, la Instrucción Española de Hormigón Estructural, EHE,2008, permite su utilización, y dentro de éstas se pueden incluir las escorias siderúrgicas enfriadas por aire según UNE-EN 12620, siempre y cuando se compruebe previamente que son estables, es decir, que no contienen silicatos inestables ni compuestos ferrosos.

- Si el **enfriamiento es rápido** (escoria granulada o peletizadas), con agua o con combinación de agua-aire, la

estructura queda colapsada y la escoria solidifica mayoritariamente como material vítreo amorfo, de granulometría más gruesa, con cierto contenido de humedad, y gran energía interna (aproximadamente el calor de cristalización es de 200 J/g) (Puertas,1993). Posee una hidraulicidad latente o potencial, cuyas propiedades serán las de un material altamente reaccionable, y en función de su tamaño de grano y superficie específica, poseerá propiedades puzolánicas notables que finamente molidas y amasadas con agua son capaces de fraguar y endurece.

Las propiedades puzolánicas estarán en función del grado de reacción de estos materiales, el cual se debe a la sílice reactiva de la adición que reacciona con el hidróxido de calcio (Pórtlandita) producida por la hidratación del cemento, formando hidratos de silicato de calcio (tobermorita) adicionales. La formación de tobermorita adicional reduce ala porosidad de la pasta y aumenta la resistencia del hormigón (Mehta, 2002). Para conseguir propiedades puzolánicas las escorias, requieren un activador álcali para iniciar la reacción química con la Portlandita.

La actividad hidráulica de las escorias se caracteriza por los módulos de basicidad (M_b) y de actividad (M_a). El módulo de basicidad es la relación entre la suma de los

óxidos básicos y la suma de los óxidos ácidos que contienen escoria. Con relación al módulo de basicidad se distinguen escorias básicas, para las cuales de $M \geq 1$, y ácidas, cuando $M_b < 1$, siendo las primeras más activas (Salazar Jaramillo). Las escorias ácidas se obtienen en procesos siderúrgicos de minerales pobres en hierro (Puertas, 1993).

La actividad hidráulica de las escorias de alto horno aumenta al crecer el módulo de actividad que se determina por la siguiente relación

$$M_a = \frac{(Al_2O_3)}{SiO_2}$$

Esta capacidad hidráulica potencial de las escorias está muy atenuada y se manifiesta con lentitud, precisando de ciertos activadores para acelerar sus reacciones de hidratación (Puertas, 1993).

La hidratación de la escoria sin la presencia de un agente activante es muy lenta, incluso, los productos de hidratación se pueden encontrar después de muchos meses. Metha reportó que la EG AH, después de estar por algunos minutos en contacto con el agua, forma una capa impermeable de aluminosilicato sobre la superficie de los granos de escoria, lo cual inhibe la reacción de

hidratación. Esto sucede, a menos que un activador químico como cemento Pórtland, yeso, silicato de sodio, álcalis, se encuentre presente para deshacer esta capa y continuar la reacción de hidratación.

Escalante-García et al, 2002, estudió los productos de hidratación de la escoria de alto horno activada por varios álcalis. Utilizó como activadores $\text{Na}_2\text{nSiO}_{2,n}$, NaOH , y mezclas de carbonato, sulfato e hidróxido. Sus estudios comprobaron que el mayor productor de hidratación, encontrado entre todos los agentes activantes fue el gel C-S-H. Para los tres activadores alcalinos, los estudios de rayos X, identificaron la presencia de hidrotalcita, y también concluyó que la escoria que reacciona con mayor intensidad es la que se activo con NaOH .

En Maia Rebelo, 2012, estudian la formación de compuestos como la hidrotalcita y la influencia con distintas temperaturas (30-45°) y distintos pH (9-12), en soluciones acuosas con NaOH . En donde se comprueba que se forman un sistema a 30 °, Mg-Al-CO_3 , y otro a 45°, Mg-Al-Cl-CO_3 , presentan un ámbito hexagonal, y forman un material en el que se genera microporosidad. Además que con pH superiores se producen cristales de hidrotalcita con buenos valores de célula y bien cristalizados.

Gonzalez , 2011, indica que la escoria necesita un activador alcalino para su participación en la fase de

hidratación del hormigón, pudiendo ser hidróxido cálcico, sódico o potásico entre otros. La escoria al mezclarse con pasta de cemento en fase de hidratación, consume el hidróxido cálcico liberado en la hidratación del cemento y propicia la activación de la escoria y esta a su vez participa en la fase de hidratación con compuestos similares a los del cemento Pórtland, por lo que puede mejorar en gran medida la interfaz de unión entre el propio árido y la pasta de cemento.

Por su parte en , Fernandez Jiménez et al,1995, realiza procesos de activación sobre escoria de alto horno, cuyo principal producto de hidratación formado es el gel C-S-H , con distintos activadores alcalinos-sulfáticos, con los que evalúa el calor desprendido, la evolución del calor y grado de reacción (ordenados de mayor a menor) en la tabla 1.

Tabla 1: Consecuencias de distintos activadores alcalinos con diferentes concentraciones

Activador	Concentración	Consecuencias
NaOH ¹	1 N	Elevadas resistencias, y evolución de calor de hidratación. Disminución del periodo de inducción
Na ₂ CO ₃	2 N	
Ca(OH) ₂	3,5·10 ⁻³ N	Bajos calores de hidratación y su velocidad más lenta. Se produce un aumento del periodo de inducción, por el efecto de "ión común" por el aumento en la disolución de Ca ²⁺ .
CaSO ₄ ·2H ₂ O	3,0·10 ⁻³ N	

Otro uso de las escoria granuladas descrito por Gonzalez , 2011, es la conocida como “grava-escoria” contando con un 15 a 20% de escoria granulada y 1% de activador (generalmente cal) con un contenido aproximado de 10% de agua. Las resistencias obtenidas son entre 60 a 100 kg/cm² a compresión y de 6 a 15 kg/cm² a tracción, valores similares a los de grava-cemento convencional. Sus principales características son un bajo calor de hidratación, fácil colocación y facilidad de transporte a grandes distancias, sin problemas de fraguado.

Permite su uso como adición activa en la fabricación de cementos. La escoria vítrea puede formar parte del material cementante, si las partículas fueron secas y la granulometría de las partículas, en su mayor parte, son menores de 45 μm, o que corresponden aproximadamente a 500 m²/kg de área específica de Blaine Mehta & Monteiro, 2006

1 Genera una gran cantidad de CaCO₃, que es un compuesto estable e insoluble, que da lugar a materiales con buenas características resistentes.

2.4. Escoria de alto horno

El horno alto es aquel, en el que se introduce un gas reductor a presión (por norma general CO) por la parte inferior, y una carga de materia constituida por minerales de hierro, coque y fundentes por la parte superior, separándose dos productos: el hierro y las impurezas con los fundentes (escoria primaria), que van evolucionando en su composición hasta llegar a la parte baja del horno, denominada crisol, formándose dos productos finales: el arrabio y la escoria. Estos productos fluyen juntos en estado líquido, a través de un orificio situado en la parte baja del crisol, piqueta, a una especie de balsa, produciéndose la separación definitiva del arrabio y la escoria por diferencia de densidad. CEDEX, 2011 CEDEX, 2009.

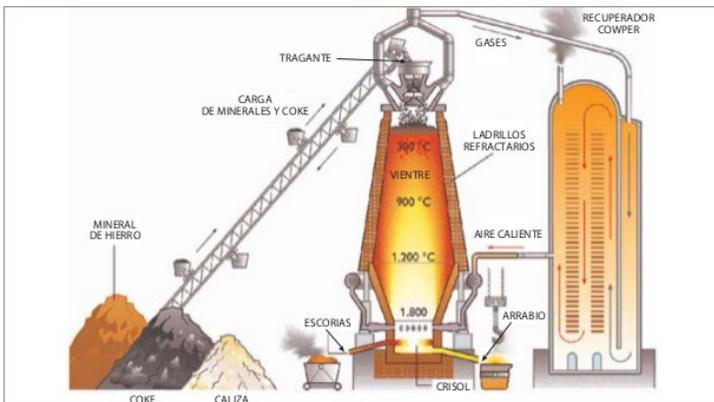


Figura 6: Obtención de las escorias en un alto horno Sanjuán et al., 2011

La escoria de alto horno es un subproducto derivado de la producción de acero. Se origina como resultado de la fusión y combinación, a temperatura de orden de 1600°C, de los constituyentes arcillosos del mineral de hierro, las cenizas de azufre del coque, la cal y la magnesia procedente de la roca carbonatadas usadas como fundentes en el proceso siderúrgico. Tras el posterior enfriamiento se obtiene la escoria (Rodríguez et al, 1996).

La cantidad de escoria producida equivale a 300 kg o 330Kg de escoria por cada tonelada de acero producido, dependiendo del autor (Neville, 2010).

El volumen total de escorias de horno alto generadas durante el año 2005 en España se estimó en 1.283.000 t, de las cuales 614.000 t fueron granuladas y 669.000 t cristalizadas, la provincia donde se genera es Gijón (Asturias) (CEDEX, 2011)

2.5. Composición química de la escoria

La composición química de la escoria está vinculada a la eficiencia del horno y al tipo de mineral empleado (de los minerales de hierro, de las cenizas del coque utilizado como combustible y de los óxidos de los fundentes), por lo tanto, está relacionada con la homogeneidad de la escoria líquida. Poseen una composición similar al clínker de cemento Pórtland pero con una menor cantidad de CaO (Alonso, 2011), con geometría de las partículas angulares y subangulares.

Químicamente son consideradas por Mehta & Monteiro, 2006 como un producto no metálico constituido esencialmente de silicatos y aluminosilicatos de calcio y otras bases. Su composición química debe obedecer la relación:

$$\frac{(CaO + MgO + Al_2O_3)}{SiO_2} > 1$$

Este autor Mehta & Monteiro, 2006, también mencionan que la escoria puede presentar un excesivo contenido de sulfuro de hierro, que puede causar problemas de manchas y afectar a la durabilidad del hormigón. El sulfuro se puede convertir en sulfato y permitir el ataque al hormigón, recomendando la limitación del contenido de SO_3 . Otro de los inconvenientes que puede presentar es la posible falta de estabilidad, debido a un contenido demasiado alto de magnesia (MgO), en forma de periclasa, cuyos cristales reaccionan con el agua a temperatura ambiente en un período a medio y largo plazo, dando lugar a tensiones internas en el material endurecido.

Aportan resistencia mecánica a largo plazo; y además dan compuestos hidratados menos vulnerables a los ataques químicos (SO_4^{2-} y Mg^{2+}).

A continuación se presenta la composición química de la escoria, que admite diversas posiciones en el diagrama SiO_2 - Al_2O_3 - CaO .

Si se coloca en un diagrama triangular los diversos materiales que se utilizan en la práctica se puede apreciar que las puzolanas y cenizas volantes, están sobre la línea SiO_2 - Al_2O_3 , en el primer tercio, partiendo de SiO_2 . La recta que atraviesa el área de las puzolanas hasta el polo CaO , cruza una zona común para las escorias de alto horno (escorias ácidas y escorias básicas), los

clinker del cemento Pórtland, las cales hidráulicas para terminar en el polo representativo CaO.

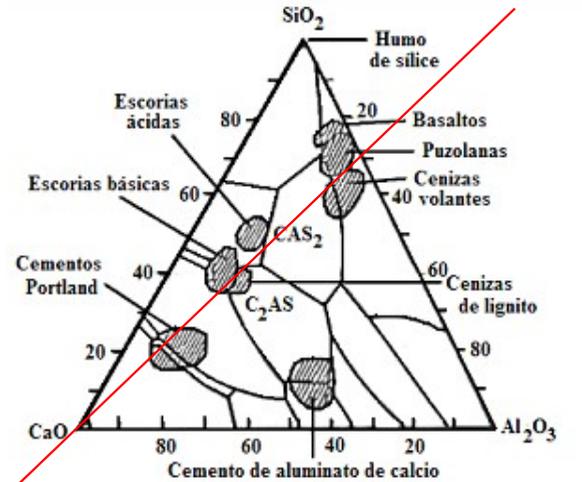


Figura 7: Diagrama $SiO_2-Al_2O_3-CaO$ (Alonso, 2011)

2.6. Composición mineralógica

Entre las fases de la escoria se encuentra la merwinite ($Ca_3Mg(SiO_4)_2$) y la diopside ($CaMgSi_2O_6$); la merwinite es una fase frecuente en los hornos de la industria siderúrgica, independientemente del grado de cristalización que la escoria alcance. Ambas fases favorecen las estructuras sometidas a altas presiones, debido a la disposición octaédrica y tetraédrica de las moléculas de MgO_6 y SiO_4 en la red cristalina. Otra fase es la sílice, uno de los mayores contaminantes del acero que al combinarse con la cal forma los silicatos $2CaO.SiO_2$ y $CaO.2Al_2O_3$; también están presentes óxidos tales como SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO (Montalvo et al, 2006).

Los componentes ácidos, Oxido de Sílice y Aluminio se combinan con los componentes básicos, la Cal y la Magnesia en diferentes relaciones en forma de elementos compuestos de carácter sílico-aluminato o cálcico magnésico complejos.

Tabla 2: Componentes mineralógicos de las escorias (Batagin & Esper, 1988; Puertas, 1993).

Denominación	Formula química simplificada	Actividad hidraulica	Observaciones
Adkermanita	C_2MS_2	ausente	Componente principal de la escoria básicas
Gelenita	C_2AS	ausente	Componente principal de la escoria básicas
Merwinita	C_3MS_2	ausente	Componente principal o secundario de la escoria básicas
Monticelita	CMS	ausente	Componente secundario de la escoria básicas
Wollastonita	CS	ausente	Componente principal de la escoria ácida
Diopsido	CMS_2	ausente	Componente principal de las escorias ácidas
Forsterita	M_2S	ausente	Componente secundario de la escoria básicas
Enstatita	MS	ausente	Componente secundario de la escoria ácidas
Espinelio	MA	ausente	Componente secundario de la escoria ácidas
Anortita	CAS_2	ausente	Componente principal de la escoria ácidas
Rankinita	C_3S_2	ausente	Componente secundario de la escoria básicas
Alita	C_3S	presente	Ausente en las EGAH, presente en las escorias de acerías y clinker
Belita	C_2S	presente	Ausente en las EGAH, presente en las escorias de acerías y clinker

La Alita y la Belita presentes en el cemento como silicato tricálcico y dicálcico, responsables de su resistencia, rara vez se presenta en las escorias de alto horno, pero se encuentran en escorias de acerías. (González de la Costera, Congreso de la Ingeniería Química) En la química del cemento se utiliza de

modo habitual la siguiente notación abreviada para referirse a los distintos compuestos de cemento: C =CaO, A=Al₂O₃, F=Fe₂O₃, S=SiO₂, H=H₂O, M=MgO, N=Na₂O+K₂O y S=SO₃.

Los componentes mineralógicos de la escorias denominadas melilitas (akermanita y gelenita) y la merwinita son características de escorias básicas, así como la wollastonita y la anortita son características de las escorias ácidas (Batagin & Esper,1988).

Las escorias de composición melilitica enfriadas rápidamente son las que potencialmente presentan mejores propiedades hidráulicas. (Massucato, 2005).

Según Calleja, 1982, las ventajas de un rápido enfriamiento de escorias fundidas son los siguientes:

- Aumentar el contenido de fase vítrea y la hidraulicidad de la escoria.
- Evitan la transformación de silicato dicálcico (C₂S), (expansividad en la hidratación)
- Elimina por completo los efectos indeseados de compuestos SH₂ y SO₂
- Permanencia en forma vítrea de Mg, en lugar de los cristales expansivo en la hidratación, obteniendo así, escoria reactiva y estable.

Mineralógicamente, casi el 70% de escoria es vítrea, se compone principalmente de minerales como merwinita ($C_3MS_2 = 3CaO MgO 2SiO_2$), akermanita ($C_2MS_2 = 2CaO MgO 2SiO_2$), gelenita ($C_2AS = 2CaO Al_2O_3 SiO_2$) y cuarzo (SiO_2).

Las escorias cristalinas contienen melilita como principal constituyente. En la siguiente figura se observa el esquema de la estructura de melilita.

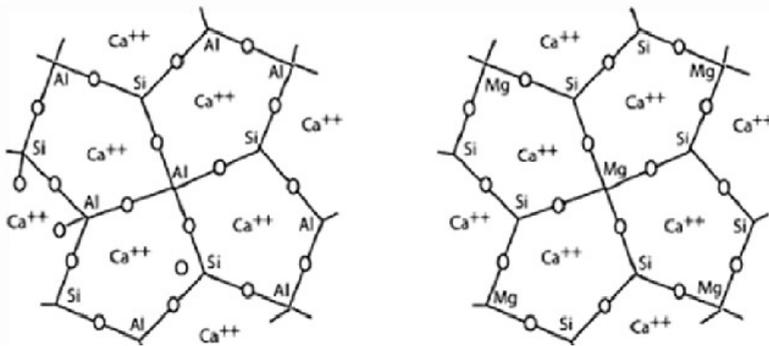


Figura 8: Esquema de la estructura de melilita. Gelenita (izquierda) y Akermanita (derecha).

2.8. Estructura vítrea de la escoria granulada de alto horno

La teoría empírica de la red propuesta por Zachariassen es la más utilizada para describir la estructura de la escoria vítrea. Esta estructura está basada en una red 3D tridimensional distorsionada formada por óxidos (Chen et al, 2012).

Los elementos que forman la red se caracterizan por sus pequeños radios iónicos y altas valencias iónicas; éstos elementos se encuentran rodeados por cuatro átomos de oxígeno (numero 4 de coordinación) en forma tetraédrica. La red está formada de tal manera que los átomos de oxígeno pertenecen al mismo tiempo a dos tetraedros, llamados oxígenos puenteados (BO = bridging oxygens).

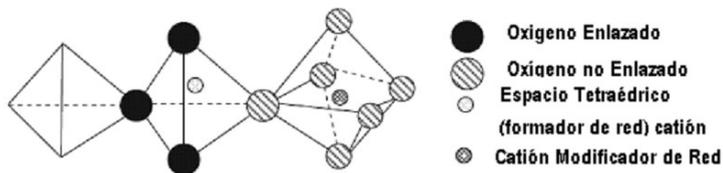


Figura 9: Definición de oxígeno no puentado por cationes coordinados tetraédricamente (NBO/T)

En la red de sílice de la escoria de alto horno vítrea se forman tetraedros de los grupos SiO_4 , cadenas y otros productos polimerizados. Las valencias negativas de estos grupos aniónicos se neutralizan por las valencias positivas de los cationes, llamados modificadores de red. Los cationes modificadores de red rompen el enlace del oxígeno y forman un oxígeno no puentado (NBO = non-bridging oxygen), O_2^- , y un oxígeno libre O_2 . El modificador de red más típico dentro de la escoria vítrea de alto horno es el ión Ca^{2+} . El grado de polimerización de la red tetraédrica de SiO_4 se reduce incrementando el contenido de modificadores de red, indicando que la parte amorfa tiene una estabilidad más pequeña y una reactividad química más alta.

2.9. Reactividad de la escoria

El grado de vitrificación (calidades, propiedades y contenido del material vítreo amorfo), composición química, composición mineralógica y la finura de escoria de alto horno son las características principales que influyen en su capacidad de reactividad² y, en general, según algunos autores, es tanto mayor cuanto mayor sea el contenido vítreo (Ceccato et al, 2009) y su superficie específica (Sanjuán et al., 2011). También influye método y/o sustancias de activación (Puertas,1993).

Según Zhang et al, 1988, la solubilidad de la escoria, y por lo tanto su reactividad frente al agua u otras sustancias de activación, depende del grado de polimerización de los tetraedros (SiO_2) y de la combinación del Al y del Mg en la fase vítrea de la escoria. Cuanto mayor es el grado de polimerización en el vidrio menores su actividad hidráulica.

La composición química de la escoria está ligada a la eficiencia del horno, y de la homogeneidad de la escoria líquida. La baja viscosidad de estas pueden verse afectadas por el contenido de alúmina, o por el valor de la relación CaO/SiO_2 , pues para valores mayores de 1,4 la composición de la escoria es más reactiva. Cuanto mayor sea el contenido de alúmina mayor será la viscosidad de la escoria, este valor según Cincotto et al, 1992, debe estar comprendido entre el 20-25%.

2 La reactividad hidráulica es la propiedad que presenta una sustancia para reaccionar con el agua en grado suficiente y para producir sólidos de muy baja solubilidad.

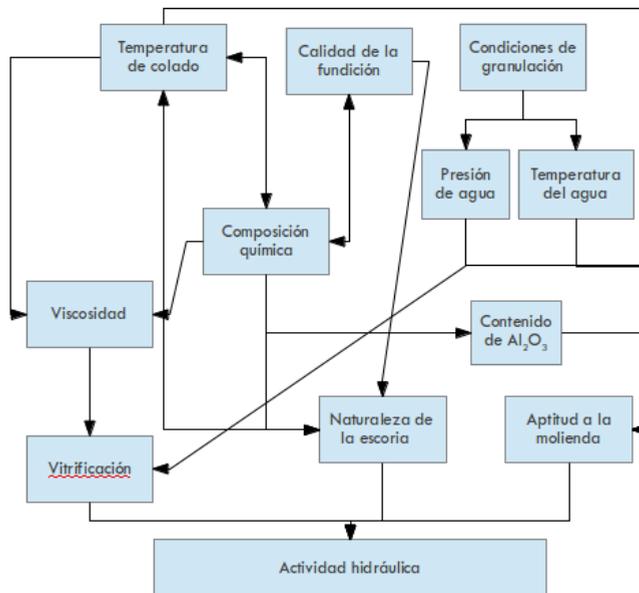


Figura 10: Reactividad de la EGAH

Las escorias de naturaleza básica, es decir, aquellas con relación $\text{CaO} + \text{MgO} / \text{SiO}_2 > 1$, tienen mayor potencial hidráulico. Narang y Chopra encontraron que escorias sintéticas con relaciones $\text{CaO} / \text{SiO}_2 \approx 1,38$ desarrollan, en su activación con NaOH , resistencias mecánicas tres veces superiores a las desarrolladas por las escorias con relación $\text{CaO} / \text{SiO}_2 \approx 1,0$. Fernandez Jiménez et al,1995

La EGAH se puede considerar, de acuerdo a su composición química, como una escoria con una buena actividad hidráulica, si cumple con los parámetros establecidos en la tabla 3.

Tabla 3: Formulas de actividad hidráulica de la EGAH.

Número	Fórmula	Relación de composición necesaria para un buen funcionamiento
1	CaO/SiO_2	1.3-1.4
2	$(CaO+MnO)/SiO_2$	>1.4
3	$(CaO+MnO)/SiO_2+Al_2O_3$	1.0-1.3
4	$(CaO+1.4MnO+0.56Al_2O_3)/SiO_2$	>1.65
5	$(CaO+MnO+Al_2O_3)/SiO_2$	>1.0

Wolter y colaboradores Cheng et al, 2007 midieron la reactividad hidrolítica de granos de escoria hirviendo 0.03g de escoria con varias composiciones por 1h en 50mL de agua destilada y titulando los lixiviados alcalinos con 0.01 mol/L HCl. La cantidad de HCl necesaria se toma como una medición de la reactividad hidrolítica. En sus resultados, los autores presentaron una buena correlación entre la reactividad hidrolítica y la relación NBO/T, confirmando que la estructura de la escoria es una importante influencia en la reactividad de la misma. Clark y Zoitos correlacionaron el cálculo de energía libre de la hidratación de la parte amorfa para alrededor de 150 escorias con el número de oxígenos no puenteados (calculados en una manera similar como

la relación NBO/T^3 con la T reemplazada por moles de los óxidos de silicio). Los resultados mostraron que existe una relación lineal entre la energía libre calculada y el NBO de los vidrios. Los vidrios con altos valores de NBO son más reactivos que los que tienen valores de NBO pequeños.

2.10. Usos de las escorias en morteros y hormigones

Dichos usos vienen definidos en función de la finura de las escorias por la superficie de específica o de Blaine, relacionada con el tamaño de árido, como se puede comprobar en la figura 10.

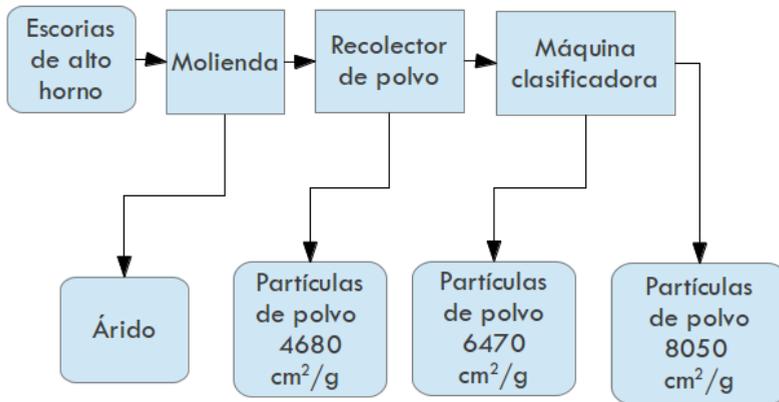


Ilustración 11: Proceso de obtención para distintos formatos de EGAH Tsuyuki & Koizumi, 1999

- 3 Una propiedad importante con respecto a cómo se distorsiona la red, es el grado de despolimerización de la sílice. Esto se expresa por la relación de átomos de oxígeno no puenteados con el número de átomos tetraédricos (por ejemplo, Si), denotado como la relación del número de oxígenos puenteados en cada tetraedro.

2.10.1. Como adición parcial total o parcial de cementos

La finura de la escoria es un parámetro importante, según Mukjerhee & Pathak, 2005, la finura de la escoria debe ser mayor que la del cemento. Como todos los materiales cementantes, la reactividad de la escoria es determinada por el área superficial. Además este ha de tener una superficie de Blaine mayor que permite que las reacciones se desarrollen con cierta facilidad Fernandez Cánovas, 2002.

La superficie específica de la escoria tiene también una gran influencia sobre la velocidad e intensidad de sus reacciones de hidratación, expresada como el área total de las partículas en relación con su masa, en cm^2/g o e en m^2/kg .

En sus estudios sobre el efecto de los componentes finos del cemento de escoria de alto horno, Öner et al, 2003 presenta una gráfica que correlaciona el área superficial y tiempo de molienda del clinker y la escoria permitiendo estimar el tiempo de molienda requerido para cierto valor de superficie específica.

Para Gjorv, 1989 ese rango se sitúa entre 4.200-6.000 cm^2/g , aunque Fernandez Cánovas, 2002 lo fija en 4000 -5000 cm^2/g , y además apunta que una mayor finura de molido, exige un mayor consumo de energía repercutiendo negativamente en el coste del cemento.

Wang et al, 1994 indica que ese rango óptimo de superficie específica debe de ser determinado atendiendo a factores no únicamente resistentes, sino

también tecnológicos y económicos. A partir de sus resultados comprueban que la superficie específica óptima de la escoria depende de la naturaleza de la misma, de los activadores y de las condiciones de curado. Así, indican que la superficie específica óptima para las escorias ácidas ó neutras es de 4.500 - 6.500 cm²/g, mientras que en las escorias básicas esa superficie debería de estar entre 4.000-5.500 cm²/g. Si las condiciones de curado son aceleradas, la efectividad del incremento de la finura de la escoria puede ser reducida.

2.10.2. Como árido

La escoria granulada, usada como árido fino influye en las propiedades del hormigón fresco, debido a su granulometría abierta (contenido insuficiente de finos), la forma angulosa de los granos, fiabilidad y densidad variable, siendo estos factores desfavorables en cuanto a la consistencia y homogeneidad en el hormigón Coelho , 2002.

La incorporación de la escoria de alto horno, como árido, puede mejorar algunas propiedades del hormigón, aumentar la durabilidad, debido a la alteración de la microestructura y a la disminución de la permeabilidad, resultando también un aumento de resistencia frente al ataque de sulfatos, protección con la reacción álcali-árido, mejoras en la trabajabilidad, aumentar la resistencia mecánica final y disminuir el calor de hidratación Kosmatka et al, 2004.

Al igual de lo que sucede con los áridos naturales utilizados para la elaboración de hormigones, en el caso de emplear escorias de alto horno como árido estos dependerán de su composición química, mineralógica, finura, su reactividad,..., mientras que en un árido natural las propiedades principalmente dependen de las características de la roca original a partir de la cual fueron obtenidos

En las investigaciones de Yuksel et al, 2006) y Numata et al, 1986 presenta cómo el uso de escoria granulada de alto horno (EGAH), como árido fino afecta a la durabilidad del hormigón. Mediante imágenes SEM, prueban que las propiedades químicas y físicas de la EGAH, son los principales factores que van afectar a la durabilidad del hormigón.

Numata et al, 1986 observa a través del microscopio de barrido una capa hidratada de C-S-H en la interfase de los granos de escoria, y que los hormigones que presentaban EGAH como árido fino presentaban una mejor resistencia frente al ataque de ácidos, que los hormigos constituidos con árido de río, justificando sus resultados porque los hormigones con escorias presentaban una mejor interfaz.

En Nadeem & Pofale, 2012 tras la realización de ensayos de resistencia a compresión y cortante, concluyen que puede ser utilizada como material alternativo de construcción de la arena natural en albañilería y enfoscados, con una sustitución parcial o total.

Los resultados de análisis granulométrico de las fracciones 0–3 y 3–7 mm, de las EGAH se dan en la tabla 3.5 y otras propiedades físicas de EGAH.

En cuanto a resistencia a compresión en la investigación llevada por Scandiuzzi & Battagin, 1990 observa que presentan mejores resistencias a compresión los morteros con escorias granuladas de alto horno (15% superiores) con árido fino, en comparación con arena natural, a los 91 días, mientras que a 28 días la resistencia a compresión era mayor en los morteros con arena natural. Justificando dichos resultados a la actividad hidráulica tardía de la EGAH, que pudo observar con microscopio electrónico de barrido

Como árido grueso, en el estudio de Lauber, 2009 y Berridi, 2008, sobre una serie de hormigones en el que emplea diferentes residuos metalúrgicos como árido grueso, entre los que se encuentran los hormigones fabricados con escorias de alto horno en fracción 4/20 en sustitución al árido natural en un 25 ,50 y100%, que se les designa como HHA25, HHA50 y HHA100 respectivamente.

3. Propiedades en estado endurecido

Capítulo 3. Propiedades en estado endurecido

3.1. Introducción

En este capítulo se va poner especial atención en la resistencia a compresión, tracción y el módulo de elasticidad (referidas en resistencia a flexión) de hormigones y morteros con EGAH.

3.2. Resistencia a compresión

3.2.1 .Introducción

Esfuerzo máximo soportado por un material bajo una carga de aplastamiento. Se calcula dividiendo la carga máxima por el área transversal original de de una probeta en un ensayo a compresión.

Es uno de los parámetros más importantes e influyentes para el cálculo de hormigones, de forma conjunta con las clases de exposición y la relación a/c , en función de los materiales utilizados para la realización de la mezclas.

3.2.1.1. Clases de exposición en las normativas ACI, UNE y EHE

3.2.1.1.1. Clases de exposición recogidas en ACI 318

En el capítulo 4 de ACI 318-2008 se recogen las distintas clases de exposición, y las clasifica en los siguientes categorías, que engloban a las clases de exposición:

Tabla 1: Categoría F. Hielo y deshielo

Severidad	Clase	Condiciones
No aplicables	F0	Hormigones no expuestos a ciclos de hielo-deshielo
Moderado	F1	Hormigones expuestos a ciclos de hielo-deshielo expuestos ocasionalmente a la humedad. Como por ejemplo elementos que se encuentran en contacto directo con el suelo
Severo	F2	Hormigones expuestos a ciclos hielo-deshielo en contacto permanente con la humedad. Como por ejemplo tanques de agua superficies verticales de en contacto con el suelo.
Muy severo	F3	Hormigones expuestos a ciclos hielo-deshielo en contacto continuo con la humedad y a materiales fundentes. Por ejemplo, elementos horizontales en estructuras de parking.

Tabla 2: Categoría S. Sulfatos

Severidad	Clase	Sulfatos solubles (SO ₄) en el suelo, en % del peso	Sulfato disuelto en agua (SO ₄), en ppm
No aplicable	S0	SO ₄ < 0,10	SO ₄ < 150
Moderado	S1	0,10 ≤ SO ₄ < 1,0	150 ≤ SO ₄ < 1500 Agua de mar
Severo	S2	0,20 ≤ SO ₄ < 2,0	1500 ≤ SO ₄ ≤ 10,000
Muy severo	S3	SO ₄ > 2,0	SO ₄ > 10,00

Tabla 3: Categoría P. Requisitos de baja permeabilidad

Severidad	Clase	Condiciones
No aplicable	P0	En contacto con agua donde la baja permeabilidad no es requerida.
Requerida	P1	En contacto con agua donde se requiera la baja permeabilidad. Se suele dar cuando el elemento estructural se puede ver reducido por la absorción de agua por capilaridad, por ejemplo tanques de agua.

Tabla 4: Categoría C. Protección de las armaduras frente a la corrosión

Severidad	Clase	Condiciones
No aplicable	C0	Hormigón seco protegido de la humedad.
Moderado	C1	Hormigón expuesto a la humedad, pero no a fuentes externas de cloruros.
Severo	C2	Hormigones expuestos a la humedad y a fuentes externas de cloruros procedentes de materiales fundentes, sales, aguas salobres, agua de mar o salpicaduras procedentes de estas fuentes.

3.2.1.1.2. Clases de exposición recogidas UNE EN206

Por su parte la normativa europea, fija las siguientes clases de exposición, en la EN 206-1:2008 y las divide en:

1. Sin riesgo de corrosión o ataque.
2. Corrosión inducida por carbonatación.
3. Corrosión inducida por cloruros de origen distinto al marino .
4. Corrosión inducida por cloruros procedentes del agua de mar .
5. Ataque hielo-deshielo con o sin agentes de deshielo.
6. Ataque químico

Tabla 5: Sin riesgo de corrosión o ataque

Clase	Descripción del ambiente
X0	Hormigones sin armaduras ni metales embebidos: cualquier tipo de ambiente excepto ciclos hielo-deshielo, abrasión o ataque químico.

Tabla 6: Corrosión inducida por carbonatación

Cuando el hormigón que contiene armaduras, u otras piezas metálicas embebidas, esté sometido al aire y a la humedad ¹ los diferentes tipos de exposición se deben clasificar como sigue:		
Clase	Descripción del ambiente	Ejemplos informativos para la elección de las clases de exposición
XC1	Seco o permanentemente húmedo	Hormigón en el interior de edificios con una humedad relativa del aire baja Hormigón permanentemente sumergido en agua
XC2	Húmedo, rara vez seco	Superficies de hormigón en contacto con agua durante mucho tiempo Muchas cimentaciones
XC3	Humedad moderada	Hormigón en el interior de edificios con una humedad relativa del aire media o alta Hormigón en el exterior protegido de la lluvia
XC4	Ciclos de humedad y sequedad	Superficies sometidas al contacto con el agua, sin que puedan considerarse dentro de la clase XC2

Tabla 7: Corrosión inducida por carbonatación

Cuando un hormigón que contenga armaduras u otras piezas metálicas embebidas esté sometido al contacto con agua que contenga cloruros, incluyendo sales de deshielo, distintos a los de origen marino, los tipos de exposición se deben		
Clase	Descripción del ambiente	Ejemplos informativos para la elección de las clases de exposición
XD1	Moderadamente húmedo	Superficies de hormigón expuestas a cloruros transportados por vía aérea
XD2	Húmedo, rara vez seco	Piscinas Hormigones en contacto con aguas industriales
XD3	Ciclos de humedad y	Elementos de puentes expuestos a salpicaduras que contengan cloruros

-
- 1 Por condiciones de humedad se entienden aquellas del hormigón que recubre a las armaduras u otros metales embebidos, puesto que, en muchos casos, pueden considerarse como reflejo de la humedad ambiente. En estos casos, puede ser adecuado realizar la clasificación en función de los distintos ambientes. Esta circunstancia no sería la misma en el caso de existir algún tipo de barrera entre el hormigón y su entorno.

Tabla 8: Corrosión inducida por cloruros procedentes del agua de mar

<p>Cuando un hormigón que contenga armaduras u otras piezas metálicas embebidas esté sometido al contacto con cloruros procedentes del agua de mar, o a la acción del aire que transporta sales marinas, los tipos exposición se deben</p> <p>clasificar como sigue:</p>		
Clase	Descripción del ambiente	Ejemplos informativos para la elección de las clases de exposición
XS1	Exposición al aire que transporta sales marinas, pero sin contacto directo con el agua de mar	Estructuras en la costa o en sus proximidades.
XS2	Sumergido permanentemente	Elementos de estructuras marinas
XS3	Zonas sometidas a la marea, a la salpicadura y a la espuma de mar	Elementos de estructuras marinas

Tabla 9: Ataque hielo-deshielo con o sin agentes de deshielo

<p>Cuando el hormigón, en estado húmedo, esté sometido a ataques significativos de ciclos hielo-deshielo, los tipos de exposición se deben clasificar como sigue:</p>		
Clase	Descripción del ambiente	Ejemplos informativos para la elección de las clases de exposición
XF1	Saturación de agua moderada, sin agentes de deshielo	Superficies verticales de hormigón expuestas a la lluvia y a la helada
XF2	Saturación de agua moderada, con agentes de deshielo	Superficies verticales de hormigón de estructuras de carreteras expuestas a la helada y al aire que transporte agentes de deshielo
XF3	Saturación de agua elevada, sin agentes de deshielo	Superficies horizontales de hormigón expuestas a la lluvia y a la helada
XF4	Saturación de agua elevada, con agentes de deshielo o agua de mar	Carreteras y tableros de puentes expuestos a agentes de deshielo. Superficies verticales de hormigón expuestas directamente a salpicaduras de agentes de deshielo y a la helada Zonas de estructuras marinas sometidas a salpicaduras y expuestas a la helada

Tabla 10: Ataque químico

<p>Cuando el hormigón esté sometido al ataque químico procedente de los suelos naturales o de las aguas subterráneas, tal y como se indica en la tabla 2, los tipos de exposición se deben clasificar como se indica a continuación. La clasificación del agua de mar depende de la situación geográfica, por lo que se utilizará la clasificación válida en el lugar de uso del hormigón².</p>	
Clase	Descripción del ambiente
XA1	Ambiente químico débilmente agresivo, de acuerdo con la tabla
XA2	Ambiente químico moderadamente agresivo, de acuerdo con la tabla
XA3	Ambiente químico altamente agresivo, de acuerdo con la tabla

2 Puede ser necesaria la realización de un estudio específico para establecer la clase de exposición adecuada en las siguientes situaciones:

Tabla 11: Valores límite para clases de exposición para ataque químico de suelos naturales y aguas subterráneas

<p>Los ambientes químicamente agresivos indicados a continuación corresponden a suelos naturales y aguas subterráneas en los que la temperatura del agua/suelo está comprendida entre 5 °C y 25 °C, y la velocidad de circulación del agua es lo suficientemente baja como para poder considerarla en condiciones estáticas.</p> <p>La clase queda determinada por la característica química que suponga una mayor agresividad.</p> <p>Quando dos o más sustancias agresivas conduzcan a la misma clase, el ambiente se debe clasificar en la clase inmediatamente superior, a menos que un estudio específico indique que esto no es necesario.</p>				
Característica química	Método de ensayo de referencia	XA1	XA2	XA3
Aguas subterráneas				
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	EN 196-2	≥ 200 y ≤ 600	> 600 y ≤ 3000	> 3 000 y ≤ 6000
pH	prEN 13577:1999	≥ 15 y ≤ 40	> 40 y ≤ 100	> 100 (hasta saturación)
NH ₄ ⁺ (mg/l)	ISO 7150-1 o ISO 7150-2	≥ 15 y ≤ 30	> 30 y ≤ 60	> 60 y ≤ 100
Mg ²⁺ (mg/l)	ISO 7980	≥ 300 y ≤ 1000	> 1 000 y ≤ 3000	> 3000 (hasta saturación)
Suelo				
SO ₄ ²⁻ total (mg/kg) ³	EN 196-2	≥ 2 000 y ≤ 3 000 ⁴	> 3 000 ⁴ y ≤ 12000	> 12 000 y ≤ 24 000
Acidez (ml/kg)	DIN 4030-2	> 200	No se da en la práctica	

- 3 Los suelos arcillosos con una permeabilidad inferior a 10⁻⁵ m/s pueden

- 4 El método de ensayo prescribe la extracción del SO₄²⁻ mediante ácido clorhídrico; alternativamente es posible proceder a esta extracción con agua, si es la práctica existente en el lugar de uso del hormigón. ser clasificados en una clase inferior.

3.2.1.1.3. Clases de exposición en EHE

En cuanto a las clases de exposición de la EHE,2008, son una adaptación de las de UNE-EN 206-1:2008, para las condiciones dadas en España.

El tipo de ambiente es definido por el conjunto de condiciones físicas y químicas a las que está expuesto un elemento estructural, y que puede conducir a la degradación como consecuencia de efectos diferentes de efectos diferentes a los de las cargas y solicitaciones consideradas en el análisis estructural.

El tipo de ambiente viene definido por la combinación de:

- Clases generales de exposición, frente a la corrosión frente a la corrosión de las armaduras, de acuerdo con la tabla...
- Clases específicas de exposición relativas a los otros procesos de degradación que pro cedan para cada caso, de entre las definidas en la tabla

En la tabla siguiente se hallan dos columnas, con las equivalencias para las distintas normas.

Tabla 12: Clases generales de exposición relativas a la corrosión y sus equivalencias

CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN				DESCRIPCIÓN	EQUIVALENCIAS	
Clase	Subclase	Design.			UNE	ACI
no agresiva		I	Ninguno	interiores de edificios, no sometidos a condensaciones elementos de hormigón en masa	X0	F0,S0,C0
Normal	Humedad alta	IIa	corrosión de origen diferente a los cloruros	Interiores sometidos a humedades relativas medias altas (>65%) o a condensaciones Exteriores en ausencia de cloruros, y expuestos a lluvia en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm Elementos enterrados y sumergidos.	XC1 XC2 XC3	P0 C0
	Humedad media	IIb		Exteriores en ausencia de cloruros, sometidos a la acción de la lluvia, en zonas con precipitación media anual inferior a 600 mm	XC4	P1 C1
Marina	Aérea	IIIa	corrosión por cloruros	Elementos de estructuras marinas, por encima del nivel de pleamar Elemento de estructuras situadas en las proximidades de a línea costera (a menos de 5 km)	XS1	C2
	Sumergida	IIIb		Elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente, por debajo del nivel mínimo de bajamar.	XS2	
	En zona de carrera de mareas y en zonas de	IIIc		Elementos de estructuras marinas situadas en la zona de salpicaduras o en la zona de carreras de las mareas.	XS3	
Con cloruros de origen diferente del medio marino		IV		Instalaciones en contacto con agua presente un contenido elevado de cloruros, no relacionados con el ambiente marino Superficies expuestas a sales de deshielo no impermeabilizadas	XD1 XD2 XD3	

Tabla 13: Clases específicas de exposición a otros procesos de deterioro distinto de la corrosión y sus equivalencias.

CLASE ESPECÍFICA DE EXPOSICIÓN				Descripción	EQUIVALIENCIAS	
Clase	Subclase	Desig.	Tipo de proceso		UNE	ACI
Química Agresiva ⁵	Débil	Qa	Ataque químico	Elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad lenta (ver tabla 11)	XA1	S1
	Media	Qb	Ataque químico	Elementos en contacto con agua de mar Elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad media (ver tabla 11)	XA2	S2
	Fuerte	Qc	Ataque químico	Elementos situados con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad rápida (ver tabla 11)	XA3	S3
Con heladas	Sin sales fundentes	H	Ataque hielo-deshielo	Elementos situados en contacto frecuente con agua, o zonas con humedad relativa ambiental en invierno superior a 75%, y que tengan una probabilidad anual superior al 50% de alcanzar al menos una vez temperaturas por debajo de -5°C	XF1 XF2	F1
	Con sales fundentes	F	Ataque por sales fundentes	Elementos situados en contacto frecuente con agua, o zonas con humedad relativa de media ambiente en invierno superior al 75% , y que tengan una probabilidad anual superior al 50% de alcanzar al menos una vez temperaturas por debajo de -5°C.	XF3 XF4	F2 F3
Erosión		E	Abrasión y/o cavitación	Elementos sometidos a desgaste superficial Elementos de estructuras hidráulicas en los que la cota piezométrica pueda descender por debajo de la presión de vapor de agua	-	-

5 Los parámetros para la distinción entre las clases de exposición, son los mismos que para UNE, que se encuentran en la tabla 11

3.2.1.2. Resistencia en las normativas ACI, UNE y EHE

3.2.1.2.1. Resistencia característica o especificada del proyecto

En la EHE, 2008 y EN 206-1:2008, toma como referencia, f_{ck} , que es la resistencia característica, y se define como valor de la resistencia por debajo del cual puede encontrarse el 5% de la población de todos los posibles resultados de medida de resistencia efectuados sobre el volumen de hormigón considerado.

El valor mínimo de f_{ck} ha de ser para hormigón armado 25 MPa, y para hormigones en masa 20 MPa.

En ACI 318:2008 toma como referencia f'_c , que se denomina resistencia específica a compresión del hormigón, siendo la empleada en el diseño y evaluada de acuerdo con las consideraciones de durabilidad.

El valor mínimo para f'_c no ha de ser menor de 17 MPa.

A menos que se especifique lo contrario, f'_c y f_{ck} debe basarse en ensayos a los 28 días, pudiendo decidir la edad a la que realizar los ensayos siendo indicado en las especificaciones de diseño o en los planos.

3.2.1.2.2. Resistencias de cálculo.

En la EHE,2008 se recoge f_{cd} , como la resistencia de cálculo a compresión:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

De donde de:

- α_{cc} : factor que tiene en cuenta el cansancio del hormigón cuando está sometido a altos niveles de tensión de compresión debido a cargas de larga duración. En esta Instrucción se adopta, con carácter general, el valor $\alpha_{cc} = 1$. No obstante, el Autor del Proyecto valorará la adopción de valores para α_{cc} que sean menores que la unidad ($0,85 \leq \alpha_{cc} \leq 1$) en función de la relación entre las cargas permanentes y las totales o en función de las características de la estructura.
- f_{ck} : Resistencia característica del proyecto.
- γ_c : Coeficiente parcial de seguridad que adopta los valores:

Tabla 14: Coeficientes parciales de seguridad

Situación de proyecto	Hormigón γ_c
Persistente o transitoria	1,5
Accidental	1,3

En la norma ACI 318:2008 se recoge como la resistencia de diseño, que consiste en la aplicación de un coeficiente de reducción ϕ a un elemento, en función de sus conexiones con otros elementos, así como sus secciones transversales, en términos de flexión, carga axial, cortante y torsión. Ésta debe ser tomada como la resistencia nominal calculada de acuerdo con los requisitos y superposiciones de la norma, multiplicada por los factores ϕ de reducción de resistencia dados, que para el caso de esfuerzos a compresión serán:

Tabla 15: Valores de la reducción de resistencia ϕ

Situaciones		ϕ
Compresión	Elementos con refuerzo en espiral	0,75
	Otros elementos reforzados	0,65
En caso de se realizado un hormigón estructural simple (que abarque los esfuerzos de flexión, cortante, compresión y aplastamiento)		0,60

3.2.2. Material cementante

3.2.2.1. Especificaciones de las escorias de alto horno para su uso en cemento UNE-206 y EHE

Según la UNE-EN 197-1:2011 y EHE recoge a la escorias granuladas de alto horno como material integrante de cemento, bajo una serie de requerimientos:

- Deben estar constituidas, al menos por dos tercios de su masa por escoria vítrea.
- Poseer propiedades hidráulicas, cuando se activa de manera adecuada.
- Ha de estar constituida al menos de dos tercios de su masa por la suma de óxido de calcio, óxido de magnesio y dióxido de silicio. El resto ha de estar compuesto por óxido aluminico y pequeñas cantidades de otros óxidos.
- Se ha de cumplir la relación :

$$\frac{(\%CaO + \%MgO)}{\%SiO_2} \geq 1$$

Los cementos tipificados en la anterior norma, y que contienen escorias de alto horno son:

Tabla 16: Cementos con escorias de alto horno recogidos en laUNE-EN 197-1:2011

Denominación	Designación	Contenido de escorias de alto horno (%)
Cemento Pórtland con escoria (Cementos con escorias de alto horno de baja resistencia inicial)	CEM II/A-S	6-20%
	CEM II/B-S	21-35%
Cemento Pórtland mixto	CEM II/A-M	12-20% (entre S, SF, FA, L, LL)
	CEM II/B-M	21-35% (entre S, SF, FA, L, LL)
Cemento con escorias de alto horno	CEM III/A	36-65%
	CEM III/B	66-80%
	CEM III/C	81-95%
Cemento compuesto	CEM V/A	18-30% (18-30% P, Q, V)
	CEM V/B	31-50% (31-50% P, Q,V)
Cementos para usos especiales	ESP VI-1	45-75% (entre S, P y FA)

También se utilizan varios tipos de cemento que no contienen escorias, que pueden o no incluir otros componentes principales, a lo largo del trabajo:

Tabla 17: Cementos utilizados en la bibliografía con adiciones de EGAH.

Denominación	Designación	% clinker	Componentes principales
Cemento Pórtland	CEM I	95-100%	-
Cemento Pórtland con cenizas volantes	CEM II/A-V	80-94%	6-20%
	CEM II/B-V	65-79%	21-35%
Cemento Pórtland con caliza	CEM II/A-L ⁶	80-94%	6-20%

Estos cementos están permitidos, y todos los incluidos en la norma UNE-EN 197-1:2011, incluso los cementos comunes con características adicionales de bajo calor de hidratación. Estos últimos, son aquellos que cuyo calor de hidratación a la edad de 7 días (medido según UNE-EN 196-8) ó a las 41 horas (de acuerdo a la norma de UNE-EN 196-9) no supere el valor característico de 270 J/g.

Además los cementos tipificados han cumplir unas especificaciones químicas y, físicas y mecánicas:

⁶ En O'Connell et al, 2012 se comprueba que presenta una capacidad inherente de resistencia a sulfatos, relativa a un cemento Portland CEM I, muy útil para medios con un grado medio y/o elevado de sulfatos. Es utilizado en McNally&Sheils, 2012.

Tabla 18: Exigencias mecánicas y físicas dadas como valores característicos

Clase de resistencia ⁷	Resistencia a compresión				Tiempo fraguado		Estabilidad de volumen	Calor de hidratación ⁸	
	Resistencia inicial (N/mm ²)		Resistencia nominal (N/mm ²)		Inicio (min)	Final (h)	Expansión (mm)	41 horas (J/g)	7 días (J/g)
	2 días	7 días	28 días						
32,5 L	-	≥12,0	≥32,5	≥52,5	≥75	≤12	≤10		≤270
32,5 N	-	≥16,0							
32,5 R	≥10,0	-							
42,5 L	-	≥16,0	≤62	≥60					
42,5 N	≥10,0	-							
42,5 R	≥20,0	-							
52,5 L	≥10,0	-	≥52,5	-	≥45				
52,5 N	≥20,0	-							
52,5 R	≥30,0	-							

7 R = Alta resistencia inicial.
 N= Resistencia inicial normal.
 L = Baja resistencia inicial. Esta clase de resistencia sólo se haya definida para los CEM III

8 Sólo para los cementos comunes de bajo calor de hidratación.

Tabla 19: Exigencias químicas dadas como valores característicos

Característica	Norma de ensayo	Tipo de cemento	Clase de resistencia	Prescripción ⁹
Pérdida por calcinación	UNE-EN 196-2	CEMI, CEM III	Todas	≤5,0%
Residuo insoluble	UNE-EN 196-2 ¹⁰	CEM I, CEM III	Todas	≤5,0%
Contenido de sulfatos (expresado como SO ₃)	UNE-EN 196-2	CEM I, CEM II ¹¹ , CEM IV, CEM V	32,5 N 32,5 R 42,5 N	≤3,5%
			42,5 R 52,5 N 52,5 R	≤4%
		CEM III ¹²	Todas	

9 En el caso de que las prescripciones se expresen en tanto por ciento, se refieren con respecto de la masa final del cemento.

10 La determinación del residuo insoluble se realizará por el método basado en la disolución de la muestra en ácido clorhídrico, y posterior ataque de disolución de carbonato de sodio.

11 El tipo de cemento CEM II/B puede contener hasta un 4,5% de sulfato para todas las clases de resistencia.

12 El cemento CEM III/C la cantidad de sulfato puede ser de hasta 4,5% de la masa de cemento.

Capítulo 3. Propiedades en estado endurecido

Característica	Norma de ensayo	Tipo de cemento	Clase de resistencia	Prescripción ¹³
Contenido de cloruros (Cl ⁻)	UNE-EN 196-2	Todos ¹⁴	Todas	≤0,10% ¹⁵
Puzolanidad	UNE-EN 196-5	CEM IV	Todas	Puzolanidad a la edad de 8 ó 15 días

13 En el caso de que las prescripciones se expresen en tanto por ciento, se refieren con respecto de la masa final del cemento.

14 El tipo de cemento de CEM III puede contener hasta mas del 0,10% de cloruros, pero en tal caso el contenido máximo debe ser consignado en los envases y en los albaranes de entrega.

15 Para aplicaciones de pretensado, el cemento puede haber sido fabricado expresamente con valores de cloruros inferiores al máximo de admisible. En este caso, se debe expresar el valor real en los envases y albaranes d entrega, reemplazando en su caso el valor de 0,10% de la masa de cemento.

Tabla 20: Prescripciones para cementos resistentes al agua de mar

Tipo	Denominación		Designación	Agua de mar (MR)	
				C ₃ A%	C ₃ A%+ C ₄ AF%
I	Cementos Portland		I	≤5,0%	≤22,0%
II	Cementos Portland con adiciones	Con escoria de alto horno (S)	II/A-S	≤8,0%	≤25,0%
			II/B-S		
		Con humo de sílice	II/A-D		
		Con ceniza volante (V)	II/A-V		
			II/B-V		
III		Con escoria de alto horno	III/A	≤10,0%	≤25,0%
			III/B	Ninguna	
			III/C	Ninguna	
V		Cementos compuesto s (S+P+Q+V)	V/A	≤8,0%	≤25,0%

Tabla 21: Prescripciones para los cementos resistentes a sulfatos

Tipos principales	Designación de los productos		Composición de la proporción en masa					C ₃ A	Puzolancia (días)
			Componentes principales						
			Clinker K	Escorias de alto horno	Puzolana natural P	Ceniza volante silícea V	Componentes minoritarios		
CEM I	Cemento Portland resistente a los sulfatos	CEMI-SR0	95-100	-	-	-	0-5	0%	-
		CEM I-SR 3						≤3%	-
		CEM I-SR 5						≤5%	-
CEM III	Cemento de horno alto resistente a los sulfatos	CEM III/B-SR	20-34	66-80	-	-	0-5%	Sin requisitos	-
		CEM III/C-SR	5-19	81-95%	-	-	0-5%		-
CEM IV	Cemento Puzolánico resistente a los sulfatos	CEM IV/A-SR	65-79	-	21-35		0-5	≤9%	8
		CEM IV/B-SR	45-64	-	36-55		0-5	≤9%	8

Además en función de resistencia característica, se fija el máximo contenido de SO_3 en el cemento:

- Para f_{ck} menor o igual a $42,5 \text{ N/mm}^2$, el contenido ha de ser inferior al 3% de la masa del cemento.
- Para f_{ck} mayores de $42,5 \text{ N/mm}^2$, el contenido ha de ser menor de 3,5% de la masa del cemento.

3.2.2.1.2. Prescripciones de la ASTM para las escorias granuladas de alto horno

En la ASTM C 989, se definen tres grados, en función del desarrollo de la actividad de las escorias:

- Grado 80 o baja reactividad.
- Grado 100 o reactividad media.
- Grado 120 o alta reactividad.

Para esta clasificación se sirve de un módulo de fraguado, índice de reactividad de escoria (SAI), que consiste en una relación inversa de las resistencias de dos morteros en probetas cúbicas, una de cemento Portland con escorias a igual proporción (SP), y otra de cemento Portland (P), multiplicadas por cien.

$$SAI = \left(\frac{SP}{P} \right) * 100$$

El cemento Portland utilizado de referencia, ha de tener una resistencia a compresión mínima a los 28 días de 35 Mpa, y tener un contenido total de álcalis ($\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{K}_2\text{O}$) comprendido entre 0,60 y 0,90% del peso del cemento.

Se ha de cumplir:

- La cantidad retenida de cuando se humedece la pantalla del tamiz de 45 μm debe de ser menor al 20 %.
- la cantidad de aire contenida en el mortero de escorias sera como máximo del 12%.

Tabla 22: Prescripciones para la clasificación del grado de reactividad de la escoria,

Índice de actividad de escorias	Media de los últimos cinco ensayos consecutivos	Ensayo individual
Índice a los 7 días		
Grado 80	-	-
Grado 100	75	70
Grado 120	95	90
Índice a los 28 días		
Grado 80	75	70
Grado 100	95	90
Grado 120	115	110

Con respecto a las especificaciones químicas:

- Se limita el sulfuro de azufre a un máximo de 2,5% de la masa de al escoria.
- Se limita el contenido de sulfatos (SO_3) al 4% de la masa de la escoria.

En la ASTM C 595 se recoge los cementos mixtos, que pueden ser granulados juntos o de forma independiente para su posterior mezclado. Estos son:

- Tipo I o SM, cemento Portland con escoria modificada, que contiene un menos de 25% del peso del cemento.
- Tipo IS, Cemento Portland con escorias de horno alto , que contienen de un 25 a 70% del peso del cemento.
- Tipo S, Cemento con escorias, que contiene más de un 70% del peso de cemento

Con la ASTM 1157, publicada en 1992 y con la última revisión en 2011, recoge las especificaciones para cementos hidráulicos, la cual contempla seis tipos de cementos mixtos, permitiendo que las escorias de alto horno se puedan utilizar en la producción del cemento.

Para la elaboración de hormigón, en ACI 318:2008, para las distintas clases de exposición contempladas, incluye una serie de especificaciones que permite las adiciones como reemplazo de cemento, dentro de los rangos establecidos, pudiendo dar lugar a conglomerados binarios, ternarios y cuaternarios. Como en Bleszinsky et al, 2002 o Bagheri et al, 2012, que con una clase de exposición F3, las limitaciones recogidas en la ACI 318 son las siguientes:

Tabla 23: Requisitos para hormigones expuestos a la clase de exposición F3 recogida en ACI 318:2008

Materiales conglomerantes	% máximos de material en base al peso del cemento ¹⁶
Cenizas volantes y otras puzolanas de acuerdo con ASTM C618	25
Escorias conformes a ASTM C989	50
Humo de sílice conforme a ASTM C1240	10
Total de cenizas volantes, otros materiales puzolánicos, escorias y humo de sílice	50 [#]
Total de cenizas volantes, otras puzolanas y humo de sílice.	35 [#]

¹⁶ Total de material conglomerante incluyendo cementos tipificados ASTM C150, C595, C845 y C1157.

El máximo porcentaje puede incluir:

- a.- Cenizas volantes y otros materiales puzolánicos en tipos IP, cementos mezclados, ASTM C595 o ASTM C1157.
- b.- Escorias de horno alto utilizadas en la elaboración del cemento mixto IS, ASTM 595 o ASTM 1157.
- c.- Humo de sílice, ASTM C1240, presente en cemento mixtos.

[#] Las cenizas volantes y otros materiales puzolánicos, y el humo de sílice no pueden superar el 25% y el 10%, respectivamente del total de la masa de los materiales conglomerantes.

3.2.2. Factores influyentes de la resistencia

3.2.2.1. Cantidad de material cementante y sustitución por EGAH.

Papadakis & Tsimas, 2002 establecen un coeficiente de eficiencia K asociado a cada adición, acorde a la EN-206, en función de su resistencia a los cloruros, carbonatación y la resistencia a compresión en varias edades, tomando como referencia las características del cemento Pórtland, para las adiciones griegas, incluso contemplando la sustitución del árido.

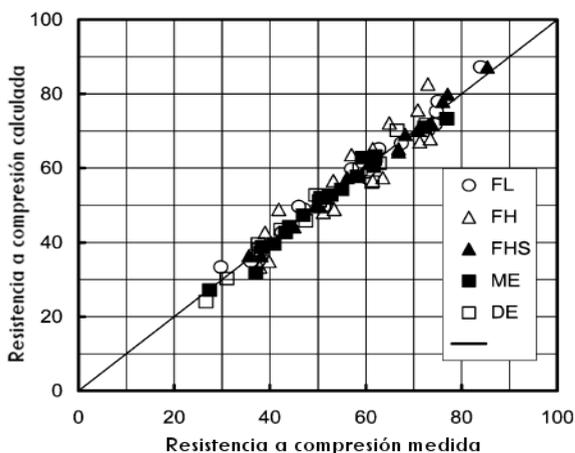


Figura 1: Comparación entre la resistencias calculadas y medidas Papadakis & Tsimas, 2002

Atendiendo a las recomendaciones para cada clase de exposición, donde se puedan utilizar las adiciones, se calcula una cantidad de cemento equivalente $C_{eq,r}$ donde C y P son la cantidad de

cemento pórtland y la cantidad de adición, que no puede ser mayores que los dados para su correspondiente clase de exposición y relación

α/c asociada, consiguiendo una correlación entre la resistencias calculadas y medidas a posteriori:

$$C_{eq} = C + k \cdot P$$

Al igual que hizo Papadakis & Tsimas, 2002 para las adiciones griegas, en Sanjuán et al., 2011 se estudia la aplicación y coeficiente de eficacia K para la EGAH, en donde comprueba que con cementos con mayor clase resistente (un CEM I 52,5 en vez de CEM I 42,5) se consiguen coeficientes K menores, aunque como medida conservadora la normativa la fije en 0,4 indistintamente, pudiendo ser superado pero sólo si los resultados de ensayos son satisfactorios, y siendo supervisados por la dirección.

Tabla 24: Coeficientes de eficacia K para distintas adiciones

Adición	Coeficientes de eficacia K	
	EHE,2008	UNE-EN 206-1:2008
Cenizas volantes (CV)	0,20 (CEM I 32,5) 0,40 (CEM I 42,5 y CEM I 52,5) <0,65 Contenido máximo de CV<30%	0,20 (CEM I 32,5) 0,40 (CEM I 42,5 y CEM I 52,5) Contenido máximo de CV<33%
Humo de sílice (HS)	≤ 2 =1 ($\alpha/c > 0,45$ y clase de exposición H o F Máximo contenido HS< 10%)	2 =1 ($\alpha/c > 0,45$ y clase de exposición XC o XF) Máximo contenido de HS < 11%
Escorias granuladas de alto horno (EGAH)	0	$\leq 0,6$ (Máximo contenido de EGAH < 50%)

Al no existir silicatos ni aluminatos tricálcicos en las EGAH, estos generan un menor calor hidratación y un desarrollo de resistencia, en los cementos que las contienen, dependiendo de la cantidad del clinker, tal que a los 90 días ofrecen mejores resultados, que un cemento pórtland tradicional Fernández Cánovas, 2002.

Con el incremento del grado de sustitución de EGAH, se produce una merma de en la resistencia a compresión Václavík, 2012 Espinoza&Esclante. Acevedo-Martínez et al,2012 comprueba además que utilizando un activador como adición se incrementa la resistencia a compresión a medida que se aumenta la cantidad de sustitución de EGAH y la adición de activador, hecho contrastado en Bernal et al., 2011 a los 28 y a los 90 días.

En Zhou et al, 2010, se comprueba que el aumento del tanto por ciento de activador alcalino, por encima del 2% un 1,20% de escoria, fomenta una merma de resistencia a compresión, inferior a las muestras, que con a igual cantidad de activador alcalino (2%), con sustituciones superiores que EGAH. Todos las muestras sobre pasan el valor de 38 MPa, aunque la muestra de control ofreciera 55 MPa

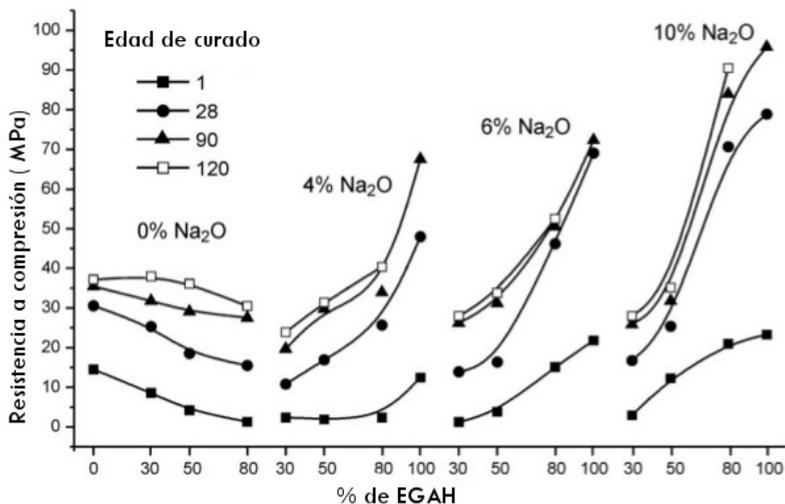


Figura 2: Desarrollo de resistencia en función del tanto por ciento de sustitución de EGAH y activador alcalino (Acevedo-Martínez et al,2012)

Lizarazo & Claise, 2011 admite que la EGAH pueda ser utilizada como de adición al cemento para producir hormigones con resistencias a compresión y penetración de cloruros similares o mayores que las de un cemento Pórtland. Además insta a que se evalúe la cantidad optima de sustitución, que para sus ensayos ha sido del 30%. El mismo valor es fijado en Sanjuán et al., 2011 debido a que la variabilidad de los coeficientes de eficacia K, aconsejando ser estudiado particularmente.

Oner&Akyuz, 2007, fija el tanto por ciento de sustitución de la escoria de para la optimización de la resistencia a compresión oscila entre 55-59%.

Aunque según Ameri et al, 2012, el máximo esfuerzo a compresión se consigue con un 25% de sustitución, ya que por una sustitución por encima de ese valor, hace que el valor de la resistencia a compresión disminuya.

Se ha realizado un gráfico, correspondiente a la figura 3, con los datos recavados de parte de los artículos, que han sido ordenados en función de la cantidad de material cementante (la que coincide con el número de la etiqueta del eje x), y relación a/c. En esta gráfica, se comprueba que a mayor cantidad de material cementante, mayores resistencia, y que cuanto mayor sea el tanto por ciento de sustitución de EGAH, se produce una merma de la resistencia a compresión de forma general. Se observa, que con los datos pertenecientes Bouteiller et al., 2012, no contienen activadores alcalinos, al igual que Thomas&Bamforth,1999. En cuanto, los datos de Kelly & Murphy, 2010, se debe a distintas relaciones a/c y que uno de las muestras contiene aditivos inclusores de aire, como se explicará más adelante.

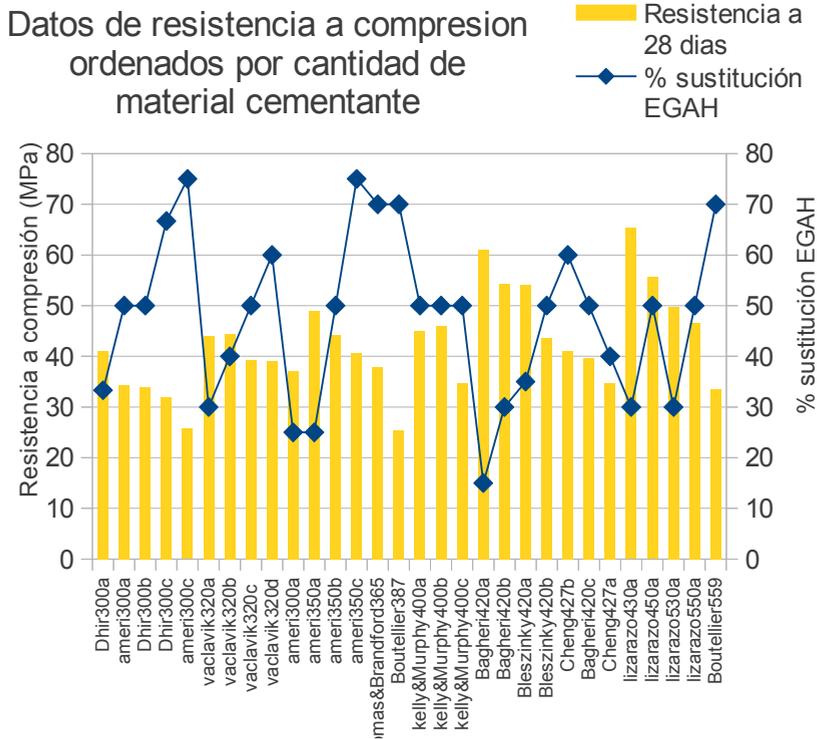


Figura 3: Datos de resistencia a compresión ordenados según cantidad de sustitución de EGHA

3.2.2.2. Influencia con respecto al curado

Castellano et al, 2009 Estudia la influencia de la temperatura y la finura de molido de la EGHA, en la resistencia a compresión, mediante la ábacos de resistencia a compresión.:

- Para finuras convencionales de la escoria, el incremento de la temperatura de curado permite subsanar la baja resistencia inicial de los cementos de escoria.
- A dos días, se pueden alcanzar resistencias similares a las registradas por las pastas elaboradas con superficies específicas mayores ($680\text{m}^2/\text{kg}$), con la activación térmica de pastas con escorias de finura de $480\text{m}^2/\text{kg}$.
- A los 7 días, para finuras mayores la evolución favorable de las propiedades obtenidas de cuando la escoria es activada físicamente, es contrarrestada por la activación térmica.

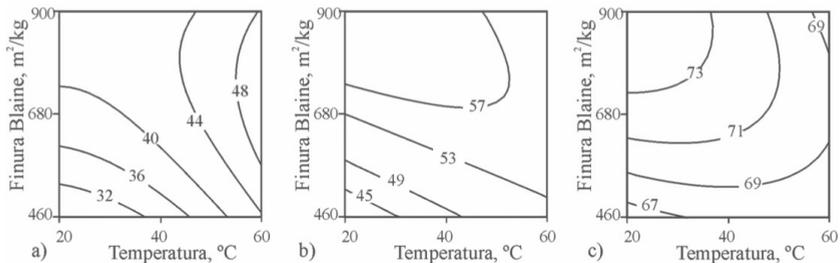


Figura 4: Ábacos de la resistencia a compresión de las pastas con 40% de escoria a) 2 días, b) 7 días, c) 28 días

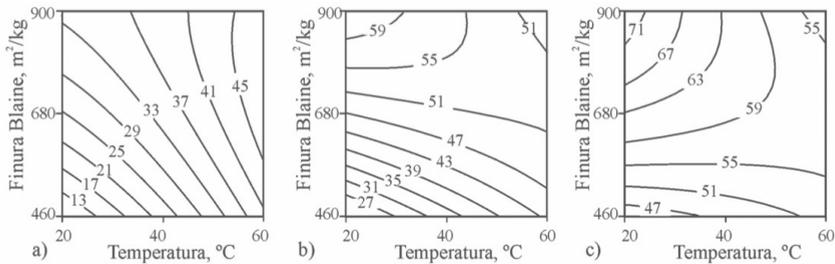


Figura 5: Ábacos de la resistencia a compresión de las pastas con 80% de escorias, a) 2 días, b) 7 días, c) 28 días

En mezclas con conglomerantes binarios, como en la de conglomerantes ternarios, con humo de sílice, se observa una mayor resistencia a compresión. Al contrario, en la mezcla con escorias de alto horno y cemento Pórtland, la resistencia a es menor, la menor de todas las realizadas, debido a las reacciones puzolánicas son lentas, y la formación del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ requiere tiempo, y eso, aunque se encuentre dentro del rango óptimo fijado en Oner&Akyuz, 2007. En Osborne, 1999, se reconoce que con la sustitución parcial del 80% de cemento, por escorias granuladas de alto horno, se produce un descenso en el desarrollo de resistencias a edades tempranas. Hecho también corroborado por Glass et al., 2000, en donde equipara las mezclas realizadas con un 65% de sustitución del cemento por escorias de alto horno granuladas, y del 30% del cenizas volantes, no alcanzan las resistencias, a edades tempranas, de los realizados con cemento Pórtland y cemento con resistencia a los sulfatos, con mayores concentraciones de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Una explicación más concreta al fenómeno anterior, nos es dada en Cheng et al, 2005: la escoria granulada de alto horno reacciona con el agua en un medio alcalino, y luego con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para formar los productos hidratados del cemento a través de las reacciones puzolánicas para que genera un gel C-S-H extra en la pasta, que disminuye el desarrollo de resistencias tempranas. Como consecuencia se obtiene una estructura capilar más densa y una menor porosidad, por esa cantidad extra de gel C-S-H.

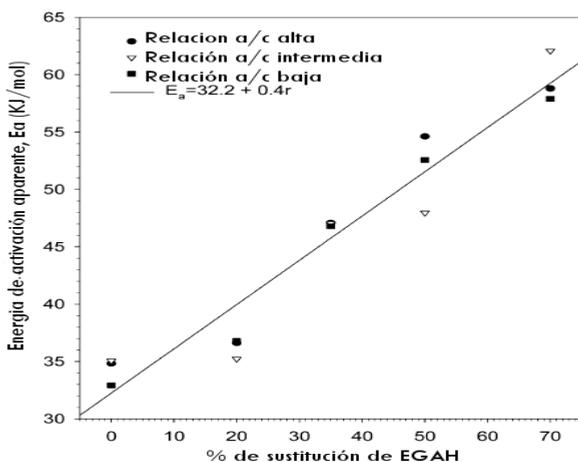


Figura 6: Energías de activación aparentes en función del % de sustitución de EGAH (Barnett et al, 2006)

También, el desarrollo de la resistencia a edades tempranas se ve influenciada por la temperatura. Este hecho queda patente en Barnett et al, 2006, donde se observa, en la figura 6, una correlación entre la energía aparente de activación y el tanto por ciento de sustitución EGAH.

Salazar Jaramillo realiza ensayos con distintos grados de sustitución, y distintas formas de curado, en la que resalta la importancia del curado en los hormigones y mayormente los que contienen escorias, los primeros 7 días, y en donde un curado deficiente los primeros 3 días supone una merma mayor en las muestras con escorias.

Ortega et al, 2011, tras la realización de ensayos con muestras con CEM III/B-42,5 L/SR y CEM II/B-V, en ambientes urbanos con distintos métodos de curado, comprueba que se obtienen mejores resultados en las muestras de CEM III a los 90 días.

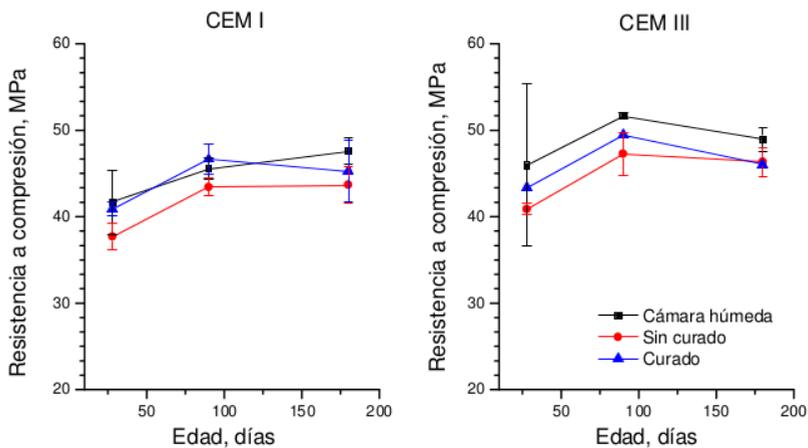


Figura 7: Resistencia a compresión simple para los hormigones de CEM I y CEM III (Ferrer et al,2012)

También se muestran mejores resultados con CEM III/B-42,5 L/SR a los 28, 90 y a los 180 días con respecto a un CEM I-42,5,

independientemente que el curado, ya sea con curado de 7 días, sin ninguno o en cámara húmeda. Se ha de resaltar que la dispersión de los valores es mayor cuando, no hay curado, que con el curado de 7 días, y obteniéndose una dispersión de los valores mínima de en las muestras en cámara húmeda.

3.2.2.3. Relación agua/cemento

En Oner&Akyuz, 2007, tuvo en cuenta las relaciones a/c , y percatándose de que el aumento de la proporción de EGAH, requiere menor una menor relación a/c para una misma trabajabilidad Lewis.

Castellano et al, 2011 Para alcanzar una resistencia similar a la obtenida por la pasta cemento Pórtland ordinario en cada relación a/c el contenido de escoria, que se incorpore al cemento de debe ser menor al 20%, pues para contenidos mayores el aumento de la relación a/c efectiva no puede ser compensado por el efecto filler producido por la adición. A edades avanzadas, el contenido de escoria a incorporar para alcanzar determinado nivel resistente es función de la relación a/c pues a medida que este parámetro de disminuye, la cantidad de escoria que reacciona es menor, debido a la limitación del espacio disponible para la disolución y precipitación de los productos de hidratación.

El aumento del grado de hidratación de las pastas con escoria que se produce cuando se incrementa la relación a/c , no necesariamente

conducirá a un mejor comportamiento mecánico de las mismas pues en estos casos, este comportamiento está gobernado en mayor medida por la porosidad, que por el grado de hidratación alcanzado.

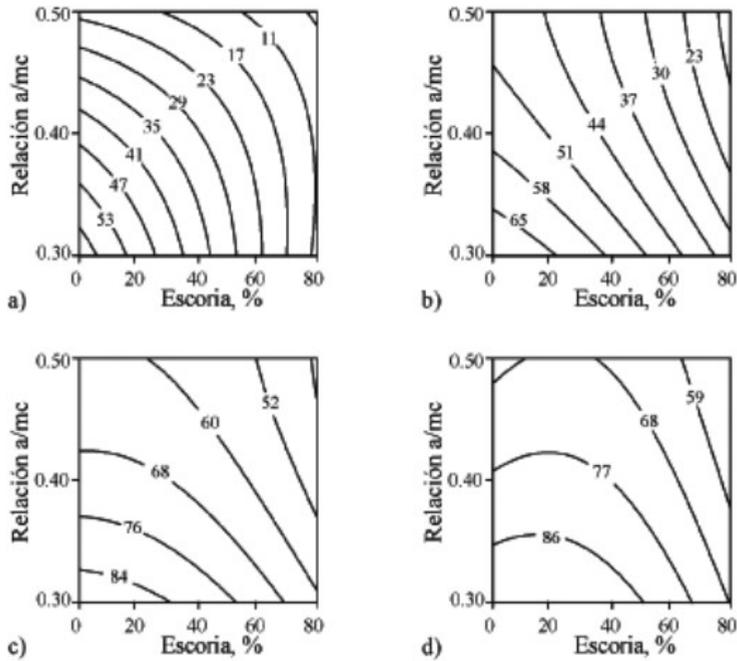


Figura 8: Ábacos de las resistencia a compresión de los morteros, a) 2 días, b) 7 días, c) 28 días , y d) 90 días

3.2.2.3.1. Agua no evaporable

Es aquella que no es necesaria para la hidratación de los productos hidratados de los cementos.

La incorporación de EGAH, produce un aumento del agua no evaporable en las primeras edades, debido al efecto filler; y en edades más avanzadas dado por la hidratación de la adición Carrasco et al, 2005. Sin embargo, para elevados contenidos de escoria en el cemento, el efecto físico no puede compensar el efecto de dilución del mismo producido por la menor cantidad de material inicialmente reactivo, generándose una disminución de en el contenido de agua no evaporable a medida que se incrementa el contenido de la escoria Castellano et al, 2011

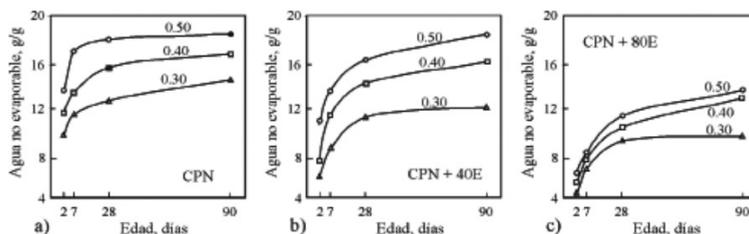


Figura 9: Agua no evaporable de las pastas : a) cemento pórtland, b) cemento pórtland más el 40% de escorias y c) cemento pórtland con un 80% de escorias

3.2.2.3.2. Uso de aditivos

Para la consecución de relaciones a/c inferiores a 0,5, se utilizan superfluidificantes, que entre los más usados se encuentran el policarboxilato de éter, que producen en general, un descenso de la viscosidad plástica y el esfuerzo umbral de cizalla en las pastas de cemento, dependiendo este descenso de la dosificación y de la

estructura del aditivo, aumentando la reducción de parámetros reológicos según incrementa la dosificación.

3.2.2.3.2.1. Modificadores de fraguado

Los cementos con EGAH requieren mayor cantidad de agua, que un cemento pórtland, consecuentemente han de tener una relación a/c que Fernández Cánovas, 1994 fija en 0,5. A lo largo de los artículos revisados y otra bibliografía, se puede observar que dichas relaciones a/c son menores, utilizando plastificantes y superplastificantes.

La compatibilidad entre cementos con adiciones y aditivos está en función de la naturaleza mineral. La adsorción de los aditivos PCE sobre el cemento con EGAH (CEM III/B 32,5R) es muy inferior a la que presenta el cemento sin adición. Sin embargo, estas pastas con aditivo son las que presentan los mayores incrementos de fluidez, incluso en bajas dosificaciones. Ello es debido al bajo clinker (y por tanto de aluminatos) y a la efectiva adsorción por parte de la EGAH. Alonso , 2011

A parte de PCE, también se suelen utilizar otros aditivos superfluidificantes basados en naftalenos (PNS), melanina (PMS) y lignosulfonato (LS), que interactúan de forma distinta en función de la naturaleza mineral, como se ha dicho antes y comprobaremos más adelante.

El uso de superplastificantes en hormigones con escorias de alto horno consigue un descenso de la permeabilidad, consecuentemente implica

un mejora en la resistencia al ataque por ión cloruro y la durabilidad
Tamilarasan et al, 2012

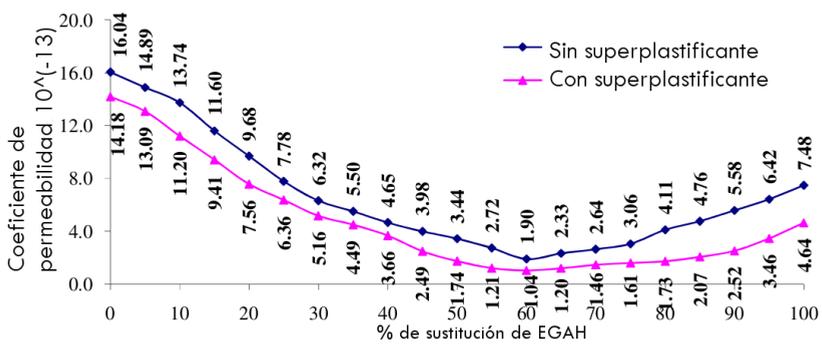


Figura 10: coeficiente de permeabilidad para un mortero M20, en función del tanto por de sustitución de EGHA Tamilarasan et al, 2012

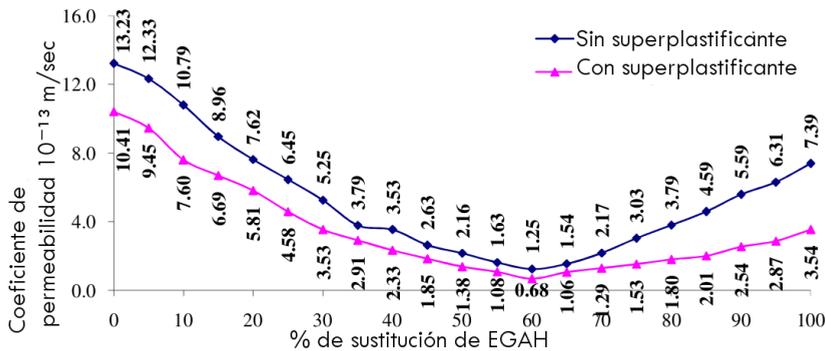


Figura 11: Coeficiente de permeabilidad de un mortero M25, en función del tanto por ciento de sustitución de EGHA

3.2.2.3.2.2. Interacciones con otros aditivos

Todo aditivo tiene unas funciones principales y una función secundaria que corresponderían con las indicaciones, y que se pueden considerar unas acciones positivas o un efecto secundario, pudiéndose dar el casos de que se incurra en una contradicción, que se corresponda con un efecto negativo Fernández Cánovas, 1994.

Este sería el caso de la utilización de los inclusores de aire, que mejoran el comportamiento frente a las heladas en los conglomerados ternarios, pero que a su vez conlleva la merma de la resistencia a compresión. Como se puede comprobar que las muestras E y F, que aparecen en la imagen, son las únicas que contienen inclusores de aire Kelly & Murphy, 2010 :

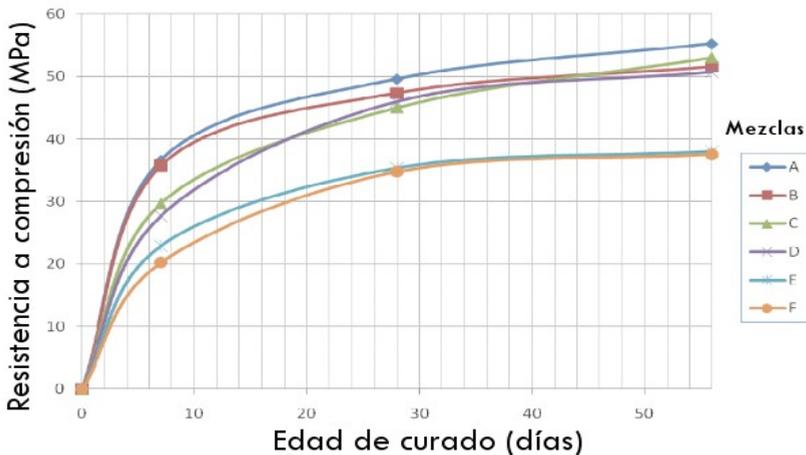


Figura 12: Resistencia a compresión de mezclas binarias con EGAH, sin (A,B,C,D) y con inclusor de aire (E,F) Kelly & Murphy, 2010

De forma análoga a la cantidad de material cementante, se ha realizado un gráfico, en el que los datos resistencia a compresión recogidos de la bibliografía, han sido ordenados primero por la relación a/c , y posteriormente por cantidad de sustitución de EGAH, en donde se sigue mostrando la disparidad de los resultados a la edad de 28 días, y descenso de resistencia cuanto mayor es la relación a/c .

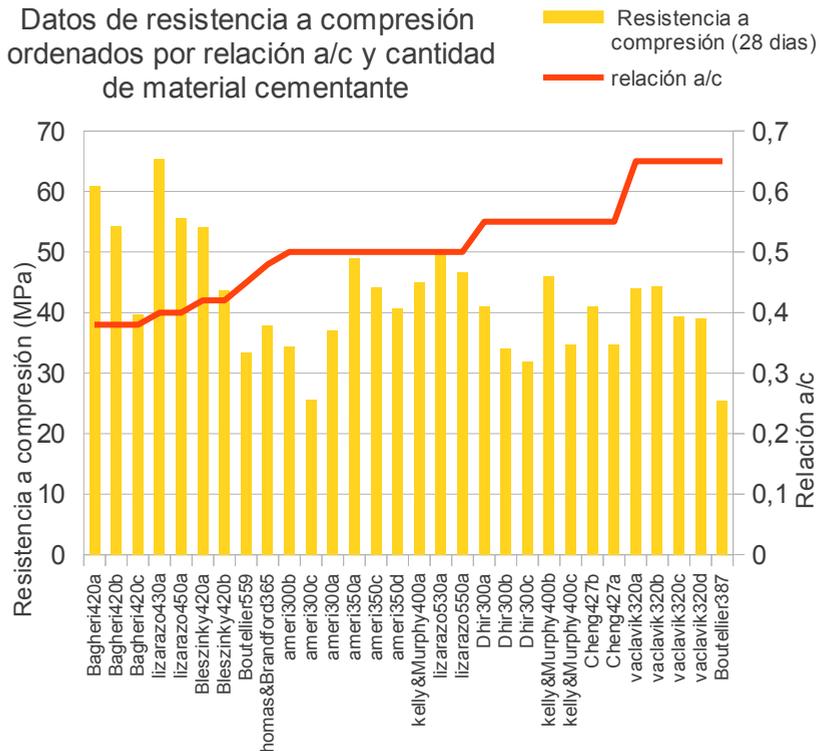


Figura 13: Datos de resistencia a compresión a los 28 días ordenados según relación a/c y contenido de cemento

Realizando unas gráficas, con datos recavados de distintos artículos, como anteriormente, se observa que al aumentar la relación a/c , produce una merma de resistencia a compresión, en la figura 13. Evaluando la bajada de resistencia, dentro de rangos de cantidad de material cementante similar, se observa que el incremento del grado de sustitución de EGAH supone una mayor merma de resistencia.

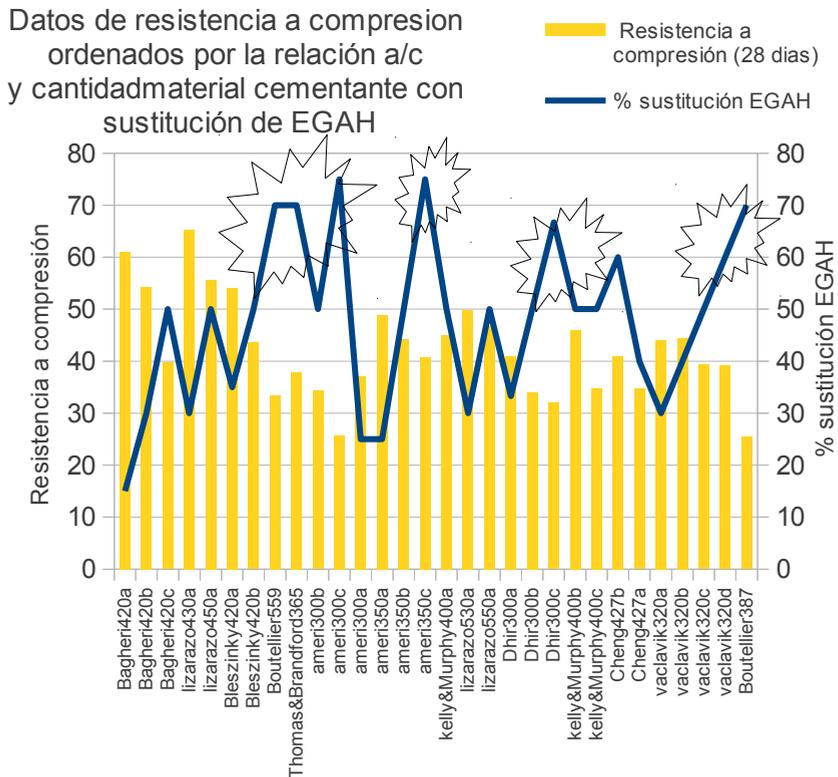


Figura 14: Datos de resistencia a compresión ordenados según relación a/c y contenido de cemento con %de sustitución de EGAH

3.2.3. Conglomerantes ternarios.

La utilización de cementos conteniendo un equilibrio entre el cemento Pórtland y dos adiciones produce un empleo más racional de los recursos naturales y una reducción en la emisión de los gases, que contribuyen al efecto invernadero sin comprometer la resistencia del material cementante resultante.

Con los cementos ternarios, casi siempre se pueden obtener mayores resistencias con mezclas de cemento Pórtland con humo de sílice a todas las edades, con niveles apropiados de sustitución adecuados de ceniza volante o escorias, desarrollos de resistencia son más significativos a los 7 y 28 días, que a los 3 días. Erdem & Kirca, 2008

Carrasco et al, 2005 Bleszinsky et al, 2002 Debido al comportamiento complementario de las adiciones, el cemento ternario de presenta ventajas frente al cemento Pórtland y al cemento binario. El material calcáreo mejora la resistencia a edades tempranas, mientras que la escoria contribuye con la resistencia a edades más avanzadas, esto hace que el cemento ternario presente un adecuado desarrollo resistente.

El uso de cementos ternarios incorporando pequeñas cantidades de humo de sílice y pequeñas cantidades de ceniza volante o escorias, nos muestra una medida viable para contrarrestar el negativo impacto de altos grados de sustitución de cenizas volantes y escorias de alto horno en edades tempranas, manteniendo la durabilidad de altos

porcentajes de sustitución de cemento, con cenizas volantes y EGAH. Lane & Ozyildirim, 1999

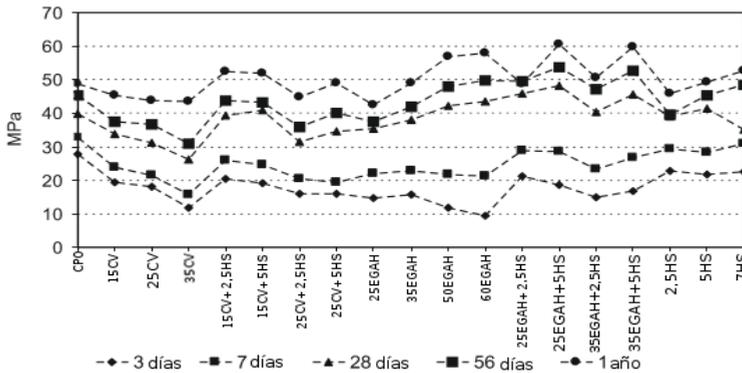


Figura 15: Valores de resistencia a compresión en Lane & Ozyildirim, 1999

3.2.3.1. Cenizas volantes

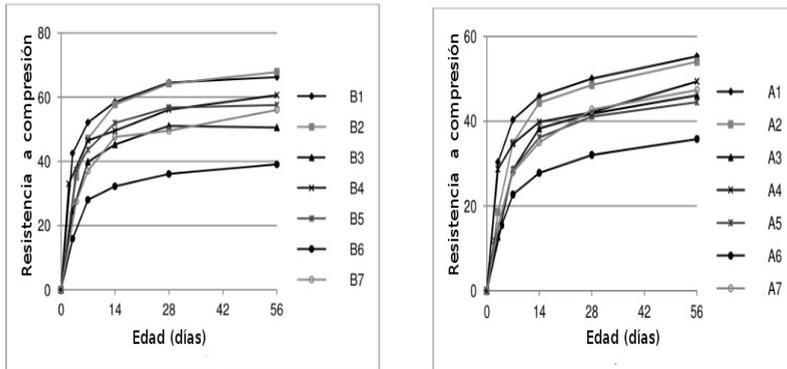
Ortega et al, 2011 Con la realización de ensayos con muestras con CEM III/B-42,5 L/SR y CEM II/B-V, se alcanza que la muestra de control de de cemento Pórtland, al cabo de 90 días obtiene valores ligeramente superiores que con las muestras con los otros dos cementos, aunque en ambientes no favorables (clima Atlántico Norte, con 15°C y 85% HR), los desarrollos de resistencia es más lento para los cementos con adiciones, con temperaturas más bajas, ya que los otros dos climas, se tomó la temperatura arbitraria de 20°C.

En McNally&Sheils, 2012 contrastan las propiedades de varios cementos, con distintos grados de sustitución de EGAH, entre ellas la resistencia a compresión. Las mezclas utilizadas son:

Tabla 25: Mezclas realizadas en McNally&Sheils, 2012

Mezcla	Tipo de cemento	Grado de EGAH (%)	Contenido de cemento	Relación a/c
A1	CEM II/A-L	0	320 kg/m ³	0,55
A2		50		
A3		70		
A4	CEM II/A-V	0		
A5		50		
A6		70		
A7	CEM III/B	0		
B1	CEM II/A-L	0	400 kg/m ³	0,45
B2		50		
B3		70		
B4	CEM II/A-V	0		
B5		50		
B6		70		
B7	CEM III/B	0		

Como muestran en la siguiente imagen, las resistencias a compresión obtenidas, las resistencias más altas son las obtenidas con CEM II/A-L. Además se observa un grado de sustitución del 50% no produce casi variación en los valores de resistencia.



Resistencia a compresión con
320 kg/m³

Resistencia a compresión con
400 kg/m³

Figura 16: Valores obtenidos de resistencia a compresión obtenidos en McNally&Sheils, 2012

Se observa que el CEMII/A-L que CEM II/A-V, desarrolla mejores resistencias cuando se combina con las EGAH, McNally&Sheils, 2012 admiten que es debido al tamaño de la partícula, ya que el cemento CEM II/A-V, como se puede corroborar en la siguiente imagen, la distribución del tamaño de partículas es mayor que el de los otros componentes, que conduce a una menor reactividad, producidas por las reacciones de hidratación de las EGAH:

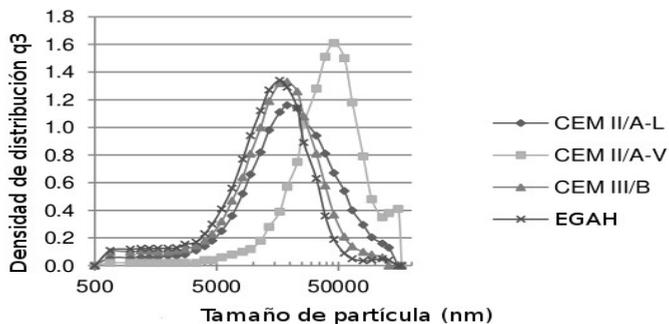


Figura 17: Gráfico de densidad de tamaño de partículas de McNally&Sheils, 2012

En Gao et al, 2005 estudian el interfase árido-pasta, con ambas las EGAH y las cenizas volantes, y en el que además, del tamaño de partícula, incluye la forma y la superficie, en la que la formas angulosas y la estructura vesicular, generan una superficie que favorece la resistencia con las EGAH, mejor que con las cenizas volantes, como se puede comprobare en la siguiente figura:

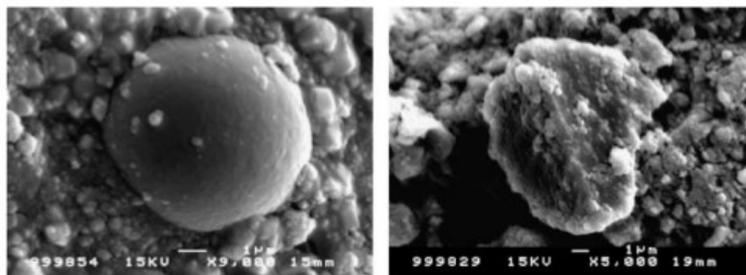


Figura 18: Imagen procedente de SEM de cenizas volantes (izquierda) y EGAH (derecha) de pastas de cemento a los 7 días de curado Gao et al, 2005

3.2.3.2. Humo de sílice

En Bleszinsky et al, 2002 estudia la durabilidad de hormigones con conglomerantes ternarios, en donde establece dos muestras de referencia, compara cementos binarios y ternarios, cuyas mezclas se corresponden con la siguiente tabla:

Tabla 26: Mezclas realizadas en Bleszinsky et al, 2002

HS / EGAH	% CPO	%HS	% EGAH	Na ₂ Oe ¹⁷ , kg/m ³	Resistencia a compresion28 días (MPa)
0/0	100			3,95	59,9
8/0	92	8		4,07	67,7
0/35	65		35	2,57	54,1
0/50	50		50	1,97	43,6
4/25	71	4	25	3,02	68,3
6/25	69	6	25	3,05	63,1
5,2/35	59,8	5,2	35	2,65	68,3

Las muestras resaltadas en la tabla, son las correspondientes a conglomerantes ternarios, en los que se observa que tienen una resistencia a compresión, mayor incluso que el conglomerante binario 8/0.

Los conglomerantes ternarios, al igual que con la resistencia a compresión, suponen una mejora de la durabilidad, y además aportan una peor trabajabilidad con la misma relación a/mc, según se incrementa la cantidad de humo de sílice. Hecho también comprobado

¹⁷ Activador alcalino.

en Bagheri et al, 2012 en el que elabora compara, la cantidad de superfluidificante con respecto a la muestra de control (de cemento Pórtland ordinario), se observa que el aumento de la adición de humo de sílice requiere mayor cantidad, mientras que al aumentar la cantidad de EGAH ésta es menor, y que al mezclar ambas adiciones se requiere menor cantidad de superfluidificante, para conferirle la misma trabajabilidad, cuanto mayor sea la cantidad de sustitución de EGAH.

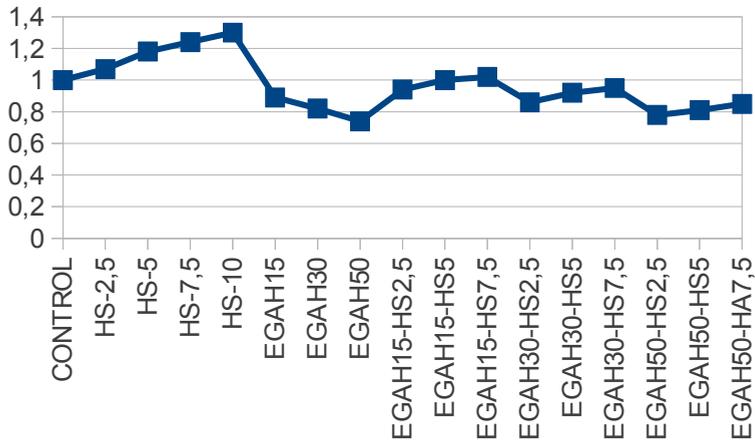


Figura 19: Contenido de superfluidificante en función de la muestra de control, para distintas adiciones y varios grados. Bagheri et al, 2012

Referente a la resistencia a compresión en Bagheri et al, 2012, como ocurre en conglomerados binarios con adiciones de EGAH, el incremento de las adiciones de EGAH, reducen las resistencias, y sobre produce unos desarrollos de resistencia más dilatados en el tiempo, como se puede observar en la imagen:

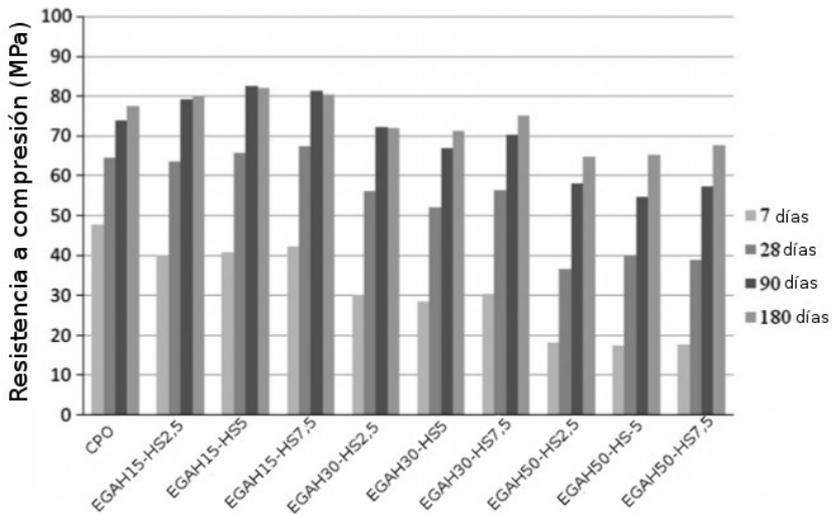


Figura 20: Valores de resistencia a compresión de conglomerados ternarios Bagheri et al, 2012

3.3. Resistencia a tracción

3.3.1. Introducción

En la EHE,2008 nos define:

El valor de la resistencia media a tracción, $f_{ct,m}$, puede estimarse, a falta de resultados

de ensayos, mediante:

$$f_{ct,m} = 0,30 f_{ck} \text{ para } f_{ck} \leq 50 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{ct,m} = 0,58 f_{ck} \text{ para } f_{ck} > 50 \text{ N/mm}^2$$

Si no se dispone de resultados de ensayos, podrá admitirse que la resistencia característica inferior a tracción, $f_{ct,k}$, (correspondiente al cuantil del 5 por 100) viene dada, en función de la resistencia media a tracción, $f_{ct,m}$, por la fórmula:

$$f_{ct,k} = 0,70 f_{ctm}$$

La resistencia media a flexotracción, $f_{ct,m,fl}$, viene dada por la siguiente expresión que es función del canto total del elemento h en mm:

$$f_{ct,m,\beta} = \max[(1,6 - h/1000) f_{ct,m}; f_{ct,m}]$$

De análoga a la resistencia a compresión de cálculo, tenemos la $f_{ct,d}$:

$$f_{ct,d} = \alpha_{ct} \frac{f_{ct,k}}{\gamma_c}$$

En la ACI 318:2008 se recoge el coeficiente de reducción ϕ para secciones controladas a tracción, cuyo valor es 0,9, por el que será multiplicado f'_c para hallar la resistencia de diseño.

$$\text{Resistencia de diseño} = f'_c \cdot \phi = 0,9 f'_c$$

También contempla un valor del coeficiente de hormigón estructural simple, como se ha definido anteriormente en la resistencia a compresión, igual a 0,6

$$\text{Resistencia de diseño} = f'_c \cdot \phi = 0,6 f'_c$$

3.3.2. Adherencia pasta-árido

3.3.2.1. Introducción

La adherencia de la pasta de cemento al árido depende de su forma, porosidad, naturaleza y especialmente de su estado superficial.

La superficie del árido debe ser la adecuada, la presencia de arcilla en ella es nefasta debido a que contribuye a disminuir la resistencia a tracción de por falta de adherencia, teniendo que ser eliminado mediante lavado.

3.3.2.2. Tipos de adherencia

La adherencia mecánica que permite la unión a escala microscópica depende del estado superficial de los áridos. Es mayor cuanto más rugosa es la superficie y así como los áridos machacados proporcionan la mayor adherencia y resistencia a tracción siendo utilizados para pavimentación de aeropuertos y carreteras.

La adherencia mecánica no es el único existente en la unión pasta-árido. Farran estudio otro más pequeño, mediante el examen de películas de contacto pasta-árido que observó que, para ciertos áridos se produce adherencia de tipo epitáxico, es decir, se forman cristales en la pasta de cemento en contacto con el árido en los que la orientación, el sistema cristalino y dimensiones son tales que es posible una superposición de la malla sobre malla con la propia red del árido. Se ha demostrado, que una pasta de cemento que contenga de cenizas o escorias de alto horno, no es la más adecuada para que se produzca una adherencia de tipo epitáxico Fernández Cánovas, 2002.

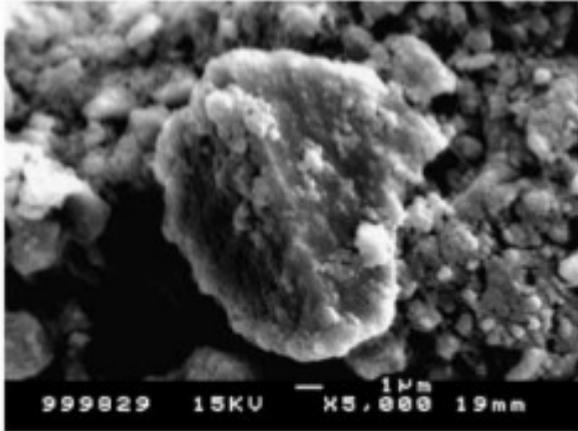


Figura 21: Imagen SEM de EGAF curada a los 7 días Gao et al, 2005

3.3.2.3. Comportamiento de la interfase árido pasta con adiciones de EGAF

Como se ha comentado anteriormente, en las mezclas realizadas con EGAF, se produce una merma del contenido de cristales de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, hecho que también se produce en la interfase árido-pasta,, produciendo una microestructura más densa.

En Gao et al, 2005 se corrobora que la influencia de la finura de molido, produce una eliminación de la zona débil de la interfase pasta-árido grueso, que es mayor cuanto mayor sea la superficie de Blaine. Con una superficie específica de $425 \text{ m}^2/\text{kg}$, basta con una sustitución del 40 % del cemento, mientras que con una de $600 \text{ m}^2/\text{kg}$,

sólo es necesaria la mitad de la sustitución, como se puede comprobar en la siguiente figura:

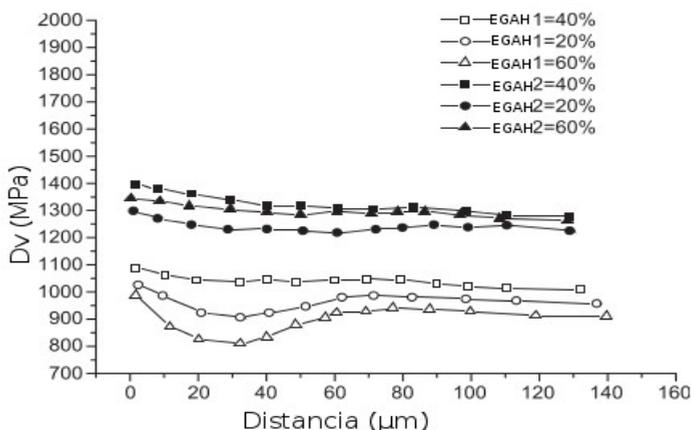


Figura 22: Relación entre los valores de dureza y distancia a la superficie del árido, con distintos grados de sustitución de EGAH y finura de molido. Gao et al, 2005

3.3.2.4. Comparaciones con otras adiciones

Gao et al, 2005 Reconoce que es económico la sustitución parcial de cenizas volantes por EGAH, y además contempla su utilización de forma conjunta experimentando buenos resultados eliminando la zona débil en el interfase árido-pasta. Como se puede observar en la siguiente imagen, no se observa la concavidad dentro del rango de 0 a 60 μm, como para las muestras con EGAH solamente:

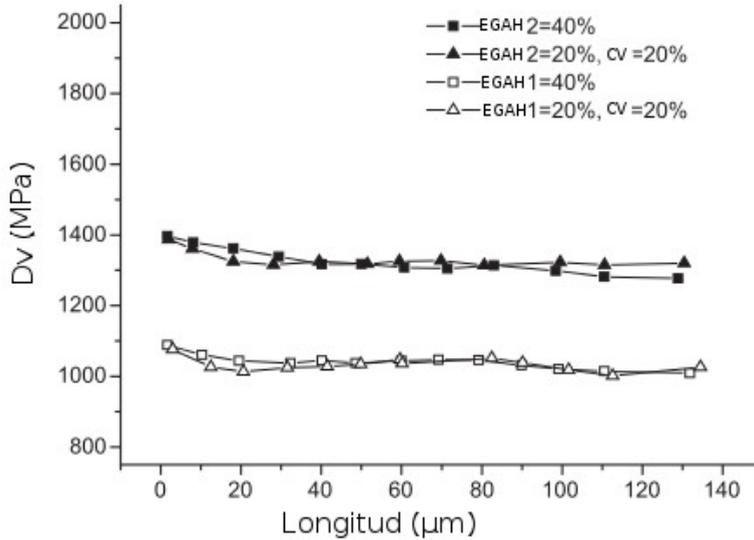


Figura 23: Relación entre la dureza y la distancia de la superficie del árido con distintas mezclas de EGAH y humo de sílice

EnGao et al,2013 se estudia la caracterización del interfase de árido-pasta con mezclas con cementos ternarios, en este caso con filler calizo y EGAH, para una posterior comprobación de simulación numérica con los datos obtenidos, obteniendo muy buenos resultados como se pueden observar en la ilustración 20.

Además en el mismo artículo, anuncia nuevas investigaciones en marcha, en las que investiga la influencia de las proporciones en las mezclas, relaciones agua cemento y el con tenido de árido en el interfase árido-pasta en sistema con cementos ternarios.

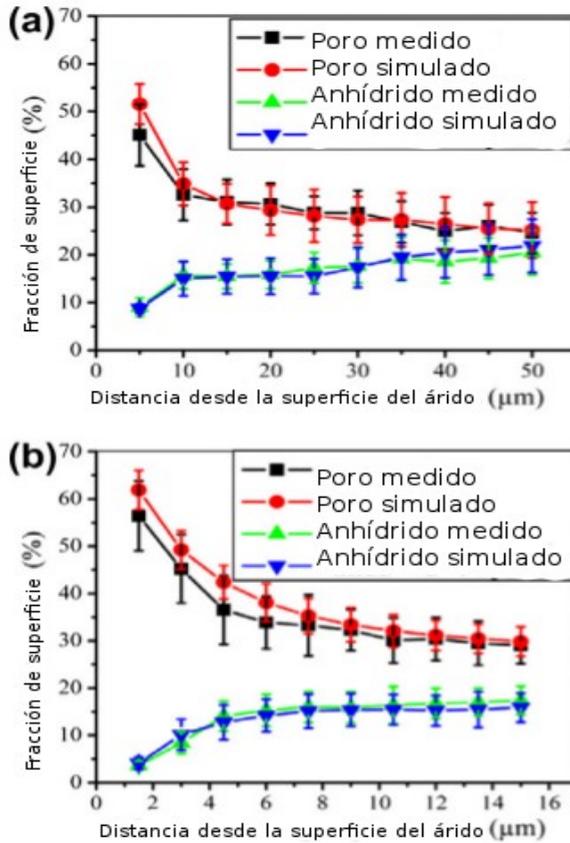


Figura 24: Perfiles de composición de la experimentación y la simulación (a) a $50\mu\text{m}$ y (b) a $15\mu\text{m}$ Gao et al, 2013

3.4. Resistencia a flexión

3.4.1. Resistencias de cálculo

En la EHE-08 y en la UNE-EN 1992-1-1 se contempla en sus métodos para el cálculo, las resistencias antes dadas, f_{ck} y f_{cd} , ya antes mencionadas.

En la ACI-318, utiliza f'_c , a la que para el cálculo se le ha de aplicar un coeficiente de reducción, que:

- Para el caso de hormigón estructural simple, utilizar coeficiente de reducción ϕ igual a 0,6.
- En el caso de que afecten al núcleos comprimidos de elementos sometidos a flexión, se aplicarán los ya expuestos en el apartado de resistencia de cálculo a compresión.

3.4.2. Módulo de elasticidad

Neville, 2010 Hay cuatro clases de comportamiento elástico aceptado por la ingeniería de los materiales, que se pueden representar con la gráfica tensión-deformación:

- Linear y elástico: Durante la aplicación de la tensión, la deformación se produce con una relación directamente

proporcional, y con el cese de la tensión vuelve a su estado original.

- No linear y elástico: Análogo al caso anterior, pero con la salvedad, de que la relación entre la tensión-deformación no es directamente proporcional.
- Linear y no elástico.: Durante la aplicación de la tensión, el material experimenta una deformación directamente proporcional, y con el cese de la tensión el material, vuelve a un estado en el que la deformación es distinta la inicial.
- No linear y no elástico: Análogo al anterior, menos que la relación tensión-deformación no es directamente proporcional

la cuarta categoría es la que concierne al hormigón, no linear no elástico, por norma general, salvo cuando las tensiones son muy bajas, que se da un comportamiento no linear y elástico.

3.4.2.1. Definición y tipos de módulo de elasticidad

Se define como la cuantificación de la pendiente relacionada de la gráfica tensión-deformación

Basándonos en un comportamiento no linear no elástico:

- módulo tangente inicial: Es aquel cuya pendiente toca el punto inicial de la curva tensión-deformación.
- módulo secante: es aquel, que partiendo de una consideración arbitraria, se considera un rango de deformación con un comportamiento elástico, para una determinada tensión, de tal forma que un incremento de dicha tensión, produce un desplazamiento.
- módulo de descarga: Módulo secante al punto en el que se produce el punto máximo de tensión y el punto de colapso del material.

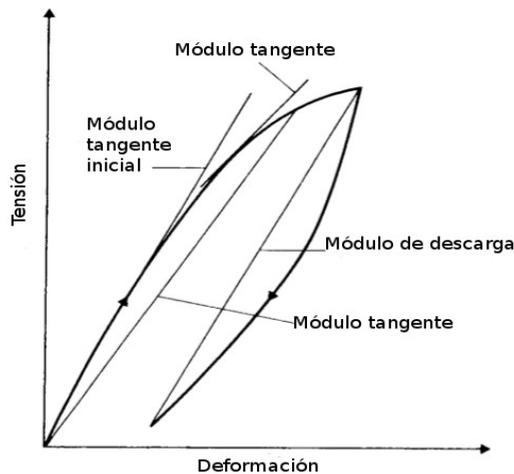


Figura 25: Diagrama tensión-deformación de material con comportamiento no elástico lineal Neville, 2010

3.4.2.3.. Aspectos normativos

En la EHE,2008 contempla el módulo de deformación longitudinal secante E_{cm} a 28 días (pendiente de la secante de la curva real σ - ϵ), siempre que las tensiones en condiciones de servicio, no pasen del valor de $0,40f_{cm}$, siendo f_{cm} la resistencia media a compresión del hormigón a 28 días de edad:

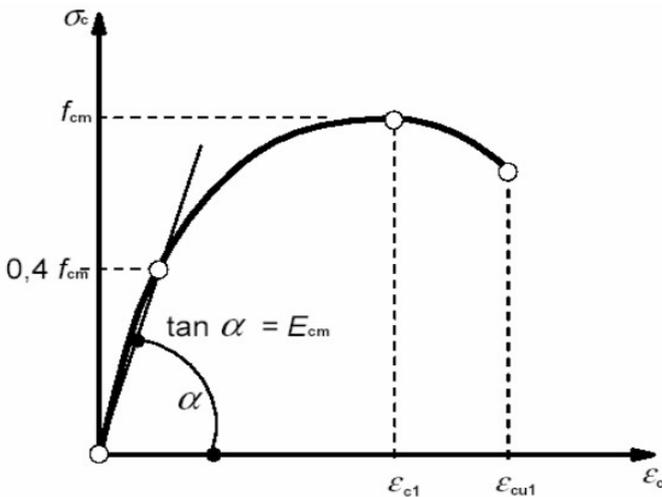


Figura 26: Representación esquemática de la relación tenso-deformación del hormigón EHE,2008

Para cargas instantáneas o rápidamente variables, el módulo de deformación longitudinal inicial del hormigón (pendiente de la tangente de origen) a la edad de 28 días, puede tomarse aproximadamente igual a:

$$E_{cm} = 8500 \sqrt[3]{f_{cm}} \text{ (en MPA)}$$

Se puede que f_{cm} , cuando se desconozcan y se haga una estimación con f_{ck} siempre que las condiciones de fabricación sean buenas

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ (MPA)}$$

$$E_c = \beta_E \cdot E_{cm} \text{ (en MPA)}$$
$$\beta_E = 1,30 - f_{ck}/400 \leq 1,175$$

Para la normativa ACI 318-2008, E_c , el módulo de elasticidad, se define como la pendiente secante trazada desde un esfuerzo hasta un esfuerzo de compresión de $0,45f'_c$, con valores de densidad comprendidos (w_c) entre 1440 y 2560 Kg/m³:

$$E_c = w_c^{1,5} 0,043 \sqrt{f'_c} \text{ (en MPA)}$$

y para hormigones con densidades normales:

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \text{ (en MPA)}$$

3.4.3. Factores influyentes

En hormigones tradicionales, se ha considerado como factores principales: la resistencia, las condiciones de humedad y, el módulo y cantidad propiedades del árido en el hormigón.

Ortega et al, 2011 La evolución del módulo de elasticidad con el tiempo no ha resultado concluyente; no obstante, se han obtenido valores superiores para los hormigones CEM III en prácticamente todos los casos. Además, para ambos tipos de hormigón, CEM I y CEM III y para cualquier edad, el valor obtenido en cámara húmeda ha sido superior al resto de exposiciones y todos los valores han sido superiores al recomendado por el UNE-EN 1992-1-1.

Por su parte, Ferrer et al, 2012 corroboran la influencia de las condiciones de humedad en el módulo de elasticidad, ya de por sí importante para las mezclas con cemento Pórtland, y más en el que contiene EGAH: Las muestras de CEM III, presentan valores más altos para "Cámara humedad" un curado realizado con HR de 100% a 20°C, que con las otras dos, curadas la intemperie y con valores de HR y temperatura variables.

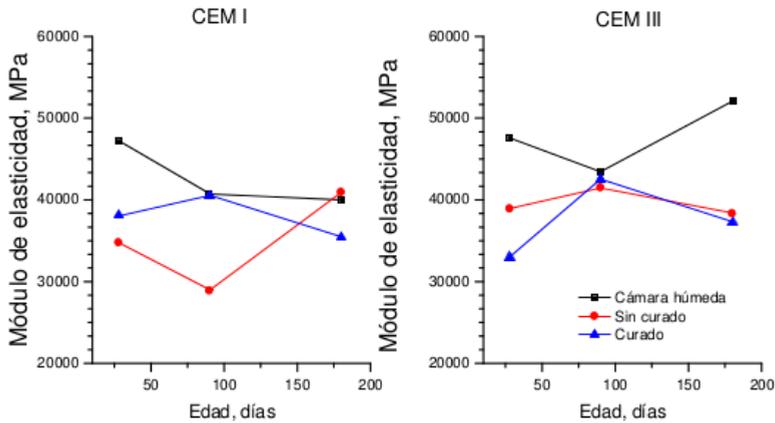


Figura 27: Módulos de elasticidad para hormigones tipo CEM I y CEM III con diferentes exposiciones ambientales Ferrer et al,2012

Al margen de la cantidad y propiedades del árido, Oner&Akyuz, 2007 observa que con valores de sustitución, en los que las EGAH, no reaccionan, permaneciendo en la mezcla, y teniendo un comportamiento de árido fino

3.4.4. Consecuencias de la utilización de EAGH

EnAmeri et al, 2012 se comprueba que se incrementa el módulo de elasticidad y la resistencia a flexión, a medida que se incrementa la sustitución de EGAH por cemento, producida por la mayor

angulosidad de las escorias, que aumenta la superficie de adherencia con la pasta de cemento, reduciendo las altas concentraciones internas.

En mezclas en las que se incorpora escorias, los activadores alcalinos (silicato sódico Bilim & Duran, 2012) incrementan la resistencia a compresión y flexión, alcanzando el máximo de resistencia con el reemplazo del 100% del cemento por EGAH.

El aumento de las adición en conglomerantes con un 80% de cemento Pórtland, independientemente que sea cenizas volantes y EGAH, supone una merma en el modulo de elasticidad, aunque con como se puede observar en la tabla 26.

Tabla 27: Mezclas de las muestras ensayadas y módulos de elasticidad en Udoeyo et al, 2012

Mezcla	Cemento Pórtland	EGAH	Cenizas volantes	E_c (MPa)
B0	100	-	-	25979
B1	80	20	-	24587
B2	80	16	4	25800
B3	80	12	8	23525
B4	80	8	12	24663
B5	80	4	16	22808
B6	80	-	20	22118

En la siguiente imagen, podemos observar la influencia de una mayor cantidad de adición de escorias, en donde la diferencia entre los valores últimos con respecto al elástico es menor, teniendo un material con un menor margen de seguridad, comportamiento que disminuye con la sustitución de cenizas, por EGAH. Con respecto a la capacidad portante, el margen de seguridad disminuye cuanto mayor es la cantidad de cenizas volantes. Aunque los ensayos realizados arrojan que las EGAH y las cenizas volantes pueden ser utilizadas como sustitución de cemento. Udoeyo el al, 2012

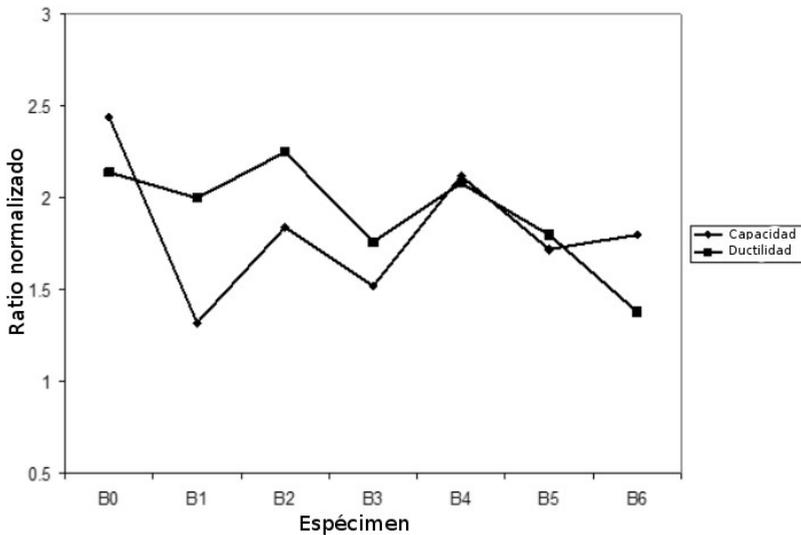


Figura 28: Ratios de ductilidad y de resistencias últimas a flexión con respecto a las elásticas Udoeyo el al, 2012

4. Durabilidad

Capítulo 4.- Durabilidad

4.1. Carbonatación

4.1.1. Introducción

La alta alcalinidad del hormigón con cemento Portland, que promueve la formación de una capa de óxidos pasivantes sobre el acero, es debida principalmente a la portlandita formada durante la hidratación de los compuestos anhidros del cemento y a los hidróxidos de sodio y potasio presentes. Estas sustancias sitúan el pH de la fase acuosa contenida en los poros del hormigón en valores entre 12,6 y 14, en el extremo más alcalino de la escala de pH. El descenso de la alcalinidad se produce principalmente por reacción de los compuestos de carácter básico de la fase acuosa del hormigón, hidróxidos de sodio, potasio y calcio, con los componentes ácidos de la atmósfera, dióxido de carbono (CO₂) y de azufre (SO₂), para formar carbonatos, sulfatos y agua. Puesto que el CO₂ se encuentra en mayor proporción en el aire que el SO₂, este proceso de descenso de la alcalinidad se denomina genéricamente 'carbonatación'.

En la siguiente tabla, se observa los valores límite de las distintas normativas, en a su clase de exposición y a la relación a/c:

Tabla 1: Requisitos normativos mínimos de hormigones en clases de exposición con riesgo corrosión inducida por carbonatación

Normativa	Clase de exposición	Armado	
		f_{ck} o f'_c (Mpa)	Relación a/c
ACI 318	P0	17	-
	P1	28	0,50
UNE EN 206	XC1	20	0,65
	XC2	25	0,60
	XC3	30	0,55
	XC4	30	0,50
EHE-08	IIa	25	0,60
	IIb	30	0,55

Además del efecto en la corrosión del refuerzo, la carbonatación puede dar lugar a aumentos en las resistencias a tracción y a compresión de las zonas afectadas, así como a tensiones y microfisuración Cheng et al, 2005.

Según Mukjerhee & Pathak, 2005, no hay evidencia de la imposibilidad técnica de la utilización de grandes cantidades de escoria de alto horno en el hormigón. Se sabe, sin embargo, que el uso de escoria de alto horno en el hormigón, en particular a niveles por encima de 50%, trae algunas desventajas:, (según dicho autor) a) el aumento de la velocidad de las reacciones de carbonatación que

conducen a la disminución del pH que puede conducir a la corrosión de la armadura b) resistencia inicial más baja, este inconveniente puede reducirse al mínimo mediante el aumento de la finura del clinker y escoria, materiales de curado o la reducción de la relación agua/material cemento (a/mc).

Entre otros beneficios técnicos de la incorporación de escoria de alto horno como adición mineral o como un agregado, se puede mencionar la mejora de la calidad del hormigón por el aumento de la durabilidad debido al cambio en la microestructura y la reducción de la permeabilidad, lo que resulta en un aumento de la resistencia al ataque por sulfatos; protección contra la reacción álcali-árido, la mejora de la trabajabilidad, y puede permitir la reducción de los materiales de agua/cemento, el aumento de la resistencia mecánica final y bajo calor de hidratación (Kosmatka et al, 2004).Y otra de sus ventajas es su nula vulnerabilidad frente a ataques químicos (SO_4^{2+} , Mg^{2+})

4.1.2. Factores influyentes

Los principales factores que hay que considerar en la carbonatación del hormigón son:

- porosidad
- el tipo y la cantidad de cemento
- el nivel de compactación

- el tipo y el tiempo de curado
- la relación agua/cemento

4.1.3. Influencia del uso de EGAH como sustitución del cemento

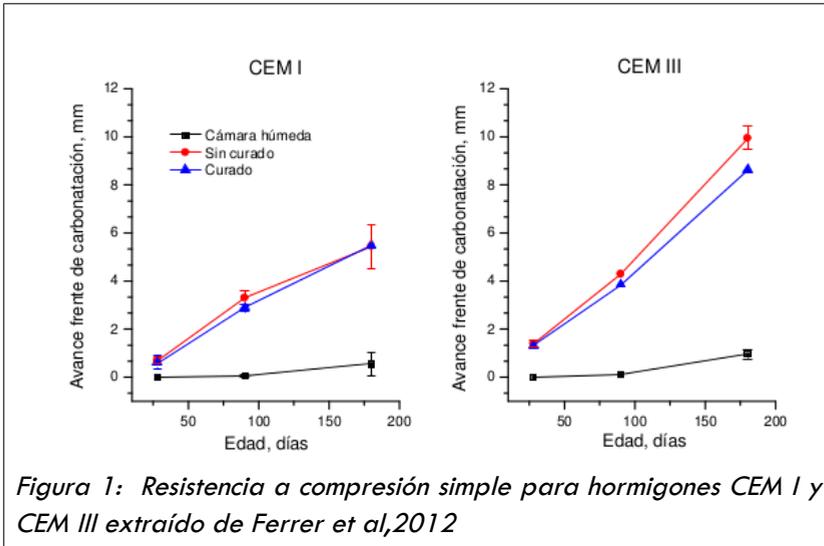
4.1.2.1. En el curado.

Un curado adecuado, en función del ambiente en el que se encuentre, puede garantizar la vida útil de una estructura. En Salazar Jaramillo realiza un estudio en el que comprueba que se obtienen porosidades y absorción más bajas, y en consecuencia una menor carbonatación de las muestras con adiciones siderúrgicas, ofreciendo unos valores óptimos para la adición del 40% del peso de cemento.

El uso de activadores alcalinos produce un incremento de la resistencia a compresión y flexotracción, aunque un efecto secundario de ello, es el aumento de la profundidad de carbonatación Bilim & Atis, 2012

Aunque Ferrer et al,2012 no considera relevante la influencia del curado en la carbonatación, ésta apenas avanzó en probetas en cámara húmeda por las condiciones de exposición, ya que las otras muestras o no tuvieron curado o uno de 7 días, expuestos a la intemperie (con mayor concentración de CO₂, humedad relativa y

temperatura variable y con exposición solar), en vez de unas condiciones ideales del 100% de HR y 20°C.



Una mayor humedad relativa en el ambiente, con una temperatura ligeramente elevada, favorece el desarrollo de una microestructura más refinada, con una menor porosidad, y una mejora de las propiedades de durabilidad de morteros con ceniza volante y EGAH Ortega et al, 2011

4.1.2.2. Humedad relativa concentración de CO₂

El ambiente de exposición y, más concretamente, la humedad relativa y la concentración de CO₂, influyen de manera diferente en el avance del frente de carbonatación y en la absorción de CO₂

La humedad en el hormigón, o mejor dicho, el grado de saturación en los poros del hormigón es otra de las variables fundamentales en el comportamiento del fenómeno de la carbonatación. La porosidad del hormigón es también un parámetro muy importante, ya que los poros capilares de menor tamaño están generalmente siempre saturados de humedad y por tanto inaccesibles a la carbonatación. Los hormigones porosos se carbonatan a gran velocidad (Ilshida et al, 2001; Chang et al, 2006; Thiery et al, 2007).

En el estudio de Song & Wong, 2007, se demuestra que hormigones con escoria de alto horno son más vulnerables a la carbonatación que los hormigones con cemento Pórtland común, ya que estos últimos contienen mayor contenido de calcio, formándolo cuando el cemento Pórtland común entra en contacto con el CO₂, que se precipita en los poros, disminuyendo la capacidad de difusión de la matriz. Por lo tanto, una capa superficial rica y densa en carbonato de calcio se crea, debido a la carbonatación, disminuyendo la porosidad de la pasta y formando una barrera para la difusión del CO₂. Esta barrera disminuye el grado de carbonatación, en hormigones con cemento Pórtland común. Además, como la penetración del CO₂ se da mediante el mecanismo de difusión, el hecho de que los capilares de un hormigón estén total o parcialmente llenos de agua dificultará el movimiento de ese CO₂. De otro lado, si esa humedad es baja, la molécula de CO₂ también tendrá dificultad para avanzar. Es decir, las mayores tasas de carbonatación se alcanzan con humedades relativas intermedias (del orden del 40%-60%). Un hormigón que se mantenga

totalmente seco o perfectamente saturado prácticamente no presentará carbonatación. El efecto se muestra en la imagen:

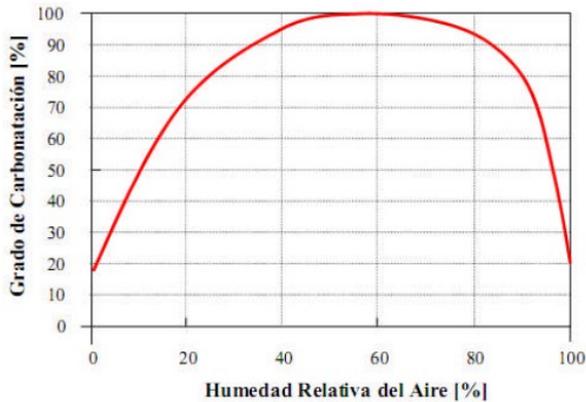


Figura 2: Grado de carbonatación del hormigón en función de la HR atmosférico de exposición Becker, 2003

4.1.2.3. Tipo de cemento, características del cemento con EGAH

El tipo de cemento también influirá en las condiciones de avance de la carbonatación, ya que el contenido en álcalis o en adiciones modificará la velocidad de avance de la carbonatación Ho et al, 1987. De hecho, la capacidad del hormigón para fijar CO_2 es proporcional a la alcalinidad de su pasta de cemento. Para cementos mixtos, la hidratación de los materiales puzolánicos o la escoria conduce a un menor contenido de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en la pasta de cemento endurecida lo que puede aumentar la velocidad de carbonatación. No

obstante, la relación a/c y el curado siguen siendo los factores más importantes. De hecho, la estructura más densa producida por la hidratación de los cementos mixtos puede ralentizar la difusión del CO_2 . En la **figura 3** se puede observar que la menor alcalinidad de los cementos con adiciones de ceniza volante o escoria de alto horno puede compensarse por la menor permeabilidad de sus pastas de cemento, si se curan apropiadamente.

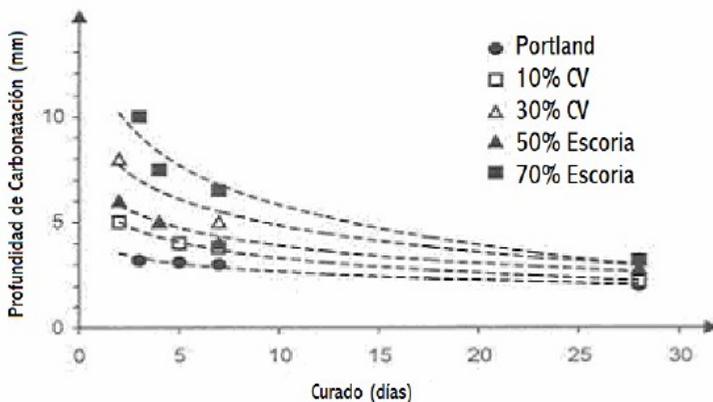


Figura 3: Influencia del curado en la profundidad de carbonatación para pastas de cemento (6 meses, 0,03% CO_2) de cemento Pórtland y cementos mixtos con ceniza volante y escorias de alto horno Page et al, 1991

Los cementos del do tipo CEM I, que son principalmente constituidos por clinker, son los más indicados para combatir la carbonatación pues

permiten producir mayor cantidades de Ca(OH)_2 en el proceso de hidratación del cemento. El contenido en CaO y de alcalinos (sodio y potasio) son las materias susceptibles de carbonatarse. Cuanto mayor sea su contenido, menor será la velocidad de carbonatación, de ahí que los cementos Pórtland sin adiciones sean en general más resistentes a la carbonatación o descenso de pH, debido a que cuentan con reserva alcalina proveniente de los óxidos alcalinos, que en agua producen hidróxidos de sodio y potasio, bases fuertes que tienen un pH alto, cercano a 14. Esta propiedad es una debilidad para la durabilidad, ya que son también compuestos más solubles, por lo que es esperable que hormigones con este tipo de cemento presenten mayor porosidad a través del tiempo, debido a la solubilización de estos hidróxidos alcalinos (Saeki et al, 1991; Valls et al, 2001; Thiery et al, 2007).

En la medida que sea mayor el contenido de cemento, mayor será la cantidad de hidróxido de calcio liberado, sustancia que reacciona con el dióxido de carbono y, al ser la misma cantidad de CO_2 agresor, menor será el avance del frente de carbonatación. Esta es una de las razones por la cual una buena cantidad de normas exigen un contenido mínimo de cemento, para garantizar una “reserva alcalina mínima” o contenido mínimo de CaOH . En otras palabras, no basta con limitar a un valor máximo la relación a/c, puesto que el empleo de altas dosis de plastificantes puede reducir en valores significativos la cantidad de agua y, consecuentemente, poderse rebajar la cantidad de cemento, manteniendo en teoría la misma resistencia e impermeabilidad, pero ese menor contenido de cemento hará que sea

menor el contenido de CaOH, lo que no es deseable desde el punto de vista carbonatación.

La adición de escoria de alto horno produce una moderada reducción de la concentración iónica, y por tanto del pH. A partir de las concentraciones de los iones hidroxilo se pueden calcular valores de pH de 13,4- 13,9 para el cemento Pórtland, y valores de pH de 13,0 - 13,5 para los cementos mixtos. Larbi et al, 1990.

Silva et al, 2002, investigaron la carbonatación en hormigones, producida con cementos CP II-E 32, con un contenido en escoria de alto horno del 25%, observaron a través de la prueba de intrusión de mercurio, que la carbonatación reducía la porosidad de un 5% a 12% y, además , concluyeron que el aumento de la resistencia a compresión se producía, debido a la reducción de la porosidad, lo que hacia mas denso al hormigón.

Galan, 2011 investigo mediante imagen SEM diferentes morteros con distintos tipos de cemento, como se observa en las figuras 4 y 5 se muestran imágenes de una probeta fabricada con cemento CEM II/A-S 52,5N con adición de escoria expuesta durante un año en el exterior no protegido de la lluvia. En las imágenes de las figuras, realizadas a 3500 aumentos, se muestra la superficie de la probeta carbonatada. En la Figura 5 los carbonatos aparecen parcialmente cristalizados y en la Figura 66 se observa una escoria rodeada de carbonatos.

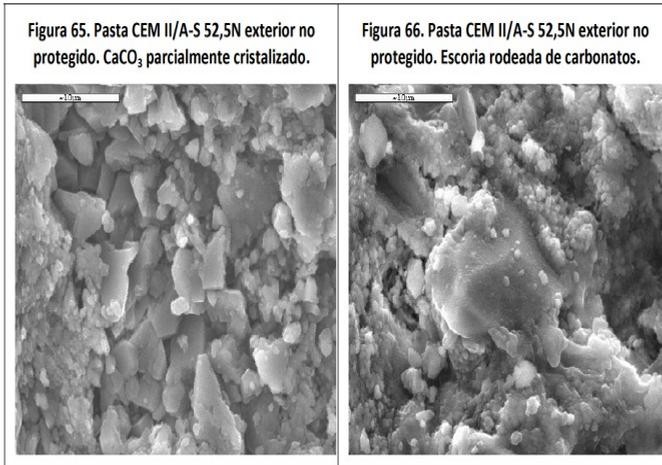


Figura 4: Pasta CEM II/A-S 52,5 N exterior no protegida. CaCO_3 , parcialmente cristalizado.

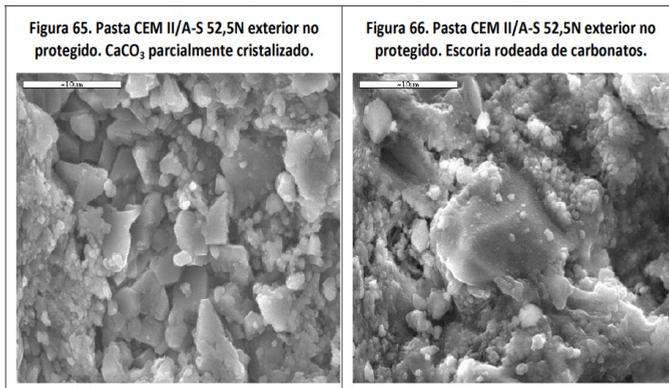


Figura 5: Pasta CEM II/A-S 52,5 N exterior no protegida. Escoria rodeada de carbonatos.

Justificando dichos resultados porque las probetas de cementos con adiciones de puzolana y ceniza volante forman menos portlandita inicialmente que las de cementos sin adiciones, mientras que aquéllas con escoria y caliza forman cantidades mayores. Asimismo, las cantidades de CaCO_3 formadas en las probetas sin adiciones son mayores que en las de puzolana y ceniza, pero menores que en las de escoria y caliza, lo cual está relacionado directamente con las cantidades de CaO en los cementos. Las profundidades del frente de cambio de pH son mayores en las probetas con adiciones que en las sin adiciones. Galan, 2011.

4.1.2.4. Porosidad

Con la carbonatación se reduce la porosidad total para todo tipo de cemento o mezcla cementicia (OPC, cenizas,...), pero dependiendo del tipo de mezcla cambian notablemente las medidas de los poros, afectando de una forma u otra a las propiedades del hormigón final Song & Wong, 2007, investigó el efecto de la carbonatación en la estructura porosa de los sistemas de cemento, producidos con dos tipos de cemento, con y sin adición de escoria. El autor descubrió que en aquellos con alto contenido de clinker la carbonatación da lugar a una reducción del volumen de poros capilares, y con cementos con contenido de escoria da aproximadamente 50%, la reducción en la porosidad es más significativa.

Atis, 2004, estudiando la relación entre carbonatación, la resistencia a compresión y la porosidad concluyo que cuanto menor es la porosidad, mayor es la resistencia y, consecuentemente menor es la profundidad de carbonatación. Más el aumento de la porosidad resulta un aumento de la profundidad de carbonatación para una resistencia a compresión constante, es decir, que la resistencia mecánica no es parámetro único para controlar la carbonatación, Por tanto, la permeabilidad y la interconexión de los poros deben ser considerados para evaluar la carbonatación en hormigones diferentes

Huang & Yang, 2002, relata que la profundidad de carbonatación decrece con el incremento de la resistencia compresión para topo tipo de hormigón, ya que esta relación depende del tipo de cemento empleado y las condiciones de curado.

4.2. Ataque ión cloruro

4.2.1. Introducción

Es un mecanismo de corrosión localizado, por presencia de iones despasivantes en cantidad como para romper las películas de óxido submicroscópicas.

La concentración de cloruros puede provenir de:

- Productos añadidos al hormigón: Ya sea de los conglomerantes, como por ejemplo del siguiente extracto de la tabla 1 de composiciones químicas de un cemento Portland, humo de sílice y escorias de alto horno de Yazici et al, 2010:

Tabla 2: Contenido de ión cloruro en los componentes de Yazici et al, 2010

Cl ⁻	Cemento Portland (%)	Humo de sílice (%)	Escorias granuladas de alto horno (%)
	0,0096	0,09	-

O provenga de los aditivos incluidos para, mejorar la trabajabilidad del hormigón, como plastificantes y

superplastificantes; y los inclusores de aire, que también son utilizados en hormigones en medio marinos y/o con ciclos de hielo-deshielo. Estos son contemplados en la EHE, 2008, y tienen limitaciones con respecto a los cloruros, contenidas en la UNE-EN 934-2:2002/A2, que las limita a las especificaciones del fabricante o; en caso de que el contenido sea inferior al 0,10% en masa, se puede considerar exento de cloruros.

- Sustancias aplicadas para el deshielo en redes viarias.
- Se hallan en ambiente o por difusión en las zonas costeras. La gran mayoría de las aguas marinas tienen una composición uniforme y muy parecida a lo largo del mundo, que se caracteriza por la presencia de un tres y medio por cien de sales solubles. El pH del agua de mar varía entre 7,5 y 8,4; además bajo determinadas condiciones, en las que se halle concentraciones de CO₂ superiores a 8,2 veces el atmosférico, pueden hacer que el agua sea más agresiva.

Tabla 3: Requisitos normativos para hormigones en clases de exposición con ataques ión cloruro

Normativa	Clase de exposición	Armado		Pretensado	
		f_{ck} o f'_c (MPa)	Relación a/c	f_{ck} o f'_c (MPa)	Relación a/c
¹ ACI 318	C0, C1	17	-	17	-
	C2	35	0,40	35	0,40
² UNE EN 206	XS1	30	0,50	30	0,50
	XS2	35	0,45	35	0,45
	XS3	35	0,45	35	0,45
	XD1	30	0,55	30	0,55
	XD2	30	0,55	30	0,55
	XD3	35	0,45	35	0,45
EHE-08	IIIa	30	0,50	30	0,45
	IIIb	30	0,50	35	0,45
	IIIc	35	0,45	35	0,45
	IV	30	0,50	35	0,45

- 1 El contenido máximo de iones de cloruro soluble en agua en el hormigón no ha de ser mayor:

	Hormigon armado	Hormigón pretensado
C0	1,00	0,06
C1	0,30	0,06
C2	0,15	0,06

- 2 Las especificaciones para el contenido de iones cloruros solubles en agua se encuentran recogidos en las especificaciones de los cementos.

La pérdida de la capa protectora del acero, debido a los cloruros, depende de determinados factores que se encuentran interrelacionados como se puede observar en la siguiente imagen:

- Penetración de cloruros, ya sean totales o libres.
- Coeficiente de difusión, que varía en función del tamaño y la distribución de los poros en el hormigón.
- La capacidad de fijación y combinación de los cloruros.

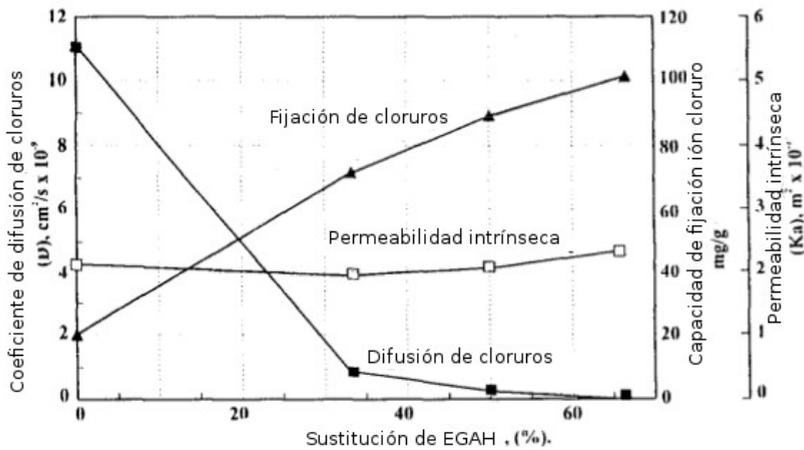


Ilustración 6: Efectos de la permeabilidad, fijación y coeficiente de difusión de cloruros en función del grado de sustitución de EGAF Dhir et al, 1996

4.2.2. Conglomerantes binarios

Según el estudio Mohammed et al, 2003, los cloruros libres suponen entre un 67% y un 90% de los cloruros totales, en función del tipo de cemento empleado (cemento de aluminato cálcico y cemento con escorias de tipo B, respectivamente).

Moon et al, 2006 estudiaron las características de los poros, la resistencia a compresión, y la difusión de cloruros en el hormigón, concluyendo que la resistencia del hormigón reduce cada vez que aumenta el diámetro medio de los poros, como se muestra en la figura a. El diámetro medio de los poros del hormigón se disminuye según orden siguiente:

1. Cemento de bajo calor de hidratación
2. Cemento Pórtland normal y cemento resistente a los sulfatos
3. Cemento con 40% de escorias de alto horno
4. Cemento con 60% de escoria de alto horno
5. Cementos de tres componentes.

Por otro lado la difusión de cloruros en el hormigón disminuye según el orden siguiente

1. Cementos de bajo calor de hidratación

2. Cemento Pórtland normal y cemento resistente a los sulfatos.
3. Cemento con 40% de escorias de alto horno
4. Cemento con 60% de escorias de alto horno y cemento de tres componentes.

La difusión de cloruros aumenta con el diámetro medio de poro presentado un factor de correlación superior a 0,91.

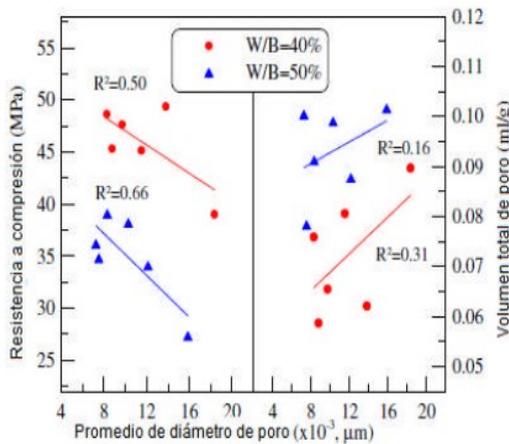


Figura 7: Relación entre el diámetro del poro, la resistencia a compresión y el volumen total de poro (Moon et al, 2006)

Los hormigones, que son diseñados con el mínimo volumen de huecos, se la fijación de cloruros se convierte en el factor dominante para la

determinación de la resistencia a la permeabilidad de los cloruros, Dhir et al,1996

El tipo de cemento y su capacidad de retener o combinar cloruros, es otro de los parámetros relevantes del proceso como se detallará más adelante.

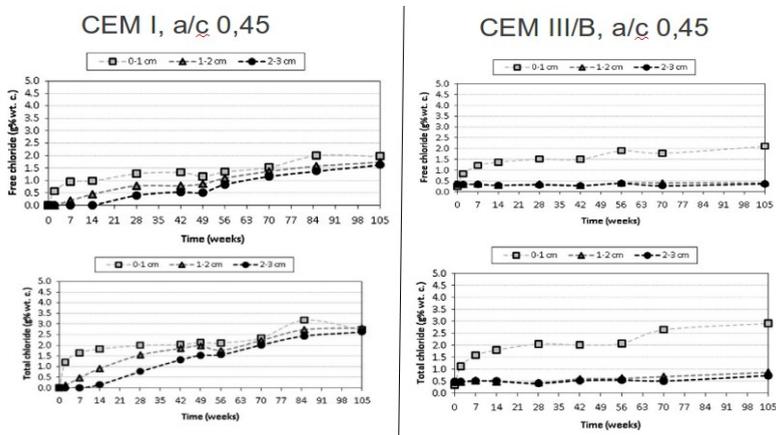
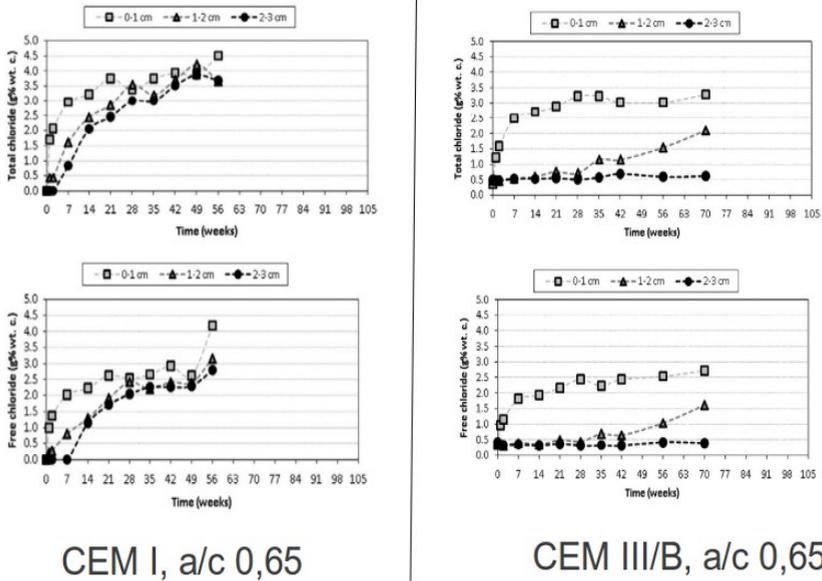


Figura 8: Evolución del contenido total de cloruros totales y libres de especímenes expuestos a ciclos de humedad-deseccación con relación a/c igual a 0,45 (Bouteiller et al., 2012)

En los ensayos realizados por Bouteiller et al., 2012, con cementos CEM III/B y CEM I, con relaciones a/c observa que, a pesar de que la porosidad es mayor para los CEM III/B con un 70% de EGAH, que para el CEM I, no está ligado directamente como se puede comprobar en las figuras 8 y 9, en donde las propiedades de transporte, como el coeficiente de difusión de cloruros o la permeabilidad, debido

tortuosa porosidad resultante en el el CEM III/B, obteniendo mejores resultados con la relación a/c menor. En conclusión el ingreso de cloruros en hormigones con EGAH, es menor.



CEM I, a/c 0,65

CEM III/B, a/c 0,65

Figura 9: Evolución del contenido total de cloruros totales y libres de especímenes expuestos a ciclos de humedad-deseccación con relación a/c igual a 0,65 (Bouteiller et al., 2012)

Tamilarasan et al, 2012, realiza un estudio en el que compara mortero con distintos grados de sustitución de EGAH, y también que contenga o no superplastificantes, en el que se demuestra que las muestras con superplastificantes experimenta un mejor comportamiento ante el test de permeabilidad de ión cloruro:

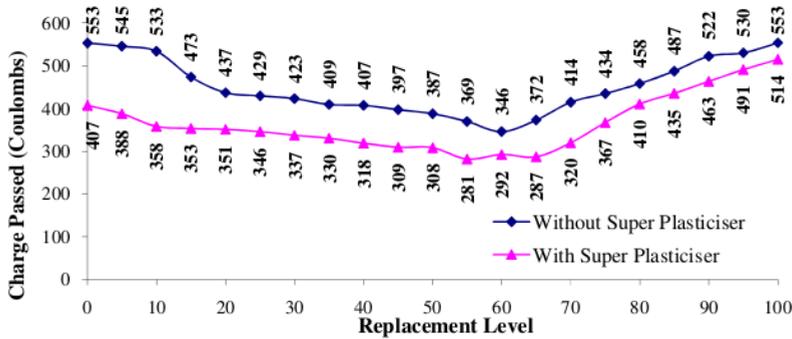


Figura 10: Valores de carga pasada a través de mortero M20 con distintos grados de sustitución de EGAH con y sin superplastificante (Tamilarasan et al, 2012)

Yiğitler et al, 2007, investigaron el efecto del tipo de cemento, la relación a/c y el contenido de cemento en la resistencia del hormigón expuesto al agua de mar. Los tipos de cementos empleados fueron cemento Pórtland normal (PC) y un cemento de escoria de alto horno (SC). Los diferentes contenidos de cementos estudiados fueron de 250, 350 y 450 kg/m³, con relaciones a/c de 0,43 – 0,53 y 0,63. Concluyeron que las mezclas SC presentaron mejor resistencia a la penetración de los iones cloruro que las de PC. El aumento de la relación a/c también tiene como consecuencia, un aumento en la profundidad de penetración de cloruro. Al aumentar la dosificación de cemento de 250 a 350kg/m³ disminuyó el ingreso del ión cloruro considerablemente.

Finalmente, concluyeron que cuando aumentaba el contenido de cemento, la resistencia a la penetración de los iones cloruro aumentaba consideraba como se muestra en la ilustración 12

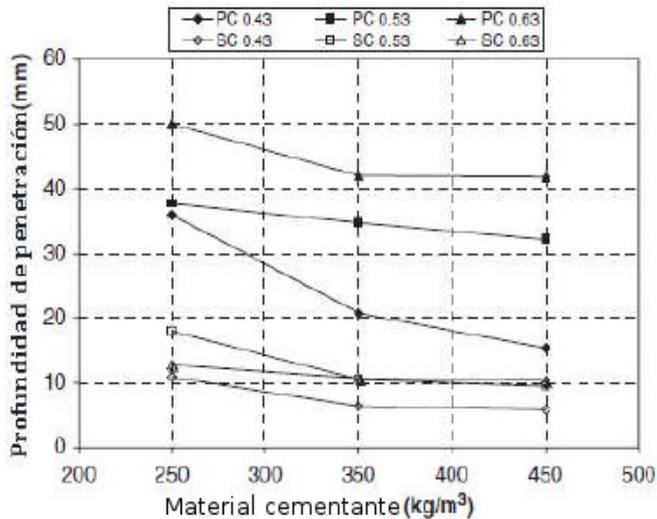


Figura 11: Profundidad de penetración de ión cloruro (Yiğiter et al, 2007)

El cemento CEM II/A-P 42,5R presenta un mejor comportamiento frente a la durabilidad que el CEM II/A-S 42,5N. Pues el hormigón fabricado con un cemento tipo CEM II/A-S 42,5 N, posee una porosidad similar a la de los fabricados con los otros tipos de cementos de igual resistencia, pero con un radio promedio de poro mayor y un volumen elevado de macroporos, de aquí su peor

comportamiento frente a la penetración del agua y CO_2 . En cambio, presenta un volumen menor de mesoporos en comparación con el resto y su difusión del ión cloruro es elevada. Este hecho puede justificarse por la forma irregular de las escorias, que da lugar a un peor sellado de los poros (Bermejo-Nuñez et al, 2010).

Looser et al, 2010, investigaron la influencia de diferentes tipos de cemento: cemento Pórtland (CEM I), cemento Pórtland mezclado con cal (CEM II/A-LL), cemento Pórtland mezclado con escoria de alto horno (CEM III/A) y cemento Pórtland con 20% de cenizas volantes (CEM I+20% CV)), en su exposición a un medio agresivo con presencia de NaCl. En base a los resultados obtenidos concluyeron que la porosidad total es el factor más importante en la resistencia a la penetración de los cloruros. El hormigón fabricado con CEM III experimentó el mejor comportamiento frente al transporte de los cloruros. Se observó la formación de la sal de Friedel en los hormigones mezclados con escoria y en los mezclados con cenizas volantes. En un trabajo de características similares, (Seleem et al,2010) estudiaron la influencia de adiciones de humo de sílice, escoria de alto horno y metacaolín como adición al cemento en el medio agresivo de agua de mar durante 3, 6 y 12 meses de exposición a la misma. En base a los resultados obtenidos, indicaron que la combinación de cemento con la adición de humo de sílice resulta ser la más eficaz para resistir el ataque del agua de mar.

Yeau et al, 2010, ensayaron unas muestras de hormigón fabricado con escoria de alto horno mediante el ensayo rápido de permeabilidad

de cloruro. En base a los resultados de estos ensayos, concluyeron que la permeabilidad a los iones cloruro de las muestras de hormigón de escoria se reduce cuando aumenta bien el periodo de curado o bien el contenido de escoria en el hormigón. El hormigón fabricado con 40% de escoria o más puede aumentar la resistencia a la corrosión dos veces más, en comparación con el hormigón fabricado con cemento normal.

Los coeficientes de difusión aparentes medidos para el ion cloruro en la investigación de Lizarazo & Claise, 2011, mediante la ecuación siguiente

$$c(x, t) - c_0 = (c_s - c_0) \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{4tD_a}} \right) \right)$$

Y cuyos resultados son mostrados en la figura 13, con las mezclas de expuestas en la figura 12 . Allí se detalla el valor correspondiente a cada mezcla, además del perfil descrito por la segunda ley de Fick para las doce semanas de ensayo. Los beneficios obtenidos en el uso de escoria son importantes, tal como ha sido reportado anteriormente por Wang et al, 2010. Para las mezclas con relación a/c igual a 0,4, el remplazo de escoria produjo una disminución entre ocho y diecinueve veces el coeficiente para las mezclas con 30 y 50% de remplazo, respectivamente. A su vez, para las mezclas con relación a/c igual a 0,5, se produjo una disminución entre diecisiete y diecinueve veces el coeficiente para las mezclas con 30 y 50% de reemplazo, respectivamente. De manera similar a lo reportado en la

literatura (Geiseler et al, 1992), se encontró que la adición de escoria de alto horno mejora notablemente la resistencia a la penetración de los cloruros, siendo el reemplazo de 50% más benéfico que el reemplazo del 30%. De la misma forma, los coeficientes obtenidos son menores, como era de esperarse, para la relación a/c.

MEZCLA	AGUA/ CEMENTANTE	ESCORIA [KG/M ³]	CEMENTO [KG/M ³]
OPC 4	0,4	0	400
OPC 5	0,5	0	400
S-430	0,4	120	280
S-450	0,4	200	200
S-530	0,5	120	280
S-550	0,5	200	200

Figura 12: Diseño de las mezclas (Lizarazo & Claise, 2011)

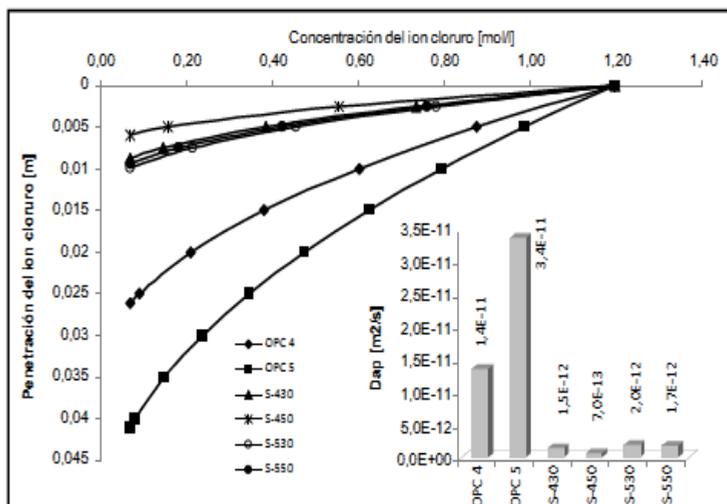


Figura 13: Coeficientes aparentes de difusión medidos en m²/s Lizarazo & Claise, 2011

Entre las razones por las cuales la escoria de alto horno mejora la resistencia a la penetración de cloruros está la presencia de compuestos producto de la hidratación, como son los silicatos de calcio adheridos a cadenas de aluminio o magnesio, que tienen la posibilidad de fijar de manera física cloruros libres y obstruir los posibles canales por los cuales éstos se mueven. De la misma forma, la porosidad y la forma de la matriz porosa del concreto es refinada debido al remplazo de EAH. Una tercera razón es la abundante presencia de aluminato tricálcico en la escoria, compuesto que tiene la capacidad de fijar cloruros, adhiriéndolos a la matriz y evitando su movimiento (Luo,2003).

Para el caso de la porosidad se observa que ésta disminuye en la medida en que disminuye la relación agua-cemento y en la medida en que aumenta el contenido de adición. Es importante decir que la definición de la porosidad tal como es definida no hace estricta referencia al volumen de vacíos con respecto al volumen total, sino más bien al volumen de vacíos interconectados definidos por medio de la tortuosidad del sistema de poros de la muestra. Finalmente, se observa en la misma figura la capacidad de fijación de cloruros de la matriz cementicia . Como ya fue descrito, la adición de escoria estimula la fijación de cloruros debido a un incremento en los productos capaces de fijar cloruros libres, especialmente a un aumento en el contenido de alúmina de la escoria.

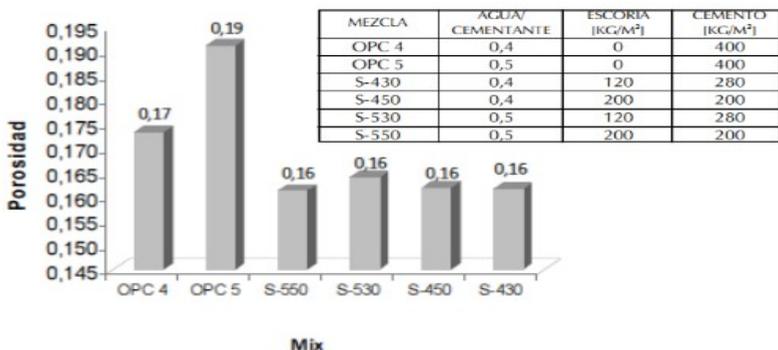


Figura 14: Histograma de porosidad en relación del diseño de las mezclas (Lizarazo & Claise, 2011)

4.2.3. Conglomerantes ternarios

En Jones et al, 1997, los resultados obtenidos de las pruebas de penetración e ingreso de cloruros indican que la resistencia de las mezclas ternarias son significativamente mayores que las de cemento Pórtland y el cemento Pórtland con ceniza volantes.

En Bleszinsky et al, 2002, se observó en la evolución de los perfiles de concentración y los coeficientes de difusión de cloruros, en mezclas ternarias, apuntaban que la adición de humo de sílice, ayuda a la supresión de mayores ratio de difusión a edades tempranas, como se da en mezclas binarias con humo sílice. Además la adición de EGAH, producía una descenso del coeficiente de difusión, consiguiendo que el coeficiente que había comenzado con valores bajos en edades tempranas, se mantenga.

La inclusión del humo de sílice en conglomerantes binarios con cemento Pórtland contribuye positivamente a reducir la permeabilidad del hormigón al ión cloruro, por el incremento de la densidad de la matriz provocada por la reacciones con las puzolanas, que bloquea los poros. (Ahmed et al, 2008)

Al contrario que con la resistencias, las mezclas ternarias con humo de sílice y con distintos grados de sustitución de EGAH muestran mejoras sustanciales en la durabilidad en edades posteriores a los 28 días. En la siguiente imagen se puede comprobar la influencia de distintos grado de reemplazo de EGAH y humo de sílice, a los 28, 90 y 180 días, en el ratio de penetración de cloruros, obteniéndose mejores resultados para una cantidad de 30% de sustitución de EGAH, y a medida que se aumenta la cantidad de humo de sílice incrementa su resistencia:

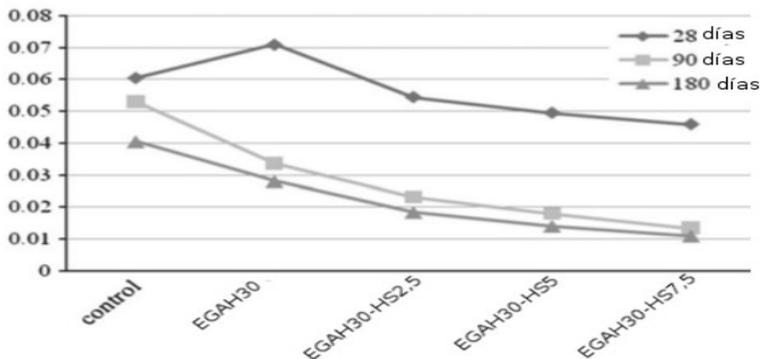


Figura 15: Ratio de penetración de ión cloruro en mezclas con 30% de EGAH y diferentes grados sustitución de humo de sílice Bagheri et al, 2012

4.2.4. Resistencia a hielo-deshielo

La investigación de la acción de las heladas, se ha tratado con la acción por cloruros: Se comprobó que los cementos con escorias de alto horno, que se estaban expuestos en las zonas de fluctuación de mareas, sufrían desconchamientos y exudaciones características por heladas; hecho que no ocurre cuando los elementos se encuentran totalmente sumergidos (Osborne,1998). En este reporte, advierte la importancia de aire ocluido.

Tabla 4: Comparativa de las prescripciones para la dosificación de hormigones resistentes a las heladas

Normativa	Clase de exposición	Relación a/c mínima	f' _c o f _{ck} (MPa) mínima	Aire ocluido
ACI	F0	-	17	-
	F1	0,45	31	Tabla 5
	F2	0,45	31	
	F3	0,45	31	
EN 206	XF1	0,55	30	<4%
	XF2	0,55	25	
	XF3	0,50	30	
	XF4	0,45	30	
EHE-08	H	0,50	30	<4,5%
	F	30	0,50	

Tabla 5: Contenido total de aire para hormigones expuestos a ciclos hielo-deshielo según EHE,2008.

Tamaño máximo nominal del árido (mm)	Contenido de aire (%) ³	
	Clase de exposición F1	Clase de exposición F2 y F3
9,5	6	7,5
12,5	5,5	7
19,0	5	6
25,0	4,5	6
37,5	4,5	5,5
50 ⁴	4	5
75 ¹	3,5	4,5

Las causas para el deterioro del hormigón endurecido por las heladas está relacionado con la complejidad de la micro-estructura del material, teniendo en cuenta que los efectos más dañinos, no están en

-
- 3 La tolerancia en el contenido de aire incorporado debe ser de $\pm 1,5\%$. Para un f'_c mayor de 35 MPa, se puede reducir el aire incorporado indicado en un 1%.

 - 4 Estos contenidos de aire se aplican a la mezcla total. Al ensayar estos hormigones, sin embargo, se retiran las partículas de árido mayores de 40 mm sacándolas mediante tamizado (la tolerancia en el contenido de aire incorporado se aplica a este valor). El contenido de aire de la mezcla total se calcula a partir del valor determinado en la fracción cribada que pasa por el tamiz de 40 mm, indicada en la ASTM C231.

función del hormigón, sino en las condiciones del medio ambiente en el que se encuentra.

Los daños por heladas en el hormigón puede adoptar varias formas. La más usual es la rotura o spalling causada por una progresiva expansión de la matriz de la pasta de cemento por repetidos ciclos de hielo-deshielo. Los bloques de hormigón expuestos a ciclos de hielo-deshielo en presencia de humedad y sales fundentes son susceptibles de scaling, degradación de la superficie expuesta hasta su desprendimiento, con la consecuente pérdida de sección. Además algunos áridos gruesos, en los bloques de hormigón son conocidos por causar roturas, paralelas a las juntas y las esquinas, en forma de D mayúscula (Mehta & Monteiro, 2006)

Los agentes inclusores de aire han demostrado de forma efectiva que la reducción del riesgo de los daños por acción de las heladas. Los mecanismos se engloban dentro de dos puntos de vista: en la pasta de cemento o en el árido.

Las EGAH producen un descenso en el contenido la orientación y la orientación dispuesta de los cristales de Ca(OH)_2 en el interfase pasta-árido. Las partículas finas de EGAH producen una saturación que equilibra la formación de Ca(OH)_2 , formado cristales pequeños, obteniendo como resultado una matriz cementante más densa. Esta es la razón por la cual hormigones de altas prestaciones con un 40% de EGAH, posee una excelente resistencia a ciclos de hielo-deshielo. (Gao et al, 2005).

En el caso de los mecanismos en la pasta de cemento, la presencia de huecos puede reducir los esfuerzos causados por los ciclos de hielo-deshielo, que con la adición de un 10% de aire ocluido, las variaciones de volumen entre ambos ciclos es nula. Además de: la presión hidráulica causada por la congelación del agua en capilares grandes y la presión osmótica resultante de la congelación parcial de la solución en los capilares puede ser una fuente de destrucción, ya que ésta puede contener sustancias como álcalis, hidróxido cálcico, cloruros.

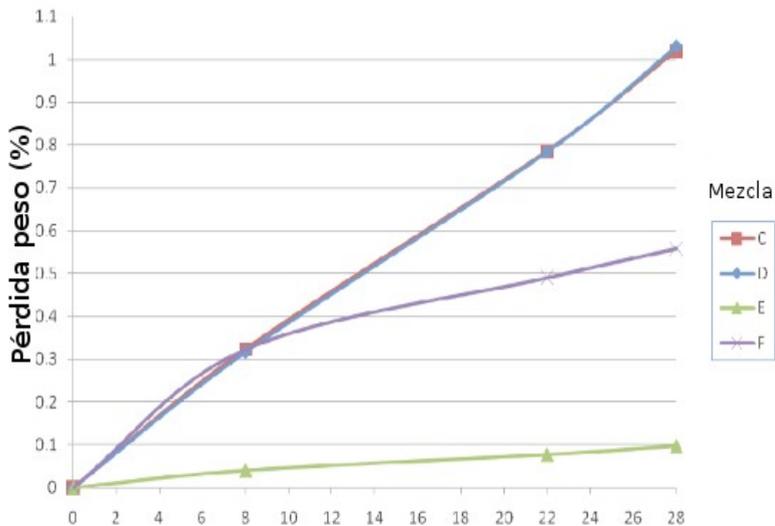


Figura 16: % de pérdida de masa en 28 ciclos hielo-deshielo (las muestras A y B se disgregaron antes de los 28 ciclos) extraído de Kelly & Murphy, 2010.

Tabla 6: Mezclas realizadas en Kelly & Murphy, 2010.

Mezcla	Cemento	EGAH	Contenido de aire (%)	Agente inductor de aire (% _{mc})
A	400	0	1,0	0
B	400	0	1,5	0
C	200	200	1,6	0
D	200	200	2	0
E	400	0	6	0,5
F	200	200	6,6	0,5

El uso de escoria de alto horno como cemento de en un 50% muestra un incremento de la resistencia a los ciclos de hielo-deshielo del hormigón. Los valores de las pruebas con sales fundentes son mucho menores que con hormigones con las mezclas con la misma relación agua/cemento y proporciones. Con lo que se valida las especificaciones de la “National Roads Authority” para el uso de escoria granulada en carreteras y puentes expuestos a sales fundentes, y que contradice a Panesar & Chidiac, 2009, que mantenían “la inclusión de escorias granuladas proporcionaban una menor resistencia a sales fundentes, comparados con hormigones sin o con porcentajes muy inferiores(Kelly&Murphy, 2010).

En cuanto a la resistencia final cabe destacar que pruebas realizadas mediante ultrasonidos al término de los 28 ciclos de hielo-deshielo: los hormigones con aire ocluido ofrecen unos buenos altas resistencias

internas a los daños y a los ciclos de hielo-deshielo; Para hormigones que sólo contenían escorias granuladas presentaban daños internos, que pueden ser un problema a largo plazo; y en el caso de hormigones tradicionales, podría ser peligroso usar bajo condiciones de hielo-deshielo, ya que ha perdido toda la resistencia interna, como se puede observar en la siguiente imagen, donde se observa la merma de la velocidad en las mezclas con menor resistencia interna (Kelly&Murphy, 2010).

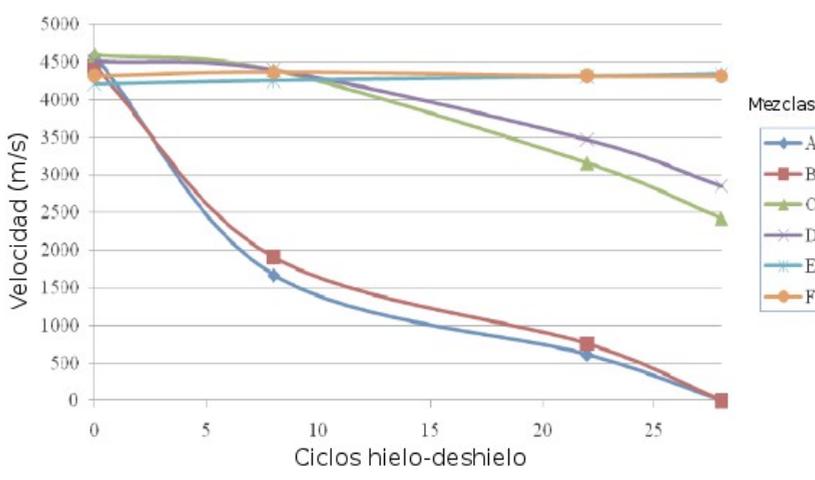


Figura 17: Gráfica de la velocidad de pulsos ultrasónicos a lo largo de los ciclos de hielo-deshielo en Kelly & Murphy, 2010.

La penetración de cloruros y el ataque frente a sulfatos, hormigones con agentes inclusores de aire y escorias granuladas en el cemento, disminuyen, siendo unas de las mejoras, a pesar de que la resistencia a

las heladas es menor que con hormigones con cemento tradicional, como se puede comprobar en Lane & Ozyildirim, 1999, en donde se evalúa muestras binarias y ternarias, las cuales presentan buenos resultados en cuanto a durabilidad, en la imagen, pero la pérdida de masa es muy superior.

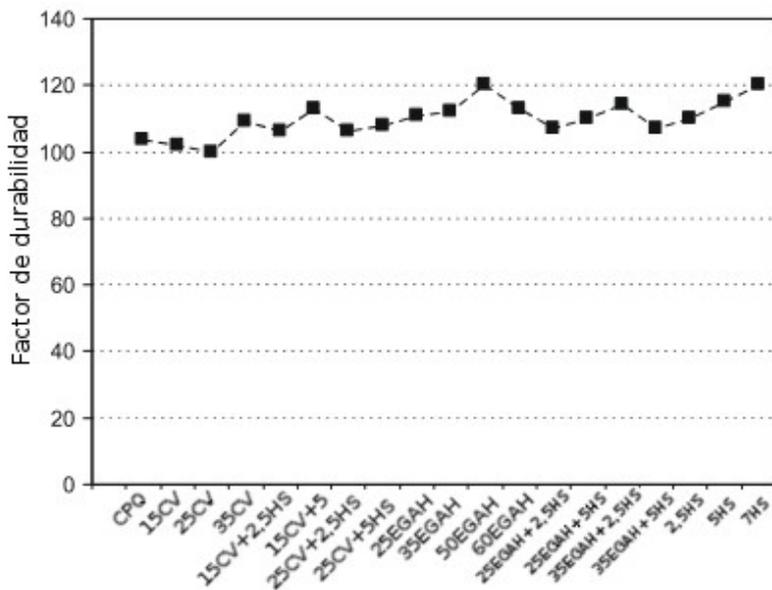


Figura 18: Factores de durabilidad después de 300 ciclos de hielo-deshielo en solución con 2% de cloruro sódico(Lane & Ozyildirim, 1999)

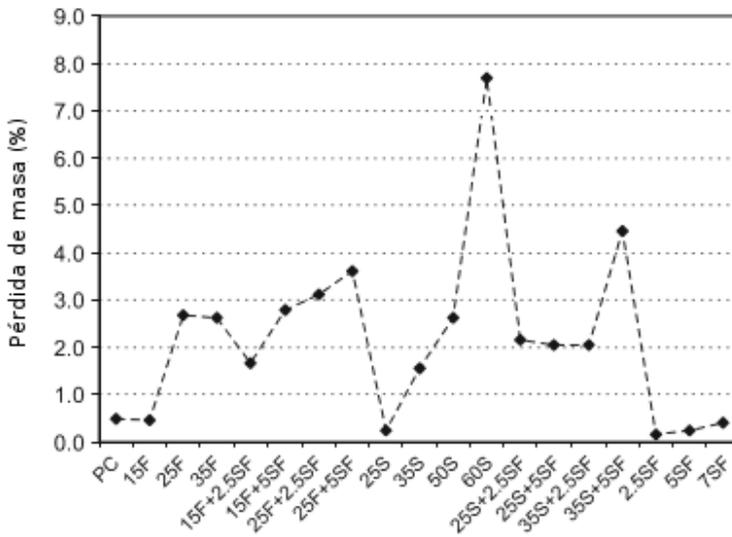


Figura 19: Pérdida de masa después de 300 ciclos de hielo-deshielo en una solución del 2% de cloruro sódico (Lane & Ozyildirim, 1999)

5. Conclusiones

Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras de investigación

5.1. Introducción

El proyecto final de carrera ha cumplido con el objetivo marcado al inicio de este trabajo, permitiendo conocer, revisar y analizar el uso de cementos con diferente sustitución de escorias granuladas de alto horno, estableciendo comparaciones de sus propiedades en estado endurecido y sus propiedades frente a la durabilidad.

5.2. Conclusiones

En cuanto el **primer objetivo** que era realizar una revisión general de las distintas investigaciones y trabajos, sobre los aspectos relacionados con la escoria granulada de alto horno

- Los componentes químicos de las escorias son los mismos que los del clínker, variando sus proporciones en función de los materiales que se hayan introducido en el horno. Las escorias poseen propiedades hidráulicas que es necesario activar; la activación se produce durante la mezcla con cemento pórtland y agua, debido a la presencia de hidróxidos de calcio, sodio y potasio. Los productos de hidratación de las escorias son los mismos que los del cemento Pórtland, aunque tanto las

cantidades de portlandita, como la relación calcio/silicio (Ca/Si) del C-S-H son menores.

- El grado de reactividad de las escorias de alto horno puede variar ampliamente de una escoria a otra y por ello no es confiable relacionar la composición de la escoria con su reactividad
- Aunque la EGAH es un material cementante, los compuestos que la constituyen son vítreos (en el caso del cemento son cristalinos) y ocurren en proporciones diversas, de acuerdo a los componentes que se introducen en el alto horno. Por esta razón, no es aplicable la química del cemento y la química de la escoria. No obstante, el principal producto de hidratación de ambos es el gel silicato cálcico hidratado (CSH), de naturaleza variable debido a las condiciones de hidratación.

Respecto al **segundo objetivo** que era establecer las características más destacables de los cementos con EGAH con respecto al cemento pórtland de referencia, se ha comprobado que

- El desarrollo de resistencia de los cementos con escoria de alto horno procede de manera más lenta que en el cemento pórtland. La escoria de alto horno reacciona con el agua lentamente pudiendo incluso tomar varios meses para alcanzar la resistencia equivalente a 28 días de un hormigón elaborado solamente con cemento Portland. Esto trae como consecuencia que se obtengan resistencias a edades tempranas menores, pero que se consigan mayores resistencias

últimas que en los hormigones elaborados únicamente con cemento Portland . Un tratamiento térmico puede acelerar el desarrollo de resistencia en cementos con escoria más que con cemento Pórtland ordinario. Cabe señalar que al someter a un cemento convencional a un tratamiento térmico se puede reducir de forma significativa la resistencia a tiempos prolongados, incrementando la porosidad y en algunas ocasiones se presenta la formación de etringita. Tales efectos son menores en concretos que incorporan escoria de alto horno que en hormigones con cemento pórtland ordinario.

- El desarrollo de resistencia y durabilidad de los hormigones depende en gran medida del grado de hidratación del cemento. Dependiendo del contenido de escoria, la hidratación inicial será más lenta que la del cemento pórtland. A más bajas temperaturas, esas diferencias resultan mayores, por lo que se requieren periodos de curado más prolongados. De esta manera, el requisito principal para obtener la mayor resistencia y durabilidad posibles es tener el suficiente tiempo de curado. Muchos problemas de durabilidad, por ejemplo carbonatación y una resistencia baja inaceptable debido al ataque químico, resultan de un curado inadecuado.
- En cuanto a los cementos ternarios con EGAH, se trata de un asunto más complejo, adiciones de cenizas volantes y humo de sílice, solventan parcialmente los desarrollos de resistencia, con una pequeña merma, mejorando las comportamientos frente al

ataque de ión cloruro, asegurando unas condiciones de curado.

Respecto al *tercer objetivo*, tras analizar distintas investigaciones y trabajos resulta que:

- En cualquier caso, se ha observado que en los cementos con mucho clinker la carbonatación implica siempre una considerable reducción del volumen total de poros.
- La adición de escoria de alto horno aumenta notablemente la resistencia del hormigón a la penetración de cloruros. La escoria de alto horno puede ser usada como adición al cemento para producir hormigones con características a la penetración de cloruros similares o superiores a las obtenidas con sólo cemento Portland. Sin embargo, es necesario evaluar qué porcentaje de adición produce un óptimo de resistencia según sea el caso, ya que no necesariamente coinciden.
- Las adiciones de cenizas volantes o humo de sílice producen un incremento de la resistencias a los cloruros, más notable con el humo de sílice que con las cenizas volantes, teniendo que ser evaluado los contenidos óptimos de cada uno de los componentes, que pueden ser variables según el caso.

5.2.1. Conclusión general

Los cementos y hormigones de escoria de alto horno, 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, mejor impermeabilidad y comportamiento frente a la carbonatación, mayor resistencia a altas temperaturas, mayor resistencia al ataque químico, mayor resistencia de la interfase árido-matriz, mayor protección de las armaduras metálicas, etc ... No obstante estos cementos y hormigones también presentan algunas desventajas respecto a los portland tradicionales, tales como un fraguado más rápido (conforme el contenido de escoria aumenta, el tiempo de fraguado se prolonga), una mayor formación de microfisuras y variabilidad en las resistencias.

5.3. Trabajos futuros

- Investigación sobre la vida tanto en cementos binarios y ternarios sobre la vida útil.
- Análisis de las propiedades de durabilidad hormigones con conglomerantes binarios y ternarios, con áridos reactivos
- Investigación sobre las fisuraciones debidas corrosión inducida por carbonatación con escorias de alto horno.

6. Referencias bibliográficas

Capítulo 6.- Referencias bibliográficas

1. Acevedo-Martínez E. , Gomez-Zamorano L.Y. , Escalante-García J.I. , " Portland cement-blast furnace slag mortars activated using waterglass:- Part 1: Effect of slag replacement and alkali concentration",Construction and Building Materials , vol. , num37, pp.462-469,2012
2. "(ACI 318-08) Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary", ACI Committee 318, 2008
3. Aguado A., Gálvez J. , " Fundamentos de la sostenibilidad en la construcción: aplicación al ormigón", V Congreso Nacional ACHE, Barcelona,2011
4. Ahmed M.S. , Kayali O., Anderson W.," Chloride penetration in binary and ternary blended cement concretes as measured by two different rapid methods",Cements & Concrete Composites , vol. 30, num, pp.576–582,2008
5. Alonso M. , Comportamiento y compatibilidad de cementos y aditivos superplastificantes basados en policarboxilatos. Efecto de la naturaleza ,Facultad de Ciencias. Departamento de Química inorgánica. ,Madrid, España,2011
6. Luciana Amaral de Lima, Hormigones con escoria de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental, 1999
7. Ameri M. , Shahabishahmiri M. , Kazemzadehazad S. , " Evaluation of the use of steel slag in the concrete;5th ARRB Conference – Shaping the future: Linking policy, research and outcomes; Perth, Australia ,2012

8. ASTM C 989:Standart specification for ground Granulated Blast-Furnace for Use in Concrete and Mortars", subcomitee C09.27,2012.
9. Atis C, " Carbonation – Porosity – Strength Model for fly ash concrete",Journal of Materials in Civil Engineering , vol. , num, pp.91-94,2004
10. Bagheri AR., Zanganeh H., Moalemi MM., " Mechanical and durability properties of ternary concretes containing silica fume and low reactivity blast furance slag",Cement & Concrete Composites , vol. , num34, pp.663-670,2012
11. Barnett S.J., Soutsos MN., Millard S., Bungey J.H., " Strength development of mmortars containing ground granulated blast-furnace slag: Effecto of curing tempoerature andetermination of apparent activation energies",Cement and Concrete Research , vol. , num36, pp.434-440,2006
12. Batagin A.F, Esper M.W. , " Contribuição ao conhecimento das propriedades do cimento Portland de alto-forno", Associação Brasileira de Cimento Portland,1988
13. Becker, E, "El Hormigón como Material de Construcción", 2003
14. Bermejo Nuñez, E.; Gálvez, J.; Moragues, A.; Fernandez, M. , "Influencia de la estructura porosa en la durabilidad de hormigones autocompactantes de similar resistencia",2º congreso ibérico de hormigón autocompacante. Guimaraes,Portugal, 2010
15. Bernal S.A., Mejía de Gutierrez R., Pedraza A.L, Provis J.L., Rodríguez E.D., Delvasto S, " Effect of binder content on the performance of alkali-activates slag concretes",Cement and Concrete Research , vol. , num41, pp.1-8,2011

16. Berridi I. , "Análisis de la influencia de residuos metalúrgicos como áridos en las propiedades del hormigón", Tesis menor,Universidad Politécnica de Cataluña,2008
17. Bilim C., Atis C.D.," Alkali activation of mortars containing different replacement levels of ground granulated blast furnace slag",Construction and Building Materials , vol. 28, num, pp.,2012
18. Bleszinsky R, Doug Hooton R. , Thomas M. Rogers C.," Durability of Ternary Blend Concrete with Silica Fume and Blast-Furnace Slag: Laboratory and Outdoor Exposure Sites Studies",ACI materials journal , num99-M51 , pp.499-508,2002
19. Bouteiller V., Cremona C., Baroghel-Bouny V., Moloula A.," Corrosion initiation of reinforced concretes based on Portland or GGBS cements: Chloride contents and electrochemical characterizations versus time",Cement and Concrete Research , vol. , num42, pp.,2012
20. Calleja J.," Cenizas, cementos y hormigones con cenizas",Materiales de Construcción , vol. , num187, pp.3-38,1982
21. Carrasco M.F, Bonavetti V.L, Menéndez G., Irassar E.F.," Cementos a medida con material calcáreo y escoria granulada de alto horno: Optimización de resistencia",Revista materiales de la Construcción , vol. 4, num1 , pp.24-34,2005
22. Castellano C., Bonavetti V.L, Irassar E.F.," Influencia de la finura de la escoria de la temperatura de curado sobre la resistencia de pastas de cementos",Revista de la Construcción , vol. 8, num2, pp.120-128,2009

23. Ceccato D., Masuero A., Vilela A., " Reciclaje de escoria granulada de fundición (EGF) como sustitución de parte de cemento en el hormigón",*Revista Matéria* , vol. 14, num1, pp.737-748,2009
24. CEDEX, "Escorias de alto horno", 2011,www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/255.pdf
25. Chang CF. and Chen J.W.," The experimental investigation of concrete carbonation depth",*Cement and Concrete Research* , vol. 36, num9, pp.1760-1766,2006
26. Chen HJ., Huang SS., Tang CW., Malek M.A., Ean LW.," Effect of curing environments on strength, porosity and chloride ingress resistance of blast furnace slag concretes: A construction site study",*Construction and Building Materials* , vol. , num35, pp.1063-1070,2012
27. Cheng A., Huang R., Wu JK., Chen CW.," Influence of GGBS on durability and corrosion behavior of reinforced concrete",*Materials Chemistry and Physics* , vol. , num93, pp.404-411,2005
28. Cheng W., Brouwers H., Shui Z.," Three-dimensional computer modelling slag o cement hydration",*Journal Material Science* , vol. , num23, pp.9595-9610,2007
29. Cincotto M. A., Batagin A. F., Agopyan V.," Caracterização da escória granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado",*IPT* , vol. , num65.,1992
30. M. Coelho M.A., "Contribuição ao estudo da carbonatação e da retração em concretos com elevados teores de escória de alto-forno", Tesis de Mestría, Universidade Federal do Espírito Santo,,2002

31. Dhir R.K., El-Mohr M.A.K., Dyer T.D., " Chloride binding in GGBS concrete", *Cement and Concrete Research* , vol. 26, num12, pp.1767-1773,1996
32. "EHE, Instrucción de Hormigón Estructural", Comisión Permanente del Hormigón, 2008
33. AEN/CTN 83, "Hormigón. Parte 1: Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad", 2008
34. Erdem T.K., Kirca O., " Use of binary and ternary blends in high strength concrete", *Construction and Building Materials* , vol. 22, pp.1477-1483,2008
35. Escalante-García J.I., Méndez-Monell J., Gorokhovskiy A., Fraire-Luna P.E., Mancha-Molinar H., Mendoza-Suarez G., " Reactividad y propiedades mecánicas de alto horno activada por álcalis", *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio* , vol. 5, num41, pp.451-458,2002
36. Espinoza L., Escalante I., " Comparación de las propiedades del concreto utilizando escoria de alto horno como reemplazo total parcial del cemento Portland ordinario", *Nexo* , vol. 21, num01, pp.11-18,2008
37. Cánovas M. F., " Patología y terapéutica del hormigón armado",
38. Cánovas M. F., " Hormigón", 2002
39. Fernández Jiménez A., Puertas F., Fernández-Carrasco L., " Procesos de activación alcalino-sulfáticos de una escoria española de alto horno", *Materiales de Construcción* , vol. 46, num 241, pp.23-37,1995
40. Ferrer B., Ortega J. M., Climent M. A., Ivorra S., Galiana R., Sánchez I., "Durabilidad y resistencia del hormigón con

- escorias siderúrgicas de alto horno en diferentes condiciones de curado realizadas en exposición ambiental urbana",,, 2012
41. Frías M., San José J. T., Vegas I., " Árido siderúrgico en hormigones: Proceso de envejecimiento y su efecto en compuestos de potencialmente expansivos",Materiales de Construcción , vol. 60, num297, pp.33-46,2010
 42. Galan, I., "Carbonatación del hormigón: combinación de CO2 con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH", Tesis Doctoral, Facultad de Química, Universidad Complutense de Madrid,España,2011
 43. Gao J.M., Qian C.X.,Liu H.F. , Wang B., Li L.," ITZ microstructure of concrete containing GGBS",Cement and Concrete Research , vol. 35, num, pp.1299-1304,2005
 44. Gao Y, De Schutter G, Ye G, Huang H, Tan Z, Wu K," Characterization of ITZ in ternary blended cementitious composites: Experiment and simulation",Construction and building Materials , vol. 41, num, pp.742-750,2013
 45. Geiseler, J., Kollo, H., Lang. E.," Influence of Blast Furnace Cements on Durability of Concrete Structures",Materials Journal – ACI , vol. 92, num, pp.252-257,1992
 46. Gjørv O., "Alkali activation of a norwegian blast furnace slag",3rd Intem. Conf Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in concrete,Trondheim, SPI, 1989
 47. Glass G. K., Reddy B, N.R. Buenfeld," Corrosion inhibition in concrete arising from its acid neutralisation capacity",Corrosion Science , vol. , num42, pp.,2000
 48. Gonzalez Ortega M. A. , "Caracterización experimental de escorias negras de alto horno",Tesis de Máster de Ingeniería

Estructural de la Construcción, Escola Tecnica superior d'enginyers de camins, canals i ports de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya,,2011

49. Hernández-Castañeda O., Mendoza-Escobedo C. J.," Durabilidad e infraestructura: restos e impactos socioeconómicos",Ingeniería Investigación y Tecnología , vol. 7, num1, pp.57-70,2006
50. Ho D. W.S, Lewis R.K.," Carbonation of concrete and its predictions",Cement Concrete Research , vol. 17, num3, pp.489-504,1987
51. Ishida T., and Maekawa K., " Modeling of pH profile in pore water based on máss transport and chemi- cal equilibrium theory",Concr. Libr. JSCE 37 , vol. , num, pp. 151–166,2001
52. Jones M.R., Dhir R.K., Magee B.J.," Concrete containing ternary blended binders: Resistance to chloride ingress an carbonation",Cement and Concrete Research , vol. 27, num 6, pp.825-831,1997
53. Kelly B. & Murphy P.," Prediction of Freeze-thaw Resistance of Concrete",Project for degree of Bachelor of Engineering, School of Arquitecture, Landscape and Civil Engineering, University College Dublin,2010
54. Kosmatka S., Kerkhoff B., Panarresse W., Tanesi J.," Diseño y Control de Mezclas de Concreto",Portland Cement Association, 14ª edición: EEUU, 2004
55. Lane DS, Ozyildirim C, "Combinations of pozzolans and ground, granulated, blastfurnace slag for durable hydraulic cement concrete", 1999

56. Larbi, J.; Fraay, A.; Bijen, J., " The chemistry of the pore solution of silica fume-blended cement systems", *Cement and Concrete Research* , vol. 20, num, pp.506-516,1990
57. Lauber M., "Influencia de la calidad de los residuos metalúrgicos granulares utilizados como áridos en las propiedades del hormigón" ,Universidad Politécnica de Cataluña,,2009
58. Lewis D.W., Blast-furnace slag as a mineral admixture for concrete, 1982, <http://www.concreteconstruction.net/concrete-articles/blast-furnace-slag-as-a-mineral-admixture-for-con.aspx>
59. Lizarazo J, Claisse P, " Influencia de la adición de escoria de alto horno en la penetración de cloruros en el concreto",*Ingeniería e investigación* , vol. 31, num2, pp.38-47,2011
60. Loser, R., Lothenbach, B., Leemann, A., Tuchschnid, M., " Chloride Resistance of Concrete and its Binding Capacity – Comparison between Experimental Results and Thermodynamic Modeling",*Cement and Concrete Composites* , vol. 32, num, pp.34,2010
61. Luo R, Cai Y, Wang C, Huang X, " Study of chlorhide and difusion in GGBS concrete",*Cement and Concrete Research* , vol. 33, num, pp.1-7,2003
62. Maia Rebelo M., Porto de Oliveira M. V., Martins J. A., " Hidróxidos duplos lamelares à base de escória de alto forno",*Química Nova* , vol. 35, num5, pp.,2012
63. McNally C., Sheils E, " Probability-based assesment of the durability characteristics of concretes manufacturated using CEM II and GGBS binders",*Construction and Buildings Materials* , vol. 30, num30, pp.22-29,2012

64. Mehta P.K., Monteiro P.J.M., "Concrete, microstructure, properties and Materials", 2006
65. Mehta P.K., "Greening of the concrete Industry for Sustainable", Concrete International , vol. , num, pp.23-28,2002
66. Mohammed, T.U. y Hamada, H., "Relationship between free chloride and total chloride contents in concrete", Cement and Concrete Research , vol. 33, num, pp.1487-1490.,2003
67. Montalvo R., Zeballos E., Paz P. ,Huayna J., Casaverde M." Caracterización de escoria siderúrgica por difracción de rayos X", Elementos , vol. , num63, pp.61-63,2006
68. Moon, H.Y.; Kim, H.S.; Choi, D.S., "Relationship between average pore diameter and chloride diffusivity in various concretes", Construction and Building Materials , vol. 20, num, pp.725-732,2006
69. Muk jerhee A., Pathak S.R., "Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete", Cement and Concrete Research , vol. 33, num, pp.1481-1486,2005
70. Nadeem M., Pofale A. D., "Replacement of natural fine agregate with granular slag - A waste industrial by-product in cement mortar applications as an alternative construction materials", International Journal of Engineering Research and Applications , vol. 2, num5, pp.1258-1264,2012
71. Neville A.M., Brooks J.J., "Concrete Techonology", 2010
72. Numata S., Koide Y., and Shimobayashi S., "Properties of Ultra-Highly Pulverized Granulated Blast Furnace Slag-Portland Cement Blends", ACI Journals , vol. 91, num, pp.1341-1360,1986

73. O'Connell M., McNally C., Richardson M. G., " Performance of concrete incorporating GGBS in aggressive wastewater environments", *Construction and Building Materials* , vol. , num27, pp.368-374,2012
74. Öner W., Erdog ̃ dub K., Günlü A., " Effect of components fineness on strength of blast furnace slag cement", *Cement and Concrete Research* , vol. 33, num, pp.463-469,2003
75. Öner A., Akyuz S., " An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete", *Cement & Concrete Composites* , vol. , num29, pp.505-514,2007
76. Ortega J. M., Sánchez I., Climent M. Á., " Influencia de diferentes condiciones de curado en la estructura porosa y en las propiedades a edades tempranas de morteros que contienen ceniza volante y escoria de alto horno ", *Materiales de Construcción* , vol. 63, num310, pp.219-234,2011
77. Osborne G.J., " Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete", *Cement and Concrete Composites* , vol. , num21, pp.11-21,1999
78. Page, C.L.; Lambert, P.; Vassie, P.R.W., " Investigation of reinforcement corrosion: 1. The pore electrolyte phase in chloride contaminated concrete", *Materials and Structures* , vol. , num, pp.243-252,1991
79. Panesar D.K. and Chidiac S.E., " Capillary suction model for characterizing saltscaling resistance of concrete containing GGBFS", *Cement & Concrete Composites* , vol. 31, num, pp.570-576,2009
80. Papadakis V.G., Tsimas S., " Supplementary cementing materials in concrete Part I: efficiency and design", *Cement and Concrete Research* , vol. 32, num, pp.1525-1532,2002

81. Puertas F, " Cementos de escorias activadas alcalinamente: Situación actual y perspectivas de futuro",*Materiales de Construcción* , vol. , num, pp.53-64,1995
82. Puertas F, " Escorias de alto horno: Composición y comportamiento hidráulico",*Materiales de Construcción* , vol. , num229, pp.37-48,1993
83. "Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósitos en vertedero", 2010
84. Rodríguez A., Suárez del Río L. M., Calleja L., Ruiz V. G., " Métodos microscópicos para la cuantificación del contenido en fase vítrea de escorias siderúrgicas",*Materiales de Construcción* , vol. 47, num245, pp.45-51,1997
85. Saeki T., Ohga H. and Nagataki S, " Mechanism of carbonation and prediction of carbonation process of concrete",*Concr. Libr. JSCE* , vol. , num17, pp.23– 36,1991
86. Salazar Jaramillo: Alejandro Salazar Jaramillo, Estudio de la durabilidad de concretos adicinnados con escoria siderúrgica, con diferentes formas de curado, , http://www.ecoingenieria.org/docs/Estudio_Durabilidad_Concretos_Adicionados.pdf
87. Sanjuán M. A., Piñeiro A., Rodríguez O, " Aplicaciones y limitaciones del coeficiente K de eficacia de la adición de escoria de alto horno en el hormigón",*Materiales de construcción* , vol. , num62, pp.,2011
88. Scandiuzzi L., Battagin A. F, " Utilização da Escória Granulada de Alto Forno como Agregado Miúdo", *ABCP*, vol. , num95, pp.,1990

89. Seleem, H. E. H., Rashad, A. M., El-Sabbagh, B. A., " Durability and Strength Evaluation of High-Performance Concrete in Marine Structures", *Constr. Build. Mater* , vol. 24, num, pp.878-884,2010
90. Silva, C.A.R., Reis, R.J.P., Lameiras, F.S., Vasconcelos, W.L., " Carbonation-Related Microstructural Changes in Long- Term Durability Concrete", *Materials Research* , vol. 5, num3, pp.,2002
91. Song H.W., Kwon S.J., " Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure", *Cement and Concrete Research* , vol. , num37, pp.909-915,2007
92. Tamilarasan V.S., Perumal P., Maheswaran J., " Experimental study on water permeability and chloride permeability of concrete with ggbs as replacement material for cement", *International Journal of Civil Engineering and Technology* , vol. 3, num2, pp.25-40,2012
93. Thierry M., Villain G., Dangla P., Platret G., " Investigation of the Carbonation front shape on cementitious materials: Effects of the chemical kinetics", *Cement and Concrete Research* , vol. 37, num7, pp.1047-1058,2007
94. Tsuyuki N., Koizumi K., " Granularity and surface structure of ground granulated blast-furnace slags", *Journal of the American Ceramic Society* , vol. , num8, pp.2188-2192,1999
95. Udoeyo F., Serrano S., Weather A., Khan B. Gao Y., Selkregg S., " Strength performance and behaviour of concrete containing industrial wastes as supplementary cementitious material", *IJRRAS* , vol. 12, num1, pp.12-17,2012
96. "UNE-EN 197-1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes", AEN/CTN, 2011

97. "UNE-EN 1992-1-1: Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación.", AEN/CTN 140, 2010
98. "UNE-EN 206-1: Hormigón. Parte 1: Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad", AEN/CTN 83, 2008
99. "UNE-EN 934-2: Aditivos para hormigones, morteros, y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos , conformidad, marcado y etiquetado.", AEN/CTN 83 Hormigón, 2006
100. Vaclavik V., Dirner V., Dvorský T., Daxner J., " Use of blast furnace slag ",*Metabk* , vol. 4, num51, pp.461-464,2012
101. Valls S., Vázquez, E., " Accelerated carbonation of sewage sludge– cement–sand mortars and its environmental impact",*Cement and Concrete Research* , vol. 31, num9, pp.1271-1276,2001
102. Wang S., Scrivener K, y Pratt P., " Factors affecting the strength of alkali-activated slag",*Cement and Concrete Research* , vol. 24, num, pp.1033-1043,1994
103. Wang, X., Lee, H., " Modeling the hydration of concrete incorporating fly ash or slag",*Cement and Concrete Research* , vol. 40, num, pp.984-996,2010
104. Yazici H., Yardimci M. Y., Yigiter H.,Aydin S., Türkel S., " Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag",*Cement & Concrete Composites* , vol. , num32, pp.639-648,2010
105. Yeau, K. and Kim, E., " An Experimental Study on Corrosion Resistance of Concrete with Ground Granulate Blast" , , vol. , num, pp.,2005

106. Yiğiter, H., Yazıcı, H., Aydın, S.," Effects of Cement Type, water/cement Ratio and Cement Content on Sea Water Resistance of Concrete",Build. Environ. , vol. 42, num, pp.,2007
107. Yuksel I. , Ozkan O., and Bilir T.," Use of Granulated Blast-Furnace Slag in Concrete as Fine Aggregate",Materials Journal , vol. 3, num, pp.203-208,2006
108. Zhang Y., Ying G., Xi O.," Study on structure and latent hydraulic activity of slag and its activation mechanism",Silic. Ind. 3/4 , vol. , num, pp.55-59,1988
109. Zhou J. , Qian S., Sierra M. G., Ye G., Van Breugel K., Li V. C.," Developement of enineeresd cementitious composites with limestone powder and blast furnace slag",Materials and Structures , vol. 43, num, pp.803-814,2010

Anejos

Anejos

Simbología

a/c , A/C	Relación agua /cemento
ACI	American Concrete Institute
AFm	Fases tipo monosulfoaluminato
nm	Nanometro
AFt	Fases tipo trisulfoaluminato
ASTM	American Society for Testing and Materials
C	CaO
C2S	Silicato bicálcico – belita
C3S	Silicato tricálcico – alita
C4AF	Ferro Aluminato Tetracálcico o Aluminoferrito Tretracálcico o felita
CH	Hidróxido cálcico – portlandita
CSH	Silicato cálcico hidratado – gel CSH
E	Modulo de elasticidad

EHE	Instrucción de Hormigón Estructural
kg/m^3	Kilogramos por metro cubico
m	Metro
m^2 / kg	Metros cuadrados por kilogramo
t	Tiempo
μm	Micrómetro
FAC4	Ferroaluminato tetracálcico
f'_c	Resistencia a compresión
f_{ck}	Resistencia a compresión
CaCO_3	Carbonato de calcio
CaO	óxido de calcio
Ca(OH)_2	Hidróxido de calcio
CO_2	Anhídrido carbónico o dióxido de carbono
CV	Ceniza Volante
Fe_2O_3	Oxido de hierro
H_2O	molécula da agua

mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
O ₂	Oxígeno
OH ⁻	Ión hidroxilo
pH	potencial hidrogénico
HR	Humedad relativa
ppm	Partículas por millón
HS	Humo de sílice
EGAH	Escoria granulada de alto horno

