



Euskal Herriko Unibertsitatea
Universidad del País Vasco
University of the Basque Country



Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Bilbao

TESIS DOCTORAL

ESTUDIO DEL EFECTO DE LA HIDRATACIÓN DE LA ESCORIA BLANCA DE ACERÍA DE HEA: APLICACIÓN EN PASTAS Y MORTEROS DE CEMENTO

Autor

TAMARA HERRERO VAZQUEZ

Directores

Dr. José Tomás San José Lombera

Dr. Iñigo Javier Vegas Ramiro

Bilbao, Primavera 2015



*Cuidado con los miedos,
les encanta robar sueños...*

Autor desconocido

AGRADECIMIENTOS

Cuando una persona te dedica su tiempo, debemos hacernos conscientes del regalo que implica: ese tiempo no podrá recuperarlo. Por ello, en primer lugar, quisiera dedicar unas líneas de agradecimiento a todas las personas que han compartido su tiempo conmigo y han contribuido de una forma u otra a hacer realidad esta Tesis Doctoral, para no olvidar nunca que lo más bonito del éxito es compartirlo.

A todos mis profesores, del colegio José Etxegarai y del Instituto Uribarri, en Basauri, que me vieron crecer y asentaron las bases necesarias para estar donde estoy. De igual forma, a todos mis profesores, sin excepciones, de la Escuela de Ingeniería Técnica de Bilbao, de la escuela Superior de Ingenieros de Bilbao y del Máster de Ingeniería de Materiales Avanzados (ETSI). Gracias a tod@s, una grandísima parte de este trabajo os corresponde.

Mi más sincero agradecimiento al profesor Jesús Cuadrado (ETSI), por despertar en mí el interés en el mundo de la construcción con sus clases. Por toda su ayuda y simpatía, y por ser el precursor de la situación profesional en la que me encuentro.

A mis codirectores de Tesis, el Dr. José Tomás San José y el Dr. Iñigo J. Vegas. Tomás, gran profesor y mejor persona. No tengo líneas suficientes para agradecerte el apoyo incondicional, la fuerza, la presencia, los ánimos y la confianza depositada en mí. Sin ti, esto no hubiera sido posible. Iñigo, por tu profesionalidad, tu esfuerzo y compromiso. Asimismo, difícil trabajo este sin la supervisión, infinito conocimiento y consejos, del profesor Javier Jesús Gonzalez. Es un auténtico placer escucharte. A los tres, sinceramente GRACIAS.

A la Fundación Iñaki Goenaga (esta investigación fue cofinanciada por el Gobierno Vasco según el **contrato IT781-13, grupo de investigación tipo A**), Jesús Díez (Director del Área de Rehabilitación de TECNALIA), Dr. Javier García Jaca (Director del Área de Materiales de TECNALIA), así como al Dr. Javier Urreta, Director de la Unidad de Construcción de TECNALIA, por brindarme la oportunidad de formarme como investigadora y cumplir este reto.

Mi agradecimiento también a las empresas que han colaborado en el suministro de materiales: ARCELORMITTAL, en especial a Andrea Barceló por sus gestiones, y MORTEROS Y REVOCOS BIKAIN, muy especialmente a Igone Azkarate, por su amabilidad, trato, y desinteresada colaboración y disposición. Es genial encontrar personas así.

Quisiera extender mi agradecimiento a todos mis compañeros de rehabilitación, con los que inicié mi andadura en Tecnalia y en esta aventura que es mi Tesis: Bengo, Jorge Torres, Laura Perez, Iñaki Piñero, Leire Garmendia, Nerea Tárrago, Mikel Ezkerro, Rosa San Mateos, Pello Larrinaga, Josu Benito, Maider Alzola, Silvia Urrea, Olatz Nicolás, Ainhoa Perez de Arrilucea, Izaskun Álvarez, Natalia Lasarte, Fran Barroso, Sergio Perez, Maria Zalbide y Estibaliz Valtierra; también a mis compañeros actuales de materiales: Alex Salvador, Eunáte Goiti, María Cano, Yolanda De Miguel, Edurne Erkizia, Oihana García, Amaia Lisbona, David García y

Agradecimientos

Jorge Sanchez; Gracias de igual modo a los profesionales y a las manos ejecutoras de los chicos de certificación: Félix Rodríguez, Javi Santamaría, Igor Ruiz y Carlos Gonzalez, y cómo no, a la gente de química: Aitor Zabalegui, José Antonio Nuñez e Iñigo Medel.

Mención especial a Idoia Arribas, por ser mucho más que una tutora cuando llegué aquí. Por tratarme siempre con cariño y ofrecerme tanta ayuda. Por su naturalidad. Te estaré siempre agradecida.

No me olvido de Juan José Gaitero (Jontxu), estupendo compañero de batallas y “mentor” en temas varios. Por tu facilidad en el trato, tu confianza, consejos y risas compartidas. Y por supuesto, a José Antonio Ibañez, para que jamás de los jamases cambie. Gracias por hacerme reír tantísimo, por ser diferente, por ser un profesional como la copa de un pino, y por enseñarme tantas cosas, tanto en el ámbito profesional como en el tecnológico. Tienes todo mi cariño.

A mis chicas de la “nano-cuadri”: Marta Díez, Marta Ocejo, Ana Miren Torre y muy especialmente Jone Lejonagoitia. Muchas veces nos encontramos en medio de la nada, y otras, en medio de la nada nos encontramos. Aparecisteis en el momento preciso, diluyendo penas y llenando los días de ilusión y risas.

Es bueno darse cuenta de que cada persona que te encuentras tiene un rol en tu vida. Algunos te ponen a prueba, otros te quieren, unos te dañan y otros te enseñan. Pero las realmente importantes son las que sacan lo mejor de uno mismo. Son esas personas poco comunes y extraordinarias que dejan huella en tu vida: Maider Loroño, Naiara Franco, Ane Miren Eguizabal, Verónica de Prado, Zdenka Torre, Cynthia Fano, Anita Ferreira y una vez más Jone Lejonagoitia. Cuando todo se vuelve oscuro, aparecen las estrellas. Eternamente GRACIAS.

Por su infinito cariño y hacerme sentir siempre como en casa: a Carmen Egües, Berta Muñoz y Jokin Ugarte. Y como no... a Sara y Ane, por robarme el corazón.

Como dice un gran escritor y poeta: “Que alguien te haga sentir cosas sin ponerte un dedo encima, eso es admirable”. Por ello, con todo mi corazón: a Alberto Muñoz; por salpicar mis sueños y apoyarme en este reto, y en otros muchos, desde hace tantos años. Por ver en mí una victoria y una ganancia suficiente como para no tener que mirar atrás, y por demostrarme que todo hay que volver a intentarlo... y el amor no tiene por qué ser una excepción. Y es que, detrás de alguien que arriesga, hay alguien que ama. TE QUIERO.

Y por supuesto, dedico este trabajo a mis padres: Alex y Pili, lo más importante de mi vida; el motor de todo. Lo que soy y lo que tengo es por vosotros. Gracias por el cariño y la paciencia cuando las cosas no iban precisamente bien. Por esa fuente inagotable de besos, abrazos y risas. Por hacerme feliz, sujetarme siempre fuerte y quererme tanto. Soy infinitamente afortunada. OS QUIERO sin medida.

Por último, quiero hacer un agradecimiento muy especial a mis pies: por apoyarme en todo momento, y a mis brazos: que siempre han estado a mi lado.

RESUMEN DE LA TESIS

La ausencia de una alternativa de uso, técnica y económicamente viable para las escorias procedentes de la fase de afino o metalurgia secundaria (escorias blancas o LFS), ha provocado que el destino final de éstas sean los vertederos. Año tras año, el problema se agrava; planteando dificultades a las empresas generadoras, el medio ambiente y la sociedad en general.

La necesidad y preocupación de la ciudadanía por preservar los recursos naturales y la contaminación ambiental, junto con la cada vez más estricta normativa, son los principales precursores de la investigación y desarrollo de técnicas de reutilización y reciclado de subproductos industriales. En este contexto, surge la valorización de la escoria blanca como sustitución parcial, o incluso total, del árido o cemento natural, en la fabricación de morteros y hormigones.

Investigaciones y desarrollos previos avalan la escoria blanca como un material con altas expectativas para su empleo en la construcción. Sin embargo, para su normalización de uso en el mercado, se antoja necesaria una mayor investigación orientada a aclarar ciertas incertidumbres tecnológicas, asociadas al efecto de la escoria blanca en matrices cementicias. Especialmente destacable es el caso de los morteros de albañilería, tanto en términos de estudios físico-mecánicos, y aspectos microestructurales, como en lo que se refiere al comportamiento de estos morteros en referencia a su durabilidad. Adicionalmente, esta Tesis Doctoral pretende profundizar en los diferentes tipos de escoria blanca, su proceso de hidratación y expansión, amén de sus efectos toda vez que se halle integrada como un componente más de los morteros.

El objetivo principal de la presente Tesis Doctoral, es el de profundizar en la ciencia de los procesos de hidratación y expansión de las escorias blancas, y colaborar en la generación de conocimiento sobre las prestaciones mecánicas y de durabilidad de los morteros de albañilería elaborados con ellas. A tal fin, se articula un plan de trabajo en torno a cuatro capítulos experimentales, previo a uno introductorio de contexto del problema, los objetivos principales y estructura de la Tesis Doctoral, y otros dos finales de conclusiones y bibliografía asociada al documento de Tesis Doctoral, respectivamente.

En el primero, se caracterizan los materiales que forman los morteros: cemento (tipo I y II), escorias blancas LFS, arena caliza y filler calizo; determinando sus características morfológicas y físico-químicas. A este respecto, las escorias blancas

Resumen de la Tesis

están formadas básicamente, por óxidos de cal, silicio y aluminio, acompañadas de magnesio y hierro en menores proporciones.

En el segundo, se lleva a cabo la valorización y proceso de estabilización volumétrica de las escorias blancas. La aproximación tradicional de estabilización mediante regado, no arroja resultados positivos a este estudio, por lo que se tratan las escorias evitando su contacto con agua. Se estudia, además, su hidratación bajo condiciones controladas, al objeto de profundizar en los cambios mineralógicos asociados a las interacciones que se producen entre el CO₂ ambiental y el agua en la escoria y, por ende, en su expansión. Las fases mineralógicas, apuntan a expansiones ligadas a compuestos hidratados y/o carbonatados a costa de fases con aluminio, magnesio y/o calcio.

En el tercero, se analiza la influencia de la escoria blanca en las propiedades cementicias del material. Se diseñan pastas y morteros elaborados con sustituciones parciales (en peso) del 10% y 20% de cemento Portland por escoria blanca y por filler calizo de referencia. Se determinan las propiedades mecánicas en estado endurecido. La incorporación de escorias blancas a los morteros influye de la siguiente manera: mayor porcentaje de sustitución, mayores caídas de resistencias y mayor porosidad. La tipología de la escoria utilizada influye en las resistencias obtenidas.

Por último, en el cuarto capítulo, se abordan aspectos relativos a la durabilidad de los morteros fabricados, evaluando su efectividad ante eflorescencias y ciclos de humedad-sequedad. También se analiza la expansión de los morteros. La incorporación de escorias blancas a los morteros proporciona mejoras de resistencia, ante fenómenos de humedad-sequedad, y ofrece una respuesta similar al mortero de referencia, en cuanto a las eflorescencias se refiere. La expansión de la escoria blanca en la matriz cementicia, adecuadamente controlado, no tiene por qué suponer un inconveniente para su empleo en el mercado de los materiales de construcción.

A partir de todos los desarrollos abordados en la presente Tesis Doctoral, podría finalmente concluirse cómo en la fabricación de morteros, con sustituciones parciales de cemento por escoria blanca, se recomienda la incorporación de ésta en cantidades en torno al 10%.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN	1
1.1. CONTEXTO.....	1
1.2. PROBLEMÁTICA ASOCIADA	3
1.3. OBJETIVOS	7
1.4. ESTRUCTURA DE LA TESIS	8
CAPÍTULO 2.- ANTECEDENTES: APROXIMACIÓN A LA INVESTIGACIÓN.....	11
2.1. EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN Y SU COYUNTURA.....	11
2.1.1 <i>Impactos del sector</i>	12
2.1.2 <i>Morteros en la edificación</i>	16
2.1.3 <i>Subproductos industriales en los morteros</i>	19
2.2. LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA.....	23
2.2.1 <i>Producción de acero en España</i>	23
2.2.2 <i>El proceso siderúrgico</i>	24
2.3. LAS ESCORIAS BLANCAS (LFS) Y SU PAPEL EN LA CONSTRUCCIÓN	30
2.3.1 <i>Tipologías de la escoria blanca (LFS)</i>	30
2.3.2 <i>Propiedades de la escoria blanca (LFS)</i>	34
2.3.3 <i>Aproximación tradicional al estudio de la inestabilidad de la escoria blanca</i>	51
2.3.4 <i>Análisis termogravimétrico y calorimétrico o térmico de las escorias blancas</i>	61
2.3.5 <i>Aplicaciones de la escoria blanca (LFS) en matrices cementicias</i>	67
2.4. CONCLUSIONES RELATIVAS A LOS ANTECEDENTES	79
CAPÍTULO 3.- MATERIALES: CARACTERIZACIÓN	81
3.1. INTRODUCCIÓN.....	81
3.2. ESCORIAS BLANCAS (LFS)	82
3.2.1 <i>Caracterización de la escoria blanca EB1</i>	82
3.2.2 <i>Caracterización de la escoria blanca EB2</i>	92
3.3. ARENA CALIZA.....	97
3.4. CEMENTO PÓRTLAND	101

3.4.1	<i>Cemento tipo I (CEMI)</i>	102
3.4.2	<i>Cemento tipo II (CEMII)</i>	105
3.5.	CONCLUSIONES RELATIVAS A LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	107
CAPÍTULO 4.- VALORIZACIÓN Y PROCESO DE ESTABILIZACIÓN DE ESCORIAS BLANCAS		109
4.1.	VALORIZACIÓN DE LFS	109
4.2.	PROCESO DE MADURACIÓN DE LFS VALORIZADA.....	110
4.3.	MADURACIÓN ACELERADA EN LABORATORIO DE LA ESCORIA BLANCA ..	117
4.4	HIDRATACIÓN CONTROLADA DE LFS.....	125
4.5	CONCLUSIONES RELATIVAS A LA VALORIZACIÓN Y ESTABILIZACIÓN DE LFS.....	134
CAPÍTULO 5.- ESTUDIO DE PASTAS Y MORTEROS DE CEMENTO ELABORADOS CON ESCORIAS BLANCAS		137
5.1.	INTRODUCCIÓN.....	137
5.2.	ACONDICIONAMIENTO DE LA ESCORIA PARA SU INCORPORACIÓN EN MATRICES CEMENTICIAS.....	138
5.3.	PASTAS DE CEMENTO ELABORADAS CON LFS	147
5.3.1	<i>Metodología experimental y dosificaciones</i>	147
5.3.2	<i>Sustituciones parciales de cemento</i>	151
5.4.	MORTEROS DE CEMENTO ELABORADOS CON LFS	176
5.4.1	<i>Metodología experimental y dosificaciones</i>	176
5.4.2	<i>Sustituciones parciales de cemento por LFS</i>	178
5.5.	CONCLUSIONES RELATIVAS A ELABORACIÓN DE PASTAS Y MORTEROS CON LFS	186
CAPÍTULO 6.- DURABILIDAD DE LOS MORTEROS ELABORADOS CON ESCORIAS BLANCAS		189
6.1.	INTRODUCCIÓN.....	189
6.2.	RETRACCIÓN DE MORTEROS CON LFS.....	191
6.2.1	<i>Metodología experimental</i>	191
6.2.2	<i>Resultados y análisis</i>	192
6.3.	CAPACIDAD DE EFLORECER DE MORTEROS CON LFS.....	193
6.3.1	<i>Metodología experimental</i>	194

6.3.2	<i>Resultados y análisis</i>	197
6.4.	DURABILIDAD ANTE CICLOS DE HUMEDAD-SEQUEDAD	203
6.4.1	<i>Metodología experimental</i>	204
6.4.2	<i>Resultados y análisis</i>	205
6.5.	CONCLUSIONES RELATIVAS A LA DURABILIDAD.....	223
CAPÍTULO 7.- CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA.....		225
7.1.	INTRODUCCIÓN.....	225
7.2.	CONCLUSIONES	226
7.3.	LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA.....	229
CAPÍTULO 18.- BIBLIOGRAFÍA		231

INTRODUCCIÓN

1

- 1.1. Contexto
- 1.2. Problemática asociada
- 1.3. Objetivos
- 1.4. Estructura de la Tesis

1.1. CONTEXTO

El empeoramiento de la economía Europea se ha trasladado con rapidez al sector de la construcción, habiendo sido éste clave para la economía española durante el último decenio. Aunque desde el año 2007 comienzan a registrarse datos sobre un decrecimiento del ritmo de construcción [SEOPAN, 2012], su importancia en la composición del PIB de España y en la generación de empleo sigue siendo fundamental.

La economía española, estaba presenciando una sucesión de graves noticias – retorno a la recesión, amenazas sobre el Euro, rescate europeo a la banca – que hacen pensar en un escenario de crisis de larga duración. Un escenario que impacta de lleno sobre el sector de la construcción, para el cual las nuevas previsiones auguran bajas muy severas, que parecen impropias de un sector que lleva encadenando seis años consecutivos de descensos. La proyección para un futuro cercano, pese a contemplar una suavización de las pérdidas, no esconde el hecho de que al sector de la construcción español le va a resultar muy difícil encontrar argumentos para crecer.

No obstante, esta industria tiene la capacidad de actuar en un sentido claramente