

Caracterización de Hormigones Especiales con Mejora de sus Propiedades Térmicas para el Desarrollo de Sistemas Prefabricados de Cerramientos de Bloque.

# CARACTERIZACIÓN DE HORMIGONES ESPECIALES CON MEJORA DE SUS PROPIEDADES TÉRMICAS PARA EL DESARROLLO DE SISTEMAS PREFABRICADOS DE CERRAMIENTOS DE BLOQUE.

## TESIS DOCTORAL

presentada para optar al título de **Doctor Ingeniero Industrial**

**Maggi Isabel Madrid Guerrero**



**Maggi Isabel Madrid Guerrero**

## DIRECTOR

Dr. Jesús Cuadrado Rojo

Dr. Aimar Orbe Mateo

*Bilbao, septiembre 2018*



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

Departamento de Ingeniería  
Mecánica / Ingeniaritza  
Mekanikoa Saila



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

INGENIARITZA  
MEKANIKOA  
SAILA  
DEPARTAMENTO  
DE INGENIERIA  
MECÁNICA

## ***AGRADECIMIENTOS***

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas y entidades que, en mayor o menor medida, han contribuido durante estos cuatro años a la realización de esta Tesis Doctoral. Muy especialmente....

A mis directores de tesis, el Dr. Jesús Cuadrado y el Dr. Aimar Orbe, por despertar en mí la motivación de alcanzar nuevas metas y por su apoyo tanto académico como personal.

Al Gobierno Vasco por los fondos aportados a través del grupo IT781-13, y a la UPV/EHU en el marco del programa UFI 11/29.

Al Departamento de Economía y Competitividad del Gobierno Vasco (EJ-GV), por la subvención recibida para el proyecto: "Soluciones constructivas de fachadas más eficientes y sostenibles resueltas mediante el uso de madera pino radiata de Euskadi".

A la empresa Smurfit Kappa Nervión S.A., por proporcionar los subproductos utilizados a lo largo de esta investigación, y a la empresa de Prefabricados Alberdi S.A. por suministrar los materiales para la elaboración del hormigón, así como también, por fabricar los bloques de hormigón utilizados en esta investigación.

Al programa Erasmus+Doctorado (UPV/EHU) por los fondos aportados para realizar la estancia internacional.

Al personal de la Universidad de Pau et des Pays de l'Adour, especialmente a la Prof. Hélène Carré por su colaboración en el periodo de la estancia en Francia y a los doctorandos que me acogieron con tanto cariño y siempre estuvieron dispuestos a ayudarme.

A los profesores Juan José del Coz y Mar Alonso de la Universidad de Oviedo, quienes me enseñaron los conocimientos básicos para poder emprender el viaje hacia el complicado mundo de los elementos finitos.

Al Prof. Arturo Zapico de la Universidad de Oviedo por su colaboración en la realización del ensayo acústico y al profesor Ernesto García Vadillo por compartir sus conocimientos sobre estos temas.

A los Profesores Javier Jesús González y Unai Elortegui, por la asesoría prestada en el desarrollo de la investigación, para la autora fue un placer contar con ambas colaboraciones.

Al Prof. Nicolás Perry, de la Universidad de Burdeos por su contribución en la tesis, concretamente, en el desarrollo del análisis del ciclo de vida.

A todo el profesorado y personal del Departamento de Ingeniería Mecánica de la UPV/EHU, por proporcionar todo lo necesario, tanto en instalaciones, como en materiales y recursos, en especial al Prof. Eduardo Rojí.

A los compañeros de doctorado que aportaron el buen ambiente a la sala de doctorados y siempre me apoyaron, tanto desde el punto de vista profesional, como humano.

Para finalizar, la ayuda sincera y el aliento de mi familia, amigos, y el apoyo continuo de mi esposo tuvieron un papel esencial en la realización de esta tesis y son enormemente apreciados.

## *Resumen*

---

## **RESUMEN**

Cuestiones ambientales como el calentamiento global, el agotamiento de los recursos naturales, la contaminación del agua, el aire y el suelo, la generación de enormes cantidades de residuos y subproductos, y las consecuencias ambientales de su eliminación; son algunos de los grandes desafíos a los que se enfrenta la civilización actual. Cada uno de estos problemas repercute considerablemente en el desarrollo futuro de la humanidad, por lo cual, se deben abordar urgentemente y de una manera eficaz y sostenible.

La industria del hormigón tiene una gran implicación en las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GHG, por sus siglas en inglés, *Greenhouse Gases*), ya que es el material más consumido en el sector, siendo la fabricación del cemento Portland, la que aporta en mayor medida, debido a que requiere la extracción y procesamiento de una importante cantidad de materia prima y el proceso en general consume una gran cantidad de energía. Adicionalmente, la extracción y procesamiento del árido para la fabricación del hormigón también colabora, aunque en menor medida que el cemento, a las emisiones totales generadas por la industria del hormigón.

En este contexto, el uso de subproductos industriales ha demostrado ser una alternativa viable para abordar el desafío de reducir el impacto ambiental del hormigón. Sin embargo, se requieren políticas sostenibles que permitan, la sustitución total o parcial del cemento o áridos del hormigón, por adiciones disponibles localmente, preferentemente materiales de desecho o subproductos; cuyo uso permita mejorar las propiedades del material, cumplir con los requisitos mínimos de los estándares actuales y reducir los costes asociados.

Por otra parte, las técnicas constructivas y materiales utilizados en la envolvente de los edificios se encuentran en constante evolución. Este fenómeno, ha sido provocado por las mayores exigencias de las normativas actuales, tal es el caso de la normativa española Documento Básico de Ahorro de energía (DB-HE) del Código Técnico de la Edificación (CTE), la cual está en constante renovación. Es por ello que, actualmente existe un interés creciente en desarrollar nuevos materiales de construcción sostenibles para la envolvente de los edificios, con propiedades térmicas óptimas. Sin embargo, este no ha sido el caso de los bloques de hormigón, que a pesar de que continúan siendo ampliamente utilizados, aún se fabrican con propiedades térmicas ineficientes y con un enfoque insostenible.

Es bien sabido que, el desarrollo sostenible enmarca tanto el aspecto ambiental, como los aspectos económico y social. Con lo cual, para lograr que la producción de bloques sea sostenible, se requiere adoptar un enfoque multidisciplinar, que cubra dichos aspectos. Este es el caso de la reutilización de subproductos, los cuales a su vez, puedan optimizar las propiedades térmicas de estos elementos prefabricados. Con este enfoque, se obtendría un menor impacto ambiental en la producción de bloques. Se generaría un ahorro económico tanto para las empresas de prefabricados de bloques, como para las empresas que generan los subproductos, ya que por un lado se ahorraría en material, y por otro, se ahorraría en el canon de vertido. Por otra parte, se obtendría un beneficio

social debido al mayor confort térmico en las viviendas, oficinas, locales y demás inmuebles donde se empleen, lo cual a su vez, reduciría los costes asociados al consumo de energía.

Anualmente, se obtienen grandes cantidades de virutas, cenizas de madera y lodos de cal como subproductos de la industria de la madera. Las virutas resultan del aserrado de madera para la fabricación de muebles y productos de madera, las cenizas de madera son un residuo, generado en las instalaciones de biomasa, después de la combustión de madera y los lodos de cal, se obtienen durante la conversión de la madera en fibras de celulosa pura a través del proceso kraft, siendo este subproducto un residuo sólido generado en una reacción de caustificación, en el proceso de reciclado de álcali de la fabricación de papel. Según el Catálogo Europeo de Residuos estos tres subproductos industriales no presentan sustancias peligrosas y están clasificados como residuos no peligrosos.

Por lo tanto, esta investigación busca reutilizar dichos subproductos para el desarrollo de bloques de hormigón más sostenibles y con mejores propiedades térmicas, para el sector de la edificación. Con ello, se conseguiría reducir el consumo de materias primas, valorizar los subproductos y reducir la ocupación de los vertederos.

La parte experimental comprendió tres etapas: el análisis de las propiedades de los subproductos, la fabricación y análisis del comportamiento de diferentes tipos de hormigones, y la fabricación y análisis del comportamiento de diferentes tipos de bloques. A continuación se describen estas tres etapas en mayor detalle.

La primera etapa, consistió en la caracterización por medio del análisis de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de las virutas, las cenizas de madera y los lodos de cal. Con ello, se buscaba conocer sus propiedades e identificar la presencia de componentes peligrosos, que no fuesen adecuados para el hormigón. Para la caracterización física.

Una vez analizados las virutas, las cenizas de madera y los lodos de cal, se decidió realizar un estudio sobre el efecto de la incorporación de estos subproductos en las propiedades del hormigón, cuyos resultados ayudarían a decidir si sería viable realizar un estudio posterior sobre el uso de los subproductos en bloques, con que porcentajes trabajar para optimizar las propiedades de los bloques y si sería beneficioso la incorporación de estos de manera combinada. Cabe destacar que, los resultados de las propiedades térmicas y mecánicas influyeron en gran medida en la selección de los porcentajes óptimos.

Así pues, la segunda etapa experimental, incluye la definición de las proporciones empleadas para la elaboración de 10 tipos de mezclas, las cuales fueron definidas a través de un estudio exhaustivo de las investigaciones previas y de las recomendaciones de una empresa de prefabricados de bloques. De las 10 mezclas de hormigón, se realizó una mezcla de referencia sin subproductos, 3 mezclas en las que el árido fino se sustituyó por virutas, en cantidades del 5, 10 y 20% en volumen; otras 3 mezclas en las que el cemento se sustituyó por cenizas de madera en cantidades de 5, 10 y 15% en volumen; y, finalmente, otras 3 mezclas en las que el cemento se sustituyó por lodos de

cal en cantidades del 5, 10 y 15% en volumen. En esta etapa se evaluaron las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de los distintos tipos de hormigón.

En la tercera etapa experimental se buscó industrializar el estudio, para ello, se extrapolaron los resultados obtenidos de una escala de laboratorio a una escala real. Con lo cual, se decidió fabricar tres series de bloques con diferentes dosificaciones, un tipo en el cual el 5% del árido fino se sustituyó por virutas, este porcentaje se escogió debido a que su adición mejoró significativamente la densidad y las propiedades térmicas del hormigón, sin reducir drásticamente su resistencia a compresión. Un segundo tipo, en el cual el 5% del árido fino se sustituyó por virutas y el 15% del cemento se sustituyó por lodos de cal, con la adición de este último, se buscaba contrarrestar el efecto negativo de las virutas sobre las propiedades mecánicas, y a su vez mantener las mejoras térmicas que aporta la madera a los bloques. Para este segundo tipo, la adición de virutas fue también en porcentajes bajos, debido a lo señalado anteriormente, mientras que, para los lodos de cal se empleó un porcentaje mayor, a fin de obtener bloques más sostenibles. Finalmente, se fabricó un tercer tipo sin subproductos, que se empleó de referencia. En cuanto a las cenizas de madera, se decidió no continuar estudiándolas debido a que no se obtuvo en la primera etapa una mejora significativa en las propiedades del hormigón. Así pues, en esta segunda etapa, se caracterizaron las propiedades morfológicas, físicas, mecánicas, acústicas, radiativas y térmicas de los bloques.

Por otra parte, se realizó un análisis térmico-numérico en dos dimensiones (2-D) de muros de bloques, mediante el método de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés *Finite Element Method*), empleando el software ANSYS. Los resultados se compararon con los obtenidos en el ensayo experimental, con el propósito de validar el procedimiento del análisis numérico. Asimismo, se evaluó como vía alternativa, el comportamiento térmico de muros con bloques huecos rellenos de aislamiento térmico.

Adicionalmente, se llevó a cabo un Análisis del Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés, *Life Cycle Assessment*) de los bloques con y sin subproductos, a fin de analizar los beneficios medioambientales que conllevaría la incorporación de subproductos en los bloques. El LCA se realizó de acuerdo con lo establecido en la norma EN-ISO 14040, utilizando la herramienta de software Eco-it. El alcance de este análisis es de la "cuna al sitio" ("cradle-to-site"). Posteriormente, se calcularon y analizaron los beneficios económicos que obtendrían las empresas de prefabricados de bloques y las empresas que generan los subproductos, al adicionar dichos subproductos a la mezcla de los bloques.

Con base a los resultados se puede concluir que la sustitución parcial del árido fino por las virutas y del cemento por los lodos de cal en la mezcla, es una vía alternativa para obtener bloques más respetuosos con el medio ambiente y a su vez con mejores propiedades térmicas.

Finalmente, se puede decir que los ensayos y análisis presentados en este documento constituyen el primer paso y servirán de base en la investigación sobre virutas, ya sea incorporado en los bloques de manera individual o en combinación con los lodos de cal.



# ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>iii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>vii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xv</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>xix</b>

## **Capítulo 1** .....

**21**

1.1	Introducción .....	23
1.2	Problemática asociada .....	23
1.3	Objetivos.....	29
1.4	Estructura de la Tesis.....	31
1.5	Importancia del estudio .....	33

## **Capítulo 2** .....

**35**

2.1	Introducción.....	37
2.2	Economía circular .....	37
2.3	Impacto ambiental del hormigón .....	39
2.4	Incorporación de subproductos en las mezclas cementicias.....	44
2.5	Bloques de hormigón.....	61
2.6	Impacto ambiental de los bloques .....	65
2.7	Características técnicas recogidas en el Mercado CE .....	66
2.8	Exigencias del Código Técnico de la Edificación (CTE).....	66
2.9	Evolución histórica de las técnicas y conceptos de los edificios energéticamente eficientes .....	70
2.10	Evolución de legislación europea y española sobre eficiencia energética en edificios .....	74
2.11	Influencia de las fachadas en la eficiencia energética de los edificios.....	76
2.12	Normativas para el cálculo y medición de las propiedades térmicas de muros.....	77
2.13	Análisis del ciclo de vida .....	79

### **Capítulo 3 .....85**

3.1	Introducción .....	87
3.2	Materiales.....	87
3.3	Metodología experimental.....	101
3.4	Resultados y discusión.....	111
3.4.1	Asentamiento .....	111
3.4.2	Absorción.....	112
3.4.3	Densidad .....	114
3.4.4	Porosidad .....	115
3.4.5	Absorción por capilaridad.....	116
3.4.6	Resistencia a compresión.....	118
3.4.7	Propiedades térmicas .....	119
3.5	Conclusiones .....	121

### **Capítulo 4 .....123**

4.1	Introducción .....	125
4.2	Metodología experimental.....	125
4.3	Resultados y discusión.....	143
4.3.1	Longitud, anchura y altura.....	143
4.3.2	Espesor de las paredes exteriores y de los tabiques .....	145
4.3.3	Paralelismo de los planos de las caras de apoyo.....	145
4.3.4	Planeidad de las caras vistas y de apoyo .....	146
4.3.5	Porcentaje de superficie de huecos.....	146
4.3.6	Densidad .....	147
4.3.7	Absorción.....	149
4.3.8	Absorción por capilaridad.....	149
4.3.9	Resistencia a compresión.....	150
4.3.10	Comportamiento acústico .....	152
4.3.11	Emisividad .....	153
4.3.12	Comportamiento térmico.....	153
4.4	Conclusiones .....	157

<b>Capítulo 5 .....</b>	<b>159</b>
5.1 Introducción .....	161
5.2 Análisis térmico-numérico de los muros .....	162
5.3 Análisis térmico-numérico de los muros con bloques rellenos de aislamiento .....	175
5.4 Conclusiones .....	178
<b>Capítulo 6 .....</b>	<b>179</b>
6.1 Introducción .....	181
6.2 Análisis del ciclo de vida de los bloques de hormigón .....	181
6.3 Beneficios económicos .....	192
6.4 Conclusiones .....	194
<b>Capítulo 7 .....</b>	<b>197</b>
7.1 Introducción .....	199
7.2 Conclusiones .....	199
7.3 Futuras líneas de investigación .....	202
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>207</b>



# 1

## *Introducción*

### **1.1 Introducción**

A lo largo de este capítulo se lleva a cabo un análisis de la problemática actual en el ámbito de la sostenibilidad y la producción de hormigón, que ha servido como origen para el desarrollo del presente trabajo de Tesis Doctoral. Conjuntamente, se describen los objetivos que se persiguen y como se ha organizado la Tesis por capítulos. Finalmente, se expone la importancia de este estudio y su contribución al área del conocimiento.

### **1.2 Problemática asociada**

Las actividades humanas están afectando a las condiciones climáticas del planeta, principalmente mediante el aumento de la concentración de Gases de Efecto Invernadero (GHG, por sus siglas en inglés, *Greenhouse Gas*) en la atmósfera. Ejemplo de ello, es el incremento a través de los años de los niveles de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en la atmósfera, el principal GHG. Tal y como se puede observar en la Figura 1, hace más de 200 años estos niveles se encontraban por debajo de las 300 partes por millón (ppm), actualmente están en 380 ppm [1], y se espera que las concentraciones de  $\text{CO}_2$  aumenten a más de 800 ppm para finales de siglo [2].

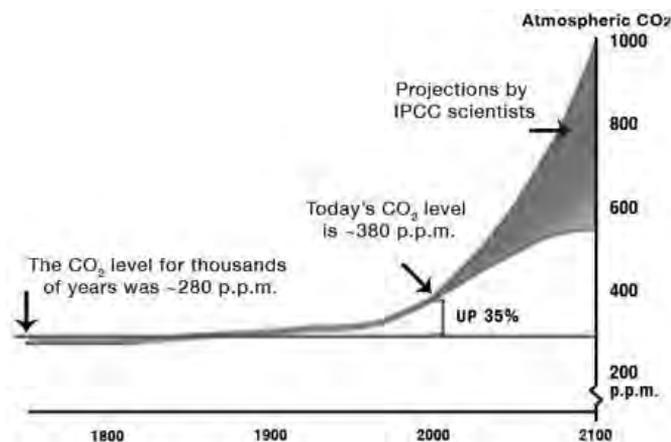


Figura 1 Concentraciones atmosféricas de  $\text{CO}_2$  históricas y proyectadas [3].

# 2

## *Estado del arte*

### **2.1 Introducción**

Este capítulo presenta la revisión de la literatura que comprende el marco teórico de la investigación. En la primera parte, se trata la economía circular, cuyo concepto está directamente relacionada con el objetivo principal de esta tesis, puesto que este modelo económico, apuesta por el uso más eficientes de los recursos, así como también, por la reutilización de residuos. Seguidamente, se comentan los escenarios estudiados hasta la fecha, relacionados con la incorporación de virutas, cenizas de madera y lodos de cal en morteros, hormigones y bloques de hormigón; y el efecto de la incorporación de estos subproductos en las propiedades de estos materiales cementicios, siendo de especial interés las propiedades térmicas; así como también, los rangos usuales de sustitución en la mezcla y los materiales que comúnmente sustituyen.

Por otra parte, se definen los conceptos básicos asociados a los bloques de hormigón, su aplicabilidad, y los requisitos exigidos por la normativa Europea y Estatal. En vista de que entre los objetivos planteados está optimizar térmicamente estos bloques, en este capítulo también se comenta la evolución histórica de la eficiencia energética hasta la fecha, tanto de las técnicas constructivas y conceptos que se han ido manejando en este ámbito, como de las directivas que la han venido regulando a nivel Europeo y Estatal. Posteriormente, se interpretan las diferentes normativas para el cálculo y medición de comportamiento térmico de los materiales, con objeto de identificar aquellas que sean más adecuadas para ser empleadas en esta investigación, y se analiza la influencia de las fachadas en la eficiencia energética de los edificios, con lo que se pretende identificar los aspectos principales, que condicionan el consumo energético final del edificio.

### **2.2 Economía circular**

El actual modelo económico lineal de “tomar, hacer, desechar” que busca potenciar un consumo a corto plazo, está llevando al planeta a una situación insostenible. La economía circular propone un nuevo modelo, que se presenta como una estrategia de aprovechamiento, cuyos objetivos son minimizar, tanto la producción de materiales, como la producción de desechos, cerrando los «bucles» o flujos económicos y ecológicos de los recursos [50]. Este tipo de economía apuesta por la reutilización de los elementos y por el empleo de materiales biodegradables en la fabricación de bienes de consumo, para que de este modo, éstos puedan volver a la naturaleza al agotar su vida útil, sin causar daños medioambientales.

# 3

## ***Materiales, fabricación y caracterización de mezclas de hormigón***

### **3.1 Introducción**

En este capítulo se describen los materiales empleados y la metodología seguida para la caracterización por medio de un análisis físico, químico y mineralógico de las virutas, las cenizas de madera y los lodos de cal. Esto se realizó con el fin de conocer sus propiedades e identificar la presencia de componentes peligrosos, que no sean adecuados para su uso en el hormigón.

Seguidamente, se detalla la metodología empleada para la fabricación de una serie de mezclas de hormigón de baja resistencia, con dosificaciones similares a las de los bloques de hormigón, cada una con diferentes proporciones (5-20% en peso) de subproductos, utilizando virutas en reemplazo de árido fino, y cenizas de madera y lodos de cal en reemplazo del cemento, y una mezcla de hormigón sin subproductos de referencia.

Además en este capítulo, se describe los procedimientos para realizar los ensayos de densidad, absorción, porosidad, absorción por capilaridad, resistencia a compresión, conductividad térmica, difusividad térmica y calor específico del hormigón. Dichos ensayos se llevaron a cabo en los laboratorios de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) y la Universidad de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA).

Los resultados dados son una media de los obtenidos al ensayar el número de muestras requerido por su respectiva normativa. Estos se comparan con los requisitos de las normativas nacionales e internacionales, así como también, con resultados de otras investigaciones. Cabe destacar que, los mejores resultados permitieron determinar los contenidos óptimos de subproductos para ser usado en la fabricación de los bloques, siendo de gran interés los resultados térmicos. Finalmente, se presentan una serie de conclusiones basadas en los resultados obtenidos.

### **3.2 Materiales**

Los materiales utilizados a lo largo de la investigación, que formaron la base para el desarrollo de esta tesis doctoral se describen a continuación. Se debe prestar atención a que los tres subproductos se emplearon en estado seco, tal y como se recibieron de las empresas que los generan. Si bien los lodos de cal se generan con un alto contenido de humedad, su incorporación en la mezcla en estado húmedo también es posible, siempre y

# 4

## *Fabricación y comportamiento de los bloques de hormigón*

### **4.1 Introducción**

Esta etapa experimental consistió en industrializar el estudio, con esto, se buscaba extrapolar los resultados obtenidos a escala de laboratorio, a una escala real; por lo cual, se fabricaron 3 tipos de bloques con los contenidos óptimos, obtenidos en la primera etapa, y se caracterizaron sus propiedades morfológicas, físicas, mecánicas, acústicas, radiativas y térmicas.

Así pues, en este capítulo se describe la metodología seguida, tanto para la fabricación de los bloques de hormigón, como para la realización de los ensayos, lo cuales fueron llevados a cabo en los laboratorios de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU), la Universidad de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA) y la Universidad de Oviedo (UNIOVI).

Los resultados dados, son una media de los obtenidos al ensayar el número de muestras requerido por su respectiva normativa. Estos se comparan con los requisitos de las normativas nacionales e internacionales, así como también, con resultados de otras investigaciones. Al final del capítulo, se incluyen las conclusiones derivadas del análisis de los resultados.

### **4.2 Metodología experimental**

En vista de los resultados obtenidos en el estudio preliminar, se decidió fabricar tres tipos de bloques, un tipo que incorporó virutas, debido a la mejora significativa obtenida en la densidad y las propiedades térmicas. Un bajo porcentaje de virutas, se consideró suficiente para mejorar el aislamiento térmico de los bloques, sin reducir drásticamente su resistencia a compresión. Un segundo tipo, en el que se incorporó virutas y lodos de cal, con la adición de este último, se buscaba contrarrestar el efecto negativo de las virutas sobre las propiedades mecánicas, y a su vez mantener las mejoras térmica que aporta la madera a los bloques. Para este segundo tipo, la adición de virutas fue también en porcentajes bajos y para los lodos de cal se empleó un porcentaje mayor, ya que de esta manera se obtendría un bloque más sostenible. Finalmente, se fabricó un tercer tipo sin subproductos, de referencia. En cuanto a las cenizas de madera, se decidió no incorporarlas en los bloques, ya que en la primera etapa, no se encontró una mejora significativa en las propiedades del hormigón. A continuación se explica en mayor detalle

# 5

## *Análisis térmico-numérico de los muros por FEM*

### **5.1 Introducción**

La necesidad continua de minimizar el consumo de energía ha obligado a evaluar el comportamiento térmico de todos los componentes de la envolvente de los edificios. Dado que no es práctico medir experimentalmente las propiedades térmicas de todos los componentes y sistemas constructivos, se hace necesario emplear métodos avanzados y precisos para predecir con fiabilidad el rendimiento térmico de los mismos. Estos métodos permiten a los proyectistas, estimar los consumos de energía asociados con todos los tipos de sistemas de construcción, incluida la albañilería, y seleccionar los sistemas más apropiados para proporcionar un diseño eficiente, que permitan reducir las cargas asociadas al uso de calefacción y refrigeración en las edificaciones.

El método de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés, *Finite Element Method*) se ha convertido en una técnica habitual en muchas áreas de la ingeniería y la física. La versatilidad del FEM radica en su capacidad para modelar estructuras con formas arbitrarias, trabajar con materiales complejos y aplicar diversos tipos de condiciones de contorno. El método puede adaptarse fácilmente a diferentes conjuntos de ecuaciones constitutivas, lo que lo hace particularmente atractivo para la simulación física [168].

En la actualidad, existen varias investigaciones [169-174] que estudian la aplicación de técnicas de análisis térmico-numérico en diferentes tipos de elementos constructivos aplicados a los muros de la envolvente. Sin embargo, no son muy numerosos los trabajos de investigación [174-177] que validen el análisis numérico, mediante la comparación de los resultados de un ensayo experimental con los obtenidos mediante un análisis numérico.

En este capítulo, se determinan las propiedades térmicas de los tres muros estudiados en el capítulo 4, mediante simulaciones bidimensionales (2-D) por el FEM. Estos resultados se contrastan con los obtenidos a partir del ensayo experimental, con el fin de determinar la precisión del método de análisis térmico-numérico. Asimismo, se discute la posibilidad de optimizar el comportamiento térmico de los bloques de hormigón, aunque no es el objetivo principal de la presente tesis, mediante la integración de un aislamiento en los huecos. Para evaluar esta solución alternativa, se realizan de igual

# 6

## *Sostenibilidad*

### **6.1 Introducción**

Una vía para reducir parcialmente las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GHG, por sus siglas en inglés, *Greenhouse Gases*) generadas por el sector del hormigón es el empleo de los bloques de hormigón con subproductos, analizados en la presente Tesis Doctoral, ya que su composición está basada en los principios de la economía circular. Así mismo, su puesta en obra permitiría abarcar los tres aspectos de la sostenibilidad ya que por un lado, se reduciría el impacto ambiental que se genera al extraer y procesar la materia prima destinada a la fabricación de estas piezas (aspecto ambiental); y por otro lado, se obtendría una reducción en el coste del material destinado a la fabricación de los bloques de hormigón (aspecto económico) y ello conduciría a una reducción en el precio final del bloque, y a su vez, en el coste total de la edificación, logrando que los ocupantes obtuvieran un ahorro que les permitiría disfrutar de otras actividades (aspecto social).

Es por ello que en este capítulo se realiza un análisis y cuantificación de los impactos ambientales globales de la producción de bloques de hormigón con y sin subproductos, mediante un Análisis del Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés, *Life Cycle Assessment*) de la “cuna al sitio” (“cradle-to-site”). Varios estudios [186-191] han realizado el LCA para cuantificar el impacto ambiental del hormigón como material. Sin embargo, solo unos pocos estudios han realizado este análisis en bloques [192-194]. Por otro lado, para cuantificar el ahorro que supondría emplear estos subproductos, se analizan los costes involucrados en la producción de los bloques con y sin subproductos. Al final del capítulo, se incluyen las conclusiones derivadas del análisis de los resultados.

### **6.2 Análisis del ciclo de vida de los bloques de hormigón**

El LCA se realizó empleando la herramienta de software ECO-it [195], ésta es de origen holandés y fue desarrollada para IHOBE, la cual es una Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco. ECO-it se emplea principalmente para el ecodiseño de productos y presenta su propia base de datos, la cual no puede ser editada o ampliada.

Un análisis de ECO-it consta de cuatro etapas en las que el usuario introduce sus propios criterios:

# 7

## *Conclusiones y futuras líneas de investigación*

### **7.1 Introducción**

En este capítulo, se sintetizan las principales conclusiones obtenidas en el marco de la presente investigación. La exposición de las mismas se desarrolla en función de los diferentes apartados abordados. Adicionalmente, se proponen futuras líneas de investigación que se derivan del presente trabajo y que ayudarán a continuar complementando el conocimiento en esta área.

### **7.2 Conclusiones**

A partir del estudio exhaustivo llevado a cabo a diferentes escalas, sobre mezclas con incorporación de subproductos de la industria de la madera, como reemplazo parcial del cemento o árido fino, para la fabricación de hormigón de baja resistencia y bloques de hormigón con un mejor comportamiento térmico, se extraen las siguientes conclusiones:

- **En cuanto a la incorporación de virutas de madera, cenizas de madera y lodos de cal en el hormigón**

Las virutas, las cenizas de madera y los lodos de cal empleados en este estudio, no contienen sustancias peligrosas entre sus componentes. Las cenizas de madera se componen principalmente de cuarzo, calcita, arcillas y materiales amorfos, mientras que los lodos de cal se componen principalmente de calcita. De acuerdo con ASTM C618, tanto las cenizas de madera, como los lodos de cal no presentan propiedades puzolánicas.

La sustitución parcial del árido fino por virutas de madera en la mezcla, disminuye el asentamiento y aumenta la absorción de agua, la porosidad y la absorción por capilaridad del hormigón, siendo este comportamiento más notorio a mayores porcentajes de sustitución. Asimismo, este tipo de hormigón presenta menor densidad, lo que mejora sus propiedades de aislamiento, proporcionando una resistencia adicional al flujo de calor. En cuanto a la resistencia a compresión, el aumento en el contenido de virutas, disminuye notablemente la resistencia del hormigón, para todas las edades. Sin

## **REFERENCIAS**

- [1] Cetin M, Sevik H. The change of air quality in Kastamonu city in terms of particulate matter and CO<sub>2</sub> amount. *Oxidation Commun* 2016;39:3394-401.
- [2] Feely RA, Sabine CL, Lee K, Berelson W, Kleypas J, Fabry VJ et al. Impact of anthropogenic CO<sub>2</sub> on the CaCO<sub>3</sub> system in the oceans. *Science* 2004;305:362-6.
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate change 2014: mitigation of climate change*. : Cambridge University Press, 2015.
- [4] Eurostat EEA. *Greenhouse gas emission statistics - emission inventories*. 2017.
- [5] Miller SA. Supplementary cementitious materials to mitigate greenhouse gas emissions from concrete: can there be too much of a good thing? *Journal of Cleaner Production* 2018;178:587-98.
- [6] Mehta PK. Greening of the concrete industry for sustainable development. *Concr Int* 2002;24:23-8.
- [7] Anefhop. *Producción de hormigón, Datos estadísticos del sector*. 2015.
- [8] Worrell E, Price L, Martin N, Hendriks C, Meida LO. Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annu Rev Energy Environ* 2001;26:303-29.
- [9] Humphreys K. *Toward a sustainable cement industry, substudy 8: climate change*. 2002.
- [10] Eurostat Statistics Explained. *Waste Statistics*. 2016;2016.
- [11] Instituto Nacional de Estadística (INE). *Estadísticas sobre la recogida y tratamiento de residuos. Encuesta sobre generación de residuos en la industria Año 2014*. 2016. .
- [12] Protocol K. *United Nations framework convention on climate change. Kyoto Protocol, Kyoto 1997*;19.
- [13] Directive WF. *Directive 2008/98/EC. Official Journal of the European Union* 2008;19.
- [14] Directive EWL. *Council Directive 1999/31/EC. L 1999*;182:26.4.
- [15] Arena U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Waste Manage* 2012;32:625-39.
- [16] Commission of the European Communities Eurostat. *Guidance on classification of waste according to EWC-Stat categories, Supplement to the Manual for the Implementation of the Regulation (EC) No 2150/2002 on Waste Statistics*. 2010;Versión 2.