

**Título:** CARAZTERIZACIÓN DE HORMIGONES ESPECIALES CON MEJORA DE SUS PROPIEDADES TÉRMICAS PARA EL DESARROLLO DE SISTEMAS PREFABRICADOS DE CERRAMIENTOS DE BLOQUE.

**Nombre:** MADRID GUERRERO, MAGGI ISABEL

**Universidad:** Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea

**Departamento:** Ingeniería mecánica

**Fecha de lectura:** 17/09/2018

**Programa de doctorado:** Programa de Doctorado en Ingeniería Mecánica por la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea

**Dirección:**

> **Director:** JESÚS CUADRADO ROJO

> **Director:** AIMAR ORBE MATEO

**Tribunal:**

> **presidente:** JAVIER CANALES ABAITUA

> **secretario:** LEIRE GARMENDIA ARRIETA

> **vocal:** DAVID GARCÍA ESTEVEZ

> **vocal:** Nestor Francisco Guerrero Rodriguez

> **vocal:** VANESA ORTEGA LÓPEZ

**Descriptores:**

> MECANICA

**El fichero de tesis** ya ha sido incorporado al sistema

> <http://hdl.handle.net/10810/31604>

**Localización:** REPOSITORIO INSTITUCIONAL E.H.U./U.P.V.

**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. 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 sostenible. 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.