

Tesis Doctoral

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

Presentado por

Maggi Isabel Madrid Guerrero

Para obtener el grado de

Doctor Ingeniero Industrial

Por la

Universidad del País Vasco

En el

Departamento de Ingeniería Mecánica

Dirigido por

Dr. D. Jesús Cuadrado Rojo

Dr. D. Aimar Orbe Mateo

Bilbao, Septiembre de 2018.

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

AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	vii
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABLAS	xix

Capítulo 1..... **21**

1.1	Introducción	23
1.2	Problemática asociada.....	23
1.3	Objetivos	30
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	62
2.6	Impacto ambiental de los bloques	66
2.7	Características técnicas recogidas en el Mercado CE	67
2.8	Exigencias del Código Técnico de la Edificación (CTE)	67
2.9	Evolución histórica de las técnicas y conceptos de los edificios energéticamente eficientes	72
2.10	Evolución de legislación europea y española sobre eficiencia energética en edificios	76
2.11	Influencia de las fachadas en la eficiencia energética de los edificios.....	78
2.12	Normativas para el cálculo y medición de las propiedades térmicas de muros.....	79
2.13	Análisis del ciclo de vida.....	81

Capítulo 3..... 87

3.1	Introducción.....	89
3.2	Materiales	89
3.3	Metodología experimental.....	103
3.4	Resultados y discusión.....	114
3.4.1	Asentamiento.....	114
3.4.2	Absorción	115
3.4.3	Densidad.....	117
3.4.4	Porosidad.....	118
3.4.5	Absorción por capilaridad	120
3.4.6	Resistencia a compresión	121
3.4.7	Propiedades térmicas.....	123
3.5	Conclusiones.....	124

Capítulo 4..... 127

4.1	Introducción.....	129
4.2	Metodología experimental.....	129
4.3	Resultados y discusión.....	149
4.3.1	Longitud, anchura y altura	149
4.3.2	Espesor de las paredes exteriores y de los tabiques	151
4.3.3	Paralelismo de los planos de las caras de apoyo	151
4.3.4	Planeidad de las caras vistas y de apoyo	152
4.3.5	Porcentaje de superficie de huecos.....	152
4.3.6	Densidad.....	153
4.3.7	Absorción	154
4.3.8	Absorción por capilaridad	155
4.3.9	Resistencia a compresión	156
4.3.10	Comportamiento acústico.....	157
4.3.11	Emisividad.....	159
4.3.12	Comportamiento térmico.....	159
4.4	Conclusiones.....	163

Capítulo 5.....	165
5.1 Introducción	167
5.2 Análisis térmico-numérico de los muros.....	168
5.3 Análisis térmico-numérico de los muros con bloques rellenos de aislamiento	181
5.4 Conclusiones	184
Capítulo 6.....	185
6.1 Introducción	187
6.2 Análisis del ciclo de vida de los bloques de hormigón	187
6.3 Beneficios económicos.....	198
6.4 Conclusiones	201
Capítulo 7.....	203
7.1 Introducción	205
7.2 Conclusiones	205
7.3 Futuras líneas de investigación	208
REFERENCIAS.....	213

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Concentraciones atmosféricas de CO ₂ históricas y proyectadas [3].	23
Figura 2 Emisiones de GHG por sector, en la UE para el año 2015 [4].	24
Figura 3 Antes y después del lago Poyang en China © NASA.	25
Figura 4 Evolución del número de centrales de biomasa en España [25].	27
Figura 5 Ubicación geográfica de los centros de producción de papel en España [35].	28
Figura 6 Esquema de una economía circular [4].	39
Figura 7 Diagrama de flujo de proceso para la fabricación de cemento. [7].	40
Figura 8 Principales fuentes de emisión de CO ₂ , con respecto al consumo de energías en la producción del Cemento Portland (Límite: de la cuna a la puerta) [9].	41
Figura 9 Virutas de madera.	45
Figura 10 Planta de biomasa de la empresa papelera Smurfit Kappa Nervion S.A.	52
Figura 11 Ceniza de madera de la empresa papelera Smurfit Kappa Nervion S.A.	53
Figura 12 Zona donde se generan los lodos de cal, en la empresa papelera Smurfit Kappa Nervion S.A.	58
Figura 13 Bloques de hormigón © ANDECE.	62
Figura 14 Tipos de bloques [90].	64
Figura 15 Fachada de bloques de hormigón © ANDECE.	65
Figura 16 Ennis House, diseñada por Frank Lloyd Wright © Ennis House.	65
Figura 17 Diagrama de flujo del proceso productivo de los bloques [91].	66
Figura 18 Palafitos.	73
Figura 19 Ventana restaurada con láminas de moscovita, un mineral de mica.	73
Figura 20 House of Tomorrow [97].	74
Figura 21 Casa pasiva Kranichstein © Passivhaus Institut.	75
Figura 22 Etiqueta de certificación de eficiencia energética de edificio nuevo.	77
Figura 23 Límites de un LCA.	82
Figura 24 Muestra de cemento.	90
Figura 25 Muestra de árido: a) fino y b) grueso.	91
Figura 26 Muestra de virutas.	91
Figura 27 Muestra de cenizas de madera.	92
Figura 28 Muestra de lodos de cal.	92
Figura 29 a) Juego de tamices y b) equipo de difracción láser.	94
Figura 30 Curva granulométrica del árido fino, árido grueso, virutas, cenizas de madera y lodos de cal.	94
Figura 31 Microscopio electrónico de barrido.	95
Figura 32 Morfología de las partículas de virutas.	95
Figura 33 Morfología de las partículas de cenizas de madera.	95
Figura 34 Morfología de las partículas de los lodos de cal.	96
Figura 35 Espectrómetro secuencial de WDXRF.	96
Figura 36 Analizador Elemental de C, H, N y S.	98
Figura 37 Analizador térmico de TGA-DSC.	99
Figura 38 Curva TG/DSC de las cenizas de madera.	100
Figura 39 Curva TG/DSC de los lodos de cal.	101

Figura 40 Difractómetro.....	101
Figura 41 XRD de las cenizas de madera.	102
Figura 42 XRD de los lodos de cal.	103
Figura 43 Cono de Abrams y mezcla de asentamiento cero.	106
Figura 44 Probeta a) en agua hervida y b) pesada.....	107
Figura 45 a) Rectificadora y b) probeta cortada.....	108
Figura 46 Acondicionamiento de las probetas en el horno.	109
Figura 47 a) Probetas sometidas al ensayo de absorción por capilaridad y b) bases de soporte.	109
Figura 48 Prensa electromecánica.....	110
Figura 49 Dispositivo de disco caliente y probeta ensayada.....	111
Figura 50 Sensor © Hot Disk.....	111
Figura 51 Gráfica aumento de la temperatura (K) vs. el tiempo (s).....	113
Figura 52 Gráfica deriva térmica (K) vs. tiempo (s).....	114
Figura 53 Efecto del contenido de virutas, cenizas de madera y lodos de cal en el asentamiento del hormigón.	115
Figura 54 Efecto del contenido de virutas, cenizas de madera y lodos de cal en la absorción de agua del hormigón.....	116
Figura 55 Efecto del contenido de virutas, cenizas de madera y lodos de cal en la densidad del hormigón.	117
Figura 56 Efecto del contenido de virutas, cenizas de madera y lodos de cal en la porosidad del hormigón.....	119
Figura 57 Relación entre la ganancia de masa (Q) y la raíz cuadrada del tiempo (\sqrt{t}) de los diferentes tipos de hormigón.	120
Figura 58 a) Acabado final de los bloques y b) tipos de bloques (con 2 y 3 cavidades).	130
Figura 59 Máquina bloquera.	131
Figura 60 a) Moldes de la máquina bloquera y b) cintas transportadora.	131
Figura 61 Zona de curado de los bloques.....	132
Figura 62 Medición de a) la longitud, b) la anchura y c) la altura de las muestras.....	133
Figura 63 Medición de los espesores de las muestras.....	134
Figura 64 Medición del paralelismo de los planos de las caras de apoyo de las muestras.	134
Figura 65 Medición de la planeidad de las caras a) vistas y b) de apoyo de las muestras.	135
Figura 66 Dibujo de la forma de los huecos en la parte a) superior e b) inferior.....	136
Figura 67 Forma de los huecos en la parte a) superior e b) inferior de los bloques.....	136
Figura 68 Porciones de los bloques.....	137
Figura 69 Determinación de la masa: a) aparente sumergida y b) saturada de las muestras.....	138
Figura 70 Secado de las muestras.	139
Figura 71 a) Recipiente y b) base de soporte.	139
Figura 72 Muestra a) sometida al ensayo de absorción por capilaridad y b) pesada para obtener su masa saturada.....	139

Figura 73 Muestra a) ensayada bajo compresión axial y b) aspecto después de la rotura.	140
Figura 74 Preparación de las probetas para el ensayo acústico.	142
Figura 75 a) Cámara acústica y b) orificio donde se dispone la probeta.	142
Figura 76 a) Fuente sonora, b) probeta dispuesta en el agujero y c) sonómetro.	143
Figura 77 Modelo de cámara infrarroja ©TESTO 875-1.	143
Figura 78 Geometría de los muros.	145
Figura 79 Muros: a) MREF, b) MS y c) MSML.	145
Figura 80 Representación del funcionamiento del equipo.	146
Figura 81 Cámara fría.	146
Figura 82 Cámara caliente.	147
Figura 83 a) Muro con el aislamiento por los bordes y b) Caja Caliente en funcionamiento.	147
Figura 84 Posición de las sondas de temperatura en contacto con el muro de la cámara: a) caliente y b) fría.	148
Figura 85 Forma de los bloques.	149
Figura 86 Densidad de los bloques y rango de valores típicos según ANDECE [19].	154
Figura 87 Absorción de los bloques y valores máximos permitidos según la norma ASTM C90 [20].	155
Figura 88 Absorción por capilaridad de los bloques y valor máximo permitido según el CTE [18].	156
Figura 89 Resistencia de compresión normalizada de los bloques a los 28 días y requisitos de CTE [16].	157
Figura 90 Aspecto de los 3 tipos de bloques: a) MSML, b) MS y c) MREF	159
Figura 91 Medición del flujo de calor y de las temperaturas (zonas fría y caliente) del muro MREF.	160
Figura 92 Medición del flujo de calor y de las temperaturas (zonas fría y caliente) del muro MS.	161
Figura 93 Medición del flujo de calor y de las temperaturas (zonas fría y caliente) del muro MSML.	161
Figura 94 Geometría real de una fila del muro visto desde la parte: a) superior e b) inferior.	170
Figura 95 a) Vista en planta del muro y b) secciones del bloque, con la geometría real (líneas segmentadas) y la representativa (líneas continuas).	170
Figura 96 Longitud “b” perpendicular al flujo de calor, y por un espesor “d” paralelo al flujo de calor.	171
Figura 97 Áreas reales y b’ del hueco de los bloques en la parte: a) superior y b) inferior.	171
Figura 98 Área real y b” del hueco formado por la unión de los bloques.	172
Figura 99 Geometría para el modelo de cálculo (mm).	172
Figura 100 Condiciones de contorno.	174
Figura 101 Aspecto global de la malla del modelo.	174
Figura 102 Representación de los elementos en el muro.	175
Figura 103 Elemento PLANE77 [19].	175

Figura 104 Elemento CONTA172 [19].	176
Figura 105 Elemento TARGE169 [19].	176
Figura 106 Elemento SURF151 [19].	177
Figura 107 Distribución de las temperaturas mínimas y máximas para los muros: a) MREF, b) MS y c) MSLM.	179
Figura 108 Aspecto global de la malla del modelo.	181
Figura 109 Representación de los elementos en el muro.	182
Figura 110 Distribución de las temperaturas para los muros con aislamiento: a) MREF, b) MS y c) MSLM.	183
Figura 111 Descripción general de la estructura de ReCiPe [34].	189
Figura 112 Límite del sistema: de la cuna al sitio.	192
Figura 113 Entradas y salidas del LCA.	193
Figura 114 Kg de emisiones de CO ₂ anuales de una empresa de prefabricados por la producción de bloques MREF, MS y MSLM.	198

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Series dimensionales (mm) [89].	63
Tabla 2 Propiedades características de los bloques de hormigón de áridos densos [90].	65
Tabla 3 Resistencia al fuego de los muros que delimitan sectores de incendio [89].	69
Tabla 4 Extracto de la Tabla F.2. del CTE DB-SI Resistencia al fuego de muros y tabiques de fábrica de bloques de hormigón de árido denso con cámara simple y sin revestir [89].	69
Tabla 5 Exigencias del CTE frente al ruido [89].	70
Tabla 6 Valores de U de cerramientos y particiones interiores de la envolvente térmica ($W/m^2.K$) [89].	71
Tabla 7 Transmitancia térmica máxima de cerramientos y particiones interiores de la envolvente térmica U ($W/m^2.K$) [89].	72
Tabla 8 Características del cemento Portland CEMII/A-M(V-L)42.5R [2].	90
Tabla 9 Densidad del cemento, árido fino, árido grueso, virutas, cenizas de madera y lodos de cal.	93
Tabla 10 Rango de tamaños del árido fino, árido grueso, virutas, cenizas de madera y lodos de cal.	94
Tabla 11 Composición química de los subproductos (% en masa)	97
Tabla 12 Contenido de C, H, N y S presente en los subproductos (% en masa).	99
Tabla 13 Diseño de las mezclas de hormigón para $1 m^3$	104
Tabla 14 Resumen de los ensayos realizados a los hormigones, normativas, tamaños y número de probetas ensayadas.	105
Tabla 15 Efecto del contenido de virutas, cenizas de madera y lodos de cal en la absorción por capilaridad del hormigón.	120
Tabla 16 Resistencia a compresión y desviación estándar de los diferentes tipos de hormigón a los 3, 7, 14 y 28 días.	121
Tabla 17 Conductividad térmica, difusividad térmica y calor específico por unidad de volumen, de los diferentes tipos de hormigones.	123
Tabla 18 Diseño de la mezcla de los bloques para $1 m^3$	131
Tabla 19 Resumen de los ensayos realizados a los bloques, normativas y número de muestras.	132
Tabla 20 Resistencia característica, factor de forma δ	141
Tabla 21 Resistencia normalizada, factor de conversión.	141
Tabla 22 Datos técnicos del mortero.	144
Tabla 23 Dimensiones.	150
Tabla 24 Desviaciones límites (mm) según la norma UNE-EN 771-3 [1].	150
Tabla 25 Categoría recomendada para cada tipo de bloque según la norma UNE 127771-3 [1].	150
Tabla 26 Espesor de las paredes exteriores y tabiquillos de los bloques.	151
Tabla 27 Desviación con respecto al paralelismo de los planos de las caras de apoyo de los bloques.	151
Tabla 28 Desviaciones admisibles en aristas y diagonales de las caras, en función de su longitud Según la norma de la Comunidad de Madrid [17].	151

Tabla 29	Planeidad de las caras vistas de los bloques.....	152
Tabla 30	Porcentaje de superficie de huecos de los bloques.....	152
Tabla 31	Extracto de la Tabla 4.1 Grupos de piezas del CTE DB-SE-F [18].	153
Tabla 32	Densidad de los bloques.....	153
Tabla 33	Resistencia a compresión media (f_m) y normalizada (f_b) de los bloques. .	156
Tabla 34	Ruido de fondo, de la fuente sonora y de las probetas.....	158
Tabla 35	Pérdida de transmisión de las probetas.....	158
Tabla 36	Resultados de emisividad de los bloques.	159
Tabla 37	Propiedades térmicas de los muros.	160
Tabla 38	Valores de U de 4 tipos de fachadas, incluyendo los muros bajo estudio.	163
Tabla 39	Conductividad térmica, difusividad térmica y calor específico de los materiales.	168
Tabla 40	Conductividad térmica de los materiales corregidos por efectos de humedad.	169
Tabla 41	Dimensiones de los dos tipos de huecos.....	172
Tabla 42	Caracterización del hueco del bloque y del hueco entre dos bloques.	173
Tabla 43	Resumen de la entrada del elemento SURF 151 [19].....	177
Tabla 44	Temperaturas obtenidas en el análisis térmico-numérico.....	178
Tabla 45	Temperaturas obtenidas con el ensayo experimental.	179
Tabla 46	Resistencia térmica, conductividad térmica y valor de U de los muros, obtenidos a partir de las simulaciones y el ensayo experimental (Caja caliente guardada).....	180
Tabla 47	Temperaturas obtenidas con el análisis térmico-numérico, para los muros de bloques rellenos con aislamiento.....	182
Tabla 48	Resistencia térmica, conductividad térmica y valor de U de los muros con y sin aislamiento, obtenidos a partir de las simulaciones.	183
Tabla 49	Impacto ambiental expresado por kg de cemento Portland producido.....	190
Tabla 50	Impacto ambiental expresado por kg de caliza producida.....	191
Tabla 51	Impacto ambiental expresado por kg de agua producida.	191
Tabla 52	Impacto ambiental expresado por kg de plastificante producido.	191
Tabla 53	Distancias recorridas por los materiales hasta la empresa de prefabricados..	195
Tabla 54	Distancias recorrida por los lodos de cal hasta el vertedero.....	195
Tabla 55	Datos de entrada para el LCA.	196
Tabla 56	Índice de impacto ambiental y kg de emisiones de CO ₂ para un bloque MREF, MS y MSLM.	197
Tabla 57	Precio unitario de los materiales empleados para la fabricación de los bloques.	199
Tabla 58	Coste de los materiales para fabricar 1m ³ de mezcla de MREF, MS y MSLM.	199

Capítulo 1

Introducción

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 (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 CO_2 aumenten a más de 800 ppm para finales de siglo [2].

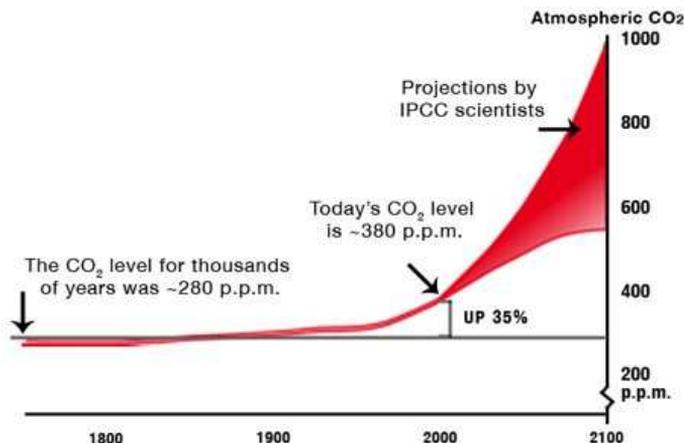


Figura 1 Concentraciones atmosféricas de CO_2 históricas y proyectadas [3].

En la Unión Europea (UE), la generación y consumo de energía son las principales fuentes de emisión de GHG, siendo este sector, en el año 2015, responsable de un 55% de las emisiones de GHG. La combustión de combustibles para el transporte (incluida la aviación internacional) es el segundo sector fuente más importante, con una contribución del 23%; la agricultura contribuye con un 10%, los procesos industriales y el uso de productos con un 8% y la gestión de residuos con un 3% [4] (véase la Figura 2).

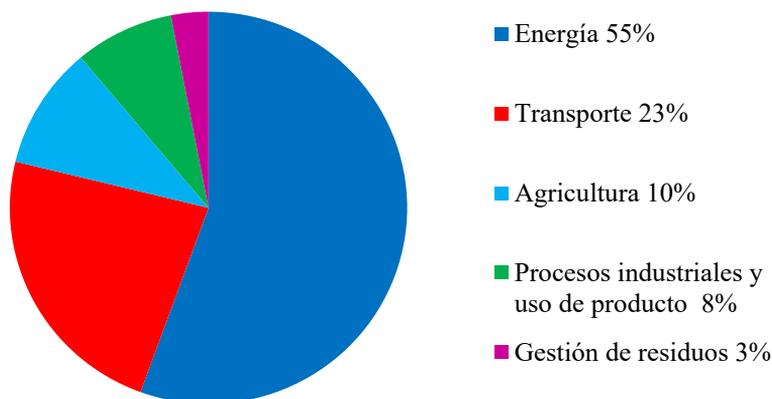


Figura 2 Emisiones de GHG por sector, en la UE para el año 2015 [4].

El sector industrial, comprende entre otros subsectores, el del hormigón, siendo este último un gran contribuyente a las emisiones anuales de GHG; tan solo en emisiones de CO₂ genera anualmente entre un 8-9% [5]. Esto se debe a que el hormigón es uno de los materiales más consumidos en el sector de la construcción y su fabricación requiere de un gran consumo de energía. En promedio, a nivel mundial se producen 12 mil millones de toneladas de hormigón al año, consumiendo aproximadamente 1.6 mil millones de toneladas de cemento Portland, 10 mil millones de toneladas de árido, y mil millones de toneladas de agua [6]. Tan solo en España, la producción de hormigón anual es de aproximadamente 39 millones de toneladas [7].

La fabricación de cemento Portland contribuye en gran medida a las altas emisiones de CO₂ generadas en la producción de hormigón, alrededor de un 5% [8]. Por cada tonelada de cemento producido, se emiten entre 0.62 y 0.97 toneladas de CO₂ [4]. Considerando que todo el proceso consume una cantidad considerable de energía y que aproximadamente 2.7 mil millones de toneladas de materia prima son necesarias anualmente para la fabricación de cemento, no es de sorprender que la fabricación de este material afecte negativamente al medio ambiente, llegando a tal punto que, en algunas regiones de países como Dubái, Singapur, España e India; ya se habla del agotamiento de los recursos pétreos. Además, la extracción extensiva de áridos está alterando físicamente los ríos y ecosistemas costeros, tal es el caso del lago Poyang en China (véase la Figura 3).



Figura 3 Antes y después del lago Poyang en China © NASA.

Debido a la creciente demanda de hormigón, se espera que las emisiones totales de CO_2 aumenten drásticamente en las próximas décadas [9]. En consecuencia, la industria del hormigón requiere una reestructuración fundamental, que permita disminuir estas emisiones.

El enfoque a largo plazo para reducir el impacto ambiental de cualquier material, es reducir su tasa de consumo. Sin embargo, la tasa de consumo del hormigón probablemente no se pueda reducir durante unos 50 años [6]. Por lo que a corto plazo, es preciso practicar la economía circular, con ello, será posible obtener un desarrollo de la industria del hormigón más sostenible. La práctica de la economía circular implica el uso eficaz de los recursos, p. ej. la fabricación de un producto a partir del reciclaje de subproductos industriales, los cuales sustituyan de manera parcial o total las materias primas vírgenes convencionales. Con ello, se lograría reducir el impacto ambiental de ambas industrias. Si este enfoque se proyectase en la producción de hormigón, se podrían obtener múltiples beneficios, como la disminución de las emisiones de GHG y el impacto de éste al medio ambiente.

En este contexto, se siguen abordando investigaciones con un enfoque sostenible, dirigidas a obtener vías que permitan reducir el alto impacto ambiental del hormigón, mediante la sustitución parcial de algunos de sus componentes, como el cemento o los áridos, por residuos o subproductos industriales tales como: cenizas de cáscara de arroz, desechos de cantera de caliza, cenizas de mazorca de maíz, cenizas de combustible, vidrio, polvo de neumático, cenizas de palma de aceite y escoria siderúrgica. Empleando esta técnica, se lograría valorizar estos subproductos, y a su vez, sería más sostenible la producción del hormigón. Además, se podría reducir el consumo de grandes cantidades de materia prima, teniendo en cuenta la gran escala de producción de hormigón a nivel mundial.

Si consideramos todas las actividades económicas y domésticas, la producción total de residuos de los Estados miembros de la UE asciende a 2.5 mil millones de toneladas anuales [10]. Solo en España, se generan más de 50 millones de toneladas anuales [11].

La estrategia de gestión de residuos más común es el vertido de residuos en vertederos. Sin embargo, las políticas para hacer frente al cambio climático y la conservación de recursos, tales como las planteadas en el Protocolo de Kioto en Copenhague [12], la Directiva 2008/98/EC [13] en la que se establecen requisitos estrictos para la reducción de los desechos, la gestión y el reciclaje, y la Directiva 1999/31/EC [14] en la que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero; sumado a la escasez y el alto coste de los vertederos, están obligando a las industrias a estudiar vías que permitan la desviación de los residuos del vertedero [15].

El presente estudio se ha centrado en el uso de subproductos del sector forestal y papelerero, específicamente en las virutas de madera, las cenizas de madera y los lodos de cal, ya que anualmente, se generan a nivel nacional, importantes cantidades de estos subproductos. Las virutas resultan del corte de la madera en los aserraderos para la fabricación de productos de madera, tales como, tablas y elementos estructurales. Las cenizas de madera son el residuo que se genera después de la combustión de la madera en las calderas de biomasa, las cuales suelen estar presentes en algunas industrias para la generación de energía térmica o eléctrica, y a su vez, permiten revalorizar parte de los subproductos generados por la industria de la madera. Por otra parte, los lodos de cal se obtienen durante la conversión de la madera en fibras de celulosa pura, mediante el proceso kraft para la fabricación de papel. Generalmente, la gestión del primero es interna; sin embargo, los otros dos subproductos se envían a vertederos. Cabe destacar que, estos tres subproductos industriales están clasificados como residuos no peligrosos en el Catálogo Europeo de Residuos [16] ya que no presentan sustancias peligrosas.

Las cantidades de virutas generadas en el proceso de aserrado se encuentran entre un 10 y un 13% por cada tronco aserrado [17]. Según un estudio realizado por la Federación Española de Envases de Madera y sus Componentes (FEDEMCO), en colaboración con la organización ambiental Ecoembes [18], en España se generaron en 2015, 301 mil toneladas de residuos de madera de la producción de envases, embalajes y palets de madera, de los cuales se recuperaron aproximadamente 235 mil toneladas (78%). Sin embargo, 66 mil toneladas (22%) fueron desechadas a los vertederos ese mismo año. Hoy en día, las virutas se usan principalmente en la fabricación de tableros de partículas o como biocombustible [19-21].

En cuanto a la generación de cenizas de madera, por cada 300 mil toneladas de madera quemada, se producen aproximadamente 3 mil toneladas de cenizas [22]. Aunque, no se encontraron datos que precisen las cantidades generadas de este subproducto a nivel mundial, se sabe que tan solo en Estados Unidos, la producción anual de las cenizas de madera es de 3 millones de toneladas [23]. Se espera que la producción en Europa aumente en los próximos años, como resultado del aumento de la producción de energía

y generación de calor mediante el uso de biomasa, en respuesta a los objetivos propuestos por la estrategia europea 20-20-20, mediante la Directiva 2009/28/CE [24], que se desarrolló para mitigar el cambio climático y mejorar la seguridad del suministro de energía.

De acuerdo con las predicciones de energía de la UE, se espera que la contribución de esta energía crezca a 236-255 megatoneladas equivalente de petróleo (Mtep) en 2030, lo cual se traduce en un aumento de hasta 210%, en su cuota de mercado actual [25]. La Figura 4 muestra la evolución del número de centrales de energía renovable de biomasa en España. Se puede apreciar que en 2015, había aproximadamente 160 mil centrales de biomasa. Un aumento de 25 puntos porcentuales en comparación con el año anterior, donde la cifra fue un poco más de -127 mil. Si desde 2008 a 2015, tan solo 8 años, se pasó de tener 10 mil centrales a superar las 160 mil, es evidente que la evolución y el aumento de la biomasa en el país es un hecho claramente visible.

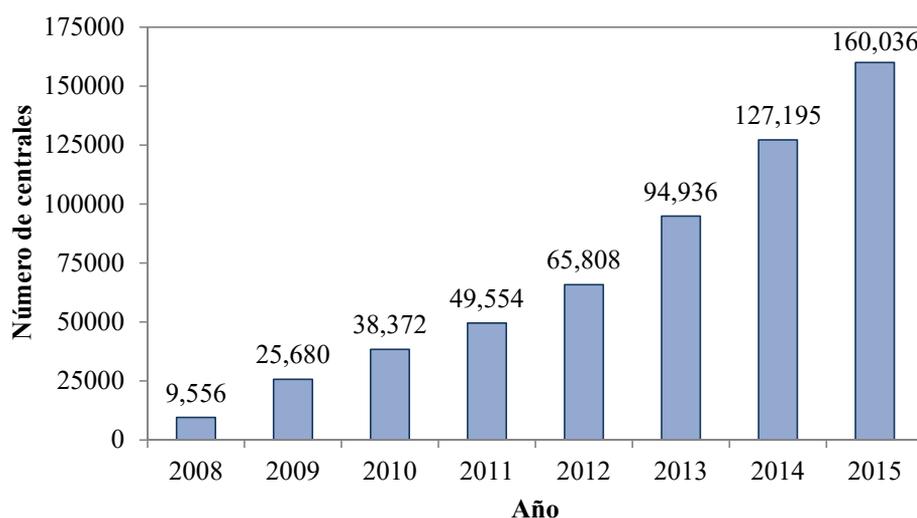


Figura 4 Evolución del número de centrales de biomasa en España [25].

Hoy en día, la mayor parte de las cenizas de biomasa generadas en las plantas térmicas se vierte en vertederos o se recicla en campos agrícolas abiertos [26-28]; no obstante, esta última medida de valorización, está restringido por el coste que supone llevar y esparcirlas por el campo. Otras formas de explotar este subproducto incluyen su uso en ladrillos de arcilla y productos de cerámica [29-32].

Por otra parte, los lodos de cal tienen una producción estimada de desechos de 0.5 m^3 por tonelada de pulpa [33]. El principal productor mundial de papel, China, produjo más de 10 millones de toneladas en 2011 [34], mientras que en Europa la producción de celulosa en 2016 fue de 37.2 millones de toneladas, y de papel y cartón de 90.9 millones de toneladas. Tan solo en España existen 50 empresas papelera ubicadas en diferentes partes del país (véase la Figura 5), las cuales produjeron aproximadamente 1.6 millones

de toneladas de celulosa y 6.2 millones de toneladas de papel y cartón, en 2016 [35]. Dado que la demanda mundial de papel sigue creciendo, la producción de lodos de cal aumentará.



Figura 5 Ubicación geográfica de los centros de producción de papel en España [35].

Hasta hace poco, en España, grandes cantidades de este subproducto se utilizaban como material aditivo en el sector de fabricación relacionado con el cemento [36,37]. Sin embargo, la producción de cemento ha caído con la reciente crisis en la industria de la construcción, lo que ha obligado a las empresas papeleras a deshacerse del lodo de cal en los vertederos. Otras aplicaciones de los lodos de cal incluyen su uso como material calcinado para producir ladrillos, su uso en reemplazo de la cal para producir elementos prefabricados de hormigón curado en autoclave y para la mejora de la tierra en la agricultura [34,38-41].

Otra problemática que afecta a la sociedad actual a nivel mundial, es la pobreza energética. Básicamente, es una situación en la que las personas no son capaces de pagar los servicios básicos de energía en sus hogares, generados principalmente por el consumo de calefacción o refrigeración; debido a los bajos ingresos familiares, a los altos costos de energía y a la baja eficiencia energética de las viviendas.

Los indicadores individuales relacionados con la pobreza energética en la Encuesta de la Unión Europea (UE) sobre Ingresos y Condiciones de Vida del año 2016, muestran que el 9.4% de la población de la UE no pudo mantener su hogar a una temperatura de confort en 2015; 9.1% acumuló atrasos en sus facturas de electricidad y 15.2% son casos de viviendas energéticamente deficientes [42]. En España, se ha constatado que en 2016, el 11% de los hogares (equivalentes a 5.1 millones de personas) se encontraban en una situación de pobreza energética [43].

Desde la constitución de la UE, se ha prestado considerable atención al papel de los consumidores en el sector de la energía. Los Estados miembros se enfrentan cada vez más a problemas de pobreza energética. En vista de esto, la estrategia Europa 2020 convierte la reducción de la pobreza en uno de los principales objetivos de la política social de la UE en la presente década, con el objetivo de reducir en 20 millones el

número de personas que viven en la pobreza y la exclusión social [44]. Es bien sabido, que la pobreza energética tiene graves repercusiones en la salud de los ciudadanos, incluido un mayor número de muertes invernales, efectos perjudiciales en la salud mental y problemas respiratorios y circulatorios [45].

Una forma de abordar el problema de la pobreza energética es llevar a cabo una renovación energética profunda de las viviendas para reducir la demanda térmica. Para ello, se deben llevar a cabo medidas de restauración aplicables a la envolvente del edificio, que involucren el uso de materiales con buenas propiedades térmicas. Esta idea que parece tan simple, no está completamente arraigada en España y es la clave para entender la eficiencia energética, así lo demuestran las actuales normativas del Código Técnico de la Edificación (CTE) [46], las cuales son cada vez más exigentes, en cuanto a requisitos térmicos se refiere, para proyectos de nueva construcción.

Por todo esto, actualmente hay una búsqueda continua de la mejora de las propiedades térmicas de los materiales que componen la envolvente de los edificios. Sin embargo, estos esfuerzos deben ir acompañados de un enfoque sostenible.

Uno de los elementos más empleados en la construcción de la fachada de los edificios y sus particiones interiores son los bloques de hormigón. Su uso presenta muchas ventajas tales como: economía, durabilidad, gran flexibilidad de planificación y composición espacial. Además, la construcción de muros de fábrica puede cumplir diversas funciones, incluidas la estructural, como el aislamiento acústico y la protección contra incendios [47]. Sin embargo, estos elementos presentan algunas debilidades en comparación con otros materiales de fachadas, tales como un alto impacto ambiental y baja resistencia térmica.

Varios estudios se han llevado a cabo sobre este tema, los cuales han producido bloques respetuosos con el medio ambiente, y en algunos casos se ha logrado mejorar alguna de sus propiedades, lo cual es difícil de conseguir con el uso de los componentes convencionales del hormigón. Además, todas las investigaciones anteriores coinciden en que la incorporación de subproductos en la mezcla reduce los costos de fabricación del hormigón.

Recientes esfuerzos también se han llevado a cabo en líneas similares; no obstante, estas se han centrado en mayor medida en optimizar las propiedades térmicas de los bloques, por medio del uso de subproductos; tales como: polvo de neumáticos, cenizas de fondo, fibras de cáñamo, cenizas volantes y cenizas de lodos, como parte de sus componentes. Sin embargo, la complejidad radica en satisfacer al mismo tiempo, los requisitos mecánicos y térmicos, ya que por lo general para obtener una baja conductividad térmica se requiere la presencia de huecos de aire en el material, mientras que para obtener una alta resistencia mecánica se requiere que este sea lo más denso posible [48,49].

1.3 Objetivos

El objetivo principal de esta investigación es reducir el impacto ambiental y optimizar las propiedades térmicas de los bloques de hormigón tradicionales, a través de la reutilización de subproductos de la industria de la madera. Este enfoque, pretende contribuir con la promoción del uso eficiente de los recursos y reemplazar economías lineales por circulares, en las que los materiales de desecho o subproductos se reutilizan para generar nuevos productos.

Para acometer el objetivo principal, se deben llevar a cabo una serie de objetivos parciales, que se detallan de forma sucinta a continuación:

(1) Caracterizar las virutas, las cenizas de madera y los lodos de cal, mediante un análisis físico, químico y mineralógico; con el objeto de identificar la presencia de componentes perjudiciales para su uso en el hormigón, y con ello, prever algunas tendencias en su comportamiento.

(2) Investigar las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de mezclas de hormigón de baja resistencia destinadas a la fabricación de bloques, incorporando virutas en reemplazo parcial de la arena, y cenizas de madera y lodos de cal en reemplazo parcial del cemento. Para cumplir este propósito, se varían las proporciones de reemplazo y se llevan a cabo ensayos de asentamiento, densidad, absorción, porosidad, absorción por capilaridad, resistencia a compresión, conductividad térmica y difusividad térmica y calor específico.

(3) Fabricar bloques de hormigón más respetuosos con el medio ambiente y con mejor resistencia térmica que los bloques tradicionales e investigar sus propiedades morfológicas, físicas, mecánicas, acústicas, radiativas y térmicas. El desafío es mejorar el comportamiento térmico de las unidades, sin reducir en gran medida la resistencia a compresión, ya que para el hormigón; una alta resistencia térmica requiere la presencia de huecos, mientras que para una alta resistencia mecánica es necesario que sea lo menos poroso posible.

(4) Determinar el nivel de fiabilidad del método de análisis numérico para la determinación de las propiedades térmicas, a partir de la comparación de simulaciones bidimensionales (2-D) de los muros por el Método de Elementos Finitos (FEM, por sus siglas en inglés, *Finite Element Method*) y los resultados obtenidos en el ensayo experimental. Asimismo, se pretende evaluar térmicamente los muros con una solución alternativa, que consiste en la integración de aislamiento en los huecos, realizando de igual manera, simulaciones en 2-D, mediante el FEM.

(5) Cuantificar mediante un Análisis del Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés, *Life Cycle Assessment*) de la cuna al sitio (cradle-to-site), la reducción del impacto ambiental que se obtiene al sustituir parcialmente algunos de los componentes tradicionales del bloque de hormigón por subproductos.

(6) Realizar un análisis de costes, a fin de determinar los ahorros involucrados en la producción de los bloques con subproductos, tanto para las empresas de prefabricados como para las empresas que generan los residuos.

1.4 Estructura de la Tesis

Este trabajo se ha desarrollado a lo largo de ocho capítulos. A continuación se describe brevemente como se ha estructurado el conjunto de la Tesis por capítulos:

Capítulo 1 Introducción

Se analiza la problemática asociada a la investigación, por lo que se abordan temas claves, tales como la implicación de la industria del hormigón en la generación GHG, la generación de subproductos industriales y la pobreza energética. Asimismo, se definen los objetivos y se detalla la estructura de la Tesis. Finalmente, se expone la importancia de este estudio y su contribución al área del conocimiento.

Capítulo 2 Estado del arte

Se construye una base teórica para la investigación, al revisar la literatura y los esfuerzos de investigación previos sobre los temas más relevantes asociados con los objetivos planteados, con lo cual se pretende definir las certezas e incertidumbres de partida. Así pues, se tratan los modelos económicos lineal y circular, el impacto ambiental que genera la producción de hormigón, se realiza una revisión profunda de los escenarios estudiados hasta la fecha, referentes a la incorporación de virutas, cenizas de madera y lodos de cal en los materiales cementicios; se analizan los conceptos básicos concernientes a los bloques, su impacto ambiental, y los requisitos exigidos por la normativa Europea y estatal, se indaga en la evolución histórica de la eficiencia energética y se interpretan las diferentes normativas para el cálculo y medición de comportamiento térmico de los materiales. Finalmente, se comentan los conceptos fundamentales para la realización de un LCA.

Capítulo 3 Materiales, fabricación y caracterización de las mezclas de hormigón

Sobre la base de la revisión de la literatura en el capítulo 2, el capítulo 3 describe la caracterización física, química y mineralógica de los subproductos empleados, las proporciones utilizadas para la elaboración de 10 tipos de mezclas de hormigón, con y sin incorporación parcial de subproductos, y la metodología empleada para caracterizar las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de los distintos tipos de hormigón, mediante los ensayos de asentamiento, densidad, absorción, porosidad, absorción por capilaridad, resistencia a compresión, conductividad térmica, difusividad térmica y calor específico.

Seguidamente, se tratan y discuten los resultados obtenidos en los ensayos experimentales, así como también, se comparan dichos resultados con los requisitos de las normativas vigentes. Con ello, se pretende conocer si es posible emplear estos tipos

Capítulo 1

de hormigones, en la fabricación de bloques. Por último, se presentan las conclusiones obtenidas a partir del análisis de los resultados.

Capítulo 4 Fabricación y comportamiento de los bloques de hormigón

En este capítulo, se describen las proporciones empleadas y la metodología seguida en el proceso de fabricación y caracterización de las propiedades morfológicas, físicas, mecánicas, acústicas, radiativas y térmicas de los bloques. Esta caracterización incluye los ensayos de longitud, anchura y altura, espesor de las paredes exteriores y de los tabiques que separan los alvéolos interiores, paralelismo de los planos de las caras de apoyo, planeidad de las caras vistas, porcentaje de superficie de huecos, densidad, absorción, absorción por capilaridad, resistencia a compresión, comportamiento acústico, emisividad y comportamiento térmico.

Además, se analizan los resultados obtenidos, así como también, se contrastan los resultados con los requisitos de los estándares actuales, con el propósito de conocer si los bloques con subproductos cumplen con dichos requisitos. Finalmente, se aportan las conclusiones obtenidas a partir del análisis de los resultados.

Capítulo 5 Análisis térmico-numérico de los muros por el FEM

Se presentan los detalles de la simulación en 2-D de muros de bloques, mediante el FEM, llevada a cabo con la ayuda del software ANSYS. Los resultados se comparan con los obtenidos mediante el ensayo experimental, detallado en el capítulo 4, con la finalidad de validar el procedimiento de análisis térmico-numérico. Asimismo, se evalúa como vía alternativa, el comportamiento térmico de muros con bloques huecos rellenos de aislamiento térmico. Finalmente, se presentan una serie de conclusiones basadas en los resultados obtenidos.

Capítulo 6 Sostenibilidad

En este capítulo, se analizan los beneficios ambientales que conllevaría la incorporación de subproductos en los bloques, mediante la realización de un LCA de la cuna al sitio (cradle-to-site), de acuerdo con lo establecido en la norma EN ISO 14040, utilizando la herramienta de software Eco-it. En cuanto a los beneficios económicos, se calcula mediante un análisis de costes el ahorro que supondría, tanto para las empresas de prefabricados de bloques, como para las empresas del sector de la madera y del papel, el empleo de estos subproductos en la fabricación de bloques. Al final de este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas.

Capítulo 7 Conclusiones y futuras líneas de investigación

Se presentan una serie de conclusiones generales, obtenidas a lo largo del desarrollo de la presente Tesis Doctoral. Además, se proponen futuras líneas de investigación que permitan complementar el conocimiento generado hasta el momento, en aspectos

relacionados con el uso de virutas, las cenizas de madera y los lodos de cal para la fabricación de hormigón o bloques.

Capítulo 8 Referencias

En este capítulo, se presenta toda la bibliografía consultada a lo largo del desarrollo de este trabajo.

1.5 Importancia del estudio

Desde un punto de vista medioambiental, el éxito de esta investigación puede contribuir a reducir el impacto ambiental de los bloques de hormigón y a generar soluciones alternativas de gestión de los subproductos de la industria de la madera, lo que a su vez, ayudaría a la preservación del medioambiente, ya que de este modo, disminuiría la contaminación, asociada a la eliminación inadecuada de estos subproductos. Así mismo, se lograría reducir el consumo de energía en los edificios, lo que permitiría disminuir las emisiones de GHG y la contaminación producida por la combustión de combustibles fósiles. Además, este estudio ofrece una solución sostenible a los problemas actuales, asociados a la extracción de materias primas naturales, tales como el consumo de energía en el proceso de extracción y producción, y su escasez.

En cuanto al aspecto económico, la puesta en obra de estos bloques, más amigables con el medio ambiente, ofrecería una reducción del coste de estos elementos prefabricados, ya que se reduciría el consumo de cemento y árido fino, y el coste de los subproductos es menor o nulo. Adicionalmente, se reducirían los costes relacionados con el consumo de energía, por el uso de calefacción y refrigeración, ya que la fachada del edificio tendría bloques con mayor resistencia térmica, en comparación con el convencional. Esto a su vez, repercutiría en los costes asociados al aislamiento de la fachada, puesto que se podría emplear un aislamiento de menor espesor. Por otra parte, los costes relacionados con el material de la estructura del edificio se reducirían, ya que los elementos estructurales (vigas, pilares y cimentaciones) serían de menor tamaño, debido a que los bloques con subproductos presentan menor peso, con lo cual, la carga muerta a soportar sería menor.

Desde un punto de vista social, el uso de estos bloques, generaría un mayor confort térmico a los ocupantes del edificio, lo que a su vez, reduciría los altos índices de pobreza energética.

La metodología desarrollada en este estudio servirá en el futuro, como base para la producción de bloques más amigables con el medio ambiente, fabricados con la incorporación de subproductos.

Capítulo 2

Estado del arte

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.

Las raíces intelectuales de la economía circular provienen del economista estadounidense Kenneth E. Boulding. En su libro titulado “La economía de la nave espacial venidera”, publicado en 1966, reconoce los desafíos que la sociedad podría enfrentar en el futuro en cuanto a la escasez de recursos y a la necesidad de encontrar su lugar, en un sistema ecológico cíclico [51]. Sin embargo, la primera vez que se empleó el término "economía circular" fue en un libro publicado por Pearce y Turner en el año 1990, titulado "Economía de los recursos naturales y el medio ambiente", en la cual se analizaba el sistema cerrado de las interacciones entre la economía y el medio ambiente [52].

Actualmente la máxima promotora de la economía circular es la Fundación Ellen MacArthur. Desde su creación en 2010, la Fundación se ha convertido en un líder de pensamiento global, al posicionar la economía circular en las agendas de los responsables de empresas, gobiernos y académicos. Su primer informe publicado está basado en varias escuelas del pensamiento, tales como: Cradle to cradle, Ecología industrial, Economía azul y Biomimetismo e incluye uno de los diagramas más utilizados de la economía circular, el cual descansa sobre 3 principios, el primero (ubicado en la parte superior de la Figura 6) consiste en preservar y optimizar el capital natural controlando las reservas finitas y equilibrando los flujos de recursos renovables; el segundo (ubicado en la parte central de la Figura 6) radica en optimizar los rendimientos de los recursos, y el tercero (ubicado en la parte de abajo de la Figura 6) consiste en promover la eficacia de los sistemas detectando y eliminando del diseño, los factores externos negativos [53].

En los últimos años, la economía circular está ganando impulso en Europa. La Comisión Europea (CE) ha adoptado nuevas medidas para ayudar a las empresas y los consumidores europeos en la transición a una economía más sólida y circular, donde se utilicen los recursos de manera más sostenible y se contribuya a "cerrar el círculo" de los ciclos de vida de los productos a través de un mayor reciclado y reutilización. Dichas medidas están especialmente enfocadas en los residuos urbanos e industriales, con las cuales, se pretende lograr un mejor equilibrio y armonía entre la economía, el medio ambiente y la sociedad [54].

Algunas empresas han decidido apostar por este tipo de economía; aunque es obvio que, poner en marcha la economía circular requiere modificar todos los ciclos de vida de los productos y sus componentes, para que estos sigan cumpliendo las mismas funciones, su aplicación genera una ventaja competitiva en el contexto de la globalización, así como también, riqueza y empleo en todo el conjunto del territorio. Sin embargo, en la actualidad son muchas las empresas que aun emplean el modelo económico lineal, tal es el caso de las empresas dedicadas a la producción de hormigón, éstas deben apostar por la economía circular para ser más competitiva y adaptarse a las exigencias del presente,

para ello, tendrán que desarrollar modelos de negocio que no estén sometidos a las limitaciones del pensamiento lineal. Los nuevos modelos no pueden limitarse a ser menos malos, sino más bien a aprovechar el crecimiento, para impulsar cambios radicalmente positivos.

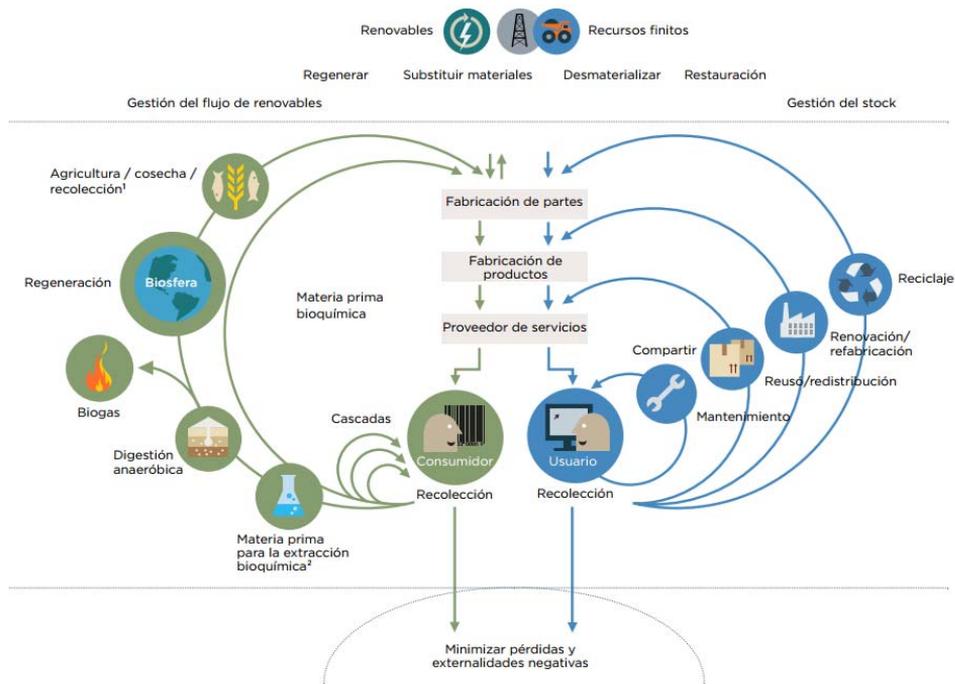


Figura 6 Esquema de una economía circular [53].

2.3 Impacto ambiental del hormigón

A continuación, se describe el impacto ambiental asociado al ciclo de vida del hormigón:

2.3.1 Componentes del hormigón

2.3.1.1 Cemento

El cemento es un conglomerante que se fabrica a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas y posteriormente molidas, que tiene la propiedad de endurecerse después de ponerse en contacto con el agua. El producto resultante de la molienda de estas rocas se introduce en un horno a altas temperaturas (de 1500 a 1600°C) para someterse a un proceso llamado “sinterización”. Mediante la sinterización el polvo se convierte en una masa por calentamiento sin llegar a fundir, este producto es llamado Clinker. Después de que éste sale del horno, entra en varias etapas de enfriamiento a fin de que pase a temperaturas manejables. Finalmente, al Clinker se le añaden yeso y piedra caliza en pequeñas cantidades, obteniendo lo que se conoce como cemento.

El proceso de fabricación consta de 6 etapas: obtención de las materias primas, preparación de las materias primas, molienda del crudo, cocción en el horno rotativo, molienda del clínker, almacenamiento y expedición [55]. El diagrama de flujo del proceso general de fabricación de cemento y las entradas y emisiones asociadas durante las diferentes etapas de producción se muestran en la Figura 7.

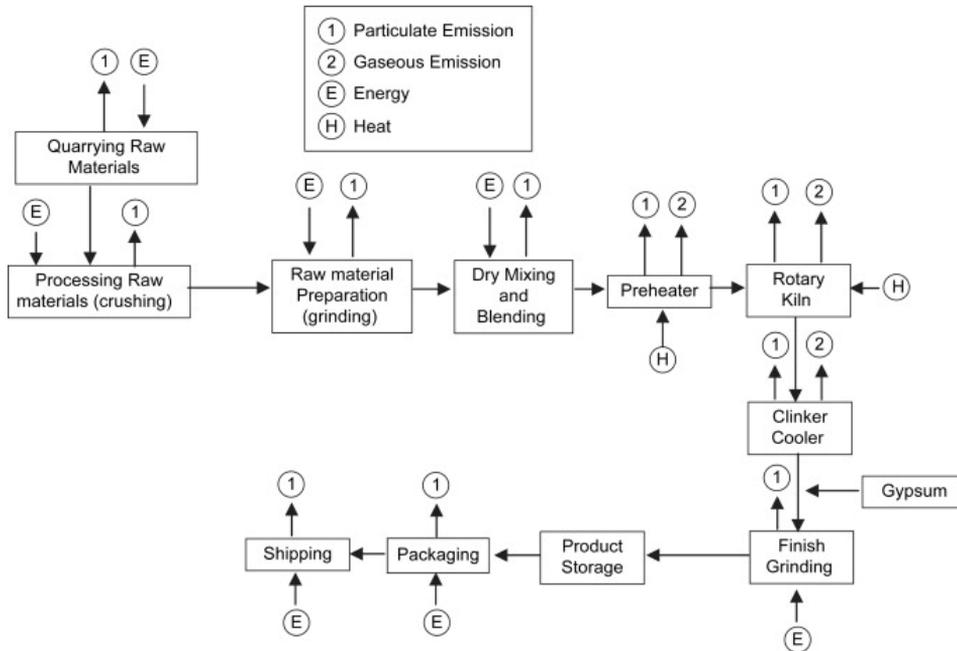


Figura 7 Diagrama de flujo de proceso para la fabricación de cemento. [56].

Los impactos ambientales de la fabricación de cemento pueden ocurrir a escala global, regional o local [57]; éstas se detallan a continuación:

La escala global, consiste en la suma del CO₂ emitido durante el proceso de calcinación (materia prima CO₂) y el CO₂ asociado al uso de energía. Este último, puede ser CO₂ de energía directa o indirecta. Las emisiones indirectas de energía, comprenden las emisiones de CO₂ asociadas con la generación de energía eléctrica para operar la planta de cemento, mientras que las emisiones de energía directa, se asocian con la combustión de combustible en el horno de cemento.

La Figura 8 muestra las emisiones de CO₂ en porcentajes generadas por el consumo de energías en la producción del cemento Portland, determinado a partir de un Análisis del Ciclo de Vida de la Cuna a la puerta. Como se puede observar, la mayor aportación de CO₂ debido al consumo de energías se produce en la etapa de cocción en el horno rotativo.

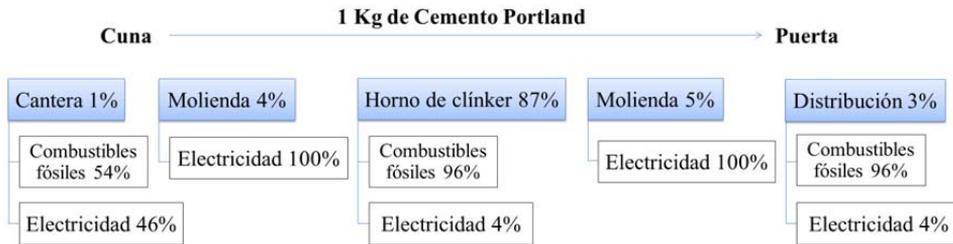


Figura 8 Principales fuentes de emisión de CO₂, con respecto al consumo de energías en la producción del Cemento Portland (Límite: de la cuna a la puerta) [58].

En esta escala, el mayor potencial para reducir las emisiones de CO₂ generadas por el uso de combustibles convencionales basados en el carbono, radica en reemplazarlo por combustibles alternativos con bajos contenidos de carbono. Los tipos más comunes son la biomasa de carbono neutral y los neumáticos fuera de uso [59].

Otra vía para reducir las emisiones de la fabricación de cemento es el reemplazo parcial del clínker del cemento Portland por puzolanas (cenizas volantes, humo de sílice, entre otras) o materiales cementantes suplementarios (escorias). En la actualidad, es una práctica común el reemplazo parcial del clínker por éstas adiciones. En Europa, los CEM II, III, IV y V se realizan de este modo. Como las adiciones están presentes en el rango de 5-30% (por peso) del cemento, sus impactos en comparación con CEM I (que consiste en 95-100% de clínker) son menores. La incorporación de estos materiales al cemento reduce el agotamiento de los recursos primarios, el consumo de energía, la gestión de los residuos (en el caso de que se traten de subproductos) y sus impactos asociados.

En cuanto a los impactos ambientales regionales, se incluyen las emisiones de SO₂ y NO_x, los cuales contribuyen a la lluvia ácida. La mayoría del SO₂ emitido se deriva de la combustión de los combustibles fósiles y del procesamiento de las materias primas en los hornos. Estos se originan debido al uso de combustible fósil durante la producción de clínker y al consumo de energía en toda la cadena del proceso.

Con respecto a la escala local, las emisiones de polvo del horno de cemento, son las que más contribuyen al impacto local. El tamaño de este polvo (0.05-5 μm) se encuentra dentro del rango de tamaño de partículas respirables (menor a 10μ) [60]. De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) [61], estas partículas finas de materia prima, no quemadas y parcialmente quemadas, presentes en los gases de combustión del horno de cemento, están clasificadas como un posible residuo peligroso, debido a los peligros ambientales y para la salud humana.

2.3.1.2 Áridos

Los áridos generalmente se obtienen mediante técnicas de minería, pueden presentar formas redondeadas, cuando se trata de materiales aluviales o formas angulosas en el resto de los casos y donde existe machaqueo. Por lo general, se separan en varias

fracciones por su tamaño, en algunos casos es necesario un proceso de lavado y secado, por lo que una modesta cantidad de energía está involucrada en todos estos procesos.

En muchas zonas del planeta, los depósitos de áridos vírgenes ya se han agotado, y transportar áridos a largas distancias puede ser insostenible. Una vía alternativa, es el empleo de una fuente gratuita o de bajo costo, tales como son los subproductos o áridos reciclados que se obtienen en el entorno local.

Los principales desechos que se generan en el proceso de producción de los áridos, son el polvo y el agua; no obstante, el polvo suele usarse otros procesos, como por ejemplo para la fabricación de hormigón autocompactante. Si no es el caso, éste se desecha en vertederos.

La caliza, que es el árido bajo estudio, presenta una serie de problemas ambientales asociados con la producción, tales como: ruidos y vibraciones generados en el procesamiento de la piedra de cantera, gran consumo de energía asociada al proceso de obtención de los áridos gruesos y finos [62], y la contaminación del agua superficial por el arrastre por escorrentía de los sólidos en suspensión.

2.3.1.3 Agua

La industria del hormigón también emplea grandes cantidades de agua dulce, tan solo el requerimiento anual de agua para la mezcla es de aproximadamente 1 billón de litros [63]. El agua utilizada para la fabricación de hormigón suele ser agua corriente, sin procesamiento posterior. Esto se debe al hecho de que ésta no contiene sustancias orgánicas, cloruros o álcalis, que puedan generar inconvenientes en la durabilidad del hormigón.

Las demandas de agua dulce a nivel mundial están provocando el agotamiento de los recursos hídricos, siendo estos frecuentemente extraídos de tal forma que comprometen el bienestar de los ecosistemas de agua dulce [64]. Esta problemática se acentúa en zonas donde el agua ya no es suficiente para las necesidades básicas. Una vía para disminuir la demanda de agua en la producción de hormigón, es sustituir el agua de la red de abastecimiento por aguas residuales industriales o agua no potable, siempre que su calidad se verifique previamente mediante ensayos de laboratorio. Otra alternativa, puede ser emplear una baja relación w/c, ya que de esta manera será menor el contenido de agua empleada.

2.3.1.4 Aditivos

A diferencia de otros componentes del hormigón, las sustancias químicas de los aditivos, son una preocupación por sus propiedades tóxicas. De los diferentes tipos de aditivos, los plastificantes y superplastificantes son los más comúnmente utilizados, representando aproximadamente el 80% del consumo de aditivos europeos [65].

Se requieren aproximadamente 3.24kg de superplastificante para 1m³ de hormigón de 35MPa (densidad de 2370kg/m³), lo que representa aproximadamente 0.33toneladas de uso de plastificante al año en Europa, con impactos ambientales potencialmente considerables [59].

Según Van den Heede [57], la cantidad de CO₂ (7.20E-01 kgCO₂-eq) emitida para la producción de 1 kg de superplastificante es solo un poco menor que las emisiones de CO₂ asociadas con la producción de cemento (8.42E-01 kgCO₂-eq). Sin embargo, como la cantidad de superplastificante utilizado en el hormigón es casi insignificante (aproximadamente un 1%), en comparación con su contenido de cemento, estas emisiones apenas contribuyen al impacto ambiental general.

2.3.2 Transporte

Las operaciones de transporte en la industria del hormigón, involucran la movilización de grandes cantidades de materia prima para su producción, y una vez fabricado el hormigón, tanto si está en estado fresco o endurecido (como elemento prefabricado), se transporta a la obra. Ambos recorridos, consumen cantidades considerables de combustible, generando un gran impacto ambiental.

2.3.3 Fase operacional

En la fabricación del hormigón, la calidad del agua superficial se puede ver afectada, debido a la red de arrastre por escorrentía de sólidos en suspensión. Esta circunstancia, podría ser particularmente significativa durante la fase operativa, ya que si la escorrentía arrastra partículas de cemento u hormigón puede traer como consecuencia un fuerte aumento en el pH de las aguas receptoras. A fin de prevenir que esto ocurra, se recomienda adaptar una zona en donde se desarrollen todas las operaciones que puedan generar derrames accidentales. En esta zona la superficie debe ser impermeable y deben existir conducciones de drenaje que permitan canalizar estas derramas.

Desde el punto de vista de la contaminación del aire, existen emisiones difusas de polvo generadas como resultado del trabajo llevado a cabo en planta. Incluso si las tolvas de áridos y cementos generalmente están cubiertas, se recomienda la implementación de diversas medidas destinadas a la prevención y minimización de las emisiones de polvo, tales como la colocación de filtros de mangas, humedecido de viales y soleras, entre otros.

La producción de hormigón también genera un aumento en el nivel de ruido del área donde se produce. En la fase operativa, las acciones que pueden tener impacto se derivan, por un lado, del tráfico de vehículos pesados (camiones para el transporte de los materiales que componen la mezcla y del hormigón una vez fabricado) y, por otro lado, del funcionamiento de la planta de hormigón y sus elementos asociados (carga y descarga de áridos, cintas transportadoras, vibradores neumáticos, amasadoras, etc.). Según un estudio medioambiental llevado a cabo por una empresa de prefabricados [66] el nivel de ruido generado por la actividad de fabricación de hormigón en una planta es

de alrededor de 67dB, medido a 10m de la planta. Se debe llevar a cabo un buen mantenimiento del equipo y mediciones sonométricas periódicas, para continuar cumpliendo a lo largo del tiempo, los límites de emisión de ruido establecidos por las reglamentaciones aplicables.

2.3.4 Residuos producidos

Entre los residuos generados en el proceso de fabricación de hormigón se encuentran: el hormigón residual que se queda en la mezcladora, moldes y sistemas de transporte; los lodos generados en la limpieza de la amasadora y que no pueden reducirse, ya que el proceso de limpieza no puede ser reemplazado, y las probetas ensayadas en laboratorio para el control de calidad del hormigón, que tampoco pueden reducirse, ya que el número de probetas a ensayar está establecido por la normativa. Por otro lado, el uso de componentes prefabricados de hormigón en lugar de hormigón vertido, ofrece las mayores ventajas en términos de generación de residuos [67], debido al seguimiento continuo del proceso productivo en fábrica, con el que se busca entre otras cosas, generar la menor cantidad de residuos.

2.3.5 Durabilidad y predicción de la vida útil

Obviamente, se pueden disminuir las emisiones de GHG que genera la fabricación y puesta en obra de los productos de hormigón, si estos fuesen mucho más duraderos, p. ej., la eficiencia de los recursos de la industria del hormigón aumentaría, si la vida útil de la mayoría de las estructuras construidas, de hoy en día, fueran de más de 100 años. Algunos de los casos más comunes de degradación del hormigón están asociados con la corrosión del acero de refuerzo, la carbonatación y el ataque por sulfatos. A fin de evitar estos inconvenientes, es esencial analizar los materiales de la mezcla, conocer el uso previsto del hormigón y cumplir con los requisitos de las normativas vigentes (la EHE en España), para realizar un diseño eficiente de la mezcla.

2.4 Incorporación de subproductos en las mezclas cementicias

La incorporación de subproductos como parte de los componentes del hormigón ha sido ampliamente estudiada; sin embargo, actualmente la norma Española EHE-08 [68] solo permite el empleo de cementos con adiciones, el uso de la fracción gruesa de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) del hormigón, hasta un límite máximo de 20% de sustitución del árido grueso convencional, para la producción de hormigón estructural, y el uso de la fracción gruesa de los RCD del hormigón hasta un 100% de sustitución del árido grueso convencional, para la producción de hormigón no estructural. Sin embargo, debido a las actuales preocupaciones ambientales y al aumento de la producción de residuos y subproductos, en el futuro se adoptarán aquellos materiales de desechos o productos secundarios que cumplan ciertos requisitos, quizás menos restrictivos que los actuales, para ser empleados en el hormigón; por lo que es fundamental continuar indagando en el efecto que tienen estos residuos en el hormigón.

Durante el último siglo y hasta la actualidad, se ha investigado la posibilidad de incorporar, entre otros subproductos, virutas de madera, cenizas de madera y lodos de cal a las mezclas de mortero y hormigón. A continuación se presenta un resumen de las investigaciones más relevantes sobre estos tres subproductos.

2.4.1 Virutas de madera

Las virutas de madera son partículas muy finas que se generan como subproducto al cortar, desbastar, perforar, taladrar o lijar madera con una sierra u otras herramientas, por los fabricantes de productos de madera y muebles (véase la Figura 9). Este producto secundario se puede obtener de diferentes fuentes, tales como: la industria del embalaje de madera y la industria del procesamiento de madera. La calidad de este subproducto varía significativamente dependiendo de varios factores, como la especie y edad de la madera, el método de almacenamiento de los troncos, incluida la temperatura, la humedad y la estación, la técnica de aserrado y el tamaño de partícula de la viruta [60,69,70].



Figura 9 Virutas de madera.

La principal finalidad de incorporar virutas en la mezcla de hormigón es producir un compuesto que disfrute de los atributos deseables del hormigón y de algunos de los méritos inherentes de la madera. Con ello, se consigue producir un material más ligero y con mejores cualidades aislantes que el hormigón convencional. Los compuestos de madera aglutinados, tienen el potencial de proporcionar una amplia gama de productos para aplicaciones de construcción.

Los compuestos de madera aglutinados se pueden dividir en dos grupos: un grupo de compuestos en los que la madera (como fibras, serrín, virutas o partículas) se incorpora como árido en el hormigón, y un segundo grupo, de materiales compuestos en los que el cemento (u otro aglutinante) actúa puramente como un aglutinante, tales como los tableros de partículas aglomeradas con cemento, tableros de cemento de lana de madera, tableros de fibra aglomerada con cemento, etc. Actualmente, estos materiales se utilizan ampliamente en muchos países desarrollados, ya que ofrecen una serie de beneficios térmicos, difícil de encontrar en algunos de los materiales de construcción convencionales.

El hormigón con virutas de madera, que es el grupo que abarca este estudio, proporciona un material compuesto que contiene, alrededor de un 30-70% en peso de madera y un 70-30% de aglutinante mineral; puede utilizarse en muchas aplicaciones, especialmente aquellas donde se permita el uso de hormigón no-estructural y se requiera que éste material aporte sus beneficios térmicos, como es el caso de los bloques de hormigón [71]. Las virutas también se utilizan como combustible para la producción de energía térmica y la industria ganadera [19-21].

2.4.1.1 Pretratamiento de las virutas de madera

Aunque la madera consiste principalmente en celulosa, también contiene azúcar soluble, ácidos, resinas, aceites, ceras, y otras sustancias orgánicas que tienen un efecto inhibitor sobre el fraguado y endurecimiento del cemento. Sin embargo, dependiendo del tipo de madera, éstos se encontrarán en mayor o menor medida. Asimismo, muchas maderas contienen tanino en cantidades apreciables, sustancia que tiene la propiedad de reaccionar negativamente sobre el hormigón. Es por lo tanto, preferible, con miras a evitar todo inconveniente ulterior, descartar todos los materiales ricos en tanino, tales como: roble, sauce, alerce, olmo, castaño, etc., aconsejándose la utilización de maderas blandas como: pino, abeto, alerce, álamo, etc. [72].

A lo largo de estas dos últimas décadas se han desarrollado distintos tipos de pretratamientos de la viruta [73-78], a fin de garantizar que los materiales extraíbles en la madera no alteren las cualidades de endurecimiento del cemento. A continuación se mencionan los más comunes:

- a) Impregnar las virutas con soluciones salinas o básicas: cloruros, sulfatos, silicato de sodio, etc. Sin embargo, esta opción no es la más conveniente, ya que como es bien sabido, estas soluciones salinas pueden causar problemas de corrosión.
- b) Empapar las virutas con una lechada de cal, dejar secar y endurecer y posteriormente sumergirlas en una solución de silicato de sodio (1:7 en peso). Es habitual complementar el tratamiento, incorporando cloruro de calcio al agua de mezclado (5% del peso del cemento) como acelerador del fraguado. Esta adición logra que el proceso de fraguado comience antes que las sustancias perjudiciales del agregado orgánico puedan afectar el cemento. La cantidad de cloruro de calcio que se incorpora es mayor que la habitualmente utilizada como acelerador del fraguado en hormigones comunes, ya que la naturaleza absorbente del agregado impide el acceso de todo el cloruro al cemento de la mezcla.
- c) Emplear aceites de parafina en procesos de impregnación-presión de vacío a fin de rellenar los huecos de las virutas y bloquear la liberación de sustancias perjudiciales para el hormigón. No obstante, algunos autores [79] han demostrado que tales aceites no aportan un efecto positivo en el fraguado o en las propiedades mecánicas del hormigón con madera.

- d) Adicionar cal entre 1/6 a 1/3 de volumen por volumen de cemento a las virutas antes de mezclar [80].
- e) Sumergir las virutas en agua y luego dejarlas escurrir. Según varios autores [78,80] se ha demostrado que la mayoría de los tipos de virutas se pueden mejorar sustancialmente aplicando esta técnica. Este procedimiento se considera sencillo y su coste es muy reducido.

Además, algunos aceleradores de curado de cemento comunes, como los cloruros de estaño, hierro, aluminio, magnesio o calcio, se pueden aplicar con el objetivo de acelerar el fraguado del cemento, mejorar las propiedades físicas del compuesto o hacer que una determinada especie de madera sea adecuada para fabricar materiales compuestos con cemento. Se han desarrollado algunas técnicas avanzadas que permiten la fabricación de compuestos de madera y cemento, en un tiempo de fraguado mucho más corto que si se empleasen los procedimientos convencionales. Asimismo, algunas técnicas como adiciones de humo de sílice o resina de isocianato también han demostrado mejorar las propiedades del producto [81].

2.4.1.2 Uso de virutas de madera de Pino radiata

Los extractos de duramen de Pino radiata están compuestos de ácidos de resina (71%), ésteres de ácidos grasos (11%), ácidos grasos (2%), fenoles (6%), e insaponificables (10%) [82]. Según algunos estudios [83,84], los ácidos de resina y los ésteres de ácidos grasos interfieren con la hidratación del cemento y reducen la unión entre el cemento y la madera. Sin embargo, se ha demostrado que el duramen generalmente comienza a formarse en este tipo de madera entre los 12 y 15 años de edad [85]. Con el fin de minimizar los efectos nocivos del duramen del Pino radiata en las propiedades del hormigón, se debe utilizar la madera de árboles jóvenes de crecimiento rápido (<15 años) [86]. En Bizkaia, la primera poda de pino radiata se realiza entre los 8 y 12 años de edad y las siguientes, cada 6 años, por lo que las virutas bajo estudio apenas contendrán duramen [87].

2.4.1.3 Antecedentes de morteros, hormigones y bloques con virutas de madera

Ya en 1940, Baver L. [88] había empezado a investigar las propiedades físicas y mecánicas de hormigones con virutas. En esta investigación, se encontró que este compuesto, no solo depende de la cantidad de virutas utilizada, sino también de sus características químicas y físicas.

- **Densidad**

Taoukil et al. [89] evaluaron las densidades de varios tipos de hormigón con virutas. La dosificación del hormigón era de 2/3 de arena y 1/3 de cemento, una relación virutas de madera/(cemento+arena) de 0, 2, 5, 8 y 10% y la relación w/c era de 0.6; además, estudiaron dos tipos de virutas, los primeros con tamaños inferiores a 0.8 mm y los segundos, con partículas de entre 0.8 y 20mm. En sus resultados encontraron que la

incorporación de virutas en la matriz, se traduce en una ganancia de la porosidad, acompañada de pérdidas en la densidad. Asimismo, observaron que los hormigones fabricados con virutas de menor tamaño, presentaban mayor porosidad y, en consecuencia, eran menos densos que los hormigones con virutas de mayor tamaño.

Adebakin et al. [60] evaluaron la densidad de bloques con una relación aglomerante/arena de 1:8. Los bloques se fabricaron reemplazando parcialmente la arena por una proporción variada (10, 20, 30 y 40%) de virutas. Los resultados obtenidos mostraron que la adición de virutas reduce el peso unitario de los bloques y este efecto se hace más notorio a mayor porcentaje de sustitución.

- **Absorción de agua**

Awal et al. [90] elaboraron diferentes tipos de hormigón, variando la relación cemento/virutas de 1:1, 1:2 y 1:3 en volumen. Los resultados mostraron que la absorción de agua del hormigón con viruta aumenta a mayor cantidad de virutas en la mezcla. A partir de las observaciones realizadas en este estudio los autores concluyeron que el hormigón con virutas, puede usarse como material de construcción.

- **Resistencia a compresión**

Ganiron [21] desarrolló una mezcla de hormigón, a partir de la sustitución de parte del árido fino por virutas, para su uso en losas de hormigón. Las mezclas tenían relaciones 1:2:4 de cemento, arena o viruta, y grava, respectivamente. Los procesos de curado fueron los siguientes: los especímenes de 7 días se curaron mediante secado al aire, los especímenes de 14 días se introdujeron en agua y los especímenes de 28 días se les roció con agua cada día. De los tres especímenes, los que mostraron mayor resistencia a compresión fueron los de siete días, los cuales se curaron mediante secado al aire. Los autores atribuyen este comportamiento a un curado interno adicional en el que se hidrata la parte central del hormigón, ya que las virutas liberaban gradualmente el agua absorbida durante el mezclado.

Aigbomian y Fan [91] investigaron las propiedades del hormigón con virutas en función del tipo de madera y del tamaño, para ello se analizaron maderas duras (haya y roble) y maderas blandas (pino y cedro) y tamaños de 1, 2 y 3mm. Los resultados mostraron que el hormigón con virutas de madera dura, tenía una densidad y resistencia a compresión más altas que las producidas a partir de virutas de madera blanda y madera mezclada. El tamaño de partícula tuvo una influencia significativa en la resistencia y densidad del hormigón, siendo el hormigón con virutas de 1mm el que registró una mayor resistencia a compresión y densidad, en comparación con el tamaño de partícula de 2 y 3mm. Los resultados de resistencia a compresión indicaron su idoneidad para fabricar paneles de muros u otras aplicaciones no estructurales y semiestructurales.

Ogundipe [92] evaluó el uso de este subproducto en bloques producidos con proporciones de 1:1:2, 1:1.5:3 y 1:2:4 de cemento, virutas y árido, y con ratios de w/c

de 0.6. Los resultados mostraron que las mezclas 1:1:2 y 1:1.5:3 tenían una Resistencia a compresión de 18.33 Mpa y 10Mpa a 28 días, por lo que cumplen los requisitos de la norma ASTM C-39 [93] para muros portantes y no portantes, respectivamente. Por el contrario, la mezcla 1:2:4 no cumplió el requisito mínimo para muros no portantes

Ravindrarajah et al. [94] evaluaron la sustitución de la arena en diferentes porcentajes (entre un 3 a 12% en volumen) por virutas en el hormigón para la fabricación de bloques. Los componentes de la mezcla eran cemento, cal, cenizas volantes, cloruro de calcio, virutas de Pino radiata, arena y agua. El contenido de cemento de la mezcla era de 1065kg/m³ y la relación w/c fue de 0.34. Se obtuvo una mezcla de hormigón con virutas con una densidad de 1540kg/m³ y una resistencia a compresión de 7 días de 14MPa cuando el 12% de la arena fue reemplazada por las virutas.

- **Resistencia a flexión**

Memon et al. [95] elaboraron tres mezclas de hormigón con una proporción de cemento virutas de 1:1, 1:2 y 1:3, con relación w/c de 0.65, 1.00 y 1.40; respectivamente, y la relación de arena/cemento fue de 1 para todas las mezclas. Antes de mezclar, se realizó un tratamiento a las virutas que consistió en sumergirlas en un recipiente lleno de agua durante una hora, y luego dejarlas drenar el agua por 15 minutos. Los resultados mostraron una tendencia similar entre la resistencia a compresión y la resistencia a flexión de la muestra de hormigón, cuanto mayor era la cantidad de virutas, menor era la resistencia. Sin embargo, los autores encontraron una rápida tendencia al aumento de la resistencia a flexión del hormigón con virutas en edades posteriores. La mayor resistencia a flexión se encontró en las probetas fabricadas con la relación 1:1 y fue de 5.77MPa y la menor en las de relación 1:3 de 0.77Mpa.

- **Resistencia al fuego**

Coronel y Rodríguez [96] evaluaron el tiempo de resistencia al fuego de paneles de hormigón con fibras de madera, cuya densidad era de 1000kg/m³, los ensayos mostraron que los paneles se encontraban en condiciones estables, después de 84 min de exposición al fuego.

Memona et al. [97] investigaron el comportamiento al fuego del hormigón con virutas, para ello, prepararon tres mezclas, con una proporción de cemento/virutas de 1:1, 1:2 y 1:3, con una relación w/c de 0.65, 1.00 y 1.40, respectivamente, y con una relación de arena/cemento de 1, para todas las mezclas. Antes de mezclar, se trataron las virutas, sumergiéndolas en agua, durante una hora y luego se mantuvieron 15 min en una malla para drenar el agua de las virutas. Los autores demostraron que, el hormigón con virutas con proporción de mezcla 1:1, presentaban el mejor rendimiento en términos de resistencia al fuego; por tanto, parece lógico pensar que cuanto más bajo es el contenido de virutas, la resistencia al fuego es mayor. Los autores concluyeron que con la adición de virutas a la mezcla, se obtenía un hormigón ligero, con una resistencia y un rendimiento de temperatura satisfactorios.

- **Propiedades acústicas**

Wolfe et al. [98] investigaron el uso del compuesto de cemento y madera para la fabricación de barreras de sonido en autopistas. La madera empleada era procedente de residuos de la construcción, por lo que era madera con y sin tratamiento. La proporción de madera/cemento fue de 1:2 en peso y el agua se limitó al 50% del peso seco de la madera, más el 25% del peso del cemento. Adicionalmente, se utilizó un acelerador para la hidratación del cemento. Los resultados obtenidos demostraron la efectividad de dichos materiales, para reducir el ruido del tráfico.

- **Propiedades térmicas**

En el estudio de Aigbomian y Fan [91] descrito anteriormente, también investigaron las propiedades del hormigón con virutas variando el tipo de madera dura (haya y roble) y madera blanda (pino y cedro). Los resultados mostraron que la conductividad térmica del hormigón estaba estrechamente relacionada con la composición química de la especie de madera, así como también, que los hormigones con madera blanda tenían una conductividad térmica un 20% menor que los hormigones con madera dura. Los autores aconsejan una relación de 1:2 de viruta a aglutinante para la producción de hormigón con virutas, para aplicaciones no estructurales y semiestructurales.

Taoukil et al. [89] realizaron un estudio experimental de las propiedades térmicas de un hormigón aligerado con virutas de madera. La determinación de la conductividad térmica y la difusividad térmica permitieron demostrar que la incorporación de virutas de madera en el hormigón aumenta considerablemente su capacidad de aislamiento térmico. Además, encontraron que, a igual porcentaje de masa de virutas, los hormigones elaborados a partir de virutas con tamaño menor, presentaban mejores capacidades de aislamiento térmico, que los obtenidos con las de tamaño mayor.

Posteriormente, Taoukil et al [71] evaluaron la influencia de la humedad en el comportamiento térmico de hormigones con una relación de 2/3 de arena y 1/3 de cemento, una relación virutas de madera cemento de 0, 6, 15, 24 y 30% y una relación w/c de 0.6. Las virutas de madera presentaban un tamaño de partícula entre 8 y 20mm y se incorporaron, sin ningún tratamiento preliminar. Los resultados experimentales mostraron que la menor densidad del hormigón con virutas de madera aumentaba la capacidad de aislamiento térmico, al disminuir la conductividad térmica y la difusividad térmica; sin embargo, estas propiedades dependían en gran medida del contenido de agua. Los autores concluyen afirmando que es posible garantizar un compromiso entre la resistencia a compresión y la conductividad térmica para obtener un hormigón de aislamiento estructural.

- **Durabilidad**

Pascale et al. [76] examinaron la durabilidad de un mortero con virutas de madera de pino tratadas con una solución de silicato de sodio, con tamaño entre 0.5 y 10mm. La

relación w/c fue de 0.75 y la relación madera/cemento fue de 3. Las muestras se almacenaron en ambientes húmedos y secos por distintos periodos, y se ensayaron a compresión. Los resultados mostraron que las propiedades del material se mejoran cuando las virutas de madera se saturaban en una solución de silicato de sodio; puesto que se mejoraba la unión entre las virutas y la pasta de cemento, debido a la formación de geles de Hidrato de Silicato Cálcico (C-S-H). Concluyeron que era viable producir un mortero ligero a partir de virutas, ya que los valores de resistencia a compresión cumplían con lo exigido en la normativa francesa (resistencia a compresión superior a 3.5 MPa).

Douglas et al. [99] sometieron bloques con virutas, con una proporción de mezcla de 4:2:1 (arena: virutas: cemento, en volumen), a 10 ciclos de 14 días de remojo y secado, y finalmente los ensayaron a compresión. Los resultados mostraron que el remojo prolongado condujo a una disminución moderada en la resistencia. Los autores concluyeron afirmando que la exposición a altos contenidos de humedad no tiene un fuerte efecto perjudicial en los bloques.

2.4.1.4 Análisis de la revisión bibliográfica sobre virutas de madera

Los estudios experimentales sobre el uso de virutas de madera en las mezclas cementicias han permitido identificar sus fortalezas y debilidades, éstas se comentan a continuación:

- Las virutas se emplean frecuentemente como reemplazo del árido fino, para hacer materiales controlados de baja resistencia, mientras que el rango de sustitución que se suele emplear es de hasta un 30% en peso.
- En general, la sustitución parcial del árido fino por virutas reduce la trabajabilidad de la mezcla, la absorción de agua del material aumenta a medida que aumenta el contenido de virutas, las propiedades de resistencia mecánicas disminuyen drásticamente a mayores reemplazos, y las propiedades térmicas mejoran a mayores contenidos de este subproducto.
- El uso de algunos pretratamientos de las virutas, ha demostrado mejoras en las propiedades mecánicas de los hormigones, que están relacionados con una mayor rigidez de las virutas; sin embargo, tanto la densidad como la conductividad térmica se ven afectadas negativamente por estos pretratamientos, que a su vez incrementa el coste final del hormigón.
- Dependiendo del tipo de madera de las virutas, su inclusión en la mezcla de hormigón puede influir en mayor o menor medida, en la trabajabilidad, tiempos de fraguado, resistencia, porosidad, resistencia térmica y durabilidad.
- Las virutas de madera de Pino radiata apenas poseen tanino, ácidos de resina y ésteres de ácidos grasos; que son los que interfieren en la hidratación del cemento y reducen la unión entre el cemento y la madera. Por tanto, se ha decidido estudiar las

virutas sin pretratamiento, de cara a no incrementar el coste e impacto ambiental del producto final.

2.4.2 Cenizas de madera

Las cenizas de madera son un residuo, generado después de la combustión completa o incompleta de madera y productos de madera, tales como: serrín, virutas de madera, cortezas y serrerías, virutas duras rechazadas de despulpado, pallets y residuos primarios sin residuos secundarios mezclados [26]. Las cenizas son producidas en instalaciones de biomasa (véase la Figura 10) a temperaturas comúnmente entre 800 y 1600°C.

En la combustión de biomasa se generan dos tipos de residuos, las cenizas de fondo y las cenizas volantes. Las cenizas de fondo están formadas por el material total o parcialmente quemado y las cenizas volantes son partículas arrastradas por la corriente de gases al exterior de la cámara de combustión.

La ceniza de fondo comprende la fracción gruesa de ceniza producida en la parrilla, en la cama inferior y en la cámara de combustión primaria. A menudo, se mezcla con impurezas minerales contenidas en el combustible de biomasa, como arena, piedras y barro o con material de cama en las plantas de combustión de lecho fluidificado. Estas impurezas pueden ser minerales, especialmente en instalaciones de combustión de lecho fijo, y dar lugar a la formación de escoria (debido a una disminución del punto de fusión) y a la presencia de partículas de cenizas sinterizadas en la ceniza de fondo.



Figura 10 Planta de biomasa de la empresa papelera Smurfit Kappa Nervion S.A.

Las cenizas de fondo están formadas por partículas altamente porosas y textura rugosa. El tamaño de sus partículas puede ser variable en función del tipo de horno, pero suelen variar entre 0-4cm [100,101], mientras que las cenizas volantes son materiales mucho más finos, con la mayor parte de sus partículas por debajo de 75µm (aproximadamente el 70%) [102]. Las partículas de mayor tamaño (>1mm) proceden de material no quemado. Considerando la capacidad de consumo de biomasa actual de las plantas, el volumen de residuos generados es de aproximadamente 120.000t/año [100], de los cuales cerca de un 64% corresponde a cenizas volantes y un 36% a cenizas de fondo [102].

Las propiedades físicas y químicas de las cenizas de madera varían sustancialmente dependiendo de muchos factores, como el tipo de tecnología de combustión en uso, las especies de madera y las temperaturas de combustión de la biomasa de la madera [103-106]. Por lo tanto, la caracterización de las cenizas de madera es esencial para obtener una mejor comprensión de su efecto en los materiales cementicios.

Las cenizas de madera bajo estudio que se muestran en la Figura 11, son una mezcla de las cenizas volantes y de fondo. Actualmente, la instalación de biomasa de la empresa papelera Smurfit Kappa Nervion S.A. produce 80.000MW.h al año de energía eléctrica renovable.



Figura 11 Ceniza de madera de la empresa papelera Smurfit Kappa Nervion S.A.

2.4.2.1 Antecedentes de morteros, hormigones y bloques con cenizas de madera

Las cenizas han sido utilizadas como material de construcción desde la época del Imperio Romano. Se sabe que el hormigón romano, fue uno de los materiales más duraderos de su tiempo, debido a su composición, que incluía cenizas volcánicas como reemplazo del cemento que usamos hoy en día. En las últimas décadas, se han llevado a cabo numerosas investigaciones con el fin de ahondar en el efecto de incorporar parcialmente cenizas de madera en las propiedades de los materiales cementantes. Algunos de ellos se comentan a continuación.

- **Trabajabilidad**

Udoeyo et al. [107] estudiaron hormigones con una proporción de mezcla de 1:2:4(cemento: arena: árido grueso) en los que se sustituía el cemento en un 5, 10, 15, 20, 25 y 30% (en volumen) por este subproducto y con una relación w/c de 0.56. Se observó que las mezclas que contenían cenizas de madera mostraban menor trabajabilidad que las de referencia para la misma proporción w/c, y este comportamiento era más pronunciado al aumentar el porcentaje de reemplazo, siendo insensible al asentamiento cuando el reemplazo era del 20, 25 y 30%. Esto se atribuyó al alto contenido orgánico de la ceniza.

- **Tiempo de fraguado**

Abdullahi M. [108] evaluó los tiempos de fraguado de las mezclas de hormigón y cenizas de madera. Se empleó una relación de mezcla de 1:2:4 y un porcentaje de reemplazo de 0, 10, 20, 30 y 40% de cemento por cenizas de madera. Los resultados indicaron que las cenizas de madera utilizadas eran ligeramente puzolánicas, ya que cumplían los requisitos químicos especificados por la norma ASTM C618 [93], la cual establece que la suma de dióxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3) debe ser de al menos el 70%. Además, los resultados mostraron que los tiempos de fraguado del hormigón con cenizas de madera aumentaban a medida que aumentaba el contenido de cenizas. La incorporación del 10 y 20% de cenizas de madera en la pasta de cemento satisface lo establecido en la norma UNE-EN 197-1 [109], la cual limita los tiempos de fraguado inicial para el cemento Portland compuesto, no debiendo ser éste mayor de 45min. Por el contrario, la incorporación del 30% y 40% de cenizas de madera en la pasta de cemento, presentó valores más altos de tiempo de fraguado, lo cual no satisface lo dispuesto en dicha norma.

- **Densidad**

Ellinwa et al. [110] encontraron que cuando el cemento era parcialmente sustituido en la mezcla de hormigón por cenizas de desperdicios de madera, había una reducción en la densidad, que se volvía más significativa a mayores porcentajes de reemplazo. La densidad de la mezcla de hormigón con resistencia a compresión de 20MPa se redujo a 2281kg/m^3 con un reemplazo del 40%, un 8% menos que las muestras de referencia. Los autores atribuyen este comportamiento a que las cenizas de madera tienen una gravedad específica menor en comparación con la del cemento Portland.

- **Absorción de agua**

Udoeyo et al. [107] estudiaron la absorción de agua de las mezclas de hormigón que contenían porcentajes de reemplazo variables (5-30%) de cemento por cenizas de madera. Se observó que el aumento en la absorción de agua se vuelve más significativo a niveles más altos de reemplazo de cemento por cenizas. La absorción de agua al 5% de contenido de cenizas de madera fue de 0.4%, y aumentó a un 1.05% con 30% de contenido de cenizas de madera.

Elinwa y Ejeh [110] también estudiaron la absorción de agua de las mezclas de mortero con reemplazo parcial del cemento por ceniza de madera. Sin embargo, a diferencia de la investigación anterior, los autores encontraron que la sustitución del 15% de cemento por cenizas de madera en el mortero disminuía la absorción de agua en relación con la mezcla de mortero de referencia. Estas contradicciones se deben a que las cenizas de madera en este estudio presentaban propiedades puzolánicas, mientras que las analizadas por Udoeyo et al. [107] no presentaban dichas propiedades.

- **Resistencia a compresión**

Rajamma et al. [26] estudiaron los efectos de dos tipos de cenizas volantes de madera, obtenidas de dos plantas de energía de biomasa de madera, en la resistencia a compresión de las mezclas de mortero. Las cenizas de madera se usaron como reemplazo parcial del cemento, con un porcentaje de reemplazo del 10, 20 y 30% del peso total del aglutinante. Se observó que uno de los tipos de cenizas de madera no presentaba propiedades puzolánicas y que su incorporación en la mezcla reducía la resistencia a compresión del mortero. En cuanto al otro tipo de cenizas, se encontró que estas presentaban propiedades puzolánicas y que su incorporación en un 10% en la mezcla de mortero exhibía una resistencia mayor a los 28 días en comparación con la mezcla de control; no obstante, a mayores porcentajes de reemplazo, se observó que la resistencia se reducía.

Subramaniam et al. [111] investigaron el efecto de incorporar 10, 15, 20 y 25% de cenizas de madera como reemplazo parcial del cemento en las propiedades mecánicas de bloques. Encontraron que el bloque con reemplazo del 15% del cemento por ceniza de madera mostró la mayor resistencia a compresión, con un aumento del 9% en comparación con el de referencia. Por lo que cumplía con lo establecido en la norma BS 6073: Parte 2. Esta mayor resistencia a la compresión se debió a la reacción puzolánica de las cenizas de madera.

- **Resistencia a tracción**

La resistencia a tracción generalmente sigue un comportamiento similar al de la resistencia a compresión. Naik et al. [112] evaluaron la resistencia a tracción de probetas de hormigón con reemplazo del cemento por cenizas de madera en cantidades que oscilan entre el 8 y el 12% (en peso). Los autores encontraron que la mezcla de referencia alcanzaba una resistencia a tracción de 3.8MPa a 28 días y 4.3MPa a 365 días, mientras que la resistencia de las mezclas de hormigón con cenizas de madera fue menor, variando entre 3.6 y 4.0MPa a los 28 días y entre 4.2 y 5.1MPa a 365 días.

- **Resistencia a flexión**

Udoeyo et al. [107] encontraron una disminución en la resistencia a flexión con el aumento en el contenido de cenizas de madera. La resistencia a flexión de las muestras que contenían un 5% de cenizas de madera fue de 5.20MPa a los 28 días, y disminuyó a 3.74MPa con un contenido de cenizas del 30%. Los autores atribuyen este comportamiento a la ausencia de propiedades puzolánicas en las cenizas analizadas.

En el estudio de Naik et al. [112], anteriormente descrito, también evaluaron la resistencia a flexión, los autores obtuvieron como resultados una resistencia de 4.1MPa a los 28 días y 4.4MPa a los 365 días para la mezcla de referencia, mientras que la resistencia de las mezclas de hormigón con diferentes proporciones de cenizas de madera se encontraba entre 3.9 a 4.4MPa a los 28 días y entre 4.3 y 5.3 a los 365 días.

Los resultados confirmaron que la inclusión de las cenizas de madera puede mejorar la resistencia a la flexión debido a las propiedades puzolánicas de las cenizas de madera.

- **Conductividad térmica**

Carrasco et al. [113] fabricaron bloques de hormigón mediante la sustitución del cemento Portland por cenizas de madera, en proporciones que van del 10 al 90% en masa. Sus resultados demostraron que la adición de cenizas de madera aumenta la porosidad del material, disminuyendo así su conductividad térmica. La mezcla mostró un valor de conductividad térmica aceptable (0.597-0.872W/m.K). Llegaron a la conclusión de que este subproducto podría utilizarse potencialmente en productos tales como bloques de hormigón.

- **Contracción por secado**

Naik et al. [112] estudiaron la contracción por secado del hormigón con cenizas de madera. Observaron que, la contracción del hormigón de referencia era de -0.0092% a los 7 días y de -0.052% a los 232 días, la contracción del hormigón con un 5% de cenizas de madera era de 0.012% a los 7 días y de -0.027% a los 232 días, para el hormigón con 8% de cenizas la contracción fue de 0.014% a los 7 días y de -0.013% a los 232 días, y las mezclas que incorporaron 12% de cenizas de madera, mostraron una contracción entre -0.0051% a los 7 días y -0.044% a los 232 días. Los autores concluyen que la inclusión de cenizas de madera contribuye significativamente a la reducción de la contracción por secado del hormigón. Este es un atributo deseable ya que al reducir la formación de fisuras dentro del hormigón, aumenta la durabilidad del mismo.

- **Resistencia contra el ataque de ácidos**

Udoeyo y Dashibil [114] estudiaron la resistencia del hormigón con cenizas de madera al ataque de ácidos. Para ello, fabricaron dos tipos de hormigón con proporciones de mezcla 1:2:4 (cemento: árido fino: árido grueso) y una relación w/c de 0.65, conteniendo en uno de ellos cemento puro como aglutinante y en el otro un 15% de cenizas de madera como reemplazo parcial del cemento. Las probetas endurecidas se sumergieron en una solución de ácido nítrico de concentración al 20% y se observó la pérdida de masa de 7 a 70 días. Ambos tipos de hormigón mostraron un incremento marginal en la masa, en un periodo de tiempo de 963 días, debido a la absorción de agua. En la décima semana se encontró una reducción de la absorción en ambas muestras; sin embargo, la pérdida de masa en el hormigón de referencia fue más pronunciada en relación con el hormigón con cenizas de madera. Esta mejora fue atribuida a la actividad puzolánica de las cenizas de madera, la cual mejoró la estructura interna del hormigón, promoviendo una mayor compacidad que da como resultado una menor porosidad y por tanto una mayor resistencia al ataque de ácidos.

Sashidhar y Sudarsana [115] estudiaron la adición de cenizas de madera (0-30%) en el hormigón y evaluaron la resistencia a compresión de las probetas sometidas al ataque con ácidos concentrados, como H_2SO_4 y HCL. Los hallazgos mostraron que la resistencia a la compresión del hormigón después de 30, 60 y 90 días de inmersión ácida, disminuye al aumentar el porcentaje del contenido de cenizas de madera. El porcentaje de reducción máximo en la resistencia a compresión se observó a los 90 días de inmersión en el ácido. Para un 10% de hormigón con cenizas de madera, la pérdida de peso debido al ataque con ácido es mínima.

- **Resistencia al hielo y deshielo**

Naik et al. [112] evaluaron la influencia de las cenizas de madera en la resistencia al hielo y deshielo del hormigón obtenido a partir del reemplazo del 5-30% de cemento por cenizas de madera. El resultado del ensayo mostró que no hay un efecto significativo de los ciclos de hielo-deshielo (300 ciclos) en el módulo dinámico relativo de las mezclas de hormigón.

2.4.2.2 Análisis de la revisión bibliográfica sobre cenizas de madera

Las investigaciones previas han permitido conocer el efecto de la incorporación de las cenizas de madera en las mezclas cementicias, éstas se mencionan a continuación:

- Se encontraron algunas contradicciones referentes a las propiedades puzolánicas de las cenizas de madera y, por tanto, en el comportamiento físico, mecánico y térmico de este tipo de hormigón. Por lo que, es fundamental realizar una profunda caracterización de las cenizas, antes de su aplicación como material constituyente en la producción de mezclas de hormigón.
- En general, el reemplazo parcial del cemento por cenizas de madera afecta adversamente la trabajabilidad en la mezcla, la capacidad de absorción de agua del hormigón aumenta con el aumento del reemplazo, las propiedades de resistencia mecánicas disminuyen con el aumento en el contenido de cenizas y las propiedades térmicas mejoran a mayores contenidos de este subproducto.
- Algunos autores recomiendan el uso de cenizas de madera como reemplazo parcial de cemento en niveles de reemplazo de hasta 10% por peso total de aglutinante, con estas proporciones se puede lograr producir un hormigón o mortero de calidad con propiedades de resistencia aceptables.

2.4.3 Lodos de cal

Los lodos de cal son un residuo generado a partir de la producción de celulosa en el proceso de la pasta kraft [116]. Se genera como un subproducto en una reacción de caustificación, $Ca(OH)_2(aq) + Na_2CO_3(aq) \rightarrow CaCO_3(s) + NaOH(aq)$, en el proceso de reciclaje alcalino de la industria del papel [117] (véase la Figura 12). El principal componente del fango de la cal es el carbonato de calcio ($CaCO_3$). La composición

química del lodo de cal varía según el tipo de papel y el origen de las fibras de celulosa [118,119].



Figura 12 Zona donde se generan los lodos de cal, en la empresa papelera Smurfit Kappa Nervion S.A.

Los lodos de cal se ha investigado en mayor medida como material para la mejora de la tierra en la agricultura [34,38-41], no obstante también se han investigado en otras aplicaciones [34,38-41], que incluyen el reemplazo de la cal común para preparar productos en autoclave y como material calcinado para preparar un nuevo tipo de material rico en calcio en ladrillos. En esta última investigación, se realizaron probetas variando el porcentaje de lodos entre un 75-95% del peso total de la mezcla, junto con un 5-15% de cemento y de cenizas volantes; se encontró que los valores de densidad estaban en el rango de 0.681-0.699g/cm³ y los valores de resistencia a compresión variaban de 6.14 a 8.07Mpa, por lo que cumplían con la norma China A3.5B06 para ladrillos de hormigón celular curado en autoclave (densidad de volumen $\leq 725\text{kg/m}^3$, resistencia a compresión $\geq 5.0\text{MPa}$).

2.4.3.1 Antecedentes de morteros y hormigones con lodos de cal

Los lodos de cal han sido estudiados tanto en estado húmedo como en seco, sin embargo, se han encontrado pocos estudios y algunas contradicciones concernientes a los efectos de su incorporación en las propiedades de los materiales cementicios; por tanto, se ha ampliado la revisión bibliográfica a materiales con similares propiedades físicas y químicas (mayormente compuestos de CaCO₃), tales como la piedra caliza, el mármol, la tiza o el producido artificialmente al combinar calcio con CO₂.

- **Trabajabilidad**

Modolo et al. [120] evaluaron la trabajabilidad de mezclas de morteros realizadas sustituyendo arena por lodos de cal en diferentes proporciones (0, 6, 12 y 18%). Los resultados mostraron que la trabajabilidad de los morteros, se vio afectada por el incremento de partículas finas en las mezclas, ya que las partículas que sustituía eran de mayor tamaño. Los autores recomiendan una dosificación adicional de agua o aditivo superplastificante para mantener invariable la trabajabilidad.

Péra et al. [121] realizaron pasta de cemento reemplazando cemento Portland tipo I por piedra caliza finamente molida y variando la relación agua/aglutinante (w/b) de 0.35 hasta 0.30. Hallaron que la presencia de CaCO_3 tiene un efecto plastificante en la pasta. Los autores recomiendan que a mayor contenido de CaCO_3 , menor sea la cantidad de agua incorporada a la mezcla.

- **Tiempo de fraguado**

Liu et al. [122] prepararon pasta de cemento reemplazando parcialmente el cemento por nano- CaCO_3 . Los contenidos fueron 1, 2 y 3% en peso y la relación w/c fue de 0.45. Encontraron que la adición de nano- CaCO_3 podía acortar el tiempo de fraguado. Cuando el contenido de reemplazo era del 2%, el efecto del nano- CaCO_3 en el tiempo de fraguado de la pasta de cemento fue el más destacado, en comparación con la pasta de referencia, acortándose el tiempo de fraguado inicial y final en 61 minutos y 39 minutos, respectivamente. Los resultados indicaron que nano- CaCO_3 podía promover la tasa de reacción de hidratación, ya que debido a su efecto superficial, tamaños de partícula más pequeños y mayor energía superficial, los Ca^{2+} y OH^- producidos por la hidratación del cemento podían adsorberse en la superficie de nano- CaCO_3 más fácilmente, reduciendo los Ca^{2+} y OH^- en la solución de la pasta de cemento y acelerando la reacción de hidratación del cemento.

- **Densidad**

Erođlu et al. [123] evaluaron las densidades de morteros fabricados a partir del reemplazo parcial (5-30% en peso) del cemento por lodos de cal. Los resultados obtenidos mostraron que la densidad se reducía a medida que aumentaba el contenido de lodos de cal, excepto para la muestra con el menor reemplazo (5%), cuyo aumento fue de 3.5%. Los autores concluyen que es factible el empleo de lodos de cal en la fabricación de hormigón.

- **Absorción de agua**

Shaikh y Supit [124] evaluaron la absorción de agua en mezclas de hormigón con incorporación de nano- CaCO_3 en un 1 y 2%. La relación w/b y la relación aglutinante/arena fueron de 0.4 y 2.75, respectivamente. Los resultados obtenidos mostraron que la adición de nano- CaCO_3 redujo la tasa de absorción de agua, siendo la adición de un 1% de nano- CaCO_3 la que mejor se comportó. La absorción de agua de este último fue 19 y 60% más baja que el hormigón de referencia, a los 28 y 90 días, respectivamente. Los autores atribuyen este comportamiento a la formación de geles C-S-H que llenaban los vacíos y por tanto reducían los poros capilares del hormigón. La reducción de los poros de los hormigones con 1 y 2% de nano- CaCO_3 también fue evidenciada en este estudio, a través de los resultados del ensayo de porosimetría de mercurio.

- **Resistencia a compresión**

Modolo et al. [116] ensayaron a compresión morteros con lodos de cal. Se encontró que la resistencia a compresión de las muestras a los 90 días aumentó un 8%, con respecto al mortero de referencia. Los autores atribuyen esta mejora, al efecto de relleno de los huecos y a un comportamiento de tipo aglutinante al mezclar los lodos de cal con la pasta.

Bederina et al. [125] elaboraron probetas de hormigón sustituyendo de 0 a 40% en masa la arena por filler calizo. Los resultados mostraron que, después de 28 días, la resistencia a compresión alcanzó su valor máximo cuando la sustitución era del 5%. Más allá de esta cantidad, la resistencia a la compresión disminuyó con el aumento del filler calizo. Atribuyeron este comportamiento a que el filler calizo rellena los huecos intergranulares, lo que aumenta la compacidad del material y, en consecuencia, su resistencia mecánica. Pero una vez que estos huecos están completamente llenos, la porción adicional de rellenos comienza a tomar el lugar de los áridos principales, lo que reduce la rigidez del esqueleto granular y, por lo tanto, la resistencia mecánica del compuesto.

Péra et al. [121] evaluaron la resistencia a compresión de pastas de cemento con piedra caliza finamente molida. Los resultados mostraron que la presencia de CaCO_3 tiene un efecto beneficioso en la resistencia debido a una interacción que ocurre entre el C_3A y el CaCO_3 , conduciendo a la producción de hidrato de carboaluminato de calcio y la modificación de etringita.

Sato y Beaudoin [126] estudiaron la incorporación de nano- CaCO_3 en un alto volumen como materiales cementantes suplementarios. El cemento se reemplazó con 50% de cenizas volantes (serie uno) y 50% de escoria (serie de dos) y se incorporó un 10% y un 20% de micro y nano- CaCO_3 en peso del aglutinante. Se encontró que el reemplazo del aglutinante con nanopartículas de CaCO_3 aceleraba la hidratación temprana del cemento y mejoraba el desarrollo temprano del módulo de elasticidad, a medida que aumentaba la cantidad de nanopartículas de CaCO_3 . Según los autores, este comportamiento se debió, al efecto de las partículas de nano- CaCO_3 y a la formación de C-S-H, lo que causa una mayor resistencia en el hormigón.

De Weertdt et al. [127] evaluaron la resistencia a compresión de morteros compuestos de cementos Portland, cenizas volantes y polvo de piedra caliza, con una relación w/b de 0.5 y aglomerante:arena de 1:3. El cemento Portland se reemplazó por polvo de piedra caliza en porcentajes de hasta 35%. Los resultados obtenidos mostraron una subida de la resistencia en los morteros debido a una reacción puzolánica producida al mezclar el cemento, las cenizas volantes y el polvo de la piedra caliza, en la que se produjo un aumento en la velocidad de reacción del aluminato tricálcico (C_3A) para formar un carboaluminato complejo, lo que aumentó los productos de hidratación total y, en consecuencia, la resistencia.

Otros estudios [37] se han centrado en el uso de este subproducto como sustituto parcial del clinker en la producción de cemento. Se preparó un cemento de base belita (CEM II A-L) con 80% en peso de clinker, 16% en peso de lodos de cal y 4% en peso de yeso. Se encontró que el mortero fabricado con el nuevo cemento, tenía una mejora en la resistencia acompañada de un aumento en la densidad.

- **Resistencia a flexión**

Modolo et al. [116] observaron que la resistencia a flexión de las muestras a los 28 días no se veía mayormente afectada, en comparación con el mortero REF, y que a los 90 días esta aumentaba, aproximadamente un 6%. Los autores concluyen que la adición de este subproducto en ladrillos, cemento y carreteras podría ser una buena alternativa para reducir las grandes cantidades que se generan al año de este subproducto.

Bederina et al. [125] evaluaron esta propiedad en hormigones con filler calizo (80 μ m). Después de 28 días, la mezcla con 5 y 10% de reemplazo alcanzaron valores de resistencia a flexión superiores a los de la mezcla de referencia. Más allá de estos contenidos, la resistencia a flexión disminuyó con el aumento del filler.

- **Durabilidad**

Shaik et al [124] evaluaron los efectos de reemplazar 1% de cemento por nanopartículas de CaCO₃ sobre las propiedades de durabilidad de hormigones. Encontraron que el reemplazo del 1% de cemento Portland por CaCO₃ disminuyó la permeabilidad del ion cloruro del hormigón en aproximadamente un 20 y un 50% a los 28 y 90 días, respectivamente. El coeficiente de difusión cloruro de hormigón se redujo aproximadamente un 73% debido a la adición de 1% de CaCO₃, este comportamiento es atribuido a reactividad del subproducto, lo que mejora la microestructura formando geles de hidrato de silicato de calcio adicionales. Los autores concluyeron que la incorporación de nanopartículas de CaCO₃ logra reducir el espacio poroso y su conectividad dentro del hormigón y, por lo tanto, se reduce la penetración de iones cloruro.

2.4.3.2 Análisis de la revisión bibliográfica sobre los lodos de cal

Los estudios experimentales referentes a la incorporación de lodos de cal en las mezclas cementicias, han permitido conocer las certezas e incertidumbres de partida sobre el comportamiento de este material, éstas se comentan a continuación:

- Los lodos de cal, aunque han sido muy poco estudiados en materiales cementicios, se han empleado mayoritariamente como reemplazo parcial del cemento, en general, se ha encontrado que a bajos porcentajes puede llegar a aumentar la densidad y su resistencia a compresión y disminuir la absorción de agua del mortero. Sin embargo, a mayores porcentajes ocurre todo lo contrario, su densidad y resistencia disminuye y los porcentajes de absorción aumentan. La influencia en el comportamiento térmico de este subproducto en las mezclas cementicias no ha sido estudiada.

- Químicamente, la presencia de nanopartículas de CaCO_3 aumenta la velocidad de reacción del aluminato tricálcico (C_3A) para formar carboaluminato, lo que aumenta los productos totales de hidratación y por ende la resistencia mecánica.

2.5 Bloques de hormigón

Los bloques de hormigón son elementos prefabricados tradicionales, arquitectónicos o estructurales, los cuales forman una parte fundamental de la arquitectura contemporánea nacional e internacional [128]. La norma europea UNE 127771-3 [109], los define como una pieza prefabricada a base de cemento, agua y áridos finos y/o gruesos, naturales y/o artificiales, con o sin adiciones y aditivos, incluidos pigmentos, de forma sensiblemente ortoédrica (véase la Figura 13).



Figura 13 Bloques de hormigón © ANDECE.

La norma hace referencia a 2 tipos de bloques, dependiendo del tipo de árido empleado y su densidad, uno de ellos son los bloques de áridos densos, los cuales presentan una densidad seca absoluta que suele estar comprendida entre 1700 y 2400kg/m^3 , y el otro tipo son los bloques de áridos ligeros, cuya densidad seca absoluta suele ser inferior a 1700kg/m^3 y presenta al menos un 20% en volumen de áridos ligeros.

Para su correcta designación se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- **Tipo de áridos:** pueden ser de áridos densos, de densidades entre 1700kg/m^3 y 2400kg/m^3 o de áridos ligeros, por ejemplo la arcilla expandida, de densidades inferiores a 1700kg/m^3 .
- **Categoría de fabricación:** las piezas de categoría I tendrán una resistencia declarada, con probabilidad de no ser alcanzada inferior al 5%, mientras que, las de categoría II serán aquellas piezas que no cumplan el requisito anterior.
- **Dimensiones:** el Código Técnico de la Edificación (CTE) establece en el Documento Básico Seguridad estructural: Fábricas (DB-SE-F) [46] que las piezas deben designarse por sus medidas modulares (medida nominal más el ancho de la junta, que suele considerarse de 10mm) de acuerdo con la Tabla 1. El orden en el cual se deben designar las dimensiones es Longitud x Anchura x Altura.

- **Color:** existe una amplia gama de colores para los bloques, esta característica permite a su vez clasificar las piezas.
- **Familia superficial:** pueden ser caravista (V), las cuales son adecuadas para su uso sin revestimiento, dentro de esta puede, o no, ser expuesta; y a revestir (E), las cuales se caracterizan por tener una rugosidad suficiente, para proporcionar una buena adherencia al revestimiento.

Series	Longitud	Anchura	Altura
A	400	Cualquiera	200
B	500		250
C	600		300
D	500		200
E	250		200
F	300		200

Tabla 1 Series dimensionales (mm) [46].

- **Familia resistente:** se clasifican según la resistencia equivalente (resistencia a compresión correspondiente al régimen por secado al aire) en: R3, R4, R5, R6, R8 y R10.
- **Uso previsto:** el uso para el que es apto el producto puede ser uno o varios de los siguientes: estructural o no estructural, exterior con cara expuesta a condiciones de humedad o no expuesto, resistente al fuego o sin exigencias de resistencia al fuego, aislamiento acústico o sin exigencias de aislamiento acústico, y aislamiento térmico o sin requisitos de aislamiento térmico.
- **Grupo de piezas:** el CTE [46] establece en el DB-SE-F los grupos de piezas maciza, perforada, aligerada y hueca. Su clasificación depende del porcentaje de volumen de huecos, del porcentaje de cada hueco y del porcentaje del espesor combinado; siendo este último, la suma de los espesores de las paredes y tabiquillos de una pieza, medidos perpendicularmente a la cara del muro.

2.5.1 Tipos y formatos de piezas

Las piezas convencionales generalmente están diseñadas con perforaciones, con lo cual se busca reducir el peso de la pieza, aumentar la capacidad de aislamiento térmico y posibilitar cuando sea necesario, la introducción del armado vertical. También se producen medios bloques y bloques con una y dos caras perpendiculares lisas para comienzos, terminaciones, esquinas y mochetas. Del mismo modo, se fabrican piezas especiales a fin de resolver dinteles, esquinas, pilares, etc.

Por otro lado, las posibilidades de fabricación de piezas diseñadas para satisfacer gustos o necesidades específicas son ilimitadas, pudiéndose fabricar piezas de cualquier forma, acabado superficial y color (véase la Figura 14).

Los bloques son fabricados variando las cantidades de cemento, tiempo de vibrado y compactado; dependiendo del nivel de resistencia estructural, y calidad de textura superficial que el usuario requiera.

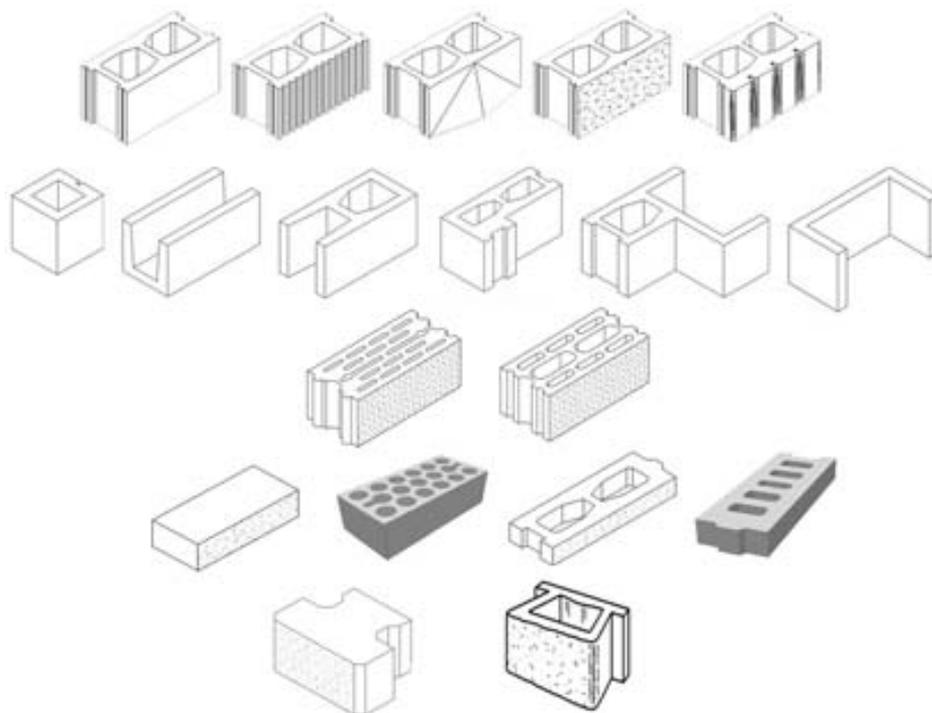


Figura 14 Tipos de bloques [128].

2.5.2 Aplicaciones

Los bloques de hormigón son aplicables a todo tipo de muros (tanto portantes como no portantes), incluyendo muros simples, fachadas, medianerías y particiones interiores, muros exteriores de chimeneas, con cámara de aire, divisiones, muros de contención de tierras y de sótano. Pueden emplearse tanto con revestimiento como expuestos en edificios, cierres de fincas y en aplicaciones de ingeniería civil.

La mampostería de hormigón es comúnmente empleada en edificios de oficinas, centros comerciales, viviendas unifamiliares, edificios de viviendas, edificios singulares, edificios públicos (bibliotecas, centros de salud, colegios, etc.), edificios industriales (oficinas, naves, terminales de carga de mercancías, etc.), polideportivos, iglesias, cierres de fincas, instalaciones agropecuarias, etc. (véase la Figura 15).

Arquitectos prestigiosos a nivel mundial, tales como Frank Lloyd Wright, Mario Botta, Carlos Ferrater, entre otros; han trabajado en numerosos proyectos, con este material, beneficiándose de sus diversas ventajas, entre las cuales está su versatilidad y fácil ejecución (véase la Figura 16).



Figura 15 Fachada de bloques de hormigón © ANDECE.



Figura 16 Ennis House, diseñada por Frank Lloyd Wright © Ennis House.

Según ANDECE las características técnicas que posee un bloque de hormigón de calidad son las que se muestran en la Tabla 2.

Resistencia a compresión normalizada	Puede superar los 10Mpa (dependiendo de la pieza y su densidad)
Resistencia adherencia a cortante (Mpa)	0.15 (morteros uso corriente y ligeros)/0.30 (morteros juntas y capas finas)
Clasificación Grupo (CTE DB-SE-F)	Los bloques más usuales suelen ser piezas “Perforadas” o “Aligeradas”
Densidad seca absoluta	2,000kg/m ³
Conductividad térmica (λ)	1.18W/(m.K) (Depende de la densidad del hormigón)
Resistencia térmica	0.17 – 0.25(m ² .K)/W
Calor específico	1,000J/(kg.K)
Absorción de agua por capilaridad	< 2g/(m ² .s) (para piezas hidrofugadas)
Absorción de agua	< 0.32g/cm ³ (para piezas hidrofugadas)
Variación debida a la humedad	Retracción: 0.55mm/m Entumecimiento: 0.65mm/m
Factor de resistencia al vapor de agua (μ)	10
Reacción al fuego	Clase A1 sin necesidad de ensayo
Resistencia al fuego	Bloque de espesor 200mm sin revestir: Árido silíceo:REI-120 y Árido calizo:REI-180

Tabla 2 Propiedades características de los bloques de hormigón de áridos densos [128].

2.6 Impacto ambiental de los bloques

El esquema del proceso de fabricación de bloques se muestra en la Figura 17, como se puede observar los procesos involucrados son similares a los de una planta de hormigón, con la adición de moldeo y curado de las piezas prefabricadas. Los bloques generalmente se fabrican con una máquina de bloques de hormigón compuesta por una amasadora, moldes, skip, cintas transportadoras y sinfines transportadores. Una vez que la mezcla de consistencia cero está amasada, el equipo la envía por la cinta transportadora a la zona de moldeo, donde se realiza el proceso de vibrado y compactado de la mezcla para obtener los bloques. Estos procesos requieren cantidades moderadas de energía dependiendo del equipo que se emplee.

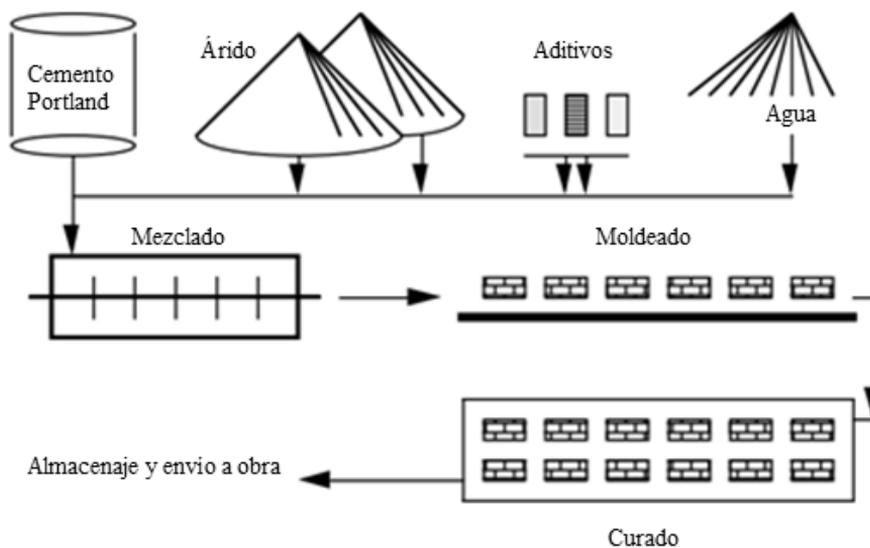


Figura 17 Diagrama de flujo del proceso productivo de los bloques [129].

Después de que los moldes se retiran, se inicia el proceso de curado. En Europa, el proceso de acondicionamiento de los bloques generalmente es por secado al aire o por inmersión en agua. Mientras que los bloques producidos en América del Norte suelen ser curados al vapor, lo que acelera la ganancia de resistencia y acorta el ciclo de producción; sin embargo, consume mucha energía [130]. De acuerdo con Worrell et al. [131] las empresas que emplean esta técnica de curado, consumen el mayor porcentaje de energía en este proceso, aproximadamente el 60% del consumo total de energía de la planta, seguido por la energía consumida (principalmente diésel) para la operación de transporte en camiones ligeros, la cual representa el 24% del consumo de energía del proceso. Siendo el resto, 16%, debido a la electricidad utilizada en toda la planta.

En España, estos elementos no requieren un uso adicional de energía y agua para el curado, puesto que el método de acondicionamiento usual de los bloques es el de secado al aire, resultando en una práctica mucho más sostenible. Una vez curado los bloques, se

paletizan y preparan para el envío, este procedimiento suele ser mecánico y con un menor consumo de energía, en comparación con el resto del proceso.

En cuanto a los residuos producidos, ocasionalmente, algunos bloques no cumplen con los requisitos de calidad requeridos, generalmente debido a problemas asociados con el mal manejo de las piezas o la calidad de los componentes; por ello, acaban siendo un producto residual. Para reducir el desperdicio, se recomienda asegurar que los métodos sean los correctos en todo el proceso de producción y que se sigan los procedimientos adecuados durante el transporte y el almacenamiento.

En el proceso de limpieza de los moldes y la amasadora, la cantidad de residuos generados es mínima, ya que el tipo de hormigón es muy seco, por lo cual, tanto los moldes como la amasadora se limpian con un cepillo, siendo innecesario el uso de agua para su limpieza. Finalmente, se vuelve a aplicar el desencofrante a los moldes.

2.7 Características técnicas recogidas en el Mercado CE

El Mercado CE es obligatorio desde abril de 2006, es responsabilidad del fabricante obtenerla, e indica la conformidad del producto que será puesto en obra de forma permanente. Esta certificación es un requisito de seguridad de carácter obligatorio si se pretende la comercialización de los bloques destinadas a obra, tanto pública como privada de la UE. El Mercado CE no pretende ser una marca o sello de calidad y requiere que el fabricante cumpla los requisitos mínimos de las normativas actuales referentes al producto en cuestión, siguiendo la metodología y criterios descritos en la misma. El fabricante deberá llevar a cabo los ensayos necesarios, tener implantado un control de producción en fábrica y realizar la declaración de conformidad CE.

Para obtener el mercado CE de los bloques se debe cumplir unos requisitos mínimos exigidos que dependerán del uso que se les pretenda dar; es decir, si serán de uso estructural o no estructural. Las características a declarar para los bloques se especifican en la Norma UNE-EN 771-3:2011 [109] titulada “Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería. Parte 3: Bloques de hormigón (áridos densos y ligeros)”.

2.8 Exigencias del Código Técnico de la Edificación (CTE)

2.8.1 Seguridad estructural (DB-SE)

En el artículo 4.1 del DB-SE-F del CTE [132], se establece un valor mínimo de 5N/mm^2 para la resistencia normalizada a compresión de las piezas para la realización de fábricas en general. Sin embargo, también establece que pueden aceptarse piezas con una resistencia normalizada de 4N/mm^2 en fábricas sustentantes (aquella que tiene carácter resistente y conforma, total o parcialmente, la estructura de edificio) y hasta 3N/mm^2 en fábricas sustentadas (aquella que está soportada por la estructura del edificio, quedando su carácter resistente restringido a soportar las acciones que actúan localmente sobre ella y transmitirlas a dicha estructura), siempre que, o se limite la tensión de trabajo a compresión en estado límite último al 75% de la resistencia de

cálculo de la fábrica, o se realicen estudios específicos sobre la resistencia a compresión de la misma.

2.8.2 Seguridad en caso de incendio (DB-SI)

Según el Documento Básico Seguridad en caso de incendio (DB-SI) del CTE se ven afectadas las fachadas sustentantes, las fachadas enfrentadas separadas a menos de 3m pertenecientes a edificios diferentes o al mismo edificio cuando delimiten un sector de incendio, un recinto de riesgo especial alto, una escalera o un pasillo protegido.

Además, se ven afectadas las partes de la fachada en las que se produce un encuentro con: un elemento delimitador de un sector de incendio, un elemento delimitador de una zona de riesgo especial alto, un elemento delimitador de una escalera protegida o un pasillo protegido, una medianería y una cubierta perteneciente a un sector de incendio o edificio diferente. Se aplica a cualquier medianería, así como también, a las particiones interiores verticales que: sean sustentantes, delimiten un sector de incendio, separen viviendas entre sí, separen establecimientos comerciales entre sí, delimiten una zona de riesgo especial, delimiten una escalera protegida o especialmente protegida, un pasillo protegido o un vestíbulo de independencia. La resistencia al fuego de los elementos separadores de los sectores de incendio debe satisfacer las condiciones de la Tabla 3.

Cabe destacar que el DB-SI establece que, en el caso de soluciones constructivas compuestas por dos o más hojas se debe considerar como valor de resistencia al fuego del conjunto, la suma de los valores correspondientes a cada hoja. La resistencia al fuego típica de muros y tabiques de una hoja de bloques de hormigón sin revestir, según el DB-SI del CTE se muestra en la Tabla 4. Como se puede observar, los bloques con árido calizo de espesor 200mm, analizados en este estudio, presentan mayor resistencia al fuego que los bloques de árido silíceo y que los demás espesores.

Uso previsto	Planta bajo rasante	Planta sobre rasante		
		Altura de evacuación (m)		
		h≤15	15≤ h ≤28	h>28
Sector de riesgo mínimo en edificio de cualquier uso	No se admite	EI 120	EI 120	EI 120
Residencial vivienda				
Residencial público	EI 120	EI 60	EI 90	EI 120
Docente				
Administrativo				
Comercial				
Pública concurrencia	EI 120 ⁽³⁾	EI 90	EI 120	EI 180
Hospitalario				
Aparcamiento ⁽²⁾	EI 120	EI 120	EI 120	EI 120

(1) Considerando la acción del fuego en el interior del sector, excepto en el caso de los sectores de riesgo mínimo, en los que únicamente es preciso considerarla desde el exterior del mismo.

(2) Resistencia al fuego exigible a las paredes que separan al aparcamiento de zonas de otro uso.

(3) EI 180 si es un aparcamiento robotizado.

Tabla 3 Resistencia al fuego de los muros que delimitan sectores de incendio [46].

Tipo de árido	Espesor nominal (mm)	Resistencia al fuego
	100	EI-15
Silíceo	150	REI-60
	200	REI-120
Calizo	100	EI-60
	150	REI-90
	200	REI-180

Tabla 4 Extracto de la Tabla F.2. del CTE DB-SI Resistencia al fuego de muros y tabiques de fábrica de bloques de hormigón de árido denso con cámara simple y sin revestir [46].

2.8.3 Salubridad (DB-HS)

Será aplicable cuando sean bloques de tipo cara vista y se utilicen en la hoja principal de la fachada. Debiendo ser su coeficiente de absorción capilar menor o igual a $5g/(m^2 \cdot s)$.

2.8.4 Protección frente al ruido (DB-HR)

Las exigencias impuestas por el CTE se muestran en la Tabla 5.

	Recinto receptor	Recinto emisor	Requisitos CTE DB-HR (dBA)
Ruido Aéreo	Recinto protegido	Misma unidad de uso en edificios de uso residencial privado	$RA \geq 33$
		No perteneciente a la misma unidad de uso (y no comparten puertas o ventanas)	$DnT, A \geq 50$
		No perteneciente a la misma unidad de uso (y sí comparten puertas o ventanas)	$RA \text{ puerta} \geq 30$ $RA \text{ muro} \geq 50$
		Recinto de instalaciones o recinto de actividad	$DnT, A \geq 55$
		Exterior	$D2m, nT, Atr \geq 30$ a 51 ⁽¹⁾ en función de ruido predominante (Ld), tipo de edificio y % huecos fachada.
	Recinto habitable	Recinto en la misma unidad de uso en edificios de uso residencial privado	$RA \geq 33$
		Recinto no perteneciente a la misma unidad de uso y sin puerta o ventana	$DnT, A \geq 45$
		Recinto no perteneciente a la misma unidad de uso y con puerta o ventana	$RA \text{ puerta} \geq 20$ $RA \text{ muro} \geq 50$
		Recinto de instalaciones o recinto de actividad	$DnT, A \geq 45$
		Paredes medianeras entre edificios	$D2m, nT, Atr \geq 40$ cada cerramiento o $D2m, nT, Atr \geq 50$ ambos cerramientos juntos.
Ruido impactos	Recinto protegido	Otra unidad de uso, zona común o recinto habitable	$L'nT, w \leq 65$
		Recinto de instalaciones o de actividad	$L'nT, w \leq 60$

(1) Véanse los valores recogidos en la Tabla 2.1 del CTE DB-HR

RA: índice de aislamiento al ruido aéreo, DnT,A: valor mínimo a alcanzar de aislamiento a ruido aéreo entre recintos, D2m,n,T,A,tr: valor mínimo a alcanzar de aislamiento a ruido aéreo entre un recinto y el exterior y L'nTw: valor máximo a no superar de aislamiento a ruido impactos entre recintos.

Tabla 5 Exigencias del CTE frente al ruido [46].

Se aplicará esta normativa cuando las fachadas delimiten recintos protegidos, tales como dormitorios, comedores, bibliotecas, en edificios de uso docente, residenciales y algunas zonas de edificios de uso sanitario (p. ej. quirófanos, habitaciones y salas de espera). Así mismo, se aplicará esta norma en el caso de que las medianerías sean colindantes con una zona habitable y a las siguientes particiones interiores verticales: particiones que separan recintos habitables y protegidos de la misma unidad de uso y

particiones que separan un recinto protegido o habitable de una zona común o de instalaciones. Por el contrario, no se aplicará esta norma en edificios de uso comercial.

2.8.5 Ahorro de energía (DB-HE)

En este Documento se establecen, entre otros aspectos, unos requisitos a cumplir para los valores de transmitancia térmica (valores de U) de cerramientos y particiones interiores de la envolvente según su ubicación, existiendo seis regiones a nivel nacional. Estas zonas climáticas se describen con una letra mayúscula que va de la A hasta la E (y α para las Islas Canarias). La letra está relacionada con la severidad del clima en invierno, con lo cual, la temperatura media es menor en la zona, cuanto más cerca está de la letra E.

Los valores de U máximos que deben presentar los cerramientos y particiones interiores de la envolvente dependiendo de su zona climática se muestran en la Tabla 6. Como se puede observar los valores de U máximos permitidos que impone el CTE para muros externos abarcan desde 0.94 hasta 0.57W/(m².K).

Cerramientos y particiones interiores	ZONAS				
	A	B	C	D	E
Cubiertas	0.50	0.45	0.41	0.38	0.35
Fachadas y cerramientos en contacto con el terreno	0.94	0.82	0.73	0.66	0.57
Suelos	0.53	0.52	0.50	0.49	0.48

Tabla 6 Valores de U de cerramientos y particiones interiores de la envolvente térmica (W/m².K)
[46].

Conjuntamente, esta norma establece que cada uno de los cerramientos y particiones interiores de la envolvente presentará una transmitancia térmica no superior a los valores de la Tabla 7. Todo ello, con el fin de que no existan descompensaciones entre la calidad térmica de las diferentes zonas.

Cabe destacar que, entre los objetivos de esta investigación está el optimizar las propiedades térmicas de bloques, por lo cual, a lo largo de este trabajo se incide en mayor medida en este tema del ahorro energético.

Cerramientos y particiones interiores	ZONAS				
	A	B	C	D	E
Muros de fachada, particiones interiores en contacto con espacios no habitables, primer metro del perímetro de suelos apoyados sobre el terreno ⁽¹⁾ y primer metro de muros en contacto con el terreno.	1.22	1.07	0.95	0.86	0.74
Suelos ⁽²⁾	0.69	0.68	0.65	0.64	0.62
Cubiertas ⁽³⁾	0.65	0.59	0.53	0.49	0.46
Vidrios y marcos	5.70	5.70	4.40	3.50	3.10
Medianerías	1.22	1.07	1.00	1.00	1.00

(1) Se incluyen las losas o soleras enterradas a una profundidad no mayor de 0.5 m.
(2) las particiones interiores en contacto con espacios no habitables, como en el caso de cámaras sanitarias, se consideran como suelos.
(3) las particiones interiores en contacto con espacios no habitables, como en el caso de desvanes no habitables, se consideran como cubiertas.

Tabla 7 Transmitancia térmica máxima de cerramientos y particiones interiores de la envolvente térmica U (W/m².K) [46].

2.9 Evolución histórica de las técnicas y conceptos de los edificios energéticamente eficientes

Desde la antigüedad, el hombre ha buscado vías que le permitiesen mejorar sus condiciones de vida, incluyendo la vivienda y su confort térmico. Si bien el término "eficiencia energética" no era tan común, como lo es en la actualidad, el hombre ha creado y transferido de una generación a otra, los códigos de buenas prácticas. Por lo que, se puede decir que los métodos utilizados a día de hoy, para construir una vivienda o edificación se han basado en construcciones previas.

Cada periodo aportó algo nuevo o mejorado a las técnicas existentes, pero un hecho notable es que los sistemas basados en fuentes de energía renovables, que se emplean hoy en día, tienen precursores antiguos. Ejemplo de ello, son las casas construidas enterradas o sobre el agua (véase la Figura 18) en climas calurosos o tropicales, con lo que se buscaba una temperatura interior más agradable. Una evolución de esos diseños, en el que también se consiguió una mejora en el confort térmico, fue materializada por los egipcios empleando muros exteriores gruesos y altos, de adobe elaborados con barro y paja, los cuales a su vez aportaban beneficios acústicos. Esta técnica fue empleada más tarde por los griegos y romanos que usaron paredes de cavidades y aberturas de mayor proporción, para aprovechar la entrada de calor por radiación.



Figura 18 Palafitos.

Los romanos también emplearon, aunque de una forma más rudimentaria, la calefacción con gases calientes que fluyen a través de las cavidades en el piso o las paredes [133]. Estos elementos con alta inercia térmica, mantenían una temperatura interior agradable, durante un período de tiempo mayor. Las ventanas cubiertas con mica (véase la Figura 19), también eran una forma activa de preservar la temperatura del aire interior, al atrapar la radiación solar [134], actualmente las láminas de mica se emplean en elementos de calefacción y pueden soportar hasta 900°C. Otra técnica que empleaban los arquitectos de todas las grandes civilizaciones de la antigüedad, era situar las puertas y ventanas en extremos opuestos de una habitación, para propiciar la ventilación cruzada. Los egipcios, incluso construían una especie de túnel vertical para facilitar la salida del aire caliente en verano.



Figura 19 Ventana restaurada con láminas de moscovita, un mineral de mica.

Sin embargo, no es hasta la última década del siglo XIX, cuando se empiezan a desarrollar líneas de investigación en el campo de la construcción, concernientes al efecto de aislamiento térmico en la transferencia de calor, formación y transporte de la humedad en las paredes, configuraciones de ventanas multicapa, etc. En ese momento, el precalentamiento del aire en la zona de servicio ubicada en el sótano, se convirtió en un método común para potenciar el proceso de ventilación que se iniciaba por circulación convectiva del aire hacia los pisos superiores.

A comienzos del siglo XX, los investigadores ya poseían los fundamentos teóricos y tecnológicos para hacer real el deseo de una casa energéticamente eficiente, y es a partir

de entonces, cuando se empiezan a dar grandes pasos en este campo, siendo uno de los más importantes el uso del aire acondicionado.

Los proyectos de investigación a escala real "House of Tomorrow" [135] (véase la Figura 20) y "MIT Solar House 1" [136] del arquitecto George F. Keck y del ingeniero Hoyt C. Hottel, respectivamente, desarrollados en la década de los 30, demostraron las importantes ganancias de calor que se pueden obtener del sol. Los dos proyectos analizaron la eficiencia energética en los edificios, basados en metodologías científicas de cálculo, estrategias de diseño y construcción. Las claves de estos edificios fueron el diseño térmico de la envolvente y de las instalaciones que mejoran el confort interior, incluyendo el uso de colectores solares. Posteriormente se avanzó en la búsqueda de soluciones técnicas, que permitan mejorar el comportamiento térmico de la envolvente y ello comenzó a convertirse en una práctica habitual [137].



Figura 20 House of Tomorrow [135].

En la década de los 40, transcurre la Segunda Guerra Mundial, por lo que ese periodo estuvo dedicado a la reconstrucción de la postguerra, en consecuencia, el progreso tecnológico de las naciones implicadas se desaceleró y el campo de la eficiencia energética en los edificios se caracterizó por no presentar mayores avances.

Al final de los años 50, el sistema de almacenamiento de energía estacional era uno de avances más importantes en el área de la edificación.

En los 60, ya era posible procesar datos de carga térmica por computadora, convirtiéndose en un método muy útil para evaluar la eficiencia energética de los edificios [138]. Este es el momento en el que los métodos de estimación del consumo energético de los edificios comienzan a ser comprobados.

La crisis del petróleo de 1973 aumentó el interés en la eficiencia energética de los edificios. La gente empezó a preocuparse más por la hermeticidad de los edificios, el uso de aislamiento, la recuperación de calor en el sistema de ventilación y las tecnologías pasivas que estaban principalmente orientadas al uso de la energía térmica solar. Para ese entonces, los conceptos más antiguos son redefinidos como casas autosuficientes, casa autónoma y casa verde por los arquitectos Brenda y Robert Vale [139]. En Estados Unidos se empezaba a investigar la influencia del intercambio de aire

en la pérdida de calor de los edificios, por lo que se realizaron algunos proyectos, en los que se evaluaba la eficiencia energética de viviendas a escala real [140]. En esos años, también surge el término de Zero-Energy House, que es muy utilizado en la actualidad.

En la década de los 80, se creó el primer "Edificio inteligente"[141], como resultado de los avances tecnológicos habidos hasta esa fecha. Además, los alemanes Wolfgang Feist y Bo Adamson desarrollaron el concepto de "Casa pasiva", inspirado en las casas energéticamente eficientes de la década de los 70. El concepto de construcción inteligente también surge en la década de los 80, cuando varios edificios integraron gradualmente el control de diversos equipos y sistemas. Inicialmente, los sistemas automatizados implementados en edificios se dedicaron por separado a cada equipo [141] y más tarde su complejidad fue capaz de controlar múltiples sistemas. Hoy en día, un solo sistema integra la capacidad de monitorizar y controlar la seguridad, la calefacción, el aire acondicionado y los sistemas eléctricos.

En la década de los 90, se construyó en Alemania la primera casa autónoma de energía, la cual fue diseñada con gran aislamiento y tecnologías de captación de energía solar por el Instituto para la Energía Solar. En 1991 se construyó la primera "Casa pasiva Kranichstein" (véase la Figura 21). En 1994, se creó en Suiza un nuevo estándar, llamado Minergie, especialmente desarrollado para edificios nuevos y renovados, Minergie es una marca de calidad suiza para edificios de bajo consumo, el cual se convirtió en un estándar oficial en ese país en 1998. En 1994, también entró en funcionamiento la primera casa de energía positiva (Plusenergiehaus) llamada Heliotrope. Las tecnologías implementadas en el edificio utilizaban energía totalmente proporcionada por fuentes renovables [142]. En 1995 el físico W. Feist desarrolló el estándar de Casa Pasiva y formó el Instituto de la Casa Pasiva y comenzó a promover el estándar.



Figura 21 Casa pasiva Kranichstein © Passivhaus Institut.

A día de hoy, se siguen buscando caminos que lleven a la eficiencia energética, de una manera sostenible. Una evidencia, es la variedad de sistemas de certificación de edificios sostenibles, adoptados en muchos países, en los cuales entre sus diferentes categorías de evaluación, los aspectos relacionados con la eficiencia energética, tienen un gran peso en su sistema de puntuación. Entre estos se encuentran las certificaciones:

LEED de los Estados Unidos, BREEAM del Reino Unido, CASBEE de Japón, DGNB de Alemania, VERDE de España y Green Building Label de China.

Cabe por tanto destacar que, las técnicas constructivas empleadas para el logro de edificios con mayor eficiencia energética, continuamente están evolucionando, debido a los requerimientos cada vez más exigentes de las nuevas normativas, por lo que se deben realizar mayores esfuerzos en optimizar el comportamiento térmico de aquellos materiales empleados en la envolvente de los edificios, como es el caso de los bloques de hormigón, cuyo uso en fachadas sigue siendo muy habitual, pese a su alta conductividad térmica.

2.10 Evolución de legislación europea y española sobre eficiencia energética en edificios

La Directiva de eficiencia energética en edificios (EPBD, por sus siglas en inglés, *Energy Performance of Buildings Directive*) fue la principal acción por parte de la Unión Europea (UE), para optimizar la eficiencia energética en el sector de la construcción, ya que plantea el cumplimiento de los objetivos en lo referente a la contención de emisiones de gases de efecto invernadero, al consumo energético y eficiencia energética y a la generación de energía a partir de fuentes renovables. El 13 de septiembre de 1993, entra en vigor la Directiva Europea 93/76/EC relativa a la limitación de las emisiones de dióxido de carbono, mediante la mejora de la eficiencia energética. Esta Directiva consistió en una lista de acciones, que recomendaba emprender para optimizar la eficiencia energética en edificios, y con ello, reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero.

En Europa, una década antes, en 1980, ya varios países aplicaban sus propias normativas, por ejemplo en España, se implementaba la norma básica NBE CT-79, en la que se establecían condiciones térmicas mínimas a cumplir por los edificios. Para ese entonces, existían más de 13 millones de viviendas construidas la mayoría con una solución de ladrillo de medio pie, cámara de aire con aislamiento térmico incorporado y tabique interior, que no disponían de ningún requisito de ahorro de energía, y por tanto, eran viviendas con una eficiencia energética muy baja.

En el año 2002, en Europa entra en vigor la Directiva 2002/91/EC de eficiencia energética en edificios, y con ella, se otorga un plazo máximo de 4 años para que se adopte en los países miembros. Siendo el año 2006, cuando España transpone la Directiva a través del Documento Básico Ahorro de Energía (DB-HE) del CTE y el en el 2008 a través del Reglamento de Instalaciones Técnicas en los Edificios RD 1027/2007. El mencionado DB-HE, establece unas exigencias en la disminución de la demanda de energía, mejoras en la eficiencia energética de las instalaciones térmicas e iluminación; así como también, la aportación de un mínimo de energías renovables para la producción de agua caliente sanitaria y electricidad según el uso del edificio.

En abril del 2006 se aprueba la Directiva 2006/32/EC sobre la eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos y por la que se deroga la Directiva 93/76/EC. La finalidad de dicha Directiva era fomentar una mayor eficiencia del uso final de la energía en los Estados miembros.

Sin embargo, no es hasta el año 2007, cuando se aprueba en España el Real Decreto 47/2007, el cual detalla un procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción, así como las reformas o rehabilitaciones de edificios existentes con una superficie útil superior a 1000m², donde se renueve más del 25% del total de cerramientos. Esta certificación de eficiencia energética permitirá visualizar de forma directa, clara y comprensible los niveles de consumo energético de una vivienda o edificio, de modo equivalente a las etiquetas energéticas de los electrodomésticos (véase la Figura 22).

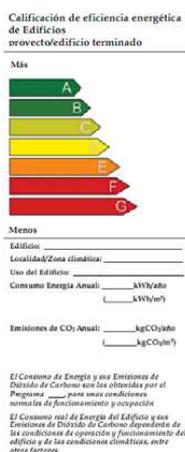


Figura 22 Etiqueta de certificación de eficiencia energética de edificio nuevo.

En el año 2010, la Directiva 2002/91/EC es actualizada por la 2010/31/EC de eficiencia energética en edificios, introduciendo conceptos como el marco metodológico comparativo para calcular los niveles óptimos de rentabilidad de los requisitos mínimos de eficiencia energética de los edificios y de sus elementos; además, introduce el concepto de Edificios de Consumo Energético Casi Nulo, haciendo mención a ello en el artículo 9, donde se especifica que los estados miembros deben garantizar que la cantidad de energía requerida debería estar cubierta, en muy amplia medida, por la energía procedente de fuentes renovables, producida in situ o en el entorno, por lo que el consumo debe ser casi nulo o muy bajo, y establece unas fechas, el 31 de Diciembre de 2018 y de 2020, para su aplicación a todos los edificios nuevos que estén ocupados y sean propiedad de autoridades públicas, y para todos los edificios nuevos de cualquier propiedad, respectivamente.

En Noviembre de 2012 la UE publica la actual Directiva 2012/27/EC relativa a la eficiencia energética de los edificios, y por la que se deroga la Directiva 2006/32/EC. Esta nueva Directiva presenta como objetivos principales:

- *Establecer un marco común de medidas para el fomento de la eficiencia energética dentro de la Unión, a fin de asegurar la consecución del objetivo principal de eficiencia energética de un 20% de ahorro para 2020, y preparar el camino para mejoras posteriores de eficiencia energética más allá de ese año.*
- *Establecer normas destinadas a eliminar barreras en el mercado de la energía y a superar deficiencias del mercado que obstaculizan la eficiencia en el abastecimiento y el consumo de energía.*
- *Disponer el establecimiento de objetivos nacionales orientativos de eficiencia energética para 2020.*

El artículo 4 de la Directiva 2012/27/EC sirve como marco de estrategia para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España, y se materializa a través de la Ley 8/2013 de Rehabilitación, Regeneración y Renovación Urbana (abril 2013), que se enmarca dentro del Plan de Vivienda 2013-2016, y que obliga a disponer de un Informe de Evaluación de Edificios, para edificios de antigüedad superior a 50 años. El informe, además de evaluar el estado de conservación de los edificios, deberá aportar información acerca del grado de cumplimiento de la normativa vigente en materia de accesibilidad, e incluirá la Certificación Energética de Edificios.

En 2013 se aprueba el Real Decreto 235/2013 sobre Certificación Energética de Edificios Existentes. En 2014, se aprueba una nueva revisión del CTE [46] por la que se actualiza el documento básico DB-HE, el cual establece unos requisitos más exigentes en la transmitancia térmica de las fachadas. Ese mismo año, se publica en el BOE el Real Decreto Ley 8/2014 de aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia.

2.11 Influencia de las fachadas en la eficiencia energética de los edificios

La envolvente térmica de los edificios, es la piel que protege a los ocupantes de las inclemencias meteorológicas. De manera natural o pasiva, un edificio de baja eficiencia energética, gana o pierde calor a través de su envolvente, el calor o el frío se escapa por algunas zonas de la envolvente, donde existe un cambio en la geometría o un cambio de materiales o de resistencia térmica, creándose los llamados “puentes térmicos”. La fachada es uno de los principales elementos constructivos del edificio, que permite alcanzar las exigencias de eficiencia energética y confort interior, establecidas en las normas y directivas nacionales e internacionales del sector de la construcción. El tipo de sistema elegido, los materiales y la correcta ejecución de la propia fachada, son aspectos críticos que condicionarán el consumo energético final del edificio.

Actualmente, en la UE los edificios de viviendas y servicios (comercios, oficinas y equipamiento) son responsables del 40% del consumo total de energía final [143]. En España este porcentaje es inferior, de aproximadamente un 28%, debido a que las condiciones climáticas son, en general, más suaves que en el centro y norte de Europa

[144]. Estos altos porcentajes, se derivan entre otros aspectos, por la baja eficiencia térmica de la envolvente de los edificios. Como resultado, la mejora de la eficiencia energética en los edificios se ha convertido en una de las agendas clave de los sectores gubernamentales, para el desarrollo sostenible de los países.

En cuanto al gasto de energía debido a la climatización, en la actualidad los porcentajes se encuentran entre el 40 y el 65% del gasto total del edificio. En un clima mediterráneo-continental como el que existe en España, en los meses de frío los edificios de baja eficiencia energética, sufren mayores pérdidas de calor a través de las fachadas norte y este, consecuencia de las bajas temperaturas. Por otro lado, en verano los edificios obtienen mayores ganancias energéticas a través de las fachadas sur y oeste consecuencia de la radiación solar.

Una de las formas en las que se consigue reducir las pérdidas o ganancias de un edificio, es empleando como parte de los componentes de fachadas, materiales con buenas propiedades térmicas. Estas medidas optimizan el comportamiento energético de la envolvente térmica y consiguen maximizar la retención de calor en las estaciones más frías y minimizar la entrada de calor en las estaciones más calurosas, de forma que, se reduce la demanda de energía para calefacción en invierno (el calor no sale del edificio), así como para refrigeración en verano (el calor no entra en el edificio), y por ende, se reducen los gastos generados por el consumo de energía y la cantidad de emisiones contaminantes, así como también, se aumenta el nivel de confort.

2.12 Normativas para el cálculo y medición de las propiedades térmicas de muros.

Desde mediados de los años 90, se han desarrollado diferentes normativas nacionales e internacionales, que establecen metodologías experimentales o de análisis numéricos para determinar el comportamiento térmico de los componentes y elementos para la edificación, incluyendo los muros. A continuación se muestran aquellas normativas que están relacionadas en mayor medida con la temática de esta investigación:

- **UNE-EN ISO 6946: Componentes y elementos para la edificación. Resistencia térmica y transmitancia térmica. Método de cálculo.**

La resistencia térmica y la transmitancia térmica de los componentes y elementos para la edificación se pueden calcular según la norma europea e internacional UNE-EN ISO 6946 [109]. El método de cálculo se basa en las conductividades térmicas o resistencias térmicas de diseño de los materiales y productos. El método se aplica a los componentes y elementos que consisten en capas térmicamente homogéneas (que pueden incluir capas de aire). Sin embargo, también proporciona un método aproximado que puede usarse para elementos que contengan capas heterogéneas, incluido el efecto de las fijaciones metálicas, mediante un término de corrección. Asimismo, esta norma a diferencia de las demás, permite una mejor consideración del efecto del gradiente térmico y la permeabilidad del aire sobre la resistencia térmica de la cámara de aire. La

norma, fue publicada originalmente en noviembre de 1996 y fue revisada y confirmada por última vez en 2012.

- **UNE-EN ISO 10211: Puentes térmicos en edificación. Flujos de calor y temperaturas superficiales. Cálculos detallados.**

Esta norma establece las especificaciones de un modelo geométrico de puente térmico tridimensional y de uno bidimensional para el cálculo numérico de flujos de calor, con el fin de evaluar la pérdida de calor total de un edificio o parte de él y las temperaturas superficiales mínimas, a fin de evitar el riesgo de condensación de la superficie. Estas especificaciones incluyen las condiciones de contorno y las subdivisiones del modelo, las condiciones térmicas del contorno y los valores térmicos, y las relaciones que se deben emplear. La EN ISO 10211 [109] se basa en las siguientes suposiciones: las propiedades físicas no dependen de la temperatura y no existen fuentes de calor en el interior del elemento del edificio. La norma fue publicada originalmente en noviembre de 1995 y fue revisada y confirmada por última vez en 2012. La nueva versión combina las dos partes en un solo estándar llamado 'cálculo detallado'.

- **ISO 9869-1: Aislamiento térmico - Elementos de construcción - Medición in situ de la resistencia térmica y la transmitancia térmica - Parte 1: Método del medidor de flujo de calor.**

Esta norma describe el método del medidor de flujo de calor para la medición de las propiedades de transmisión térmica de componentes de construcción plana, que consiste principalmente en capas opacas perpendiculares al flujo de calor y que no tienen un flujo de calor lateral significativo. Las propiedades que se pueden medir son la resistencia térmica, la conductancia térmica y la transmitancia térmica. El método de medición del medidor de flujo de calor también se puede emplear en componentes que consisten en capas casi homogéneas perpendiculares al flujo de calor, siempre que las dimensiones de cualquier heterogeneidad en las proximidades del medidor de flujo de calor sean mucho menores que sus dimensiones laterales y no sean puentes térmicos que puedan ser detectados por termografía infrarroja. La UNE-EN ISO 9869-1[109] describe además el análisis de los datos, incluida la corrección de errores sistemáticos y el formato de informe. Esta norma se publicó en 1967 y se revisó y amplió en 2014.

- **UNE-EN 12664: Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor del flujo de calor. Productos secos y húmedos de baja y media resistencia térmica. Y UNE-EN 12667: Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Productos de alta y media resistencia térmica.**

Ambas normas especifican otros métodos para determinar la resistencia térmica de un material mediante los métodos de la placa caliente guardada protegida o del medidor de flujo de calor. La norma UNE-EN 12664 [109] es específica para productos en estado

seco o húmedo, de resistencia térmica media y baja y la UNE-EN 12667 [109] se recomienda para productos de resistencia térmica alta y media, presentando esta un procedimiento de ensayo más sencillo. Ambas normativas fueron publicadas en 2001.

- **UNE-EN ISO 8990: Determinación de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario. Métodos de la caja caliente guardada y calibrada.**

La resistencia térmica total de un muro también se puede medir empleando los métodos de la caja caliente guardada y calibrada, especificados en la norma UNE-EN ISO 8990 [109], la cual establece los principios para el diseño del equipo y los requisitos mínimos que se deben cumplir para la determinación de las propiedades de transmisión térmica en estado estacionario en el laboratorio, de grandes probetas.

Describe además el aparato y la técnica de medición. El principio consiste en colocar una probeta representativa del muro entre dos ambientes controlados (caliente y frío) y así medir el flujo de calor total que lo atraviesa debido a fenómenos de convección y radiación. La caja caliente se basa en el mismo principio de medición del consumo de energía, que el de las mediciones in situ, pero permite controlar mejor las condiciones climáticas en cada lado de la probeta. La precisión de la medición es por lo tanto conocida y mucho más alta. Esta norma ha estado disponible desde 1996 y fue revisada y confirmada por última vez en 2012.

Este método es empleado en esta investigación ya que se considera bastante confiable y permite obtener varios parámetros a la vez.

2.13 Análisis del ciclo de vida

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés, *Life Cycle Assessment*) es una herramienta metodológica con la cual se puede medir el impacto ambiental de un producto, proceso o sistema a lo largo de todo su ciclo de vida o parte de él. Se basa en la recopilación y cuantificación de todas las entradas (materias primas, transporte y consumos de energía) y salidas (emisiones y residuos) que intervienen desde que se obtienen las materias primas hasta su fin de vida. Estos datos, con la ayuda de herramientas y bases de datos, dan como resultado final la cuantificación de los impactos ambientales asociados a un producto, proceso o sistema.

El LCA varía dependiendo del producto a evaluar, su proceso productivo, las bases de datos empleadas y el límite asumido; éste último dependerá de los objetivos del análisis. A continuación, se mencionan las 4 formas más comunes para plantear el límite de un LCA (véase la Figura 23):

- **De la cuna a la puerta**

Considera las entradas y salidas desde que se obtienen las materias primas, hasta que el producto se pone en el mercado (a la salida de la planta de fabricación/montaje).

- **De la cuna al sitio**

Un estudio de estos límites incluye los resultados “de la cuna a la puerta” y el transporte del material o producto a su sitio de uso.

- **Cuna a la tumba**

Incluye tanto los resultados “de la cuna al sitio”, como los resultados asociadas con el uso del material o producto (mantenimiento) y el final de la vida útil (eliminación, reutilización, reciclaje).

- **De la cuna a la cuna**

Va más allá que el estudio “de la cuna a la tumba” y se ajusta en gran medida al modelo de economía circular, ya que los productos se diseñan para que al final de su vida puedan reutilizarse o reciclarse y, por tanto, evitar su disposición en vertederos.

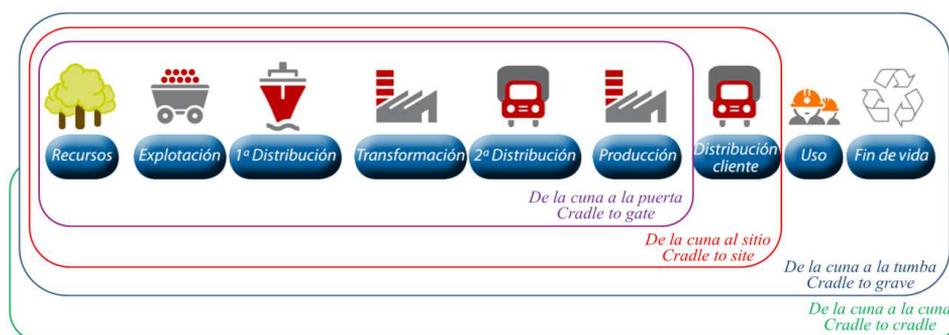


Figura 23 Límites de un LCA.

El marco del LCA se especifica en la norma UNE-EN ISO 14040 [109]. De acuerdo con esta norma, el LCA permite evaluar los impactos potenciales asociados con un producto, mediante la compilación de un inventario de las entradas y salidas de un sistema de producto, la evaluación de los impactos ambientales potenciales y la interpretación los resultados. Asimismo, esta norma describe cuatro fases a realizar que incluyen:

2.13.1 Definición del objetivo y del alcance

El objetivo y alcance de un LCA deben estar definidos de forma clara y concisa. Con ello, se consigue garantizar que la amplitud y el detalle del estudio sean suficientes para lograr el objetivo planteado. En esta etapa, también se define la unidad funcional, la cual puede ser de tipo físico y funcional.

2.13.2 Análisis del inventario

En esta fase se recopilan los datos y procedimientos de cálculo, a fin de cuantificar las entradas y salidas de un sistema de producto.

2.13.3 Evaluación de impacto

La fase de evaluación de impacto del LCA, tiene como finalidad evaluar la importancia de los impactos ambientales, utilizando los resultados del análisis del Inventario del Ciclo de Vida (LCI, por sus siglas en inglés, *Life Cycle Inventory*). En esta fase de la metodología del LCA la norma UNE-EN ISO 14040 [109] establece una serie de etapas que se mencionan a continuación:

a) Selección y definición de las categorías de impacto ambiental

Las categorías representan los impactos ambientales de interés de los cuales se desean obtener resultados. Existen multitud de categorías y la selección de éstas dependerá del objetivo planteado y del nivel de exactitud de los resultados que se desee obtener. A modo orientativo, se indican a continuación las principales categorías de impacto ambiental:

- **Demanda acumulada de energía**

La Demanda de Energía Acumulada (CED, por sus siglas en inglés, *Cumulative Energy Demand*) representa el consumo de los recursos energéticos a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, es decir, el consumo total de energía a partir de recursos renovables y no renovables, que resulta de la fabricación, uso y eliminación de un producto. El cálculo de la energía acumulada a lo largo de todo el ciclo de vida del producto, incluye tanto los usos directos (durante la extracción y transporte de las materias primas, la fabricación, distribución, utilización y tratamiento de los residuos del producto) como indirectos (la producción de electricidad, transporte, etc.) La CED se expresa en Megajulios (MJ).

- **Agotamiento de recursos abióticos:**

Este indicador de categoría de impacto se refiere al consumo de recursos energéticos no renovables (aquellos que se renuevan mediante ciclos naturales extremadamente lentos, p. ej. los combustibles fósiles, o no se renuevan en ciclos naturales, p. ej. los depósitos minerales) con la consiguiente reducción de disponibilidad para las generaciones futuras. Entre las causas de la aceleración del Agotamiento de los Recursos Abióticos (AD, por sus siglas en inglés, *Abiotic Depletion*) está el crecimiento de la población, el aumento del consumo individual y la mala gestión. El ámbito geográfico de este indicador es a escala global. El AD se expresa en kg de Antimonio equivalente/kg emitido (kg Sb-eq).

- **Calentamiento global**

El calentamiento global es un fenómeno provocado por el aumento paulatino de la temperatura en el sistema climático de la Tierra, producto de las elevadas concentraciones de GHG, que provocan el efecto invernadero, siendo los principales GHG el CO₂, el ozono troposférico y el Metano (CH₄). Estas emanaciones son causadas

en gran parte por el hombre, quien ha abusado del consumo de productos, los cuales, en su proceso de fabricación consumen gran cantidad de combustible, emitiendo al ambiente diferentes tipos de gases tóxicos. Entre los efectos negativos se encuentran el aumento del nivel del mar, el aumento del volumen y la frecuencia de la lluvia y el crecimiento de desiertos subtropicales. Esto repercute enormemente, en todas las especies que habitan el ecosistema, y en especial en los seres vivos y en las especies más débiles.

El ámbito geográfico de este indicador es a escala global. Los factores se expresan como Potencial de Calentamiento Global (GWP, por sus siglas en inglés, *Global Warming Potential*) en el horizonte temporal de 100 años, medida en la unidad de referencia en kg de Dióxido de Carbono equivalente/kg emitido (kg CO₂-eq).

- **Reducción de capa de ozono**

Esta categoría de impacto se refiere a la degradación de la capa de ozono estratosférico, que protege a la tierra de los rayos ultravioletas, los cuales son altamente perjudiciales para la vida en el planeta. Este proceso de destrucción del ozono, se debe al transporte de clorofluorocarbonos (CFC) por fuertes vientos hacia la estratosfera, en un proceso que puede tardar de 2 a 5 años. Los clorofluorocarbonos se descomponen en la estratosfera y liberan cloro, el cual ataca al ozono, causando la ruptura catalítica de las moléculas de ozono, lo cual permite que una mayor fracción de radiación ultravioleta alcance la superficie terrestre, con efectos potencialmente nocivos sobre la salud humana, los recursos naturales, el entorno natural y el entorno antropogénico.

Hasta hace poco, los CFC se empleaban ampliamente en aplicaciones industriales, tales como refrigerantes, espumas aislantes y disolventes. Otras sustancias que destruyen el ozono son los pesticidas como el bromuro de metilo, el halón usado en los extintores de incendios y el cloroformo de metilo empleado en procesos industriales. El ámbito geográfico de este indicador es a escala global. El Potencial de Agotamiento del Ozono (ODP, por sus siglas en inglés, *Ozone Depletion Potential*) se expresa en kg de Clorofluorocarbono 11 equivalente/kg emitido (kg R11-eq).

- **Acidificación**

Es la pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua, como consecuencia del retorno a la superficie de la tierra, en forma de ácidos, de los Óxidos de Azufre (SO₃) y de Nitrógeno (NO_x) descargados a la atmósfera. La lluvia ácida es el caso más conocido, pero también se produce acidificación en precipitaciones en forma de nieve, rocío o nieblas. Esto genera una amplia variedad de impactos sobre el suelo, el agua del subsuelo, aguas superficiales, organismos biológicos, ecosistemas y edificaciones. Ocasionando la muerte de peces, daño a los bosques y cultivos y el deterioro de edificios. Este fenómeno ocurre en mayor medida cerca de las fuentes de deposición, llegando a darse a algunos cientos de kilómetros del foco, en función de las condiciones de dispersión.

La escala geográfica varía entre la escala local y escala continental. El potencial de acidificación (AP, por sus siglas en inglés, *Acidification Potential*) se expresa en kg de Dióxido de Azufre equivalente/kg emitido (kg SO₂-eq).

- **Eutrofización**

La eutrofización es el enriquecimiento de nutrientes en un ecosistema acuático. Básicamente, ocurre cuando el agua recibe un vertido de nutrientes, como desechos agrícolas o forestales, lo cual favorece el crecimiento excesivo de materia orgánica, provocando un crecimiento acelerado de algas y otras plantas verdes, que cubren la superficie del agua y evita que la luz solar llegue a las capas inferiores. Todo ello trae como consecuencia que la vegetación muera al no poder realizar la fotosíntesis, y esto a su vez, genera un cambio indeseable en la población de las especies marinas. Otra consecuencia de las altas concentraciones de nutrientes, es la contaminación del agua superficial, pudiéndola llegar a hacer no apta para el consumo.

El Potencial de Eutrofización (NP, por sus siglas en inglés, *Nutrification Potential*) se expresa en kg de Fosfato equivalente/kg emitido (kg PO₄-eq). El destino y la exposición no está incluido, el período de tiempo es la eternidad, y la escala geográfica varía entre la escala local y continental.

- **Oxidación fotoquímica**

La Creación del Potencial de Ozono Fotoquímico (POCP, por sus siglas en inglés, *Photochemical Ozone Creation Potential*) o smog de verano, es la formación de compuestos químicos reactivos, principalmente ozono, por la acción de la luz sobre las emisiones antropogénicas. Estos gases químicamente reactivos, suelen encontrarse en las grandes ciudades, donde existe una gran presencia de industrias y vehículos, los cuales liberan grandes cantidades de Compuesto Orgánico Volátil (VOC, por sus siglas en inglés, *Volatile Organic Compound*) y de NO_x, siendo más notoria la presencia de estos gases durante la época de verano, cuando la luz solar está más presente. Este fenómeno es perjudicial para la salud humana y los ecosistemas. El POCP se expresa en kg de Etileno equivalente/kg emitido (kg C₂H₄-eq) y el lapso de tiempo es de 5 días y la escala geográfica varía entre la escala local y continental.

b) Clasificación

Durante la etapa de clasificación, los datos del LCI son asignados a diferentes categorías de impacto. Si un producto o proceso contribuye a varias categorías de impacto, tiene que ser considerada en todas estas categorías. Los diferentes programas informáticos para el cálculo del LCA permiten agilizar y simplificar esta fase.

c) Caracterización

En esta etapa se calcula la contribución de cada entrada y salida en su categoría de impacto asignado y se totalizan las contribuciones dentro de cada categoría. Una vez

que los datos del LCI se les ha asignado una o más categorías de impacto ambiental. Cada dato es multiplicado por su correspondiente factor de caracterización. De este modo se pueden obtener valores con unidades equivalentes, los cuales finalmente se suman para medir la contribución total de los datos a cada categoría de impacto. Este procedimiento puede ser calculado por los programas informáticos, los cuales permiten obtener resultados en menor tiempo.

d) Interpretación

En esta fase se analiza la información obtenida a lo largo del LCA, a fin de obtener las conclusiones que permitirán determinar los puntos más críticos en el diseño del producto y servirán para optimizar el proceso productivo del producto analizado.

Capítulo 3

Materiales, fabricación y caracterización de mezclas de hormigón

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 cuando se considere esto en la dosificación del hormigón; con ello se evitaría el coste adicional y el impacto ambiental, que conlleva el proceso de secado y el consumo de mayor cantidad de agua, siendo así mucho más viable su uso.

• **Cemento**

Se empleó cemento Portland CEMII/A-M(V-L)42.5R (véase la Figura 24). Según la norma UNE-EN 197-1 [109], se refiere a un cemento Portland mixto alto en clínker, tipo CEM II/A-M con cenizas volante y piedra caliza (VL), resistencia media-alta, 42.5MPa a los 28 días y alta resistencia inicial R. Las características de este tipo de cemento Portland se muestran en la Tabla 8.



Figura 24 Muestra de cemento.

Características del cemento Portland		Norma	Usual
Componentes	Clínker (%)	80-94	84
	Caliza (%)	6-20	7
	Puzolana (%)	-	-
	Cenizas volantes (%)	6-20	9
	Escoria siderúrgica (%)	-	-
	Regulador de fraguado, “yeso” (%)	-	3
Químicas	Trióxido de azufre (SO ₃) (%)	4max.	3.2
	Cloruros (Cl-) (%)	0.10max.	0.03
	Pérdida por calcinación (%)	-	-
	Residuo insoluble (%)	-	-
Físicas	Superficie específica Blaine (cm ² /g)	-	3.750
	Expansión Le Chatelier (mm)	10max.	0.5
	Tiempo de inicio de fraguado (minutes)	60min.	220
	Tiempo final de fraguado (minutes)	-	260
Mecánicas	Compresión a 7 día (Mpa)	-	43.00
	Compresión a 28 día (Mpa)	42.5-62.5	54.00

Tabla 8 Características del cemento Portland CEMII/A-M(V-L)42.5R [145].

- **Áridos**

Se usó como árido fino y grueso, piedra caliza natural machacada (véase la Figura 25).

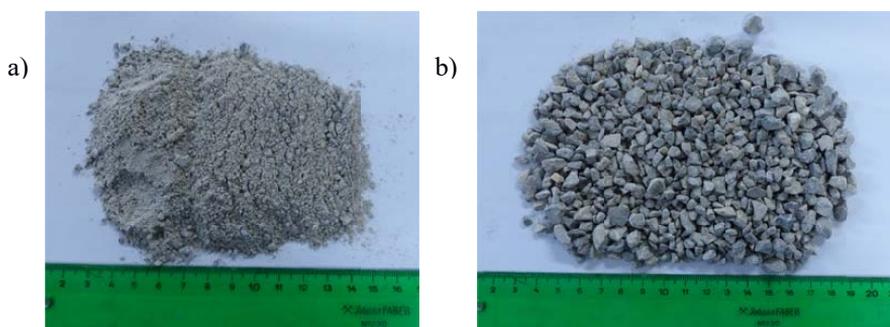


Figura 25 Muestra de árido: a) fino y b) grueso.

- **Virutas de madera**

Las virutas se obtuvieron como subproductos del aserrado de madera de pino Radiata (*Pinus Radiata*) en tamaños estándar para la producción de pallets. Este tipo de madera está clasificada como madera blanda y comprende aproximadamente el 55% de la superficie forestal del País Vasco, por lo que hay gran disponibilidad de la misma. En la fabricación de hormigón, las virutas se usaron como reemplazo de la arena, en volumen. Las mismas, tienen el aspecto que se muestra en la Figura 26. Este subproducto aparece en la Lista Europea de Residuos [16] con el código 03 01 05 como desecho no peligroso.



Figura 26 Muestra de virutas.

- **Cenizas de madera**

Las cenizas de madera utilizadas en este estudio (véase la Figura 27), se producen a partir de la combustión de biomasa de madera de pino Radiata, en una planta de cogeneración de vapor con una capacidad instalada de 21.4MW, de la empresa papelera Smurfit Kappa Nervion S.A.. Las cenizas de madera se utilizaron en reemplazo parcial del cemento para la fabricación de hormigón. Este subproducto aparece en la Lista Europea de Residuos [16] con el código 10 01 03, como desecho no peligroso, lo cual se corroboró en los ensayos realizados para su caracterización.



Figura 27 Muestra de cenizas de madera.

- **Lodos de cal**

Los lodos de cal, se producen como un subproducto del proceso de reciclaje en la producción de papel de la empresa Smurfit Kappa Nervion S.A., usando madera de pino Radiata como materia prima (véase la Figura 28). Este subproducto fue utilizado en el reemplazo parcial de cemento para la fabricación de hormigón. Aparece en la Lista Europea de Residuos [16] con el código 03 03 09, como desecho no peligroso, coincidiendo con los resultados obtenidos en su caracterización química.



Figura 28 Muestra de lodos de cal.

- **Plastificante**

Como aditivo plastificante se usó la marca comercial MasterGlenium ACE 425 de la empresa BASF, un superplastificante/agente reductor de agua para hormigón, para mejorar la trabajabilidad de la mezcla.

- **Agua**

Se utilizó agua potable de Bilbao para la fabricación de las probetas de hormigón, con un pH de 7.88mg/L, un contenido de sulfato de 28.2mg/L y una dureza de <7°f, con niveles insignificantes de compuestos que pudiesen afectar negativamente la preparación de mezclas de hormigón. Por otro lado, el agua urbana de Iurreta se usó para la fabricación de los bloques, con pH de 7.81mg/L, contenido de sulfato <20mg/L y dureza de <14°f; este agua tampoco mostró compuestos que pudieran ser dañinos para el hormigón.

3.2.1 Caracterización física de los materiales

- **Densidad**

La densidad de los materiales se determinó de acuerdo con la norma UNE-EN 1097-3 [109], excepto para las virutas que se determinó a partir de la densidad de un sólido de bloque de madera de acuerdo con la norma UNE-EN 408 [109]. La densidad seca del cemento, árido fino, árido grueso, virutas, cenizas de madera y lodos de cal se muestra en la Tabla 9. El árido ligero se define en la norma UNE-EN 13055 [109] como cualquier árido con una densidad seca inferior a 1.20Mg/m^3 , por lo que los subproductos empleados en este estudio se clasifican como materiales ligeros.

Materiales	Densidad (Mg/m^3)
Cemento	3.05
Árido fino	2.71
Árido grueso	2.70
Virutas	0.57
Cenizas de madera	0.31
Lodos de cal	0.83

Tabla 9 Densidad del cemento, árido fino, árido grueso, virutas, cenizas de madera y lodos de cal.

- **Tamaño de partícula**

El tamaño de partícula para los áridos naturales y las virutas se determinó mediante la técnica de tamizado (véase la Figura 29a), según lo estipulado en la norma UNE-EN 933-1 [109]; y para las cenizas de maderas y los lodos de cal empleando la técnica de difracción láser (véase la Figura 29b). Los tamaños del árido fino, árido grueso, virutas, cenizas de madera y lodos de cal se muestran en la Tabla 10. La curva granulométrica de los áridos, virutas, cenizas de madera y lodos de cal se muestra en la Figura 30. Como se puede observar, las cenizas de madera y los lodos de cal tienen una granulometría similar, ambos pasan por el tamiz 0.063mm , por lo cual podrían ser empleados como filler o como sustituto parcial del cemento; mientras que las virutas, tienen una granulometría que se encuentra dentro del rango del árido fino, en consecuencia, es conveniente reemplazar parcialmente este último por las virutas.

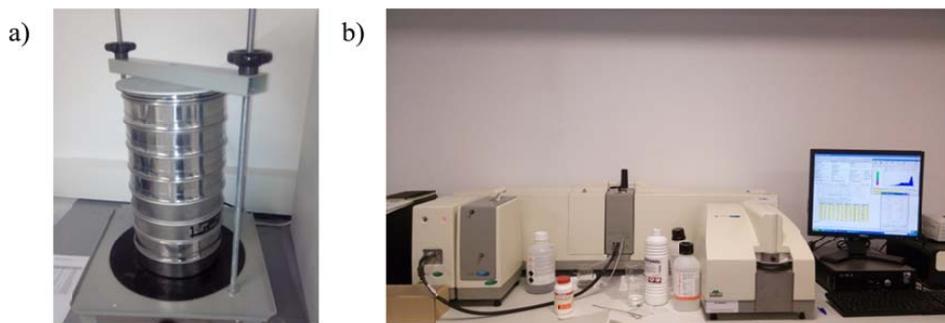


Figura 29 a) Juego de tamices y b) equipo de difracción láser.

Materiales	Rango de tamaño
Árido fino	0-4mm
Árido grueso	2-6mm
Virutas	0-2mm
Cenizas de madera	1-60 μ m
Lodos de cal	0.4-50 μ m

Tabla 10 Rango de tamaños del árido fino, árido grueso, virutas, cenizas de madera y lodos de cal.

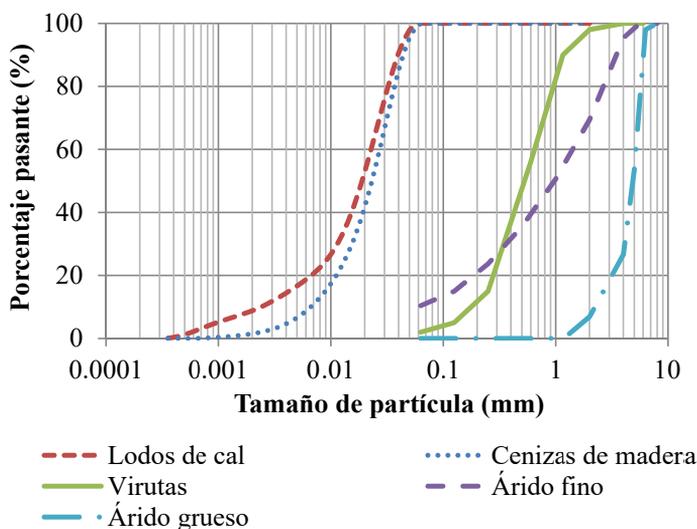


Figura 30 Curva granulométrica del árido fino, árido grueso, virutas, cenizas de madera y lodos de cal.

• **Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)**

La Microscopia Electrónica de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés, *Scanning Electron Microscope*) se realizó a fin de analizar la microestructura de los subproductos, para ello, fue necesario emplear un microscopio electrónico de barrido (véase la Figura 31). Como se muestra en la imagen SEM, Figura 32, la superficie de una partícula típica de viruta

presenta cavidades en forma de tubos huecos, paralelos y cercanos entre sí, los cuales presentan a su vez huecos, que parecen estar alineados. También presenta zonas sólidas con superficie de forma irregular. En la Figura 33, la imagen SEM de las cenizas de madera muestra un alto grado de irregularidad en la forma de las partículas y porosidad en su superficie. Por otro lado, en la Figura 34, la imagen SEM revela que los lodos de cal contenían pocas partículas porosas y muchas de forma poliédrica. La alta porosidad de las virutas y las cenizas de madera, observadas en las imágenes SEM, contribuyeron significativamente a los valores de baja densidad mostrados anteriormente.



Figura 31 Microscopio electrónico de barrido.

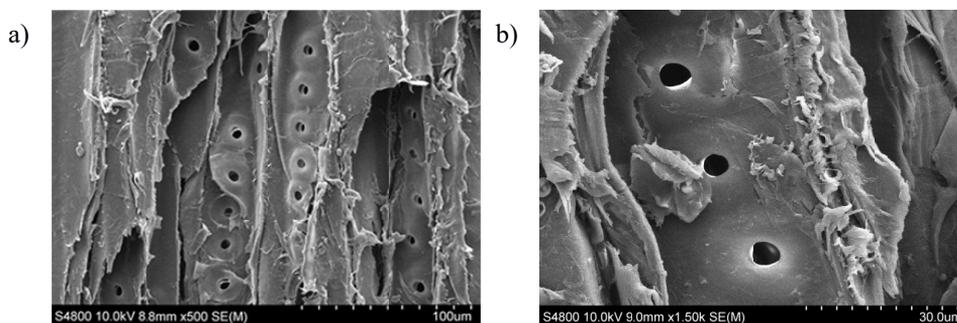


Figura 32 Morfología de las partículas de virutas.

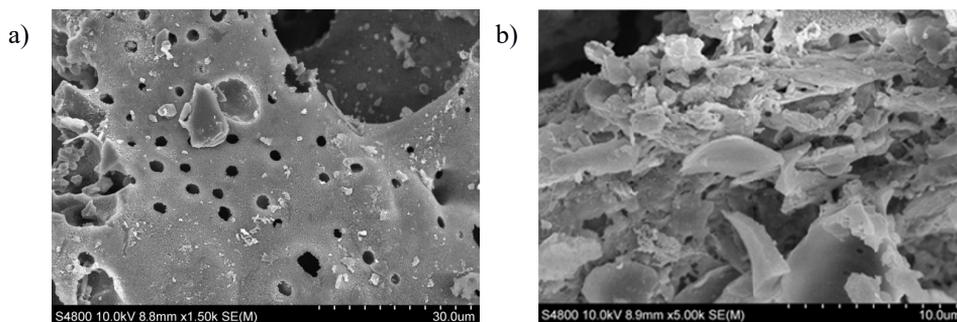


Figura 33 Morfología de las partículas de cenizas de madera.

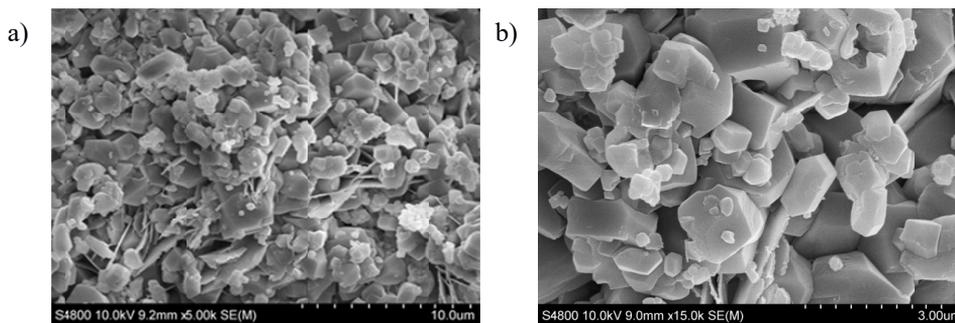


Figura 34 Morfología de las partículas de lodos de cal.

3.2.2 Caracterización química de los subproductos

- **Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (XRF)**

Este ensayo se realizó con objeto de determinar la composición química de las cenizas de madera y los lodos de cal. A partir de una pequeña muestra en polvo de cada subproducto, se preparó un perla de vidrio borado mediante fusión, en un microhorno de inducción, mezclando el fundente Spectromelt A12 y la muestra seca en proporciones aproximadas de 20:1.

El análisis químico de cada perla se realizó en atmósfera de vacío, empleando un espectrómetro secuencial de fluorescencia de rayos X (véase la Figura 35) por dispersión de longitud de onda (WDXRF), dotado con un tubo de Rh, y tres detectores (flujo gaseoso, centelleo y sellado de Xe).



Figura 35 Espectrómetro secuencial de WDXRF.

Para la confección de las rectas de calibrado se utilizaron patrones internacionales bien caracterizados de rocas y minerales. Además, se calculó la pérdida por calcinación (LOI, por sus siglas en inglés, *Loss On Ignition*), tras someter una porción alícuota de cada muestra a 1050°C, durante una hora en un horno mufla.

Los resultados obtenidos mediante Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (XRF, por sus siglas en inglés, *X-ray Fluorescence*) de las muestras analizadas en forma de perla

quedan recogidos en la Tabla 11. Los elementos químicos de las virutas no se determinaron con esta técnica, ya que coinciden exactamente con los de las cenizas de madera (producidas por la combustión de biomasa del pino Radiata). Debe mencionarse la presencia de cantidades notorias de hidrocarburos no quemados en las cenizas de madera, que forman parte de la LOI. Por el contrario, la LOI de los lodos de cal es principalmente dióxido de carbono, con una menor presencia de materia orgánica a partir de fibras celulósicas.

Muestra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	LOI
WA	30.04	6.17	1.95	0.11	0.70	5.62	0.35	2.22	0.39	0.30	0.30	50.83
LM	0.03	0.01	0.09	0.01	0.19	50.31	2.83	0.17	0.01	0.04	1.48	46.1

WA = Cenizas de madera y LM = Lodos de cal.

Tabla 11 Composición química de los subproductos (% en masa).

Las cenizas de madera mostraron un alto porcentaje de dióxido de silicio (SiO₂), alcanzando un 30%, seguido de un 6.2% de óxido de aluminio (Al₂O₃), 5.6% de óxido de calcio (CaO), 2.2% de óxido de potasio (K₂O) y 2.0% óxido de hierro (Fe₂O₃). El resto de los compuestos presentes en la muestra de cenizas de maderas, se encontraron en porcentajes muy bajos, inferiores al 1%. Estas cantidades son adecuadas, ya que cantidades mayores (>4%) de algunos de estos compuestos, podrían causar un aumento volumétrico en el sólido debido a la hidratación, causando tensiones internas que podrían romper el hormigón o producir un falso fraguado; los cuales son efectos indeseables en el hormigón, especialmente si se tratan de hormigones para productos de tipo prefabricados.

Por otro lado, los lodos de cal presentaron un alto contenido de CaO, un poco más del 50%. De acuerdo con Ban et al. [146] altas composiciones de CaO (>40%) en el material pueden volverlo hidráulicamente reactivo. El sulfato de sodio (Na₂SO₄) y el azufre, en forma de trióxido de azufre (SO₃), estuvieron presentes en menores cantidades, mientras que los otros compuestos se encontraron en cantidades menores al 1%.

Actualmente, la norma Estadounidense ASTM C618 [93] y la Europea UNE-EN 450-1 [109] solo permiten la sustitución parcial del cemento por cenizas volantes de carbón y puzolanas naturales crudas o calcinadas. Sin embargo, debido a las preocupaciones ambientales y al aumento de la producción de residuos y subproductos, en el futuro se adoptarán otros materiales que cumplan con los requisitos físico-químicos, para su uso como material puzolánico. Los resultados de XRF se compararon con los requisitos de la norma ASTM C618 [93], con el fin de determinar si las cenizas de madera y los lodos de cal se podrían usar como materiales puzolánicos en el hormigón. Los requisitos químicos especificados por la norma establecen que la suma de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ debe ser de al menos un 70%, el trióxido de azufre (SO₃) no debe exceder el 5%, el contenido de humedad no debe superar el 3% y la LOI no exceder el 10%, para que el material pueda clasificarse como puzolana.

Se encontró que la suma del contenido de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , de las cenizas de madera y los lodos de cal eran de 38.16 y 0.13%, respectivamente, siendo ambos valores menores al porcentaje mínimo establecido en la norma. En cuanto al contenido de SO_3 en ambos subproductos, se encontró que los valores eran menores al porcentaje establecido, por lo que en este caso si cumplieron este requisito. Por otra parte, la LOI obtenida para las cenizas de madera y lodos de cal fue del 50.83 y 46.1%, respectivamente, mayor al mínimo permitido. El alto valor de LOI para las cenizas de madera puede deberse al contenido apreciable de materia orgánica [26], mientras que para el caso de los lodos de cal los valores altos se deben a la presencia de dióxido de carbono. En líneas generales, los componentes químicos de ambos subproductos, no se ajustaron a las especificaciones de la norma ASTM C618 [93]. Por lo tanto, se puede afirmar que las cenizas de madera y los lodos de cal no muestran propiedades puzolánicas.

- **Contenido de Carbono (C), Hidrógeno (H), Nitrógeno (N) y Azufre (S)**

Este ensayo se llevó a cabo con el objetivo de medir el contenido de C, H, N y S presente en las muestras de virutas, cenizas de madera y lodos de cal. Para ello, se empleó un Analizador Elemental de C, H, N y S (véase la Figura 36). El método analítico consistió en la oxidación completa e instantánea de la muestra a través de la combustión con oxígeno a una temperatura de 1020°C.



Figura 36 Analizador Elemental de C, H, N y S.

El contenido de C, H, N y S se resume en la Tabla 12. Como se observa, C fue el elemento químico con mayor presencia en las virutas y cenizas de madera; esto no causa sorpresa alguna, ya que la madera está formada principalmente por C, H y O orgánicos. Debido al alto contenido de C en las virutas y las cenizas de madera, su uso se limita a materiales de baja y media resistencia como bloques, pavimentos de hormigón y similares [147]. A pesar de esta limitación, es bien sabido que cuanto mayor es el contenido de carbono, menor es la densidad del material, lo que finalmente conduce a una menor densidad y conductividad térmica del hormigón. Por el contrario, los lodos de cal presentan cantidades menores de C, principalmente presentes en formas inorgánicas de carbonato. El mayor porcentaje de H también se obtuvo en las virutas; que se atribuye a la celulosa presente en la madera, ya que la celulosa presenta una cantidad significativa de H. Además, el H era menos del 1% tanto en las cenizas de madera como en los lodos de

cal. Se encontraron cantidades menores de otros elementos como N y S en todos los subproductos

Muestra	C	H	N	S
Virutas	47.85	6.22	<1.6	<3
Cenizas de madera	38.24	<1	<1.6	<3
Lodos de cal	13.11	<1	<1.6	<3

Tabla 12 Contenido de C, H, N y S presente en los subproductos (% en masa).

3.2.3 Caracterización mineralógica de los subproductos

- **Termogravimetría y calorimetría diferencial de barrido (TG y DSC)**

El comportamiento térmico de las cenizas de madera y los lodos de cal se analizaron empleando un analizador térmico de Termogravimetría y Calorimetría Diferencial de Barrido (TG/DSC, por sus siglas en inglés, *Thermogravimetry/Differential Scanning Calorimetry*), el cual se muestra en la Figura 37. El TG mide la cantidad de cambio de peso de un material, en función del aumento de la temperatura. Por otro lado, el DSC mide la cantidad de energía absorbida o liberada por una muestra cuando se calienta o enfría, proporcionando datos cuantitativos y cualitativos sobre los procesos endotérmico (absorción de calor) y exotérmico (liberación de calor). Para llevar a cabo el ensayo, se calentaron aproximadamente 15mg de la muestra desde la temperatura ambiente hasta 900°C, con una velocidad de calentamiento de 10°C/min.



Figura 37 Analizador térmico de TGA-DSC.

Las curvas TG/DSC de cenizas de madera se muestran en la Figura 38. La curva TG indica que la muestra de cenizas de madera perdió masa a medida que la temperatura aumentaba. A una temperatura inferior a 250°C, la curva de TG mostró una pérdida inicial de masa del 7.424%; el DSC mostró un pico endotérmico a 60°C, atribuido principalmente a pérdidas de humedad por fisiorción y quimisorción [148]. Las principales variaciones en masa se encontraron en el TG/DSC en el rango de 300-580°C, donde un pico exotérmico fue seguido por una curva descendente, debido a la combustión de materia orgánica en la ceniza. En este punto del gráfico, la curva TG mostró una variación de masa del -41.537%. Después de 580°C, la curva de DSC comenzó una

descomposición en varias etapas, en la cual el aluminio y el carbonato de calcio se descomponen. La pérdida de masa total fue del 51.61%, similar al valor de LOI obtenido por XRF (véase la Tabla 11).

Las curvas TG/DSC de los lodos de cal se muestran en la Figura 39. La curva DSC de esta muestra tiene algunos picos endotérmicos menores a temperaturas inferiores a 125°C, con una pérdida de masa de alrededor del 3%; este comportamiento es característico de los procesos de desorción y secado. A medida que la temperatura aumentaba, se observó un pico exotérmico a 520°C y luego un fuerte pico endotérmico a 828°C; variaciones que son características de la descomposición de la calcita (CaCO_3). La segunda variación de masa notable fue -1.87%, que ocurrió entre temperaturas de 300 a 550°C, correspondiente a la combustión de materia orgánica menor. La curva luego cae abruptamente de 600 a 828°C con una pérdida de masa del 38.3%, alcanzando una variación de masa de -43.3%; este resultado también concuerda con la pérdida de masa dada en la Tabla 11.

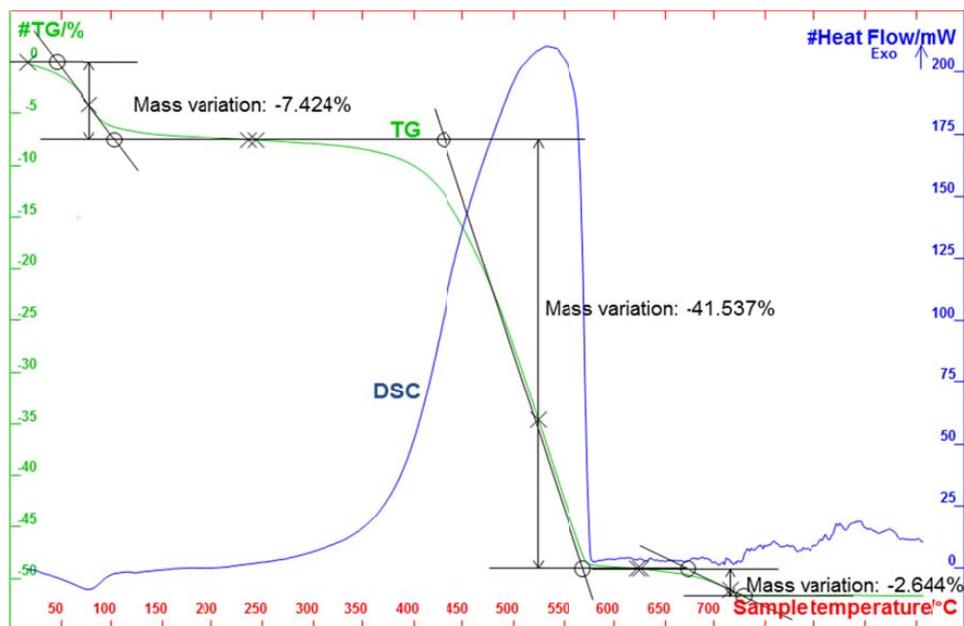


Figura 38 Curva TG/DSC de las cenizas de madera.

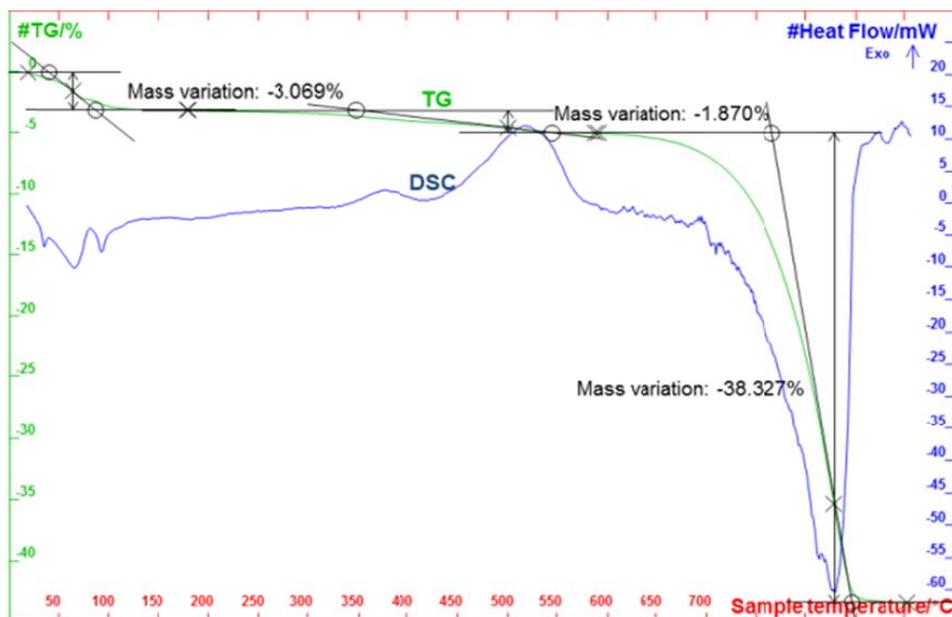


Figura 39 Curva TG/DSC de los lodos de cal.

- **Difracción de rayos X (XRD)**

El análisis de difracción de rayos X (XRD) se realizó a fin de identificar la fase cristalina de las cenizas de la madera y los lodos de cal. Una porción de cada muestra se analizó mediante DRX de polvo, en un difractómetro (véase la Figura 40), equipado con tubo de cobre ($\lambda Cu_{K\alpha media}=1.5418\text{\AA}$, $\lambda Cu_{K\alpha 1}=1.54060\text{\AA}$ y $\lambda Cu_{K\alpha 2}=1.54439\text{\AA}$), goniómetro vertical (geometría Bragg-Brentano), rendija programable de divergencia, intercambiador automático de muestras, monocromador secundario de grafito y detector PixCel.



Figura 40 Difractómetro.

Las condiciones de medición fueron de 40KV y 40mA, con un barrido comprendido entre 5 y 70°2theta. Para el tratamiento informático de los difractogramas obtenidos e

identificación de las fases presentes, se empleó el software específico PANalytical X'pert HighScore, en combinación con la base de datos PDF2 del Centro Internacional de Datos de Difracción.

A partir de la Figura 41 se identificaron cuatro fases cristalinas en el patrón XRD de las cenizas de madera: cuarzo (SiO_2) trigonal como fase cristalina mayoritaria (color rojo), CaCO_3 trigonal (color azul), minerales del grupo de los filosilicatos (arcillas) e indicios de yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ monoclinico (color verde). Además, la elevación en la región de $20\text{-}30^\circ 2\theta$, en la parte inferior del diagrama, indicó la presencia de cantidades muy importantes de material amorfo (no cristalino). Teniendo en cuenta que la pérdida de volátiles (CO_2 de calcita, H_2O de grupos OH de arcillas y H_2O de la hidratación del yeso) de las fases cristalinas identificadas no puede justificar el alto valor de LOI (50.83%), se puede decir entonces, que las cantidades significativas de material amorfo observadas en el difractograma corresponden a la materia orgánica. Por lo tanto, considerando las XRD (fases identificadas e intensidades relativas) y los resultados de XRF, se puede estimar la siguiente composición para las cenizas de madera: 25% de cuarzo, 10% de calcita, 10-15% de arcillas, yeso (<1%), material amorfo (probablemente orgánica en su mayor parte y sílice amorfa en una proporción menor de alrededor del 5%) 50-55%.

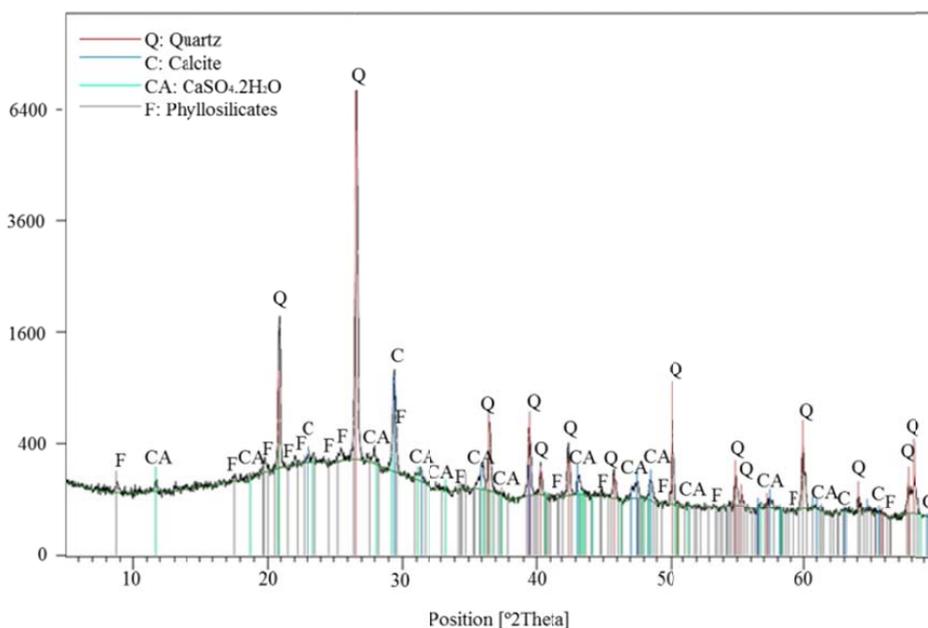


Figura 41 XRD de las cenizas de madera.

Por el contrario, dos fases cristalinas se identificaron en la Figura 42 para los lodos de cal: CaCO_3 trigonal (color rojo) como fase mayoritaria y portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) en pequeñas cantidades (color azul). Estos resultados concuerdan con los obtenidos en el análisis químico de este subproducto. La LOI del 46.1% en la Tabla 11 también incluye el agua

perdida en la descomposición de las pequeñas cantidades de portlandita detectadas en el XRD ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ consiste en $79.7\%\text{CaO} + 24.3\%\text{H}_2\text{O}$) y cualquier materia orgánica remanente. No se detectaron fases cristalinas portadoras de azufre y sodio, por lo que estas fases estarían en muy pequeñas cantidades, o bien esos elementos forman parte de algo de material amorfo (no cristalino) incluido en la muestra. Por lo tanto, los lodos de cal están formados esencialmente de CaCO_3 ($>90\%$), con pequeñas cantidades de portlandita (del orden de 1-3%) y seguramente también pequeñas cantidades de material no cristalino.

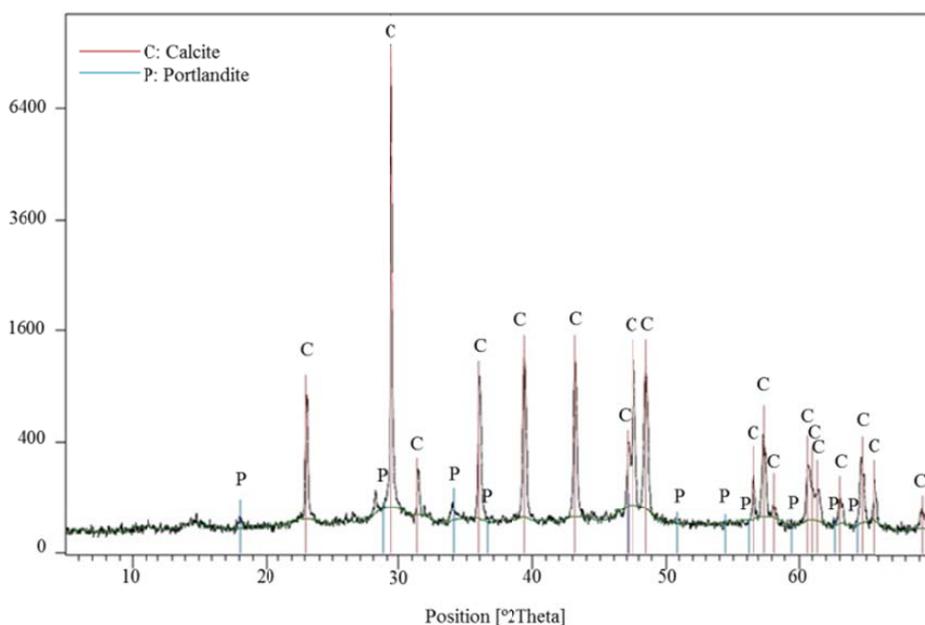


Figura 42 XRD de los lodos de cal.

3.3 Metodología experimental

En esta sección, se describen los diseños de las mezclas de hormigones de baja resistencia, con dosificaciones similares a las de los bloques, basados en la revisión de la literatura y en las proporciones utilizadas por la empresa de Prefabricados Alberdi S.A. En total se realizaron 10 tipos de mezclas, de las cuales 9 se realizaron con incorporación de subproductos y una sin subproductos, que sirvió de referencia.

Conjuntamente, en esta sección se exponen los procedimientos de los ensayos realizados. Cabe destacar que, esta etapa se desarrolló a fin de obtener los contenidos óptimos de subproductos, la selección se basó primordialmente en la mejora de las propiedades del hormigón, siendo de especial interés, aquellas probetas en las que se consiguió una mayor optimización térmica, y que a su vez cumplieron los requisitos exigidos por la normativa vigente referente a bloques de hormigón.

3.3.1 Diseño de las mezclas de hormigón

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. Las designaciones de estos 10 tipos de hormigón son REF, CS-5, CS-10 y CS-20, CWA-5, CWA-10, CWA-15, CLM-5, CLM-10 y CLM-15, respectivamente.

En el hormigón de referencia, la cantidad de plastificante fue del 1%, en masa de cemento, y la relación w/c se estableció en 0.4. A partir de estos valores, las cantidades (absolutas) de plastificante y agua permanecieron constantes en las demás mezclas, para obtener un producto final con la porosidad deseada, aun sabiendo que la cantidad de cemento, por su sustitución parcial por cenizas de madera y lodos de cal se redujo. Una porosidad vacuolar nominal de aproximadamente el 20% era tanto previsible como deseable, a fin de obtener valores de densidad de no más de 2Mg/m^3 (hormigón liviano).

La cantidad de árido grueso, fue en todos los casos de 500kg/m^3 . Las mezclas fueron diseñadas para tener un asentamiento cero, de acuerdo con los requisitos de fabricación para los bloques. Las proporciones de la mezcla se presentan en la Tabla 13.

Tipo	CEM (kg/m^3)	AF (kg/m^3)	AG (kg/m^3)	LM (kg/m^3)	WA (kg/m^3)	S (kg/m^3)	W (kg/m^3)	SP (kg/m^3)
REF	180	1900	500	-	-	-	72	1.80
CS-5	180	1805	500	-	-	19.98	72	1.80
CS-10	180	1710	500	-	-	39.96	72	1.80
CS-20	180	1520	500	-	-	79.93	72	1.80
CWA-5	171	1900	500	-	0.91	-	72	1.80
CWA-10	162	1900	500	-	1.83	-	72	1.80
CWA-15	153	1900	500	-	2.74	-	72	1.80
CLM-5	171	1900	500	2.45	-	-	72	1.80
CLM-10	162	1900	500	4.90	-	-	72	1.80
CLM-15	153	1900	500	7.35	-	-	72	1.80

CEM = Cemento, AF = Árido fino, AG = Árido grueso, S = Virutas, WA = Cenizas de madera, LM = Lodos de cal, W = Agua y SP = Superplastificante.

Tabla 13 Diseño de las mezclas de hormigón para 1 m^3 .

El procedimiento que se siguió requirió el mezclado en seco de los áridos finos y gruesos durante 30 segundos. Seguidamente, se agregó el cemento y se mezcló por otros 30 segundos, completando la mezcla en seco con la adición del subproducto y repitiendo el ciclo. El agua y el superplastificante se agregaron gradualmente. Después del desmoldeo, las probetas de hormigón se dejaron curar mediante su inmersión en agua a temperatura ambiente (20°C).

3.3.2 Procedimiento experimental

La caracterización de las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de las mezclas de hormigón se evaluaron mediante diferentes procedimientos de ensayo. Para cada tipo de hormigón, se realizaron 18 (3+12+3) probetas cúbicas, reutilizando para el ensayo térmico, las probetas del ensayo de absorción por capilaridad. En la Tabla 14, se resumen los ensayos realizados, con sus respectivas normativas, los tamaños y el número de probetas.

Ensayo	Norma	Tamaño de la probeta (mm)	Número de probetas ensayadas
Asentamiento	UNE-EN 12350-2 [109]	-	-
Densidad seca Absorción Porosidad	UNE-EN 83980 [109]	100x100x100	30
Absorción por capilaridad	UNE-EN 83982 [109]	100x100x100	30
Resistencia a compresión	UNE-EN 12390-3 [109]	100x100x100	120
Conductividad térmica Difusividad térmica Calor específico	UNE-EN ISO 22007-2 [109]	100x100x100	30*

* Probetas reutilizadas

Tabla 14 Resumen de los ensayos realizados a los hormigones, normativas, tamaños y número de probetas ensayadas.

3.3.2.1 Asentamiento

Este ensayo se realizó con el propósito de garantizar que todas las mezclas tuvieran un asentamiento cero (≤ 6 mm), ya que es un requisito esencial en la fabricación de bloques. Una vez que el hormigón se mezcló, se llevó a cabo el ensayo de asentamiento, siguiendo lo establecido en la norma UNE-EN 12350-2 [109]. Para ello, fue necesario humedecer el cono de Abrams y colocarlo en el suelo, este se llenó en tres capas, cada una de aproximadamente un tercio del volumen del molde. Cada capa se compactó con 25 golpes, utilizando una varilla de compactación, distribuyendo uniformemente los golpes sobre la sección transversal de la capa. Posteriormente, se enrasó la superficie haciendo rotar sobre ella la varilla, se levantó el molde en dirección vertical sin perturbar el hormigón en un tiempo de aproximadamente 5 segundos y se colocó una placa sobre el cono invertido, de modo que se extendiera sobre el hormigón asentado (véase la Figura 43). Finalmente, se procedió a medir la distancia entre la placa y el centro original de la cara superior del hormigón. Esta distancia es el asentamiento del hormigón.



Figura 43 Cono de Abrams y mezcla de asentamiento cero.

3.3.2.2 Densidad, absorción y porosidad accesible al agua

La densidad, absorción y porosidad del hormigón generalmente se consideran factores importantes, puesto que estos parámetros están directamente relacionados con los comportamientos mecánicos, térmicos, acústico, así como también con la durabilidad del material. Para la caracterización física de los diferentes tipos de hormigón se siguieron las directrices especificadas en la normativa UNE-EN 83980 [109]. Se ensayaron 3 probetas por cada tipo de hormigón, con dimensiones de 100mm x 100mm x 100mm. El procedimiento consistió en medir la masa seca, después de que cada probeta se acondicionara mediante secado en horno, a una temperatura de 105°C, durante un mínimo de 24 horas, hasta que la variación de masa fuese menor al 0.5% en las mediciones espaciadas 1 hora.

Posteriormente, la probeta se sumergió en agua a $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$, durante 48 horas, hasta que la diferencia de masa entre dos mediciones sucesivas, espaciadas 24 horas, fuese menor al 0.5%. Se eliminó la humedad superficial con una toalla y se determinó la masa tras inmersión.

La probeta se colocó en un recipiente, se llenó con agua y se dejó hervir durante 5 horas (véase la Figura 44a). Después de ese tiempo, se dejó enfriar por pérdida natural de calor durante 15 horas, hasta que la temperatura final estuviera entre 20 y 25°C. Inmediatamente después, se eliminó la humedad superficial con una toalla y se determinó la masa de la muestra tras saturación por ebullición.

Por último, la probeta se suspendió, mediante un hilo de nylon, se sumergió en agua y se determinó su masa aparente (véase la Figura 44b).

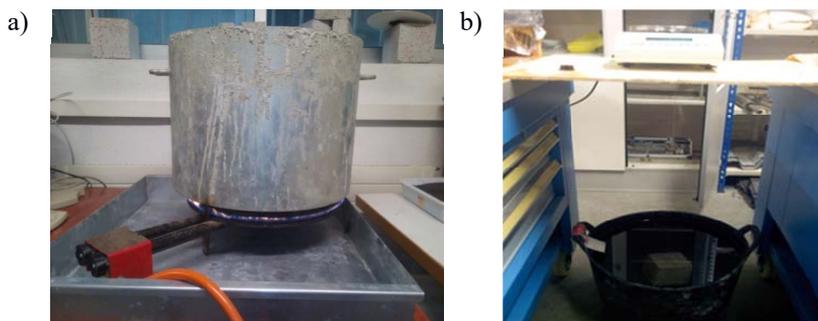


Figura 44 Probeta a) en agua hervida y b) pesada.

La densidad, absorción y porosidad se calcularon de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Densidad, } \frac{\text{Mg}}{\text{m}^3} = \frac{m1}{0,001} \quad (3-1)$$

$$\text{Absorción después de inmersión y ebullición, \%} = \frac{m3 - m1}{m1} * 100 \quad (3-2)$$

$$\text{Porosidad, \%} = \frac{m3 - m1}{m3 - m4} * 100 \quad (3-3)$$

Dónde: $m1$ es la masa de la probeta secada al horno, (Mg); $m2$ es la masa de la probeta con superficie seca después de la inmersión, (Mg); $m3$ es la masa de la probeta con superficie seca después de la inmersión y la ebullición, (Mg); $m4$ es la masa aparente de la probeta en agua después de la inmersión y la ebullición, (Mg); y ρ es la densidad del agua que es igual a 1Mg/m^3 .

Los resultados finales se expresaron con dos cifras decimales en el caso de la densidad, y con una cifra decimal, en el caso de la absorción de agua y la porosidad accesible al agua, tal y como lo indica la norma.

3.3.2.3 Absorción por capilaridad

La absorción por capilaridad es un parámetro asociado con la durabilidad del hormigón. Este ensayo se basa en el método de Fagerlund [149], cuyo objetivo es determinar el coeficiente de absorción por capilaridad del hormigón endurecido, que depende de la interconexión de la red de poros en el interior del material.

Antes de comenzar el ensayo, se cortaron 3 probetas por cada tipo de hormigón, de $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$, por la mitad con una rectificadora, para obtener un total de 60 probetas de tamaño $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 50\text{mm}$ (véase la Figura 45).



Figura 45 a) Rectificadora y b) probeta cortada.

Para determinar la absorción por capilaridad, se siguió el procedimiento establecido en la norma UNE-EN 83982 [109]. Esta norma especifica que antes de proceder al ensayo, es necesario acondicionar las probetas, siguiendo el procedimiento especificado en la norma UNE-EN 83966 [109]. Con este acondicionamiento, se logra que las probetas tengan un contenido de humedad constante, que permita hacer comparables los resultados, ya que si la probeta contiene agua en los poros afectaría la velocidad de transporte de los fluidos y gases a través del material, haciendo que los resultados no sean representativos. Según esta última norma, una humedad relativa dentro de la probeta de hormigón entre 65 y 75%, se considera adecuada para la ensayo de absorción por capilaridad.

El acondicionamiento consistió en dejar secar las probetas en un horno (véase la Figura 46), a una temperatura de $(50\pm 2)^{\circ}\text{C}$, durante 4 días. Transcurrido ese tiempo, las probetas se retiraron del horno y se sellaron, envolviéndolas en una película de polietileno impermeable al vapor de agua. Se dejaron nuevamente en el horno a $(50\pm 2)^{\circ}\text{C}$, durante otros 3 días. Después, las probetas selladas se sacaron del horno, la película de polietileno se retiró y se colocó sobre una base de soporte en un recipiente a $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ y (65-75%) de humedad relativa. Para lograr y mantener estos porcentajes de humedad relativa, se introdujo una solución saturada de cloruro de sodio (NaCl) en el fondo de un recipiente, se introdujeron las probetas de tal modo que no estuvieran en contacto con el fluido, se cerró el recipiente y se mantuvo durante 21 días hasta el día del ensayo de absorción por capilaridad.



Figura 46 Acondicionamiento de las probetas en el horno.

Después del acondicionamiento, las probetas se colocaron sobre las bases de soporte (véase la Figura 47a), asegurando una superficie de contacto mínima entre la probeta y el agua de al menos 95% (véase la Figura 47b). Se introdujo agua en el contenedor, teniendo cuidado de no mojar la superficie del hormigón, hasta una lámina de agua con una altura de $5\pm 1\text{mm}$ en el lateral de la probeta. El aumento de masa de los especímenes se midió periódicamente con un balanza de 0.1 g de precisión, hasta que la diferencia entre dos pesadas sucesivas, espaciadas un mínimo de 24 horas, fuese menor que 0.1%. La temperatura de ensayo se mantuvo a $(20\pm 2)^\circ\text{C}$.



Figura 47 a) Probetas sometidas al ensayo de absorción por capilaridad y b) bases de soporte.

El coeficiente de absorción por capilaridad, la porosidad efectiva del hormigón y la resistencia a la penetración del agua por la absorción capilar se calcularon de acuerdo con estas expresiones:

$$K = \frac{\delta a \cdot \varepsilon e}{10 \cdot \sqrt{m}} \quad (3-4)$$

$$\varepsilon = \frac{Qn - Qo}{A \cdot h \cdot \delta a} \quad (3-5)$$

$$m = \frac{tn}{h^2} \quad (3-6)$$

Dónde: K es el coeficiente de absorción por capilaridad, [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$]; δa es la densidad del agua, ($1\text{g}/\text{cm}^3$); ε es la porosidad efectiva del hormigón, (cm^3/cm^3); m la resistencia a la penetración del agua por la absorción capilar, (min/cm^2); Q_n es el peso de la probeta cuando alcanza la saturación ($t=tn$), (g); Q_0 es el peso de la probeta antes de comenzar el ensayo ($t=0$), (g); A es la superficie de la probeta en contacto con el agua, (cm^2); h es el espesor de la probeta, (cm); y tn es el tiempo necesario para alcanzar la saturación, (min). Los resultados finales se expresaron con dos cifras decimales.

3.3.2.4 Resistencia a compresión

Este ensayo se llevó a cabo con el propósito de analizar el efecto de la incorporación de estos subproductos en las propiedades mecánicas de los hormigones bajo estudio. Se realizó el ensayo a compresión a 12 probetas por cada tipo de hormigón, con dimensiones de 100mm x 100mm x 100mm empleando una maquina universal de ensayos (véase la Figura 48). El ensayo se llevó a cabo a los 3, 7, 14 y 28 días según la norma UNE-EN 12390-3 [109]. La carga vertical se aplicó a la probeta a una tasa de aumento de la carga de (2400 ± 200) N/s.



Figura 48 Prensa electromecánica.

La **resistencia media**, f_m , es la media aritmética de la resistencia a compresión de 3 probetas y se calculó con la siguiente ecuación:

$$\sigma_c (\text{N}/\text{mm}^2) = \frac{F}{A} \quad (3-7)$$

Dónde: σ_c es la resistencia a compresión, (Mpa); F es la carga máxima de rotura, (N); y A es el área transversal de la probeta sobre la que actúa la fuerza de compresión, (mm^2).

3.3.2.5 Conductividad térmica, difusividad térmica y calor específico

Las propiedades térmicas de los diferentes tipos de hormigón fueron evaluadas con objeto de conocer si el empleo de estos subproductos puede aportar una mejora térmica al hormigón. El método de Fuente de Plano Transitorio (TPS, por sus siglas en inglés, *Transient Plane Source*) [150] se usó para determinar la conductividad térmica, la difusividad térmica y para deducir el calor específico por unidad de volumen de las probetas, de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 22007-2 [109]. El ensayo se realizó con

un equipo de Disco caliente, modelo TPS 2500 S (véase la Figura 49), y el programa Analizador de constantes térmicas v.5.9.5.



Figura 49 Dispositivo de disco caliente y probeta ensayada.

Este dispositivo de ensayo utiliza un sensor con forma de espiral doble (véase la Figura 50), que actúa como una fuente de calor, para aumentar la temperatura de la probeta y como un "termómetro de resistencia", para registrar el aumento de temperatura dependiente del tiempo. El sensor está hecho de una doble espiral de níquel-metal de 10µm de grosor. Esta espiral está sostenida por un material de tipo poliimida "Kapton", para proteger su forma particular, darle resistencia mecánica y mantenerla aislada eléctricamente. Dicho material, se puede usar en un rango de temperatura de -264 a 226°C.

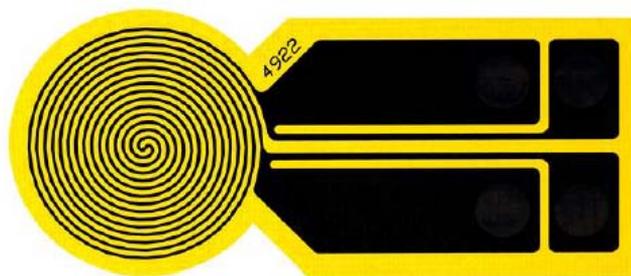


Figura 50 Sensor © Hot Disk.

El aumento de temperatura del sensor depende de las propiedades térmicas del material bajo estudio. Las características térmicas pueden deducirse por análisis inverso, de este modo, la conductividad térmica y la difusividad térmica son determinadas por el software utilizado y el calor específico por unidad de volumen de las probetas se deduce de los valores de la conductividad térmica y la disipación de calor.

$$Cp = \frac{\lambda}{K} \quad (3-8)$$

Dónde: Cp es el calor específico volumétrico, [$J/(m^3 \cdot K)$]; λ es la conductividad térmica, [$W/(m \cdot K)$]; y K es la difusividad térmica, (m^2/s).

Para describir teóricamente cómo se comporta el sensor, se resolvió la ecuación de la conductividad térmica, suponiendo que el sensor consta de varias fuentes de calor en forma de anillos concéntricos en una muestra extremadamente grande [151,152].

Si el sensor se calienta eléctricamente, la expresión de su resistencia puede darse en función del tiempo:

$$R(t) = R_o (1 + \alpha \overline{\Delta T}(\tau)) \quad (3-9)$$

Dónde: R es la resistencia del sensor justo antes de que sea calentada o en el tiempo $t=0$, R_o es la resistencia inicial en $t=0$, $\overline{\Delta T}(\tau)$ es el valor promedio del aumento de la temperatura superficial de la muestra y α : es el coeficiente de resistividad eléctrica en función de la temperatura.

A partir de la ecuación anterior, se obtiene el aumento de temperatura registrado por el sensor.

$$\overline{\Delta T}(t) = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R(t)}{R_o} - 1 \right) \quad (3-10)$$

El aumento de la temperatura en función del tiempo se da de acuerdo con la teoría de Gustafsson [153] por:

$$\overline{\Delta T}(\tau) = \frac{P_o}{\pi^2 a \cdot \lambda} * D(\tau) \quad (3-11)$$

Con:

$$\tau = \sqrt{\frac{t}{\theta}} \quad \text{and} \quad \theta = \frac{a^2}{K} \quad (3-12)$$

Dónde: P_o es la potencia total inyectada en el sensor, a es el radio global del sensor, λ es la conductividad térmica de la muestra que se ensaya, t es el tiempo medido desde el inicio de la grabación, τ es el tiempo característico, K es la difusividad térmica del material bajo estudio y $D(\tau)$ es la función sin dimensión que depende de τ :

$$D(\tau) = [m(m+1)]^{-2} \int_0^\tau ds \cdot s^{-2} \left[\sum_{n=1}^m n \sum_{k=1}^m \exp\left(\frac{-(n^2 + k^2)}{4m^2 s^2}\right) J_o \frac{nk}{2m^2 s^2} \right] \quad (3-13)$$

Dónde: J_o es la función de Bessel modificada y m es el número de fuentes de calor en forma de anillos concéntricos en el sensor.

Trazando el aumento de temperatura registrado como una función de $D(\tau)$, se obtiene una línea recta cuya pendiente es $s = \frac{P_o}{\frac{\pi \cdot 3 \cdot a \cdot \lambda}{2}}$, la cual permite determinar la conductividad térmica.

Como K y, en consecuencia, θ no se conocen antes del ensayo, la recta final a partir de la cual se calcula la conductividad térmica se obtiene mediante un método de iteración sucesiva.

Una vez teniendo claro cómo trabaja el sensor, se procedió a la realización del ensayo, para ello fue necesario acondicionar las probetas de 100mm x 100mm x 50mm, usadas en el ensayo de absorción por capilaridad, mediante secado en horno a 50°C, hasta peso constante y lijado de la superficie, para que estuvieran lo más planas posible y con ello reducir la entrada de aire cuando se realizara el ensayo.

Se empleó un sensor Kapton con un radio de 6.403mm. La elección de este tamaño del disco de medición fue guiada por el tamaño de la dimensión más grande del material a ensayar. En el caso del hormigón, debe ser al menos mayor que el tamaño de árido más grande. En este estudio, el tamaño máximo del árido utilizado fue de 6mm. Finalmente, el sensor se colocó entre las dos piezas, como se puede apreciar en la Figura 49. Para cada muestra, se realizaron 3 ensayos en diferentes posiciones, considerando la heterogeneidad del hormigón. Los ensayos se llevaron a cabo a temperatura ambiente (20 ± 2)°C, con un coeficiente de temperatura inicial de resistencia de 0.0047/K, una potencia de medición del sensor entre 0.06 y 0.17W, y un tiempo de medición de 40 a 80 segundos.

Las siguientes condiciones se deben verificar cuando se realiza el ensayo, a fin de validar el éxito del experimento:

- Después de completar una medición, es importante inspeccionar cuidadosamente la curva transitoria. Esta debe mostrar un aumento continuo de temperatura, y debe estar libre de saltos o discontinuidades repentinas (véase la Figura 51).

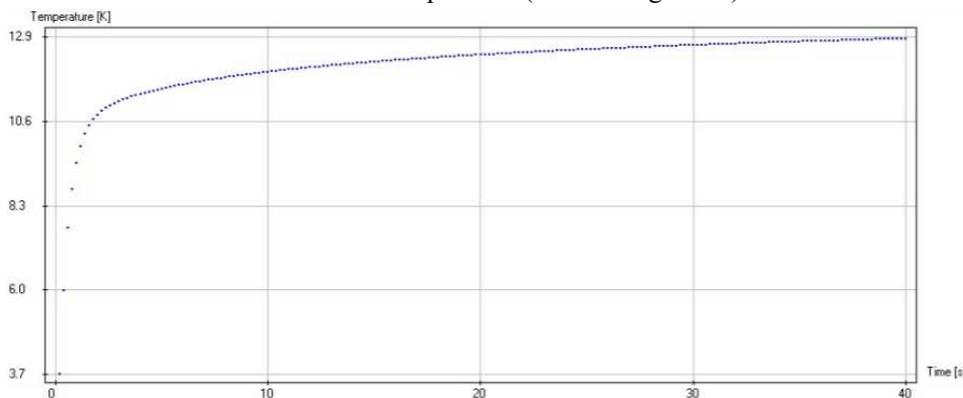


Figura 51 Gráfica aumento de la temperatura (K) vs. el tiempo (s).

- El gráfico de deriva térmica vs tiempo (véase la Figura 52) debe mostrar una buena estabilización de temperatura de la muestra, con una variación de temperatura muy baja, por lo que no debe mostrar ninguna tendencia, es decir, debe producir una dispersión aleatoria.

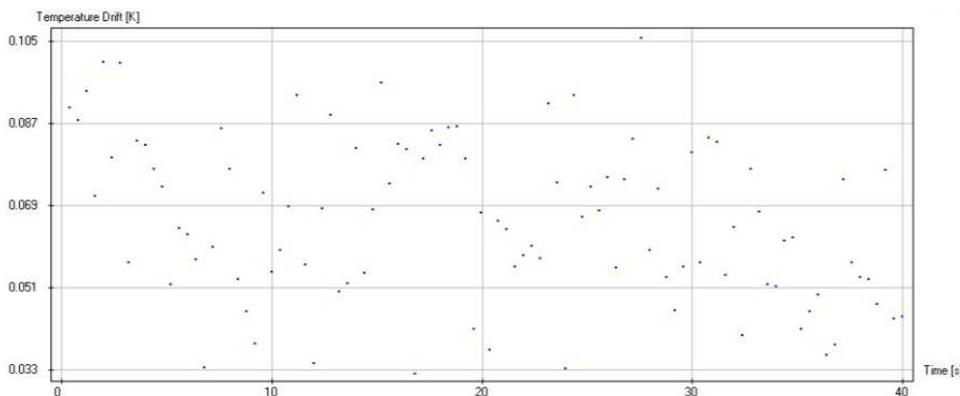


Figura 52 Gráfica deriva térmica (K) vs. tiempo (s)

- El aumento de temperatura entre el primer y último punto utilizado para el análisis, debe estar entre 0.4 y 4°C (aumento de la temperatura).
- La relación entre el tiempo total de la medición y el tiempo característico, debe estar idealmente entre 0.33 y 1.
- La desviación media de los puntos de medición a partir de los cuales se calcula la conductividad térmica debería ser idealmente inferior a $3 \times 10^{-4} \text{K}$.

Los resultados que no cumplieron con estos 5 requisitos fueron descartados. Mientras que los que si cumplieron se expresan con dos cifras decimales.

3.4 Resultados y discusión

3.4.1 Asentamiento

Este ensayo se llevó a cabo a fin de confirmar que todas las mezclas de hormigón presentaran un asentamiento cero ($\leq 6\text{mm}$), puesto que es uno de los requisitos fundamentales en la fabricación de estas piezas prefabricadas. Cabe aclarar que, el método empleado no es el más indicado para el tipo de mezcla bajo estudio, ya que según la norma UNE-EN 12350-2 [109] esta metodología está más adaptada a rangos de asentamientos de 10 a 210mm. Por lo tanto, se ha tenido mucha precaución al realizar el ensayo e interpretar dichos resultados. La Figura 53 muestra los resultados obtenidos, como se puede observar la mezcla del hormigón de referencia presentó un asentamiento de 6mm.

Como era de esperar, las mezclas de hormigón con virutas exhibieron menor asentamiento que la mezcla de referencia. La sustitución del 5, 10 y 20% del volumen total de la arena por virutas, disminuyó los valores de asentamiento del hormigón, siendo estos de 2, 0 y 0mm, respectivamente. Esto se atribuye a la mayor absorción de las virutas, en comparación con el material que sustituyen (caliza), provocando que la

cantidad de agua libre para el efecto de lubricación de los componentes de la mezcla disminuyese, debido a que parte de ésta pudo ser absorbida por los poros de las virutas.

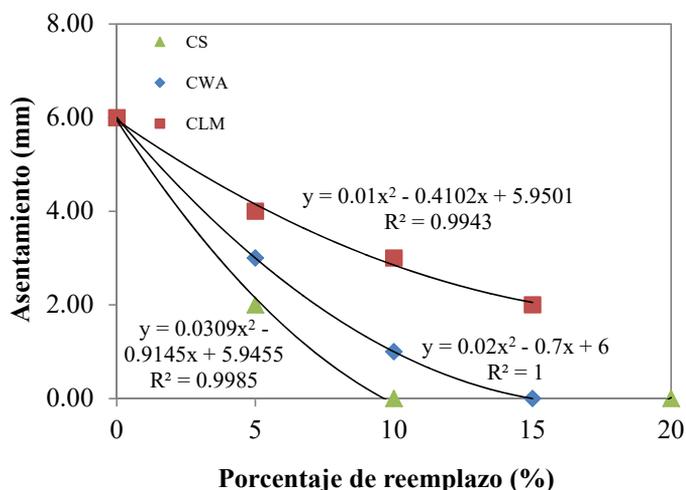


Figura 53 Efecto del contenido de virutas, cenizas de madera y lodos de cal en el asentamiento del hormigón.

La adición de cenizas de madera también ha mostrado un efecto adverso en el asentamiento del hormigón fresco, con el reemplazo parcial del 5, 10 y 15% del volumen total de cemento por cenizas de madera, se obtuvieron valores de asentamiento de 3, 1 y 0mm; respectivamente. Esta disminución en el asentamiento se puede atribuir al alto contenido orgánico de las cenizas y a la forma irregular que presenta este subproducto, por lo que existió mayor fricción entre ellos provocando la disminución de la trabajabilidad de las mezclas.

Las mezclas de hormigón fresco con lodos de cal también mostraron menor asentamiento que el de referencia, aunque la disminución fue en menor escala. El reemplazo del 5, 10 y 15% del volumen total del cemento por los lodos de cal, disminuyó el valor de asentamiento a 4, 3 y 2mm. Esto pudo deberse a la forma y finura de la partícula.

3.4.2 Absorción

Los resultados obtenidos de absorción de agua del hormigón de referencia y de los hormigones con incorporación, en diferentes cantidades, de virutas, cenizas de madera y lodos de cal se muestran en la Figura 54.

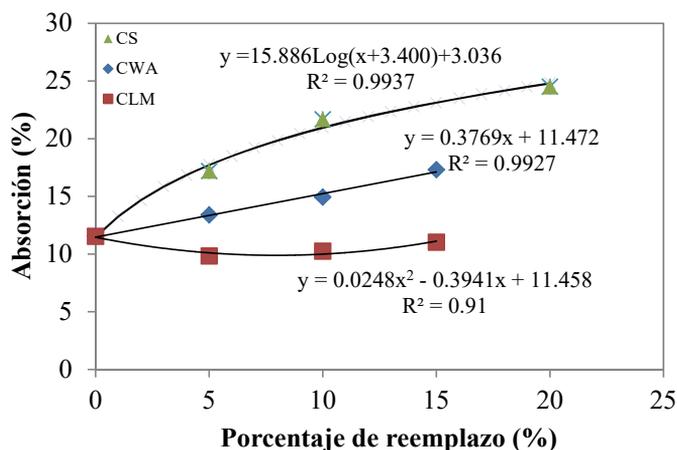


Figura 54 Efecto del contenido de virutas, cenizas de madera y lodos de cal en la absorción de agua del hormigón.

Los resultados experimentales mostraron que la incorporación de virutas aumenta significativamente la absorción del hormigón, y este comportamiento se hace más notorio a mayores contenidos de virutas en la mezcla. Estos resultados eran de esperar, debido al alto comportamiento higroscópico de la madera. Comparándolo con el hormigón de referencia, el reemplazo volumétrico de arena por virutas en cantidades de 5, 10 y 20% aumenta la absorción del hormigón en un 48.9, 87.7 y 112.2%, respectivamente.

Por otro lado, la adición de las cenizas de madera tuvo un comportamiento similar al de las virutas, aunque en porcentajes menores. Su incorporación aumenta la absorción del hormigón, y este incremento se hace más evidente a mayores contenidos de este subproducto en la mezcla. Comparándolo con el hormigón de referencia, el reemplazo de cemento por cenizas de madera, en cantidades de 5, 10 y 15%, aumenta la absorción del hormigón en un 15.9, 29.4 y 49.9%, respectivamente. Esta mayor demanda de agua está directamente relacionada con la alta porosidad de las cenizas de madera.

Por el contrario, la incorporación de lodos de cal en el hormigón disminuyó ligeramente la absorción. En relación al hormigón de referencia, el reemplazo del cemento por lodos de cal en cantidades de 5, 10 y 15% produjo una disminución en la absorción en un 14.8, 11.2 y 4.5%, respectivamente. Las muestras CLM-5, exhibieron la mayor reducción en la absorción entre todas las mezclas. A mayores porcentajes de reemplazo, se encontró que la absorción aumentaba ligera y gradualmente. La menor absorción del hormigón con lodos de cal, se atribuye principalmente a una reducción en la porosidad vacuolar (vacío o poro) del hormigón.

Las ecuaciones obtenidas para las virutas y las cenizas de madera, apuntan a una tendencia de ambas mezclas, a aumentar los valores de absorción de agua del hormigón,

con porcentajes mayores de reemplazo. Sin embargo, en el caso del hormigón con virutas, la curva presenta un comportamiento logarítmico, que denota un crecimiento más lento; mientras que la ecuación para el hormigón de lodos de cal indica que con la incorporación del 16% de este subproducto, se obtendrían valores de absorción, similares a los de la mezcla de referencia y tenderían a aumentar a partir de este porcentaje. Cabe destacar que estas tendencias son aplicables a rangos de reemplazo bajos, ya que se necesitarían más datos para establecer una tendencia a tasas de reemplazo más altas.

3.4.3 Densidad

Los resultados del ensayo de densidad llevado a cabo en los hormigones de referencia y con subproductos se muestran en la Figura 55. Se puede apreciar que, las densidades de todos los tipos de hormigón que se ensayaron están dentro del rango de 1.38- 2.08Mg/m³.

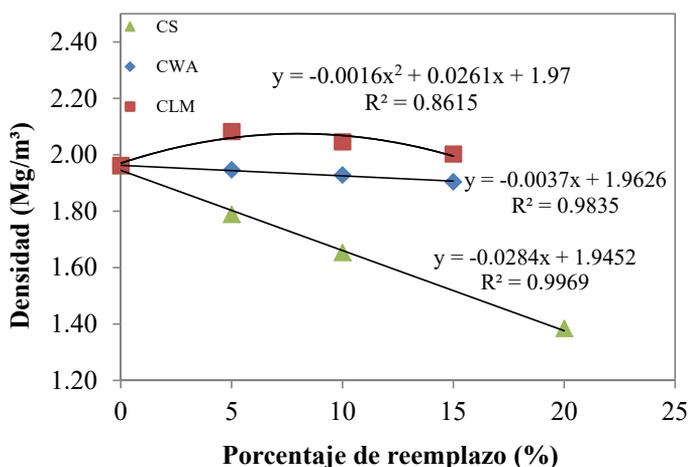


Figura 55 Efecto del contenido de virutas, cenizas de madera y lodos de cal en la densidad del hormigón.

A partir de los resultados se pudo observar que la densidad disminuye con el aumento de la incorporación de virutas y cenizas de madera. Esta disminución, puede deberse a la menor densidad de ambos subproductos, en comparación con los materiales que sustituyeron (caliza y cemento, respectivamente), así como también, a una menor adherencia entre los subproducto y la pasta, en comparación con la adherencia entre el árido natural y la pasta, lo cual pudo conducir a la creación de vacíos en el hormigón [154]. La mayor reducción de densidad se encontró en las muestras CS-20, el hormigón con mayor contenido de virutas, el cual mostró una densidad de alrededor de 1.38Mg/m³, en comparación con 1.96Mg/m³ para el hormigón de referencia, siendo la reducción de aproximadamente 29.6%. El hormigón ligero se define en la norma UNE-EN 206-1 [109] como cualquier hormigón con una densidad seca entre 0.80 y 2.00Mg/m³; por lo tanto, los hormigones de referencia, con virutas y cenizas de madera bajo estudio, pueden calificarse como hormigones ligeros.

Por el contrario, la sustitución parcial del cemento por los lodos de cal, mostró un ligero aumento de la densidad, con un incremento máximo de 6.1% para las muestras CLM-5. Esto se debe a que el CaCO_3 mejora la microestructura del hormigón, formando geles adicionales de hidrato de silicato cálcico (C-S-H). Sin embargo, a partir del 5% de reemplazo de cemento por lodos de cal, se encontró que la densidad disminuía ligeramente, probablemente debido a la aglomeración de partículas que bloqueaban una reacción más efectiva entre el CaCO_3 y el cemento.

De acuerdo con las ecuaciones de los hormigones con virutas y cenizas de madera, existe una tendencia a que la densidad de ambas mezclas disminuya a mayores porcentajes de reemplazo. Las pendientes de las ecuaciones indicaron que con el mismo porcentaje de reemplazo en las mezclas, la densidad del hormigón con virutas, será al menos 7 veces menor, que la densidad del hormigón con cenizas de madera; mientras que, para el caso del hormigón con lodos de cal, la ecuación muestra que con adiciones superiores al 16% de este subproducto, se obtendrán valores de densidad más bajos que los del hormigón de referencia.

Comparando la Figura 55 con la Figura 54, se puede observar una correlación inversa entre la densidad y la absorción. Con el aumento en la densidad, la absorción de agua del hormigón se reduce y viceversa.

3.4.4 Porosidad

Los resultados obtenidos correspondientes al ensayo de porosidad realizado a los hormigones de referencia y con incorporación en diferentes proporciones de virutas, cenizas de madera y lodos de cal se muestran en la Figura 56. Como se puede observar, la porosidad de los hormigones con virutas es directamente proporcional al porcentaje de reemplazo de este subproducto. Este incremento en la porosidad vacuolar es atribuido principalmente a la extensa porosidad superficial presente en las virutas, observada a través de las imágenes de SEM, así como a la porosidad generada en el hormigón por una interacción más débil entre las virutas y la pasta [154].

En el caso del hormigón con cenizas de madera, el comportamiento fue similar al del hormigón con virutas; sin embargo, estos valores no fueron tan prominentes. El incremento en la porosidad del hormigón con cenizas de madera se atribuye a la ausencia de una reacción química entre las cenizas de madera y la pasta, ya que este subproducto no presentó propiedades puzolánicas, y en consecuencia se comportó como un árido más en la mezcla, por lo que existió una mayor área de superficie de áridos a recubrir por una menor cantidad de pasta (puesto que la cantidad de cemento fue menor), generando así un hormigón más poroso.

Por otro lado, la porosidad del hormigón con lodos de cal disminuyó ligeramente en comparación con la del hormigón de referencia, encontrándose la mayor reducción, de aproximadamente 16%, en las muestras CLM-5. Según Shaikh et al. [124], la disminución de la porosidad se atribuye al hecho de que la incorporación de CaCO_3 en el

hormigón podría intensificar la aceleración del proceso de hidratación debido al consumo de hidróxido de calcio (CH) y la formación de nuevos geles de C-S-H.

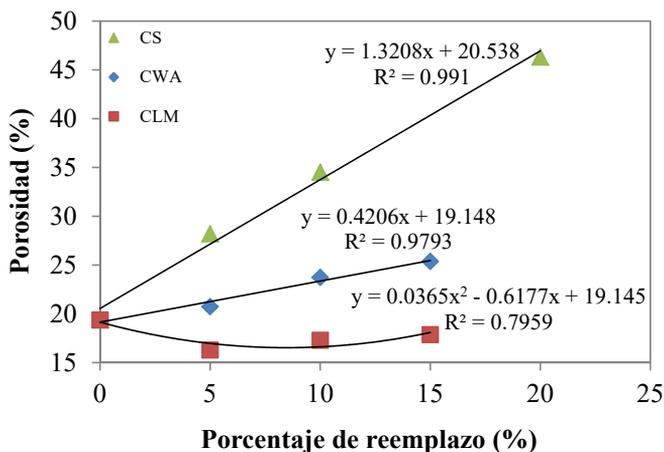


Figura 56 Efecto del contenido de virutas, cenizas de madera y lodos de cal en la porosidad del hormigón.

Comparando la Figura 56 con la Figura 54 y 55, se encontró que a medida que aumenta la porosidad, la densidad se reduce y la absorción de agua aumenta, y viceversa. Aunque la norma europea no especifica valor límite de porosidad de los bloques, la guía ACI 122R-14 [155] menciona que los valores típicos de porosidad de los hormigones utilizados para fabricar bloques, suelen estar dentro del rango de 8-12%. Todos los valores obtenidos, incluso los del hormigón de referencia, son mayores que los valores indicados en esta guía. Esta diferencia en los valores de porosidad se debe principalmente a la mayor exigencia de la norma ACI 531.1-83 en cuanto a los valores mínimos de resistencia a compresión de las piezas, en comparación con el Código Técnico de la Edificación (CTE), por lo cual, resulta evidente que la porosidad de los bloques que se rigen por la ACI, sea menor que los de este estudio, cuya normativa a cumplir es el CTE.

Sin embargo, los altos niveles de porosidad en las probetas, tienden a tener un mayor porcentaje de aire que actúa como aislante, mejorando las propiedades térmicas de los materiales y disminuyendo sus valores de densidad.

Las ecuaciones predicen un aumento en la porosidad, si se incorporan en la mezcla porcentajes más altos de virutas, cenizas de madera y lodos de cal, que aquellos bajo estudio. Las pendientes de las ecuaciones mostraron que la porosidad del hormigón elaborado con virutas, será al menos 3 veces mayor que el de las cenizas de madera, para un mismo porcentaje. Además, la ecuación para el hormigón con lodos de cal indica que, con la incorporación del 17% de este subproducto, se obtendrían valores de porosidad

similares a los de la mezcla de referencia; sin embargo, a mayores porcentajes, existe una tendencia a aumentar los valores de porosidad del hormigón.

3.4.5 Absorción por capilaridad

Los resultados del coeficiente de absorción por capilaridad de los hormigones de referencia y con subproductos se muestran en la Tabla 15. Para todas las mezclas, se encontró un comportamiento similar al obtenido al evaluar la absorción de las probetas. La curva típica de absorción de agua de los diferentes tipos de hormigón en función de la raíz cuadrada del tiempo se muestra en la Figura 57.

Mezcla	m (min/cm ²)	εe (cm ³ /cm ³)	K (g/m ² min ^{0.5})
REF	230.4	0.18	1.18
CS-5	172.8	0.28	2.12
CS-10	172.8	0.34	2.61
CS-20	115.2	0.44	4.12
CWA-5	172.8	0.20	1.50
CWA-10	172.8	0.23	1.73
CWA-15	172.8	0.25	1.88
CLM-5	230.4	0.14	0.95
CLM-10	230.4	0.16	1.05
CLM-15	230.4	0.17	1.12

K = Coeficiente de absorción por capilaridad, ε = Porosidad efectiva del hormigón y m = Resistencia a la penetración del agua por la absorción capilar.

Tabla 15 Efecto del contenido de virutas, cenizas de madera y lodos de cal en la absorción por capilaridad del hormigón.

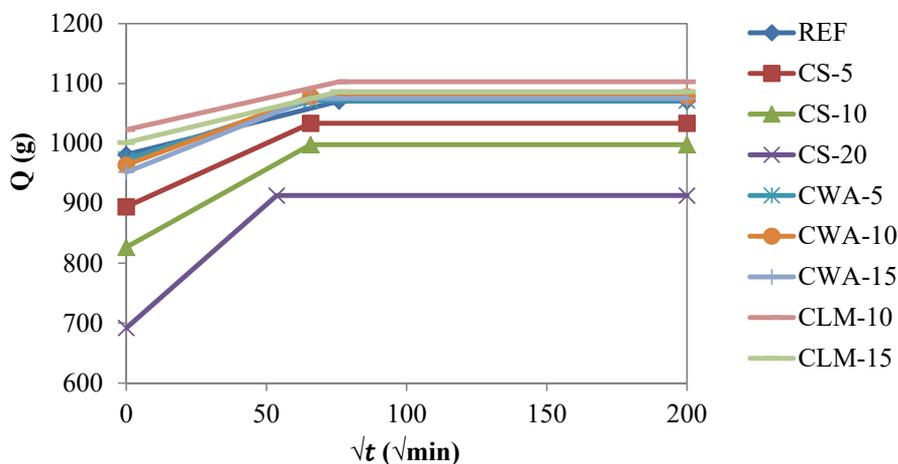


Figura 57 Relación entre la ganancia de masa (Q) y la raíz cuadrada del tiempo (√t) de los diferentes tipos de hormigón.

Como se esperaba, el aumento en el porcentaje de virutas conduce a altos coeficientes de absorción por capilaridad. El mayor coeficiente se encontró en las muestras CS-20, siendo este, por lo menos 3 veces mayor que el de referencia. Los hormigones con virutas presentaron la menor resistencia a la penetración del agua por absorción capilar y los mayores valores de porosidad efectiva del hormigón.

Por otra parte, los hormigones con adición de cenizas de madera mostraron un incremento en la absorción por capilaridad y en la porosidad efectiva, siendo más notorio a mayores contenidos de este subproducto. Esto se debe principalmente a la alta porosidad de los hormigones con cenizas de madera, que permite que el agua se transporte con mayor facilidad.

En cuanto a los hormigones con lodos de cal, se encontró que la absorción por capilaridad se reduce ligeramente con la adición de este subproducto, siendo mayor la disminución a menores porcentajes de sustitución. En la Figura 57 se puede observar que las líneas son casi paralelas entre sí, lo que evidencia un comportamiento similar de las mezclas. Asimismo, los resultados indican que la adición de lodos de cal reduce la cantidad de poros interconectados entre sí, lo que a su vez redundaría en un hormigón con mayor resistencia a absorber agua por capilaridad.

Se encontró que los resultados de porosidad efectiva de todos los tipos de hormigón son coherentes con los obtenidos en el ensayo de porosidad, discutido en el apartado 3.4.4.

3.4.6 Resistencia a compresión

Se determinó la resistencia a compresión de las mezclas formuladas a 3, 7, 14 y 28 días. Los resultados se exponen en la Tabla 16. Se puede observar, comparando estos resultados con los de la Figura 56, que esta propiedad mecánica está relacionada con la estructura interna del hormigón, concretamente, con la porosidad del material.

Mezcla	f_m (Mpa)			
	3 días	7 días	14 días	28 días
REF	4.2 ± 0.36	5.6 ± 0.45	5.8 ± 0.48	5.9 ± 0.47
CS-5	2.1 ± 0.38	2.6 ± 0.44	2.8 ± 0.41	2.9 ± 0.35
CS-10	1.0 ± 0.25	1.3 ± 0.31	1.3 ± 0.35	1.5 ± 0.29
CS-20	0.6 ± 0.31	0.7 ± 0.29	0.8 ± 0.32	0.8 ± 0.27
CWA-5	4.1 ± 0.42	5.0 ± 0.76	5.0 ± 0.59	5.4 ± 0.45
CWA-10	3.9 ± 0.38	4.7 ± 0.46	4.9 ± 0.36	5.1 ± 0.42
CWA-15	3.6 ± 0.42	4.6 ± 0.51	4.8 ± 0.54	4.9 ± 0.41
CLM-5	6.4 ± 0.45	6.5 ± 0.40	7.0 ± 0.47	7.6 ± 0.46
CLM-10	5.8 ± 0.47	6.1 ± 0.37	6.6 ± 0.50	7.4 ± 0.38
CLM-15	4.7 ± 0.38	5.2 ± 0.58	6.4 ± 0.43	7.3 ± 0.44

Tabla 16 Resistencia a compresión y desviación estándar de los diferentes tipos de hormigón a los 3, 7, 14 y 28 días.

La resistencia a compresión de los hormigones con virutas, está fuertemente influenciada por la adición de este subproducto. Los resultados mostraron que la reducción en la resistencia a compresión, es mayor a medida que los contenidos de virutas aumentan en la mezcla, para todas las edades. A los 28 días, esta reducción fue de 50.5, 75.5 y 86% con cantidades de 5, 10, 20% de virutas, respectivamente. El tipo de hormigón en estudio tiene un gran volumen de árido fino, que a su vez sirve como filler. Por lo tanto, este contribuye significativamente en la resistencia del hormigón. Como el componente mayoritario, ha sido sustituido por virutas, que es un material menos rígido, con una adherencia más débil a la pasta que la caliza, es razonable esperar resultados con una mayor reducción en la resistencia que los otros tipos de hormigón bajo estudio.

Por otro lado, los hormigones con cenizas de madera mostraron una mayor similitud con el comportamiento del hormigón de referencia, ya que presentaron el mayor incremento porcentual entre el tercer y el séptimo día; sin embargo, la resistencia a compresión del hormigón con cenizas de madera, no alcanzó los valores obtenidos por el hormigón de referencia, presentando menor resistencia a mayores contenidos de remplazo, en todas las edades. A los 28 días, estas reducciones fueron de 9.5, 14.2 y 17.7% debido a la sustitución de 5, 10 y 15% de cemento por cenizas de madera, respectivamente. La resistencia máxima del hormigón con cenizas de madera, se obtuvo con las muestras CWA-5.

Este comportamiento puede deberse a la reactividad relativamente baja de las cenizas de madera, determinado en el análisis químico. Lo que significa que, este subproducto actúa como parte de los áridos dentro del hormigón, más que como un aglutinante, obteniendo así una mezcla con menor cantidad de cemento y por ende un hormigón con menor resistencia [107,113,156].

Entre todas las mezclas estudiadas, los hormigones con lodos de cal presentaron las mayores resistencias a compresión, para todas las edades. A los 28 días, la resistencia de los hormigones que contenían 5, 10 y 15% de lodos de cal fue un 27.7, 24.7 y 23.2% más alta que el hormigón de referencia, respectivamente. Las muestras CLM-5 mostraron la mayor resistencia a compresión. Más allá de este porcentaje, la resistencia comienza a disminuir progresivamente. Sin embargo, estos valores son aún más altos que el del hormigón de referencia. De acuerdo con la ecuación obtenida, podría ser posible realizar una sustitución del cemento de hasta un 20% y obtener una resistencia a compresión mayor a 5MPa.

Los resultados de la resistencia a compresión para el hormigón con lodos de cal corresponden con el aumento en los respectivos valores de densidad. Este aumento de la resistencia a compresión también puede atribuirse a una reacción química, que ocurre al mezclar el CaCO_3 y el cemento Portland, lo cual como ya se ha mencionado anteriormente, produce un reacción más rápida del aluminato tricálcico (C_3A) para formar carboaluminato, lo que incrementa los productos de hidratación total, de tal forma que también aumenta la resistencia del hormigón. Además, la presencia de silicato de tricalcio

(C₃S) en el cemento conduce a un tiempo de fraguado más corto y una mayor resistencia inicial. Los resultados confirmaron que esta reacción se reduce cuando el contenido de CaCO₃ (lodos de cal) aumenta a partir de cierto porcentaje y el contenido de cemento se reduce, esto puede ser debido a una escasa dispersión de este subproducto en la mezcla en estado fresco, por lo que se aglomeran los nano-CaCO₃, ya que los lodos de cal tienen mayores resistencias de Van der Waal que el cemento [124].

3.4.7 Propiedades térmicas

Los resultados obtenidos en el ensayo de conductividad térmica, difusividad térmica y calor específico por unidad de volumen, de los hormigones con y sin subproductos se muestran en la Tabla 17. Se puede observar que, el comportamiento térmico del hormigón depende de varios aspectos, tales como los componentes que lo constituyen y su porosidad. Cuanto menor es la conductividad térmica de la inclusión que reemplaza el componente convencional, mejor será el comportamiento térmico del hormigón [157,158].

Tipo de Mezcla	Conductividad térmica [W/(m.K)]	Difusividad térmica [mm ² /s]	Calor específico volumétrico [MJ/(m ³ .K)]
REF	1.12	0.70	1.60
CS-5	0.83	0.50	1.66
CS-10	0.76	0.45	1.69
CS-20	0.55	0.32	1.72
CWA-5	0.98	0.61	1.61
CWA-10	0.95	0.56	1.70
CWA-15	0.91	0.49	1.86
CLM-5	1.13	0.73	1.55
CLM-10	1.12	0.72	1.56
CLM-15	1.12	0.71	1.58

Tabla 17 Conductividad térmica, difusividad térmica y calor específico por unidad de volumen, de los diferentes tipos de hormigones.

Como se puede observar, la conductividad térmica y la difusividad térmica del hormigón disminuyen con el aumento del contenido de virutas en la mezcla. Se encontró que con la incorporación del 5, 10 y 20% de este subproducto, la conductividad térmica del hormigón se reducía en un 25.9, 32.1 y 50.9% y la difusividad térmica en un 28.6, 35.7 y 54.3%, respectivamente. En otras palabras, el hormigón con virutas tiene una mayor resistencia térmica, una tasa más lenta de transferencia de calor y una mayor capacidad de almacenamiento de calor. Esta mejora se atribuye a la mayor porosidad del hormigón y a la menor conductividad térmica de las virutas, aproximadamente 0.13W/(m.K) [109], en comparación con la caliza, entre 1-3W/(m.K) [159]. Estos resultados son similares a los obtenidos por otros autores [71,89,160], los cuales atribuyeron este comportamiento a una ganancia en la porosidad del hormigón con virutas, acompañado de una disminución en la densidad.

En cuanto a los hormigones con cenizas de madera, la conductividad térmica y la difusividad térmica también disminuyen a medida que se incorporan mayores contenidos de cenizas de madera en la mezcla, por lo que se puede decir que la adición de este subproducto mejora el comportamiento térmico del hormigón. La conductividad térmica de los hormigones de cenizas de madera disminuyó en un 12.5, 15.2 y 18.8% y la difusividad térmica disminuyó en un 12.9, 20 y 30% cuando se sustituyó un 5, 10 y 15% de cemento por este subproducto, respectivamente. Esta disminución se debe a la mayor cantidad de poros en las mezclas. Los resultados se encuentran en armonía con los obtenidos por Carrasco et al. [113].

Por el contrario, la conductividad térmica y la difusividad térmica de los hormigones con lodos de cal no mostraron cambios significativos por la adición de este subproducto. Los resultados obtenidos fueron muy similares a los del hormigón de referencia. En comparación con este último, el hormigón en niveles de reemplazo del 5% del cemento por lodos de cal exhibió un ligero aumento en la conductividad térmica entre 1.12 y 1.13W/(m.K), menos de 1%, y en la difusividad térmica entre 0.70 y 0.73mm²/s, lo que se traduce en un aumento máximo del 4%. Este incremento se debe a la ligera disminución en la porosidad del hormigón con lodos de cal. No se encontraron resultados publicados por otros autores sobre las propiedades térmicas del hormigón con lodos de cal, por lo que no se pudo hacer una comparación de los resultados. Sin embargo, se puede apreciar que los resultados son coherentes con los obtenidos en los ensayos de densidad, porosidad y resistencia a compresión.

Según Al-Jabri et al., [161] los bloques sólidos presentan mayor conductividad térmica (1.2W/m.K) que los bloques fabricados con cavidades escalonadas o alineadas (entre 0.57-0.92W/m.K). Resulta obvio pensar entonces que, debido a que las conductividades térmicas de todos los hormigones bajo estudio son inferiores a 1.2W/(m.K), los bloques con cavidades fabricados con estas mezclas, presentarían también valores de conductividad térmica menores que los obtenidos en dicha investigación.

3.5 Conclusiones

En este capítulo se analizó el efecto que conlleva la sustitución parcial (en volumen) del árido fino por virutas y del cemento Portland por cenizas de madera o lodos de cal en las propiedades físicas, mecánicas y térmicas del hormigón, destinado a la fabricación de bloques de hormigón. Las siguientes conclusiones han sido extraídas con base en los resultados:

- El aumento en el contenido de virutas en la mezcla, reduce el asentamiento y la densidad, y aumenta notablemente la absorción de agua, la porosidad y la absorción por capilaridad del hormigón.
- La resistencia a compresión de este tipo de hormigón, disminuye con la incorporación de virutas, y esto se hace más notorio, a mayores contenidos de reemplazo.

- En cuanto a las propiedades térmicas, a mayores contenidos de virutas en la mezcla mejor se comporta térmicamente este tipo de hormigón.
- Por otra parte, la sustitución parcial del cemento por cenizas de madera, produce hormigones con menor asentamiento, y este comportamiento se hace más evidente, a mayores porcentajes de cenizas de madera en la mezcla.
- Los valores de absorción de agua, porosidad y absorción por capilaridad son mayores para el hormigón con cenizas de madera, que el de referencia, y este incremento se hace más notorio, a mayores contenidos de este subproducto en el hormigón.
- En contraste, este tipo de hormigón presenta menor densidad, lo que mejora sus propiedades térmicas. No obstante, la mejora de dichos aspectos no es tan significativa, como lo fue para el caso de los hormigones con virutas.
- En cuanto a la resistencia a compresión, se encontró que a mayores contenidos de cenizas de madera en la mezcla, menor es la resistencia a compresión del hormigón. Por otra parte, la incorporación de lodos de cal en la mezcla, reduce levemente el asentamiento, la absorción, la absorción por capilaridad y la porosidad del hormigón. Esta reducción de poros en el hormigón, conlleva a un ligero aumento en la densidad.
- Los contenidos de lodos de cal estudiados, aportaron una mejora en la resistencia a compresión del hormigón.
- En cuanto a las propiedades térmicas, la incorporación de los lodos de cal en la mezcla, tiene una influencia insignificante.
- Los lodos de cal tienen un gran potencial para ser empleados como material cementante complementario en el hormigón.

Capítulo 4

Fabricación y comportamiento de los bloques de hormigón

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 el diseño de las mezclas, así como también, el proceso de fabricación y los ensayos realizados a los bloques:

Diseño de las mezclas

Se fabricaron tres tipos de bloques, dos tipos presentan sustituciones por volumen: una serie en el cual el 5% del árido fino se sustituyó por virutas; otro con una combinación de dos subproductos, en la que el 5% del árido fino se sustituyó por virutas y 15% del cemento se sustituyó por lodos de cal. Mientras que tercer tipo, no implicó ninguna sustitución por lo que se usa de referencia. Las designaciones de estos 3 tipos de bloques fueron MS, MSLM y MREF, respectivamente. En total se fabricaron 270 bloques, 90 por cada tipo, de los cuales 60 presentan 2 cavidades y 30 tienen una tercera cavidad de tamaño más reducido, que permite cortar el bloque en dos mitades y se emplean para finalizar el tabique o los huecos de puertas y ventanas. Los bloques con 3 cavidades suelen emplearse en las esquinas de los muros, debido a la facilidad para cortarlas por la mitad. El tamaño de los bloques es de 390mm x 190mm x 190mm, y se adoptó este tamaño ya que es el que frecuentemente se emplea en fachadas, en España. El aspecto que presentan los bloques se muestra en la Figura 58.

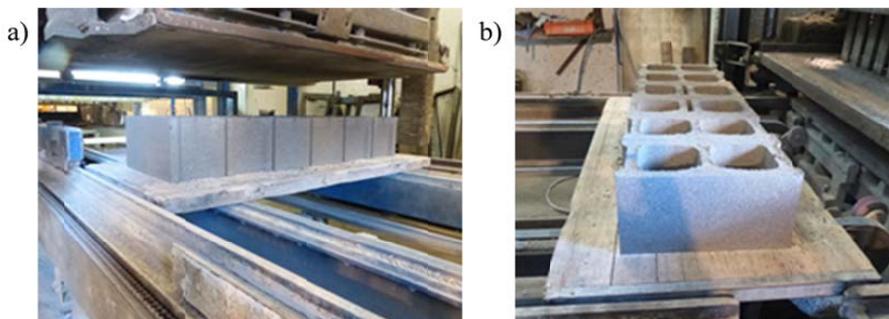


Figura 58 a) Acabado final de los bloques y b) tipos de bloques (con 2 y 3 cavidades).

Las mezclas fueron diseñadas para tener asentamiento cero, según los requisitos de diseño y del proceso de fabricación (resistencias aceptables y desmoldeo rápido). Por lo tanto, la relación w/b se estableció en 0.4 para las mezclas MREF y MS, y la relación w/b se estableció en 0.44 para la mezcla MSML. Se añadió plastificante durante la etapa de agitación para mejorar la trabajabilidad de todas las mezclas, la cantidad fue del 1%, en peso de cemento o aglutinante. El diseño de la mezcla se presenta en la Tabla 18.

Fabricación y comportamiento de los bloques de hormigón

Tipo	CEM (kg/m ³)	AF (kg/m ³)	AG (kg/m ³)	S (kg/m ³)	S fracción (Vol. %)	LM (kg/m ³)	LM fracción (Vol. %)	A (kg/m ³)	SP (kg/m ³)
MREF	180	1900	500	-	-	-	-	72	1.80
MS	180	1805	500	19.98	5	-	-	72	1.80
MSLM	153	1805	500	19.98	5	7.35	15	72	1.61

CEM = Cemento, AF = Árido fino, AG = Árido grueso, S = Virutas, LM = Lodos de cal, A = Agua y SP = Superplastificante.

Tabla 18 Diseño de la mezcla de los bloques para 1 m³.

Los bloques se fabricaron en una empresa de prefabricados local, utilizando un mezclador de hormigón Giro P-750 y una máquina bloquera Quadra V (véase la Figura 59). Los procedimientos de mezclado son similares a los empleados en la primera etapa. Después de mezclar los áridos, el cemento y los subproductos se agregaron en dos etapas sucesivas. Seguidamente, el agua y el aditivo reductor de agua se dosificaron gradualmente.



Figura 59 Máquina bloquera.

Una vez preparada, la mezcla (0.5m³) se llevó mediante una cinta transportadora hasta los moldes (véase la Figura 60), previamente seleccionados, donde se hizo vibrar y compactar para producir 6 bloques cada 30 segundos. El proceso de fabricación de cada serie, se realizó en un período de aproximadamente 8 minutos.



Figura 60 a) Moldes de la máquina bloquera y b) cintas transportadora.

Finalmente, los bloques en estado fresco se secaron al aire hasta el día del ensayo, en la zona de curado de la fábrica, especialmente habilitada para ello (véase la Figura 61), cuya temperatura ambiente estaba entre 20 y 22.5°C y la humedad relativa era superior al 50%.

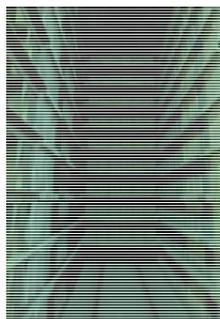


Figura 61 Zona de curado de los bloques.

4.2.1 Procedimiento experimental

Los ensayos realizados a los bloques, sus respectivas normativas y el número de muestras empleadas en cada ensayo se resumen en la Tabla 19. Su selección se basó en las especificaciones establecidas en las normas UNE-EN 771-3 [109] y UNE 127771-3 [109] a las que se refiere explícitamente el CTE [46] en el Documento Básico Seguridad Estructural: Fábrica (DB-SE-F).

Propiedad	Ensayo	Norma	Número de muestras
Morfológica	Longitud, anchura y altura	UNE-EN 772-16 [109]	6
	Espesor de las paredes y los tabiques		
	Paralelismo de los planos de las caras de apoyo		
	Planeidad de las caras vistas		
	Porcentaje de superficie de huecos	**	6
Física	Densidad	UNE-EN 772-12 [109]	6
	Absorción*	ASTM 140-11 [93]	6
	Absorción por capilaridad	UNE-EN 772-11 [109]	3
Mecánica	Resistencia a compresión	UNE-EN 772-1 [109]	6
Acústica	Comportamiento acústico	UNE-EN ISO 10140-1 [109]	3
Radiativa	Emisividad*	ASTM E1933-99a [93]	3
Térmica	Comportamiento Térmico	UNE-EN ISO 22007-2 [109]	3

* Este tipo de ensayo no lo contempla la norma EN 771-3.

**Se empleó una metodología distinta a la establecida en la normativa.

Tabla 19 Resumen de los ensayos realizados a los bloques, normativas y número de muestras.

4.2.1.1 Longitud, anchura y altura

La longitud, el ancho y la altura de 6 bloques completos de cada familia se midieron a fin de determinar en qué medida estas dimensiones varían con la adición de los subproductos a la mezcla y comprobar que cumplan con las tolerancias máximas permitidas en la norma UNE-EN 771-3 [109]. El procedimiento operativo seguido fue el establecido en la

norma UNE-EN 772-16 [109]. Para ello, antes de realizar la medición, se eliminó todo el material superfluo adherido a la pieza. Seguidamente, se midió con un calibre de medición con mandíbulas superpuestas de precisión 0.1mm, las 12 aristas que conforman su paralelepípedo envolvente (véase la Figura 62). Los resultados se expresaron redondeados a los 0.5mm más cercanos, tal y como lo indica la norma.

Las desviaciones máximas (tanto positivas como negativas) de las dimensiones efectivas de cada una de las piezas, se establecieron respecto a los valores efectivos medios del conjunto de la muestra.

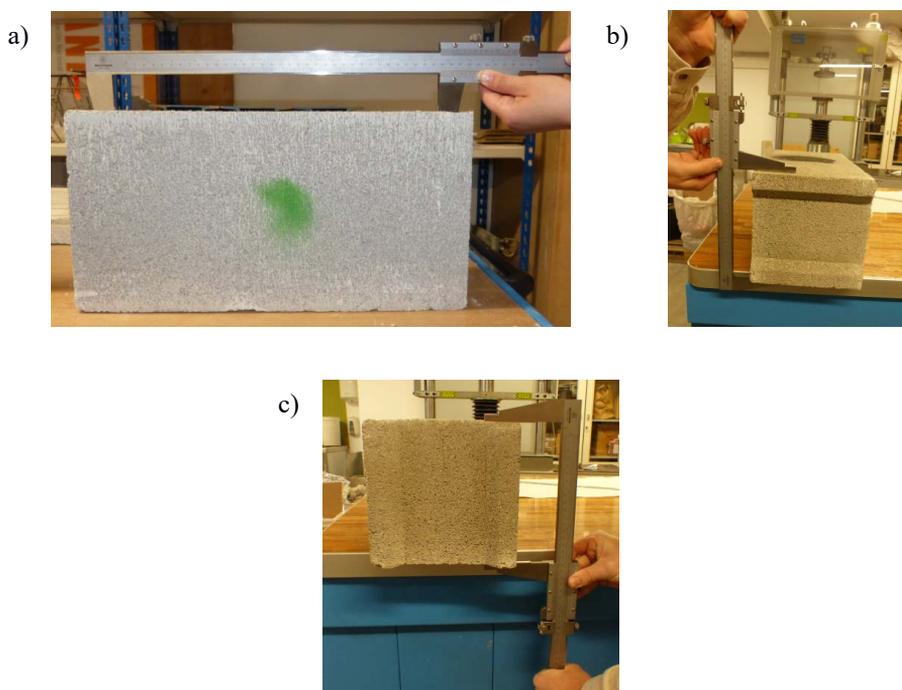


Figura 62 Medición de a) la longitud, b) la anchura y c) la altura de las muestras.

4.2.1.2 Espesor de las paredes exteriores y de los tabiques que separan los alvéolos interiores

El espesor de las paredes y tabiquillos de 6 bloques de cada familia, se determinaron siguiendo el procedimiento establecido en la norma UNE-EN 772-16 [109]. Se calculó el promedio de tres medidas tomadas en posiciones distintas suficientemente representativas (véase la Figura 63), expresando los resultados redondeados a los 0.5mm más cercanos.



Figura 63 Medición de los espesores de las muestras.

4.2.1.3 Paralelismo de los planos de las caras de apoyo

Este ensayo se realizó a 6 bloques completos de cada familia, conforme a lo establecido en la norma UNE-EN 772-16 [109]. El mismo, consistió en colocar la pieza de forma estable sobre una superficie plana de dimensiones estables. A continuación, empleando un reloj comparador fijado en un soporte, se buscó un punto de referencia (la esquina de menor medida de la cara de apoyo superior de la pieza) y seguidamente, se determinaron las cotas en las demás esquinas de la pieza, respecto a esta referencia (véase la Figura 64). La desviación del paralelismo de los planos, se tomó como el mayor valor de las cotas obtenido en todas las piezas, redondeado a los 0.2mm más próximos.



Figura 64 Medición del paralelismo de los planos de las caras de apoyo de las muestras.

4.2.1.4 Planeidad de las caras vistas y de apoyo.

La planeidad de las caras vistas y de apoyo se evaluó siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 772-20 [109]. Se midieron las diagonales de las caras de las muestras, a partir de una regla graduada de longitud mayor que cualquier diagonal de las caras de la pieza, y un juego de calas de espesor con una precisión de 0.05mm. Se colocó la regla en cada diagonal, y se utilizó la cala de espesor para medir la distancia entre la cara de la pieza y la regla (véase la Figura 65). Según esta norma, si la cara de la pieza es cóncava, se mide la distancia mayor desde la superficie de la regla con una aproximación de 0.05mm. En el caso de la cara de la pieza sea convexa, se coloca la regla de tal manera

que, la distancia máxima a la superficie de la regla sea casi igual a cada lado del punto de contacto.

En cuanto a los resultados, tanto la longitud media de la diagonal como la desviación media máxima de planeidad de las caras, se expresaron redondeando al 0.1mm más próximo.

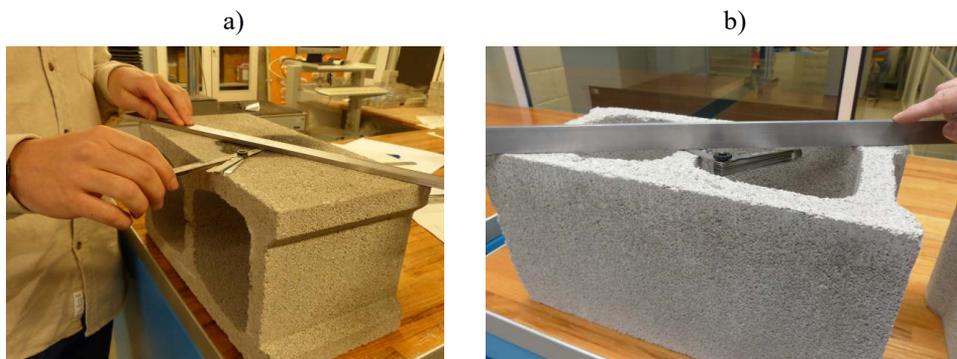


Figura 65 Medición de la planeidad de las caras a) vistas y b) de apoyo de las muestras.

4.2.1.5 Porcentaje de superficie de huecos

Este ensayo es especialmente relevante en lo que respecta al comportamiento térmico de las piezas, ya que a mayor porcentaje de superficie de huecos, menor será el porcentaje de hormigón, y por tanto mayor será el aire presente en las cavidades, lo que es beneficioso para el desempeño térmico de los bloques, ya que el aire posee menor conductividad térmica que el hormigón.

El porcentaje de superficie de huecos de 6 bloques (con 2 cavidades) por cada familia, se determinó a partir de fotografías digitales, las cuales se importaron a un software de diseño por computadora utilizado para dibujo 2-D (AutoCAD) y se dibujaron sobre ellas (véase la Figura 66 y 67). Empleando este método de medición, se obtienen las áreas tanto superior como inferior de los bloques de una manera más práctica, que con la metodología especificada en la norma UNE-EN 772-2 [109], en la que se requiere de una cartulina y una prensa para someter los bloques a compresión, y de este modo, obtener su geometría. Además, este ensayo destructivo, requeriría un gran número de piezas, en total 12 bloques por cada familia, y no 6 como establece, ya que el tipo de bloque bajo estudio presenta en la parte superior e inferior, huecos con diferentes áreas.

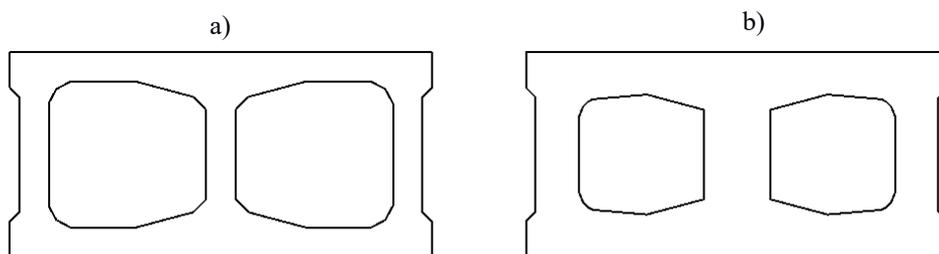


Figura 66 Dibujo de la forma de los huecos en la parte a) superior e b) inferior.



Figura 67 Forma de los huecos en la parte a) superior e b) inferior de los bloques.

El porcentaje de superficie de huecos se determinó con la siguiente ecuación:

$$\text{Porcentaje de superficie de huecos, \%} = A_v/A_B \quad (4-1)$$

Dónde: A_v es el área total de los huecos obtenido mediante una media entre el área total superior y el área total inferior, mm^2 ; y A_B es el área bruta del bloque, mm^2 . Los resultados se expresaron con una exactitud de 10mm^2 .

4.2.1.6 Densidad y absorción

La densidad se evaluó con el fin de conocer el efecto que tiene la adición de estos subproductos en el peso de los bloques, ya que si se consigue una reducción del mismo, se podría obtener mejoras en el comportamiento térmico, así como una reducción en los costes de transporte o en materiales destinados a soportar las cargas muertas del edificio. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la densidad está directamente relacionada con la resistencia a compresión, cuanto menor es este parámetro, menor es su resistencia; por lo que, se buscó reducir la densidad de las piezas y al mismo tiempo cumplir con los requisitos mecánicos mínimos de la normativa. Por otro lado, el ensayo de absorción, aunque no está contemplado en la norma referente a bloques, se realizó con el fin de evaluar el comportamiento de los bloques en condiciones húmedas, ya que un porcentaje de absorción alto en los bloques puede generar problemas de resistencia en los muros, puesto que las unidades podrían absorber parte del agua del mortero de junta, impidiendo que este logre su resistencia de diseño y cumpla su función principal.

Estas propiedades físicas se determinaron a partir de 6 porciones representativas de los bloques por cada familia, después de 28 días de fabricación (véase la Figura 68), de acuerdo con las normas UNE-EN 772-13 [109] para determinar la densidad y ASTM 140-11 [93] para obtener la absorción.



Figura 68 Porciones de los bloques.

El procedimiento consistió en sumergir cada una de las probetas en agua a 20°C, durante 24 horas, para luego determinar, con una balanza hidrostática, las masas de las probetas sumergidas completamente en agua (véase la Figura 69a). Posteriormente, las probetas se retiraron del agua y se dejaron drenar durante 60 segundos sobre una malla de alambre grueso, toda el agua de la superficie visible se secó con un paño húmedo, y se procedió a pesar las probetas nuevamente, a fin de obtener la masa saturada (véase la Figura 69b). Tras su inmersión en agua, se secaron en un horno a 70°C, durante al menos 24 horas, hasta que dos pesadas sucesivas a intervalos de 2 horas mostraron una pérdida incremental no superior al 0.2%, del peso de la muestra, previamente determinado. Finalmente, se pesaron para determinar la masa seca. La densidad y la absorción de los bloques se calcularon con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Densidad, (Mg/m}^3\text{)} = m_1 / [(m_2 - m_3) \cdot 10^3] \quad (4-2)$$

$$\text{Absorción, (Kg/m}^3\text{)} = (m_2 - m_1) / (m_2 - m_3) \cdot 1 \quad (4-3)$$

$$\text{Absorción, \%} = (m_2 - m_1) / m_1 \cdot 100 \quad (4-4)$$

Dónde: m_1 es la masa de la probeta secada al horno, (kg); m_2 es la masa de la probeta con superficie seca después de la inmersión, (kg) y m_3 es la masa aparente de la probeta en agua, (kg).

Los resultados finales se expresaron con dos cifras decimales en el caso de la densidad, y con una cifra decimal, en el caso de la absorción de agua.

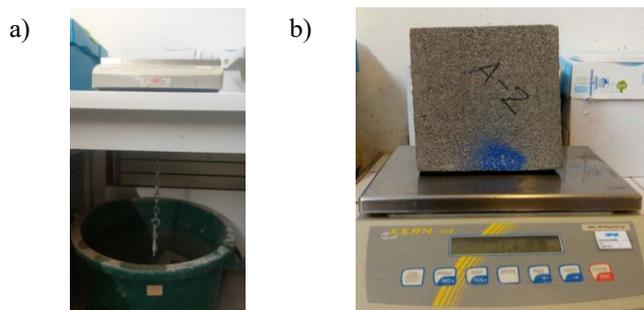


Figura 69 Determinación de la masa: a) aparente sumergida y b) saturada de las muestras.

4.2.1.7 Absorción por capilaridad

Este parámetro es especialmente relevante en lo que respecta a la durabilidad de los bloques. Se determinó a partir de 6 bloques enteros de cada familia, después de 28 días de fabricación, siguiendo el procedimiento establecido en la norma UNE-EN 772-11 [109] y que se explica a continuación:

Los bloques se secaron en un horno a 70°C (véase la Figura 70), hasta que se alcanzó una masa constante, después se dejaron enfriar a temperatura ambiente durante 12h. Posteriormente, se determinó su masa seca. A continuación, las muestras se colocaron sobre soportes en una bandeja (véase la Figura 71), de tal modo, que se sumergieron en agua a una profundidad de 5±1mm (véase la Figura 72a), y se activó el cronómetro. Después de 10min, se sacaron de la bandeja y se les eliminó cualquier agua superficial secándolas con un paño húmedo. Inmediatamente, se pesaron para obtener su masa saturada (véase la Figura 72b). El coeficiente de absorción por capilaridad de cada tipo de bloque se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$C = (M - m)/(A \cdot t) \cdot 10^6 \quad (4-5)$$

Dónde: C es el coeficiente de absorción capilar de los bloques, [$g/(m^2 \cdot s)$]; m es la masa de la muestra después del secado, (g); M es la masa de la muestra después de la inmersión durante un tiempo t , (g); A es la superficie bruta de la cara de la muestra sumergida en agua, (mm^2) y t es el tiempo de inmersión (s).



Figura 70 Secado de las muestras.

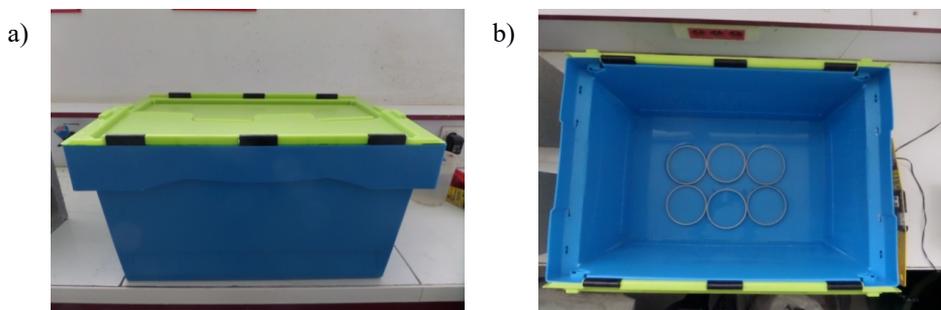


Figura 71 a) Recipiente y b) base de soporte.

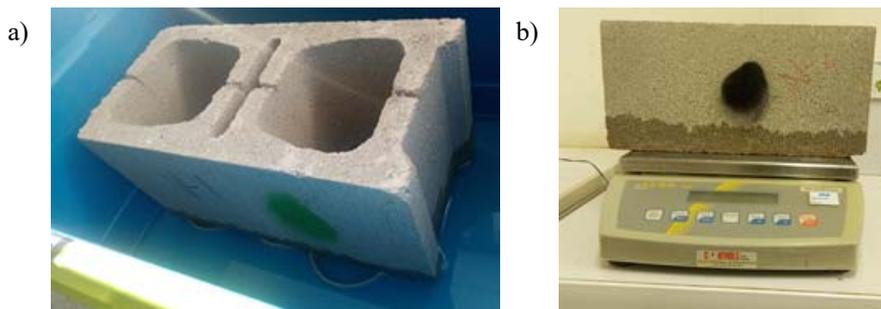


Figura 72 Muestra a) sometida al ensayo de absorción por capilaridad y b) pesada para obtener su masa saturada.

4.2.1.8 Resistencia a compresión

Este ensayo se realizó con el objetivo de comprobar que los resultados de resistencia a compresión de los bloques, cumplieran con los valores mínimos de resistencia requeridos por el Código Técnico de la Edificación (CTE).

El ensayo se llevó a cabo a partir de 6 bloques de hormigón de cada familia, a los 14, 28 y 90 días siguiendo las especificaciones de la norma UNE-EN 772-1 [109]. La carga de compresión se aplicó axialmente en una de las caras de la muestra, a una velocidad uniforme de $0.05\text{N/mm}^2/\text{min}$ hasta la rotura (véase la Figura 73).

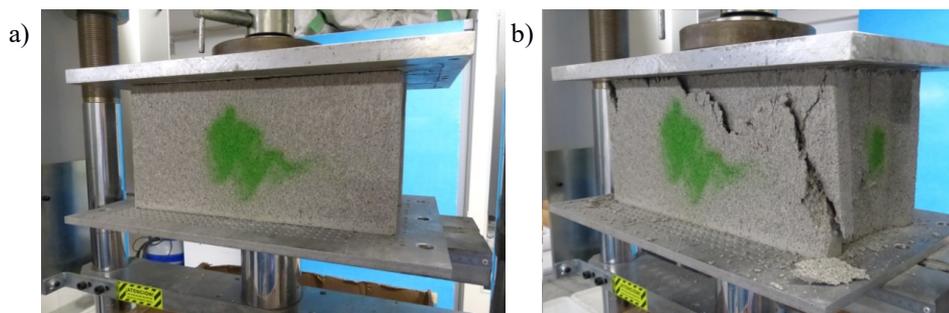


Figura 73 Muestra a) ensayada bajo compresión axial y b) aspecto después de la rotura.

La resistencia a compresión de los bloques se expresó como resistencia media y resistencia normalizada.

La resistencia media, f_m , es la media aritmética de la resistencia a compresión de 6 bloques. Se calculó con la siguiente ecuación:

$$\sigma_c(N/mm^2) = \frac{F}{A} \quad (4-6)$$

Dónde: σ_c es la resistencia a compresión, (MPa); F es la carga máxima de rotura, (N); y A es el área transversal de la probeta sobre la que actúa la fuerza de compresión, (mm^2). Ésta última puede ser el área bruta o el área neta. Según la norma UNE-EN 772-1 [109], para este tipo de bloque corresponde el área bruta, puesto que presentan hendiduras que no se rellenan con mortero en obra.

La resistencia normalizada, f_b , es la resistencia a compresión de las piezas convertida en resistencia a compresión equivalente, correspondiente al régimen de secado al aire de una pieza de 100mm de ancho por 100mm de altura. Para obtenerla se empleó la siguiente ecuación:

$$f_b = f_m \cdot \delta \cdot f_c \quad (4-7)$$

Dónde: f_m es la resistencia media a compresión de la muestra, (MPa); δ es el factor de forma, que se da en la Tabla 20, y f_c es el factor de conversión, que se muestra en la Tabla 21.

Altura (mm)	Anchura (mm)				
	50	100	150	200	≥250
40	0.80	0.70	-	-	-
50	0.85	0.75	0.70	-	-
65	0.95	0.85	0.75	0.70	0.65
100	1.15	1.00	0.90	0.80	0.75
150	1.30	1.20	1.10	1.00	0.95
200	1.45	1.35	1.25	1.12	1.10
≥250	1.55	1.45	1.35	0.25	1.15

Nota: se admitirá interpolación lineal entre los valores adyacentes del factor de forma.

Tabla 20 Resistencia característica, factor de forma δ .

Método de acondicionamiento	Factor de conversión
Secado al aire	1.0
Acondicionamiento para un contenido de agua del 6%	1.0
Secado en estufa	0.8
Acondicionamiento por inmersión	1.2

Tabla 21 Resistencia normalizada, factor de conversión.

Los bloques presentaron una altura de 190mm y una anchura de 190mm, por lo que al interpolar los valores de la Tabla 20 se obtuvo que el factor de forma era de 1.12. El método de acondicionamiento empleado fue por secado al aire, por lo que el factor de conversión utilizado fue de 1. Los resultados de resistencia a compresión se expresaron con una precisión de 0.1Mpa.

4.2.1.9 Comportamiento acústico

Este ensayo se llevó a cabo con el objeto de evaluar el comportamiento acústico de los bloques, ya que al formar parte de la fachada del edificio, tendrán que cumplir entre otras funciones, la de reductor del nivel de ruido transmitido al interior. Para ello, se emplearon 3 porciones representativas por cada tipo de bloque, las cuales se extrajeron de las paredes exteriores de los bloques, se cortaron y se limpiaron mediante la eliminación del material superfluo, hasta que ambos lados de las probetas fueran planas y tuviesen un tamaño de 350mm x 190mm, aproximadamente, tal y como se muestra en la Figura 74.

Para la realización del ensayo acústico se empleó un dispositivo para mediciones a pequeña escala, que consiste en una cámara de madera de 3500mm x 350mm x 500mm (véase la Figura 75a), realizado con tableros de partículas con cemento, de densidad menor a 1200kg/m³ y espesor de 10mm, el cual presenta un orificio (véase la Figura 75b) de 350mm x 190mm x 25mm, donde se dispone la probeta, a 1500mm de uno de los extremos, y a 2000mm del otro.

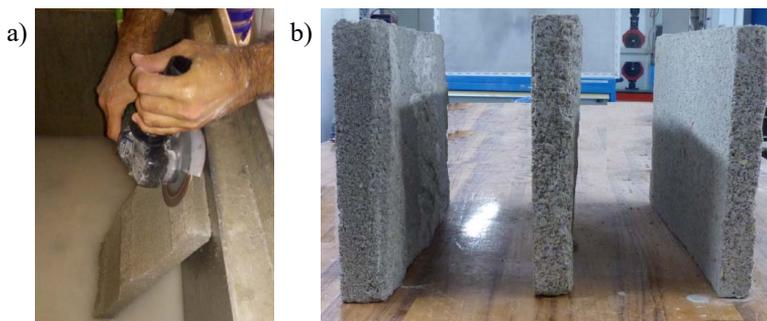


Figura 74 a) Preparación de las probetas para el ensayo y b) acabado final.

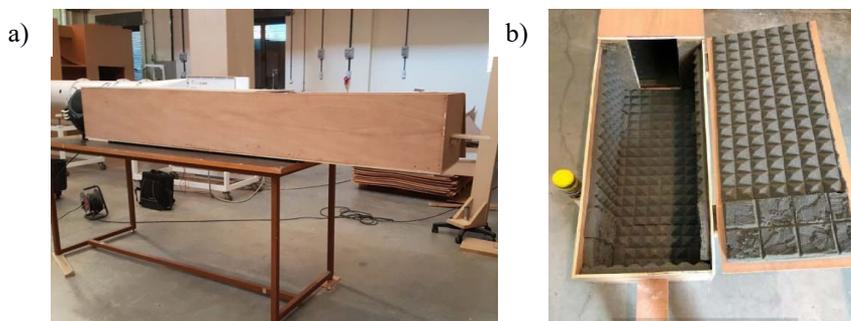


Figura 75 a) Cámara acústica y b) orificio donde se dispone la probeta.

La cámara, por tanto está dividida en dos zonas: una cerrada de 2000mm de largo, recubierta de placas de espuma de aislamiento acústico sin relieve piramidal, y con una fuente sonora omnidireccional de la marca Bruel & Kjaer (véase la Figura 76a) en su extremo, sellado con aislamiento por los alrededores, para evitar pérdidas sonoras. La otra zona de 1500mm de largo, está recubierta de placas de espuma de aislamiento acústico con relieve piramidal. Esta zona tiene una puerta, que es por donde se introduce la placa (véase la Figura 76b), la cual está aproximadamente en la zona central de todo el dispositivo. En el extremo de esta segunda zona, está instalado un sonómetro Bruel & Kjaer 2250 Light (ver Figura 76c) de clase 1, con un calibrador acústico de nivel sonoro Bruel & Kjaer 4231, que permite medir niveles de presión sonora; este cumple con la norma UNE-EN 21314/75 [109] y el R.D 1367/2007, sobre sonómetros de precisión, de acuerdo con al orden ITC/2845/2007, del 25 de septiembre de 2007, “IEC 61672: Equipos de Clase 1 y 2”.

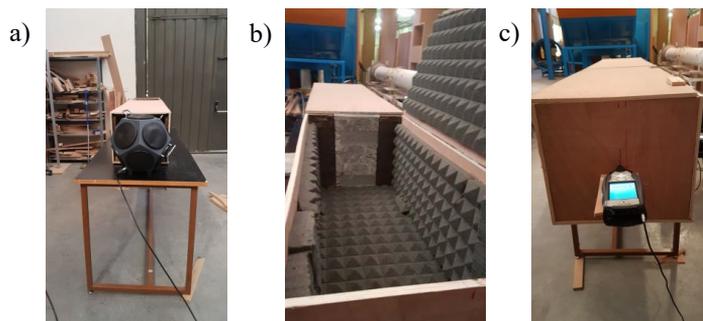


Figura 76 a) Fuente sonora, b) probeta dispuesta en el agujero y c) sonómetro.

Para evaluar el comportamiento acústico de las diferentes probetas, se empleó un espectro de frecuencia de ruido rosa. Primero, se midió el ruido de fondo en el punto de inmisión, con la fuente sonora apagada. Seguidamente, se midió en el punto de inmisión el nivel sonoro que llegaba procedente de la fuente. Una vez realizadas dichas mediciones, se evaluó el aislamiento al ruido de las probetas. Cada paso, comprendió la realización de 3 medidas de 10 segundos, cada una con un intervalo de separación de 1 minuto.

4.2.1.10 Emisividad

La emisividad de los bloques se determinó a fin de conocer las propiedades aislantes por reflexión de las superficies de los bloques, el método empleado fue el de medición comparativa con la cámara infrarroja de la norma ASTM E1933-99^a [93], cuyo procedimiento se desarrolló en dos pasos, los cuales se explican a continuación:

El primer paso consistió en la determinación de la temperatura aparente reflejada. Para ello, se cortó un trozo grande de papel de aluminio y se arrugó un poco. Luego, se unió a un trozo de cartón del mismo tamaño y se colocó el cartón en la parte delantera del bloque. Seguidamente, se aseguró que el lado con el papel de aluminio apuntase a la cámara y que este estuviese en el mismo ángulo y orientación que el bloque. Finalmente, se ajustó la emisividad de la cámara termográfica (véase la Figura 77) a 1.0 y se midió la temperatura aparente del papel de aluminio.



Figura 77 Modelo de cámara infrarroja ©TESTO 875-1.

En el segundo paso, se determinó la emisividad del material. Para ello, fue necesario determinar y establecer la temperatura aparente, según el paso anterior. Seguidamente, se puso un trozo de cinta aislante (con una emisividad alta conocida) en el bloque y se calentó la muestra a 40°C. Luego, se enfocó y auto-ajustó la cámara y se congeló la imagen. Se estableció la emisividad a la de la cinta aislante en un valor de 0.95 [162]. Se midió la temperatura de la cinta mediante la función de medición isoterma y se anotó la temperatura. Finalmente, se enfocó la superficie del bloque, se cambió el ajuste de la emisividad hasta que leyese la misma temperatura que en la medición anterior y se tomó nota de la emisividad.

4.2.1.11 Comportamiento térmico

El comportamiento térmico de los bloques se evaluó a fin de conocer si la adición de estos subproductos a la mezcla, puede aportar una mejora térmica a las piezas y por consiguiente a la fachada de los edificios. Se realizaron 3 muros de tamaño 1190mm x 190mm x 1000mm (véase la Figura 78), cada uno con 15 bloques de cada familia. Para realizar las juntas en el muro, se utilizó un mortero comercial formulado con cemento, cal, árido silíceo y aditivo; el cual cumple con las especificaciones de la norma UNE-EN 998-1 [109] y cuyas características se muestran en la Tabla 22. Las juntas de mortero tuvieron un espesor aproximado de 10mm. El acabado final de los 3 muros se puede observar en la Figura 79.

Reacción al fuego Euroclase A1	GP - CSIV - W2
Producto en pasta	≤ 2%
Agua de amasado	Euroclase A1
Temperatura de aplicación	16±1%
Tiempo de vida de la mezcla	5-35°C
Producto endurecido	30 minutos
Resistencia a compresión	≥ 6MPa
Absorción de agua por Capilaridad	≤ 0.2kg/m ² .min ^{1/2}
Coefficiente de permeabilidad al vapor de agua	≤ 15
Adhesión	≥ 0.3MPa

Tabla 22 Datos técnicos del mortero.

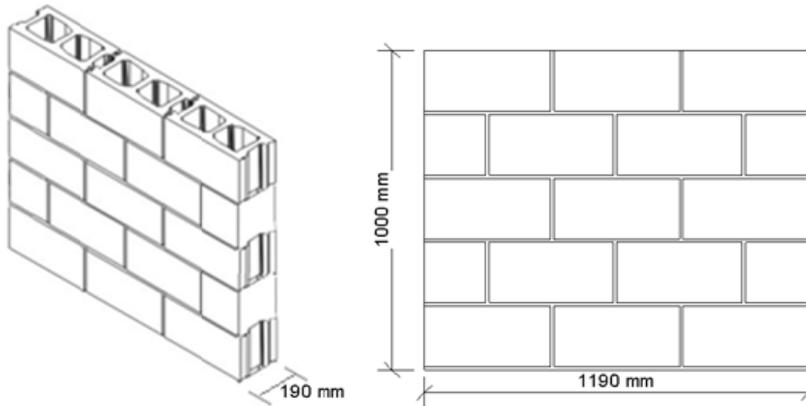


Figura 78 Geometría de los muros.

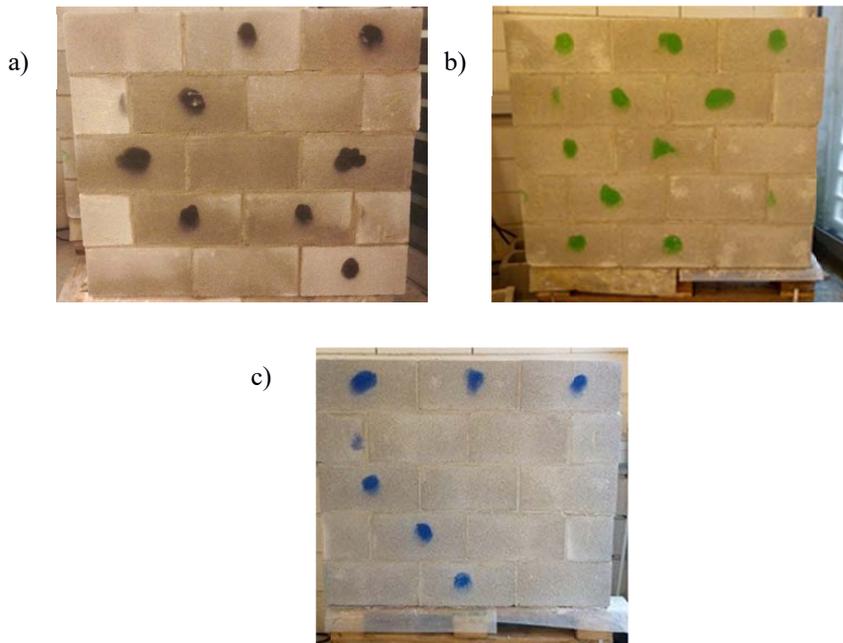


Figura 79 Muros: a) MREF, b) MS y c) MSLM.

Las mediciones de la resistencia térmica, la conductividad térmica, el coeficiente de transferencia de calor, el flujo de calor y el coeficiente de transferencia de calor convectivo de los muros se realizaron con un dispositivo de Caja Caliente Guardada, de nombre comercial Celda térmica Thermo3, diseñado y calibrado de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 8990 [109].

El equipo consta de 2 cámaras aisladas, una cámara de frío con temperatura controlada y otra con un recinto caliente regulado en temperatura o flujo (véase la Figura 80). La muestra se coloca entre los dos recintos y el equipo hace posible medir la energía que

pasa a través de la muestra bajo diferentes condiciones térmicas. A partir de estas medidas, se calculan las propiedades de transferencia de calor de la muestra.

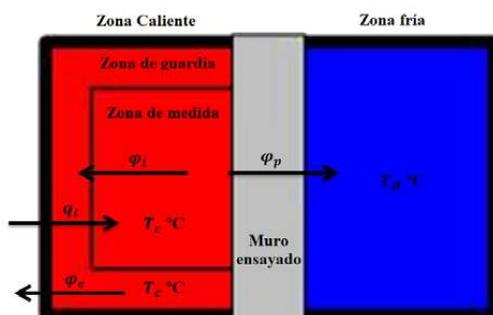


Figura 80 Representación del funcionamiento del equipo.

La cámara fría permite simular condiciones climáticas similares a las que pueden surgir fuera del edificio. En esta cámara, la temperatura puede regularse entre 5 y -10 °C. La envolvente exterior de la zona fría es una caja de chapa lacada de dimensiones 1200mm x 1200mm x 600mm, montada sobre ruedas con bloqueo direccional. En el interior, una segunda envolvente de chapa lacada 1000mm x 1000mm x 500mm es la zona configurada a temperaturas bajas. Las dos envolventes están aisladas con poliuretano de 100mm. La zona fría está equipada con 4 sensores de temperatura digitales que se encuentran en contacto con la muestra (véase la Figura 81).



Figura 81 Cámara fría.

La cámara caliente permite una simulación de las condiciones de temperatura interior del edificio y su temperatura puede regularse entre 10 y 30°C. La envolvente exterior de la zona caliente consiste en una caja de chapa lacada de dimensiones 1200mm x 1200mm x 600mm montada sobre ruedas con bloqueo direccional. En el interior, una segunda envolvente de chapa lacada de dimensión 1000mm x 1000mm x 500mm es la zona donde se establece la temperatura. Las dos envolventes están aisladas con poliuretano de 100mm. Dentro de la segunda envolvente, una tercera envolvente de dimensiones 800mm x 800mm x 300mm, delimita la zona de medición. El área entre el área medida y la capa interior se conoce como zona de guardia. Las zonas de medición y de guardia están

equipadas, con 8 sondas de temperatura digitales, distribuidas por todo el volumen y en la pared (véase la Figura 82).



Figura 82 Cámara caliente.

El ensayo se llevó a cabo siguiendo las recomendaciones de la norma UNE-EN ISO-8990 [109]. La misma, específica que las caras del muro que no están en contacto con las cámaras se deben sellar con aislamiento, con el fin de limitar los intercambios térmicos del muro, para ello se usó un aislamiento de tipo fibra de madera (véase la Figura 83). La muestra se colocó entre ambas cámaras.

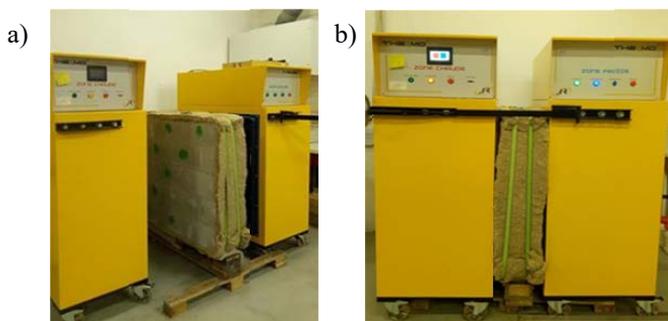


Figura 83 a) Muro con el aislamiento por los bordes y b) Caja Caliente en funcionamiento.

Las cámaras fría y caliente estaban equipadas con 8 sondas digitales de temperatura en contacto con el muro, 4 en cada lado del muro, como se muestra en la Figura 84. Cabe destacar que, la posición de las sondas se eligió de esta manera, a fin de cubrir la mayor superficie posible del muro, incluyendo el mortero; de este modo se obtiene un resultado más representativo.

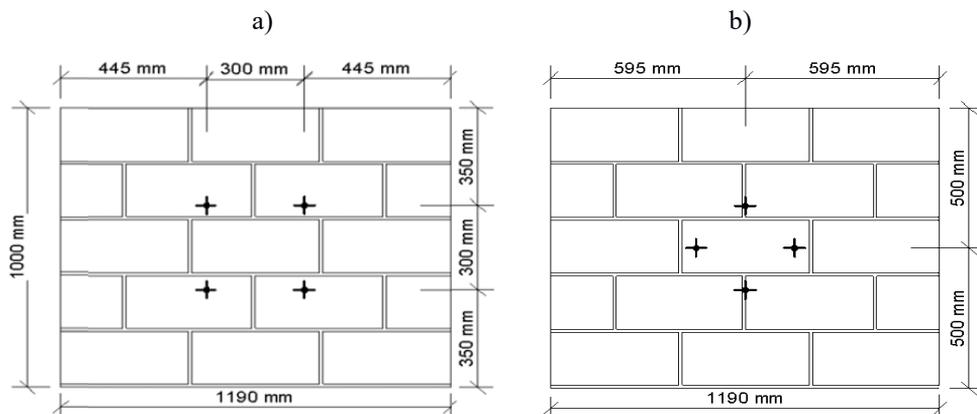


Figura 84 Posición de las sondas de temperatura en contacto con el muro de la cámara: a) caliente y b) fría.

El ensayo comenzó a una temperatura constante en todo el muro. Las temperaturas constantes se mantuvieron tanto en el lado caliente (interior) a 25°C como en el lado frío (exterior) a 5°C. Las temperaturas del aire y la superficie, así como también la potencia suministrada a la cámara caliente se midieron en estado estacionario. El ensayo se llevó a cabo durante 24 horas y el tiempo de medición en el estado estacionario fue de aproximadamente 18 horas. Sobre la base de estas mediciones, se calcularon las propiedades de transferencia de calor de la muestra. La resistencia térmica del muro se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$R = A \cdot \Delta T / \varphi_p = A \cdot (T_o - T_n) / \varphi_p \quad (4-8)$$

Dónde: R es la resistencia térmica, ($m^2 \cdot K/W$); A es la superficie del muro a ensayar, (m^2); ΔT es la diferencia de temperatura entre las caras del muro, ($^{\circ}C$); φ_p es el flujo de calor a través del muro, (W); T_o es la temperatura de la cara del muro en el lado caliente, ($^{\circ}C$); y T_n es la temperatura de la cara del muro en el lado frío, (s).

De manera similar, el coeficiente de conductividad térmica, una medida de la velocidad a la cual el calor (energía) pasa perpendicularmente a través de un área unitaria para una diferencia de temperatura de un grado, se determinó con la siguiente ecuación:

$$\lambda = e / R \quad (4-9)$$

Dónde: λ representa la conductividad térmica, ($W \cdot m/k$); e es el espesor del muro (m); y R es la resistencia térmica, ($m^2 \cdot K/W$).

El coeficiente de transferencia de calor (valor de U) es el parámetro que generalmente se utiliza para limitar la demanda de energía a través de la fachada del edificio, que se define de la siguiente manera:

$$\text{Valor de } U = 1/R_T = 1/(R_{si} + R + R_{so}) \quad (4-10)$$

Dónde: R_{si} y R_{so} son las resistencias de la superficie interna y externa, respectivamente, ($m^2.K/W$); R es la resistencia térmica de superficie a superficie, ($m^2.K/W$); y R_T es la resistencia térmica total, ($m^2.K/W$).

Los valores de R_{si} y R_{so} , utilizados en los cálculos son los declarados en la Tabla B.1 del anexo B de la norma UNE-EN ISO 10077-2 [109], la cual establece que para cerramientos verticales R_{si} y R_{so} son iguales a 0.13 y $0.04m^2.K/W$, respectivamente.

El flujo térmico se calculó de la siguiente manera:

$$q = \varphi_p / A \quad (4-11)$$

Dónde: q es el flujo térmico, (W/m^2); φ_p es el flujo de calor a través del muro, (W); y, A es la superficie del muro a ensayar, (m^2).

La ecuación 4-12 se empleó para calcular el coeficiente convectivo de transferencia de calor de las dos caras en contacto con las cámaras.

$$h = \varphi_p / (A. \Delta Tr) \quad (4-12)$$

Dónde: h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor, ($W.m^2/k$); ΔTr es la diferencia de temperatura entre el área de fluido circundante y la superficie sólida, ($^{\circ}C$); φ_p es el flujo de calor a través del muro, (W); y A es la superficie del muro a ensayar, (m^2).

4.3 Resultados y discusión

4.3.1 Longitud, anchura y altura

La forma de los bloques se muestra en la Figura 85. Como se puede observar, la parte interna tiene una forma de pirámide truncada. Esto se debe a la forma de los moldes, los cuales están diseñados de esta manera para facilitar la obtención de las piezas en el proceso de moldeado.

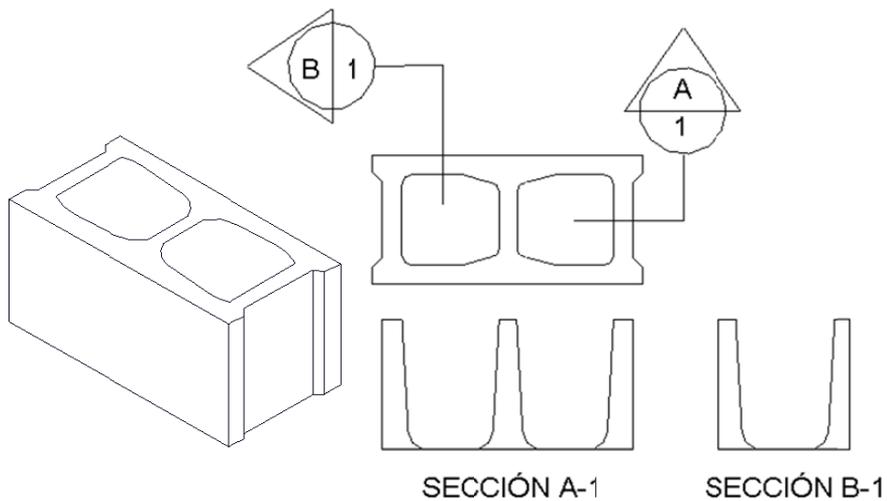


Figura 85 Forma de los bloques.

La media de las dimensiones reales de los bloques estudiados, con sus respectivas desviaciones se muestra en la Tabla 23. Como se puede apreciar, no se notaron cambios en las dimensiones de las piezas al incorporar las virutas y los lodos de cal en los bloques.

Tipo de bloque	Dimensiones (mm)					
	Longitud	Desviación	Anchura	Desviación	Altura	Desviación
MREF	390.5	+1.0 -1.0	191.0	+1.0 -2.0	190.5	+1.0 -2.0
MS	390.5	+1.0 -2.0	190.5	+1.0 -2.0	190.0	+1.0 -2.0
MSML	390.0	+1.0 -2.0	191.0	+1.0 -2.0	190.5	+1.0 -2.0

Tabla 23 Dimensiones.

La norma UNE-EN 771-3 [109] establece que las variaciones en la longitud, anchura y altura de las muestras, deben estar dentro de los límites de tolerancia especificados, y dependiendo de sus desviaciones, las piezas se podrán clasificar en su categoría de tolerancia, tal y como se muestra en la Tabla 24. A partir de los resultados, se puede decir que los 3 tipos de bloques se clasifican en la categoría de tolerancia D2.

Dimensiones	Categoría de tolerancia			
	D1	D2	D3	D4
Longitud	+3	+1	+1	+1
	-5	-3	-3	-3
Anchura	+3	+1	+1	+1
	-5	-3	-3	-3
Altura	+3	±2	±1.5	±1
	-5			

Tabla 24 Desviaciones límites (mm) según la norma UNE-EN 771-3 [109].

Según la norma UNE 127771-3 [109] los bloques D2 pueden ser empleados como bloques a revestir (véase la Tabla 25) ya que las desviaciones encontradas son pequeñas, lo que facilita la aplicación de un revestimiento. Asimismo, dicha norma no recomienda el empleo de bloques D2, cuando su uso previsto sea con una junta fina de mortero (1-3mm), ya que los muros pueden presentar problemas de adherencia, y por consiguiente de resistencia.

Bloque	Categoría
Cara vista	D1
A revestir	D2 y D3
Bloque de hormigón con junta delgada	D4

Tabla 25 Categoría recomendada para cada tipo de bloque según la norma UNE 127771-3 [109].

Como se mencionó anteriormente en el apartado 2.5, el Documento Básico Seguridad Estructural Fábrica (DB SE-F) del CTE [132] establece que las piezas deben designarse por sus medidas modulares. Comparando los resultados obtenidos con la Tabla 1 de dicho

apartado, se puede decir que los 3 tipos de bloques se designan como: “Serie A200”, con medidas modulares de 400mm x 200mm x 200mm.

4.3.2 Espesor de las paredes exteriores y de los tabiques

Los resultados obtenidos tras realizar el ensayo para determinar las dimensiones de los espesores de las paredes exteriores y de los tabiques de los bloques se muestran en la Tabla 26. Como se puede apreciar, tanto las dimensiones de los espesores de las paredes exteriores, como las de los tabiquillos de los 3 tipos de bloques, son similares entre sí; además, estos tipos de bloques presentaron las dimensiones de los espesores de los tabiques, ligeramente mayores que las de los espesores de las paredes exteriores.

Tipo de bloque	Dimensiones (mm)	
	Paredes exteriores	Tabiques
MREF	26.5	28.0
MS	26.5	28.0
MSLM	26.5	28.0

Tabla 26 Espesor de las paredes exteriores y tabiquillos de los bloques.

4.3.3 Paralelismo de los planos de las caras de apoyo

Los resultados correspondientes a la desviación con respecto al paralelismo de los planos de las caras de apoyo de los 3 tipos de bloques se muestran en la Tabla 27. Como se puede observar los valores obtenidos de las desviaciones del paralelismo de los planos son muy cercanos entre sí.

Tipo de bloque	Desviación máxima (mm)
MREF	1.6
MS	1.8
MSLM	1.6

Tabla 27 Desviación con respecto al paralelismo de los planos de las caras de apoyo de los bloques.

Aunque no existe un límite específico en la norma UNE 127771-3 [109], ni en la norma ASTM C90-16a del valor de desviación del paralelismo de los planos de las caras de apoyo de los bloques, la norma de la Comunidad de Madrid referente a Ladrillos y bloques [163] establece unos valores límites, en función de la longitud de las aristas y la familia superficial, que se muestran en la Tabla 28 y pueden servir de referencia.

Dimensiones nominales de aristas	Desviación máxima (mm)	
	Cara vista	A revestir
>300mm	4	6
>250 y ≤300mm	3	5
>125 y ≤250mm	2	3

Tabla 28 Desviaciones admisibles en aristas y diagonales de las caras, en función de su longitud Según la norma de la Comunidad de Madrid [163].

Comparando los resultados obtenidos con las exigencias de la normativa anteriormente mencionada, se puede observar que, para los 3 tipos de bloques con dimensiones

nominales de aproximadamente 190mm, las desviaciones máximas encontradas fueron menores a 2mm, por tanto, se puede decir que los 3 tipos de bloques poseen suficiente paralelismo de los planos en las caras de apoyo.

4.3.4 Planeidad de las caras vistas y de apoyo

Las dimensiones medias de las diagonales de las caras vistas (L_{dcara_vista}) y de apoyo ($L_{dcara_de_apoyo}$), y las distancias medias entre las caras y la regla, medidas en los 3 tipos de bloques se muestran en la Tabla 29.

Tipo de bloque	L_{dcara_vista} (mm)	$L_{dcara_de_apoyo}$ (mm)	d_{cara_vista} (mm)	$d_{cara_de_apoyo}$ (mm)
MREF	434.5	434.4	0.5	0.9
MS	434.4	434.5	0.5	0.9
MSLM	433.9	434.2	0.5	0.9

Tabla 29 Planeidad de las caras vistas de los bloques.

De acuerdo con la norma UNE-EN 41410 [109], la superficie de un bloque se considera plana si no se desvía de un plano en más del mayor de los siguientes valores:

$$2 \text{ mm o el resultado de la siguiente expresión: } 0.1\sqrt{L_d} \text{ (mm)} \quad (4-13)$$

Dónde L_d es la longitud de la diagonal de la superficie del bloque, (mm).

El resultado de la expresión 2 es de aproximadamente 2.1mm para todos los casos, siendo este valor mayor a 2mm, por lo cual se usó el valor de la expresión para comparar. Como se puede apreciar en la Tabla 29, las distancias medias entre las caras (vista y de apoyo) y la regla son menores a 2.1mm. Por tanto, se puede afirmar que los 3 tipos de bloques presentan planeidad de las caras vistas y de apoyo.

4.3.5 Porcentaje de superficie de huecos

Dado que los huecos de los bloques tienen una forma troncopiramidal, existe una diferencia entre el porcentaje de superficie de huecos de la parte superior e inferior, por lo que para obtener el área de los huecos, fue necesario calcular la media entre el área superior e inferior. La Tabla 30 muestra los resultados obtenidos referentes al ensayo de porcentaje de superficie de huecos.

Tipo de bloque	Área Bruta (mm ²)	Área superior (mm ²)	Área Inferior (mm ²)	Media del Área de los huecos	% de huecos	% de cada hueco	% de espesor combinado
MREF	72,185.5	36,316.8	23,318.4	29,817.6	41.3	20.7	20.60
MS	71,990.3	36,309.8	23,330.2	29,820.0	41.4	20.7	20.70
MSLM	72,090.0	36,307.6	23,320.1	29,813.9	41.4	20.7	20.80

Tabla 30 Porcentaje de superficie de huecos de los bloques.

El CTE [46] establece en la Tabla 4.13 del Documento Básico de Seguridad Estructural Fábrica (DB-SE-F) una clasificación de las piezas de hormigón en grupos, dependiendo

de los porcentajes de volumen de huecos, de cada hueco y del espesor combinado (véase la Tabla 31).

Características	Grupo de piezas			
	Maciza	Perforada	Aligerada	Hueca
Volumen de huecos (% del bruto)	≤ 25.0	≤ 50.0	≤ 60.0	≤ 70.0
Volumen de cada hueco (% del bruto)	≤ 12.5	≤ 25.0	≤ 25.0	≤ 25.0
Espesor combinado (% del ancho total)	≥ 37.5	≥ 20.0	≥ 20.0	-

Tabla 31 Extracto de la Tabla 4.1 Grupos de piezas del CTE DB-SE-F [46].

Debido a que para los 3 tipos de bloques, los porcentajes de volumen de huecos fueron menores al 50%, los porcentajes de cada hueco fueron menores al 25% y los porcentajes del espesor combinado (porcentaje del ancho total) fueron mayores al 20%, se puede afirmar que todos los tipos de bloques bajo estudio entran dentro del rango del grupo de piezas “Perforada”. Cabe destacar que, este grupo de pieza suele emplearse con frecuencia en el sector de la construcción [128].

4.3.6 Densidad

Los resultados obtenidos del ensayo de densidad llevados a cabo en los 3 tipos de bloques se muestran en la Tabla 32. Se pudo observar que la mayor reducción en la densidad ocurrió cuando solo se reemplazó el árido fino en la mezcla de hormigón, es decir en las muestras MS, siendo esta reducción de 6.9%. Este comportamiento se atribuye a la menor densidad de las virutas, aproximadamente 0.57Mg/m^3 , en comparación con la caliza, de 2.71Mg/m^3 , y a un aumento de la porosidad, que pudo haber surgido por una interacción más débil entre las virutas y la pasta [154]. Un comportamiento similar se observó en las muestras MSLM, aunque en menor medida, debido a la sustitución parcial del cemento por los lodos de cal, donde la reducción de la densidad fue del 3.4%, en comparación con la densidad de los bloques de referencia. Este resultado sugiere que la incorporación de lodos de cal contrarresta moderadamente el efecto de las virutas.

Tipo de bloque	Densidad seca (Mg/m^3)	Peso seco (kg)
MREF	2.03	13.60
MS	1.89	12.60
MSLM	1.96	13.10

Tabla 32 Densidad de los bloques.

La norma UNE 127771-3 [109] define un bloque de hormigón de árido denso como cualquier bloque con una densidad seca entre 1.70 y 2.40Mg/m^3 . Comparando estos valores con los resultados, los 3 tipos de bloques se clasifican como bloques de hormigón de árido denso. Además, este rango es típico de los valores de bloques convencionales [128] (véase la Figura 86). Por otro lado, la norma ASTM C129 [93] clasifica los bloques según su densidad en bloque normal, de peso medio y ligero, siempre y cuando sus densidades sean mayores a 2.00Mg/m^3 , entre 1.68 y 2.00Mg/m^3 e inferior a 1.68Mg/m^3 , respectivamente. Por lo tanto, las muestras MREF, de acuerdo con esta última norma, se

clasifican como bloques normales y, los otros dos tipos de muestras (MS y MSML), como bloques de peso medio.

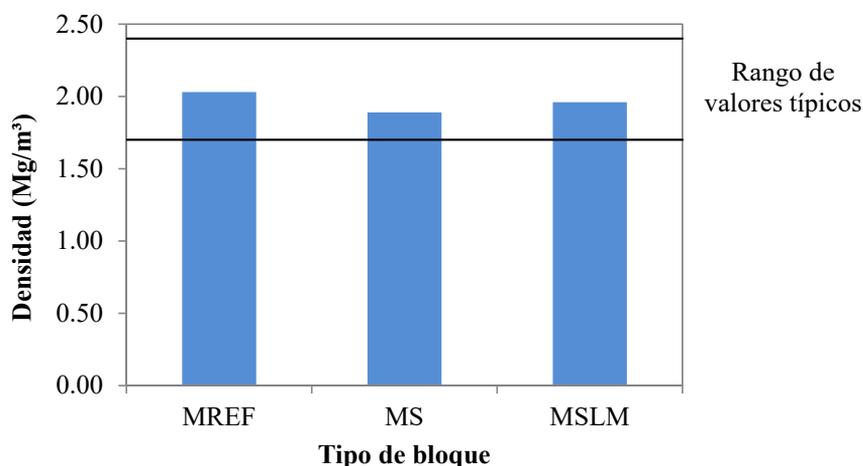


Figura 86 Densidad de los bloques y rango de valores típicos según ANDECE [128].

La densidad de los bloques es un parámetro importante a determinar, ya que una reducción en su peso proporcionará comodidad de trabajo y facilidad de manejo. Además, si se calcula el peso de 1m^2 de muro con los bloques MREF, este pesaría 170.0kg (sin mortero) y con los bloques MS o MSML el muro pesaría 157.5 y 163.0kg (sin mortero), respectivamente; con lo cual, se obtendría una disminución en la carga muerta de la estructura, lo que conduciría a una reducción en el tamaño de las vigas, pilares y fundaciones, lo que a su vez repercute en el presupuesto final de construcción [164].

Cabe destacar que la reducción en la densidad de los bloques, como se evaluará en las subsecciones siguientes, optimiza su comportamiento térmico [165,166]. Sin embargo, esta propiedad está estrechamente relacionada con la resistencia a compresión, cuanto menor es la densidad, menor es su resistencia [161].

4.3.7 Absorción

De los resultados mostrados en la Figura 87, se observó un aumento en la absorción de agua en las muestras MS y MSML de 65.9 y 25.9%, respectivamente, debido a la alta absorción de virutas [71]. Se puede observar que, la incorporación de los lodos de cal en las muestras de MSML contrarrestó un tanto, el efecto negativo de las virutas. Comparando los valores obtenidos de densidad y absorción se encontró, como se esperaba, una correlación inversa entre la densidad y la absorción, es decir, con una disminución en la densidad, la absorción de agua de los bloques aumenta y viceversa.

Aunque no existe un límite específico en el valor de absorción de los bloques en la norma UNE 127771-3 [109], la norma ASTM C90 [93] especifica valores máximos de absorción

de agua para los bloques de 208, 240 y 288kg/m³ para bloques de peso normal (W_n), peso medio (W_m) y peso ligero (W_l); respectivamente. Comparando los resultados de absorción obtenidos con los requisitos de esta norma, los valores de absorción fueron aceptables para los 3 tipos de bloques, y dentro del rango establecido en dicha norma (véase la Figura 87).

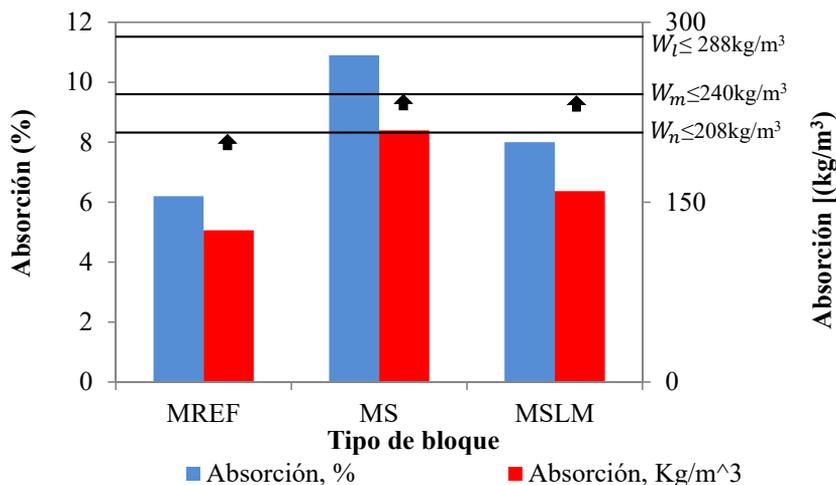


Figura 87 Absorción de los bloques y valores máximos permitidos según la norma ASTM C90 [93].

4.3.8 Absorción por capilaridad

La absorción por capilaridad desempeña un papel importante en el transporte y la redistribución del agua tras entrar en contacto con la superficie del bloque. Este parámetro depende tanto de la porosidad, como del grado de conexión entre los poros internos del hormigón. Es importante resaltar que, la absorción por capilaridad está directamente relacionada con la durabilidad de los bloques. Según la norma UNE 12771-3 [109], la durabilidad de los bloques frente a los ciclos de hielo/deshielo se garantiza, si se cumple el requisito de absorción por capilaridad.

Los resultados de absorción capilar de los bloques se muestran en la Figura 88. Se encontró que la incorporación de virutas como reemplazo único o en conjunto con los lodos de cal en los bloques, conduce a un aumento de la absorción por capilaridad del 16.2 y 10.8%, respectivamente. Este aumento se esperaba debido a la alta higroscopicidad de las virutas. Sin embargo, este aumento no fue tan pronunciado para las muestras MSML, por lo que se puede afirmar que la adición de lodos de cal produce una mezcla con menor número de conexiones entre los poros.

El valor máximo de absorción por capilaridad para los bloques, destinados a la construcción de fábricas sustentadas, de acuerdo con los requisitos del CTE [46] está limitado a 5g/(m².s). Todos los resultados son inferiores a los máximos permitidos en la normativa española (véase la Figura 88). Por lo tanto, los 3 tipos de bloques pueden

emplearse como bloque cara vista. Este ensayo no lo incluye la norma ASTM, por lo que no se pudieron comparar los resultados con esta normativa. Cabe destacar que, estos resultados están en armonía con los correspondientes al estudio llevado a cabo en la sección anterior referente a la absorción de agua de los bloques.

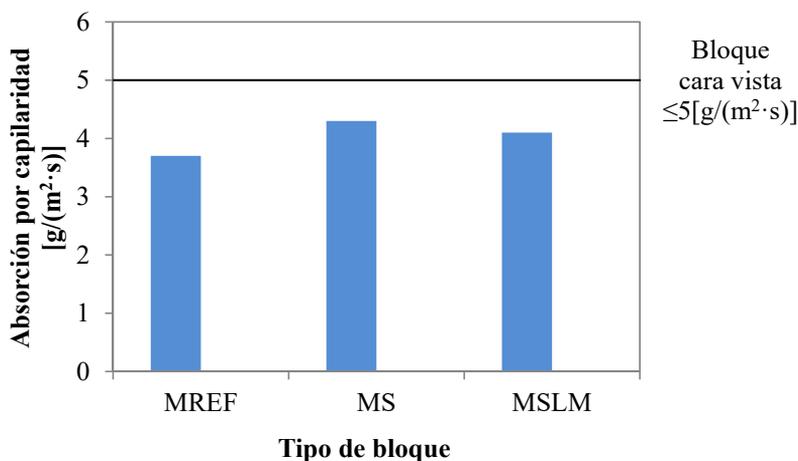


Figura 88 Absorción por capilaridad de los bloques y valor máximo permitido según el CTE [46].

4.3.9 Resistencia a compresión

Los resultados del ensayo a compresión, en términos de promedios, a 14, 28 y 90 días de edad se muestran en la Tabla 33. Como se esperaba, se observó que los bloques con menor densidad poseen menor resistencia a compresión. Según la evidencia experimental, la resistencia a compresión a los 28 días de las muestras MS y MSML disminuyeron un 34.3% y un 13.4%, respectivamente, en comparación con la muestra MREF; esto se atribuye a la menor rigidez que presentan las virutas en comparación con el material que sustituyen y al aumento de poros en los bloques. Es evidente que, el uso de lodos de cal tiene un efecto positivo sobre la resistencia a compresión [167]. Investigaciones previas, también han demostrado que los lodos de cal en reemplazo parcial del cemento, mejoran la resistencia a compresión de las mezclas de hormigón [120]. Esta mayor resistencia se debe a una reacción química entre el nano-CaCO₃ y el cemento, que acelera la velocidad de reacción del aluminato tricálcico (C₃A) para formar un complejo de carboaluminato, aumentando así los productos de hidratación total y la resistencia [127].

Parámetro	14 días			28 días			90 días		
	MREF	MS	MSLM	MREF	MS	MSLM	MREF	MS	MSLM
<i>f_m</i> (Mpa)	5.4	3.1	3.9	6.7	4.4	5.8	7.2	4.8	6.2
<i>f_b</i> (Mpa)	6.0	3.5	4.4	7.5	4.9	6.5	8.1	5.4	6.9

Tabla 33 Resistencia a compresión media (*f_m*) y normalizada (*f_b*) de los bloques.

Comparando los resultados obtenidos en la sección 4.2.6, referente a la resistencia a compresión de los hormigones con los resultados de los bloques, se encontró que para

ambos casos los resultados a escala real fueron mayores; esto pudo deberse a que al ser un proceso mecanizado, existe un mejor vibrado y compactado de la mezcla, por lo que existe un mejor acomodamiento de los componentes que a escala de laboratorio, donde el proceso es totalmente manual, y en consecuencia, se obtuvo una mezcla más densa. Estas diferencias, se pudieron apreciar también al comparar los valores obtenidos de densidad y absorción de los hormigones y los bloques de referencia y con 5% de virutas.

Por otra parte, las resistencias normalizadas a los 28 días de los 3 tipos de bloques se muestran en la Figura 89. Los resultados demostraron que los 3 tipos de bloques pueden clasificarse como piezas de fábricas sustentantes; sin embargo, para el caso de las muestras MS se necesitarían estudios adicionales, ya que su resistencia estandarizada está por debajo de los 5N/mm^2 .

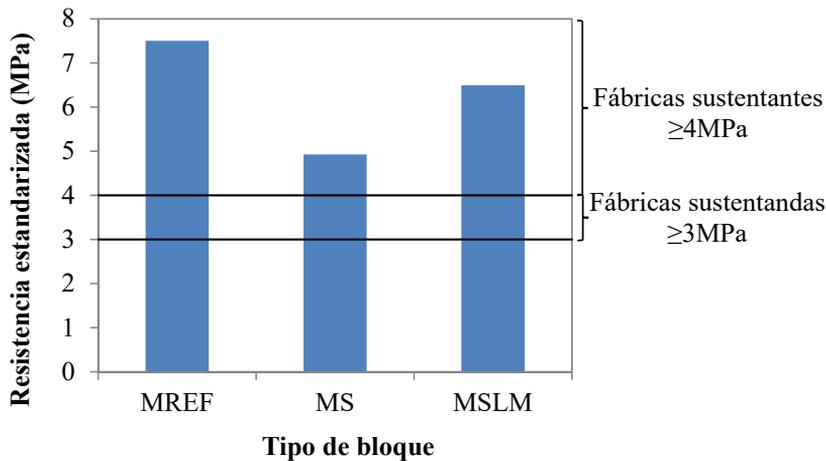


Figura 89 Resistencia de compresión normalizada de los bloques a los 28 días y requisitos de CTE [132].

Por otro lado, las normas ASTM C129 y ASTM C90 [93] establecen un criterio más restrictivo, los requisitos de resistencia a 28 días se establecieron en 4.1 y 13.1 MPa para bloques sustentados y sustentantes, respectivamente. Los resultados de resistencia a compresión para todos los tipos de bloques a los 28 días solo satisfacen los requisitos mínimos de piezas sustentadas.

4.3.10 Comportamiento acústico

En la Tabla 34 se recogen los valores obtenidos de las mediciones del ruido de fondo en el punto de inmisión con el altavoz apagado, así como también, el ruido procedente del altavoz sin y con probetas insertadas en el interior de la cámara. Para todos los casos, se tomaron las medidas del nivel de presión acústica continuo equivalente ponderado A ($L_{Aeq,T}$), ponderado C ($L_{Ceq,T}$) y del nivel de presión sonora máximo y mínimo ponderado en A (L_{AFmax} y L_{AFmin}). Además se calculó la diferencia entre el $L_{Aeq,T}$ y el $L_{Ceq,T}$.

Cabe destacar que, la ponderación A se ajusta a la manera de percibir el ruido por el oído humano en las diferentes bandas de frecuencias, bonificando las frecuencias bajas (que molestan poco) y penalizando las frecuencias en torno a 3000Hz que molestan mucho. Por el contrario, la ponderación C se emplea para evaluar los ruidos de tipo impulsivo y de tipo pico.

Parámetro	Ruido de Fondo (dB)	Nivel de inmisión sin ninguna probeta (dB)	Nivel de inmisión con las probetas (dB)		
			MREF	MSD	MSLM
$L_{Aeq,T}$	35.35	91.37	84.35	82.38	82.97
$L_{Ceq,T}$	50.79	102.75	96.34	94.82	95.37
$L_t = L_{Ceq,T} - L_{Aeq,T}$	15.45	11.39	11.99	12.44	12.40
L_{AFmax}	36.59	92.67	86.05	84.91	85.09
L_{AFmin}	34.16	89.80	82.93	80.58	81.31

Tabla 34 Ruido de fondo, de la fuente sonora y de las probetas.

A partir de los datos de la Tabla 34 se determinaron los valores de pérdida de transmisión (TL), los cuales se calcularon restando los valores de nivel de inmisión sin ninguna probeta, con los valores de nivel de inmisión con la presencia de las probetas. Los resultados se muestran en la Tabla 35.

Tipo de bloque	TL en dB(A)	TL en dB(C)
MREF	7.02	6.41
MS	8.99	7.93
MSML	8.40	7.38

Tabla 35 Pérdida de transmisión de las probetas.

A partir de los resultados se puede observar que con las probetas MREF, se obtuvo una menor pérdida de transmisión que con las demás probetas, siendo esta de 7.02dB para el nivel de presión acústica continuo equivalente ponderado A y de 6.41dB para el nivel sonoro ponderado C; por tanto, este tipo de bloque es el más aislante acústicamente. Por otro lado, las muestras MS presentaron la mayor pérdida de transmisión, siendo esta de 8.40dB para el nivel de presión acústica continuo equivalente ponderado A y de 7.38dB para el ponderado C. En cuanto a las muestras MSML, las pérdidas de transmisión fueron menores que las de las muestras MS, de 8.4 y 7.38dB, para el nivel de presión acústica continuo equivalente ponderado A y ponderado C, respectivamente.

Así pues, los resultados indican que las muestras MS y MSML tienen propiedades de aislamiento acústico menores que las MREF, esto se debe principalmente a la disminución de la densidad, ya que las propiedades acústicas del material dependen en gran medida de este parámetro; en consecuencia, las de menor peso presentaron un comportamiento de aislamiento acústico menos eficiente, que la de mayor peso. Sin embargo, estos tipos de bloques con subproductos pueden disminuir los tiempos de reverberación, al ser un material más poroso que el tradicional.

4.3.11 Emisividad

En la Tabla 36 se muestran los resultados obtenidos de emisividad de los 3 tipos de bloques. Como se puede apreciar los 3 tipos de bloques presentaron los mismos valores de emisividad, debido principalmente a su similitud en el aspecto. En la Figura 90 se puede apreciar el acabado superficial de las muestras y su similitud. Cabe destacar que, cuanto más pequeño sea el valor de la emisividad, mejor aislante por reflexión será dicha superficie, siendo 1 el valor máximo. Por tanto, se puede afirmar que las muestras MS y MSML tendrán un aislamiento por reflexión semejante al de los bloques convencionales.

Tipo de bloque	Emisividad
MREF	0.95
MS	0.95
MSML	0.95

Tabla 36 Resultados de emisividad de los bloques.

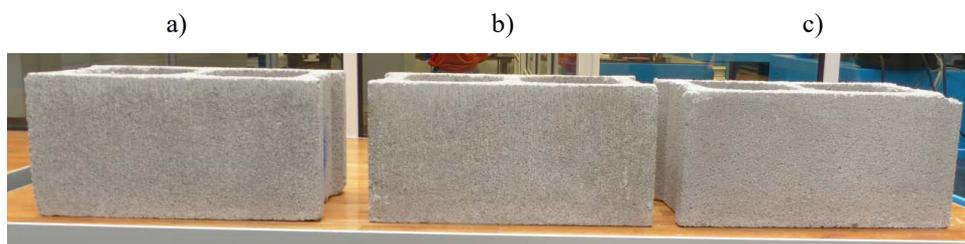


Figura 90 Aspecto de los 3 tipos de bloques: a) MSML, b) MS y c) MREF

4.3.12 Comportamiento térmico

Los valores obtenidos de las propiedades térmicas de los 3 muros construidos a partir de los 3 tipos de bloques se presentan en la Tabla 37. Las temperaturas de los muros, y la estabilización del flujo de calor en un periodo de tiempo de 24h, se muestran en las Figuras 91, 92 y 93.

El contenido de humedad para los 3 tipos de muros al finalizar el ensayo, se encontraba entre un rango de 2.5 y 3.0%, derivado de la humedad relativa presente en el ambiente, la cual para ese mes (Noviembre) del ensayo era mayor al 80%. Según la norma ACI 122R-14 los valores de las propiedades térmicas de los bloques de hormigón, deben considerar la influencia de la humedad, puesto que en la etapa de uso, los bloques no están en condiciones de secado al horno; por tanto, estos resultados son más representativos.

Designación		Muro MREF			Muro MS			Muro MSLM		
		Media	Min.	Max.	Media	Min.	Max.	Media	Min.	Max.
TA (zona de guardia):	°C	23.7	23.6	23.9	23.9	23.8	24.0	23.7	23.6	23.8
TA (zona caliente):	°C	22.8	22.1	22.2	22.5	22.5	22.6	22.3	22.2	22.3
TM (zona caliente):	°C	19.2	17.6	19.3	19.6	18.4	20.7	19.4	19.1	19.9
TA (zona fría):	°C	5.0	4.5	5.4	5.0	4.6	5.4	5.0	4.5	5.45
TM (zona fría):	°C	8.1	7.8	9.1	8.1	7.8	16.0	8.3	7.9	9.1
Flujo de calor a través del muro	W	26.1	25.0	32.7	23.3	19.3	24.9	24.2	20.8	26.1
Resistencia térmica:	m ² .K/W	0.27			0.32			0.30		
Conductividad térmica:	W/m.K	0.699			0.601			0.643		
Valor de U:	W/m ² .K	2.26			2.05			2.10		
Flujo térmico:	W/m ²	40.73			36.42			37.75		
Coefficiente de transferencia de calor convectivo (Cámara caliente):	W/m ² .K	13.53			12.50			13.14		
Coefficiente de transferencia de calor convectivo (Cámara fría):	W/m ² .K	13.21			11.74			11.51		

TA= temperatura del aire y TM= Temperatura del muro.

Tabla 37 Propiedades térmicas de los muros.

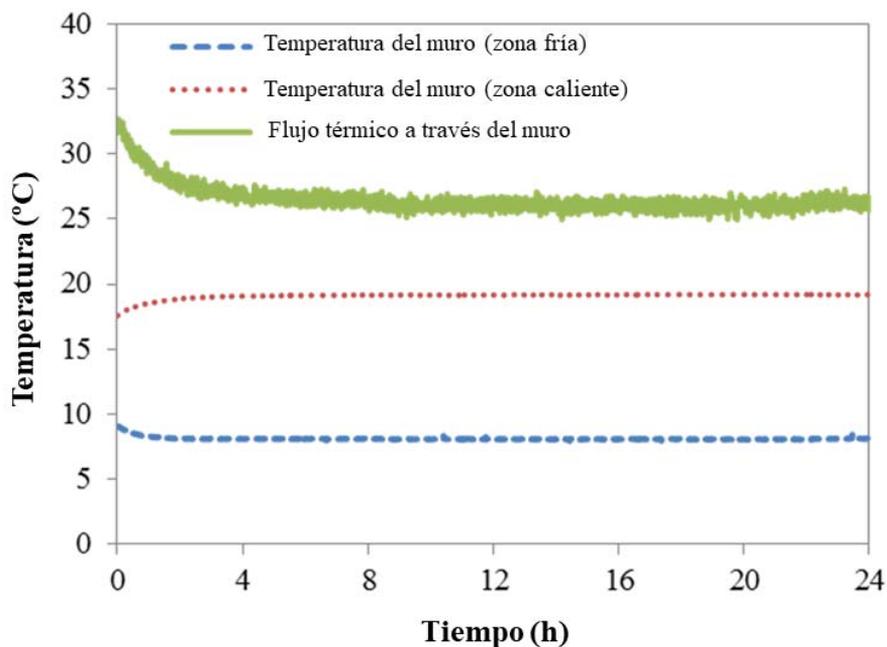


Figura 91 Medición del flujo de calor y de las temperaturas (zonas fría y caliente) del muro MREF.

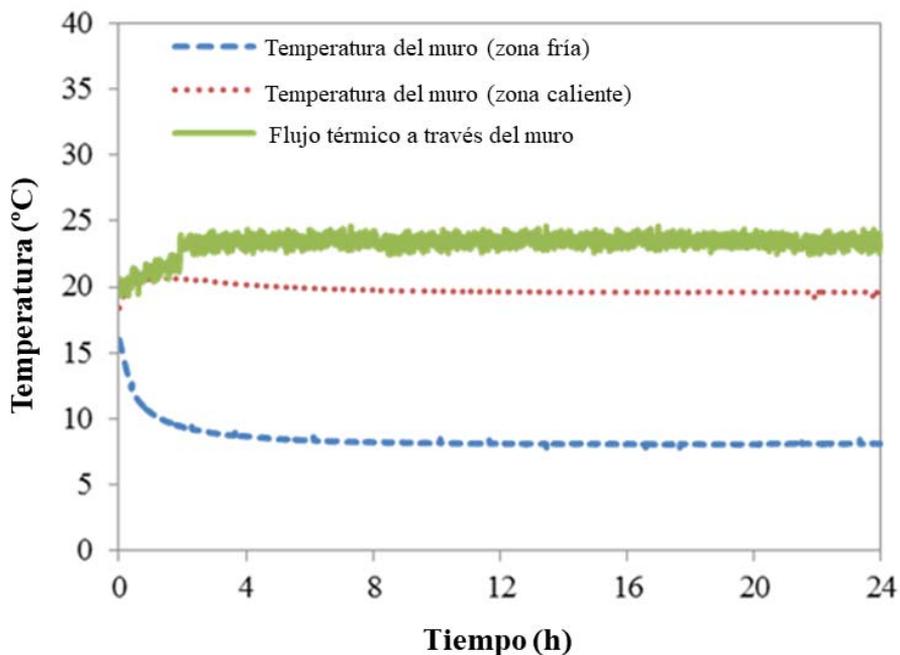


Figura 92 Medición del flujo de calor y de las temperaturas (zonas fría y caliente) del muro MS.

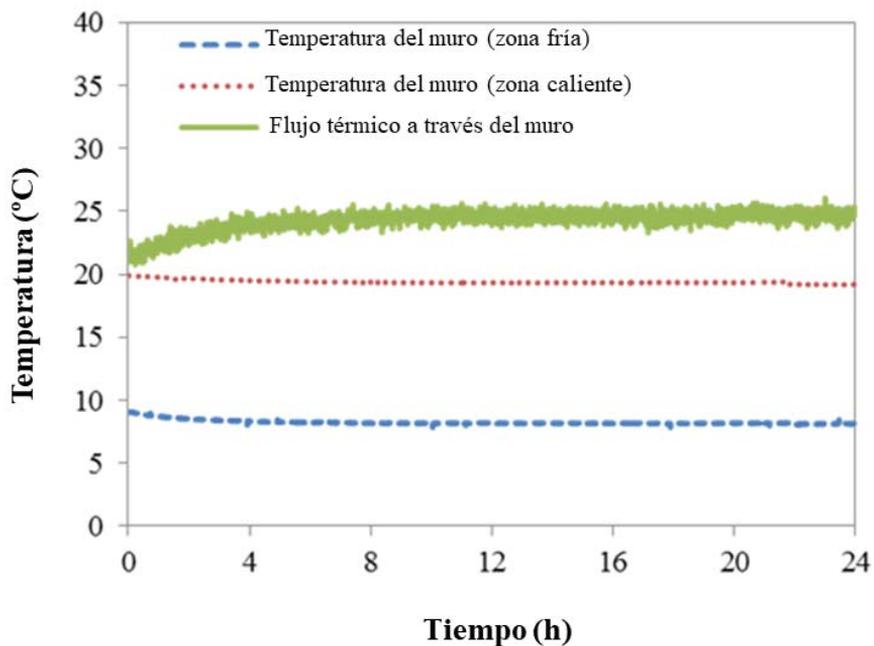


Figura 93 Medición del flujo de calor y de las temperaturas (zonas fría y caliente) del muro MSML.

Comparando los resultados de los 3 tipos de muros, se encontró que la incorporación de virutas al 5% mejoró los valores de resistencia térmica en un 18.5% en comparación con el muro de referencia, mientras que la combinación de 5% de virutas y 15% de lodos de cal mejoró valores en un 11.1%. Lo que a su vez condujo a una mejora en la conductividad térmica y el coeficiente de transferencia de los muros. Así mismo, se observó una disminución en la transferencia del flujo de calor de 10.6% en el muro MS y de 7.3% en el muro MSLM.

Esta optimización en las propiedades térmicas se debe a la adición de virutas, las cuales restringen el flujo térmico. Puesto que presenta una conductividad térmica menor que la conductividad térmica de la caliza. Otro factor a considerar es el aumento de poros, lo que lleva a un aumento en el aire ocluido. La conductividad térmica del aire es menor que la del hormigón [161]; en consecuencia, los poros llenos de aire, se oponen a la transferencia de calor a través de los bloques, lo que mejora la resistencia térmica del muro [166]. Por el contrario, las mejoras en las propiedades térmicas son menores para los muros construidos con las muestras MSML, debido a la mayor densidad, en comparación con las muestras MS.

El Comité ACI 122 [155] sugiere valores prácticos de diseño de conductividad térmica para bloques estructurales de hormigón con piedra caliza como componente principal, que van desde $0.95\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ para una densidad de hormigón de $1763\text{kg}/\text{m}^3$ a $1.44\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ para una densidad de $2083\text{kg}/\text{m}^3$. Estos valores de conductividad térmica son más altos que los obtenidos en esta investigación.

Aunque no se especifica ningún valor límite de resistencia térmica en las normas actuales, los bloques deben cumplir con los valores de la transmitancia térmica (valores de U) estipulado para fachadas. Tal y como se comentó en el apartado 2.8.5, los valores de U máximos permitidos para fachadas que impone el CTE, se encuentran dentro del rango de $0.94\text{-}0.57\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, dependiendo de la ubicación y su zona climática. Los resultados obtenidos de valores de U están en el rango de $2.26\text{-}2.05\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Por lo tanto, estos muros requerirán capas de aislamiento adicionales para satisfacer la normativa. Sin embargo, esta mejora en las propiedades térmicas podría conducir a posibles reducciones en el espesor del aislamiento, y de ese modo se aumentaría ligeramente el área útil de la edificación.

El valor de U de una fachada típica con bloques de una vivienda ubicada en la zona climática de Bilbao (C1), donde el CTE [132] impone un valor de U máximo de $0.730\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, se calculó variando la conductividad térmica de los muros de bloques y el espesor del aislamiento. Los componentes de la fachada desde el exterior hasta el interior consistieron en: estuco, bloques, aislamiento de lana de roca y paneles de yeso laminado. En la Tabla 38 se muestran los espesores de los materiales y sus conductividades térmicas, así como los resultados de los valores de U de 4 fachadas. Como se observa, se puede obtener una reducción del espesor del aislamiento de

aproximadamente 10mm y cumplir con el valor de U requerido por el CTE para dicha zona climática, empleando las muestras MS o MSLM.

Material	Caso 1 MREF		Caso 2 MS		Caso 3 MSLM		Caso 4 MREF	
	λ (W/m.K)	e (m)	λ (W/m.K)	e (m)	λ (W/m.K)	e (m)	λ (W/m.K)	e (m)
Estuco	0.570	0.010	0.570	0.015	0.570	0.015	0.570	0.015
Muro de bloques	0.699	0.190	0.601	0.190	0.640	0.190	0.699	0.190
Aislamiento de lana de roca	0.035	0.030	0.035	0.030	0.035	0.030	0.035	0.040
Panel cartón-yeso	0.400	0.015	0.400	0.015	0.400	0.015	0.400	0.015
Valor de U (W/m ² .K)	0.739 > 0.730		0.715 < 0.730		0.726 < 0.730		0.610 < 0.730	
	No cumple		Cumple		Cumple		Cumple	

Tabla 38 Valores de U de 4 tipos de fachadas, incluyendo los muros bajo estudio.

4.4 Conclusiones

En este capítulo, se analizó el efecto de incorporar virutas de madera, tanto de manera individual y en combinación con los lodos de cal, en las propiedades de los bloques. Para ello, se fabricaron 3 tipos de bloques, un tipo se fabricó sustituyendo parcialmente el 5% del árido fino por virutas; un segundo tipo, reemplazando un 5% del árido fino y un 15% del cemento por lodos de cal; y un tercer tipo, sin subproducto que sirvió de referencia. Con base en los resultados del estudio, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- No se notó ningún cambio importante en las dimensiones de las piezas, al incorporar las virutas y los lodos de cal en los bloques. Los 3 tipos de bloques se designaron como: “Serie A200”, con medidas modulares de 400mm x 200mm x 200mm y se clasificaron en la categoría de tolerancia D2.
- Los bloques con subproductos presentaron menor densidad y mayor absorción, en comparación con la muestra de referencia, siendo este efecto más notorio, cuando solo se reemplazó en la mezcla el árido fino por las virutas.
- La incorporación de virutas como reemplazo único o en conjunto con los lodos de cal en los bloques, conduce a un aumento de la absorción por capilaridad. No obstante, de acuerdo con los requisitos del Código Técnico de la Edificación (CTE) referente a la absorción por capilaridad, los 3 tipos de bloques pueden emplearse como bloque cara vista.
- La resistencia a compresión de los bloques con subproductos disminuyeron, a todas las edades ensayadas, en comparación con la muestra de referencia; siendo menor la bajada de resistencia para los bloques con incorporación de virutas y lodos de cal. Es evidente que, el uso de lodos de cal tiene un efecto positivo sobre la resistencia a compresión del hormigón. De acuerdo con el CTE, los 3 tipos de bloques pueden emplearse como piezas de fábricas sustentantes. Sin embargo, se necesitarían estudios

adicionales en caso de que se empleasen los bloques con virutas como reemplazo único.

- Los bloques de referencia presentan un mejor comportamiento acústico, en comparación con los bloques con subproductos, aunque las variaciones en los resultados demuestran que la diferencia no es significativa.
- Los 3 tipos de bloques presentan valores de emisividad equivalentes, por lo cual, aportarán un aislamiento por reflexión similar.
- Tanto los bloques con virutas como los bloques con la combinación de virutas y lodos de cal se comportan mejor térmicamente, en comparación con las de referencia, siendo más evidente la mejora, cuando sólo se incorporaron las virutas en la mezcla. La optimización de las propiedades térmicas podría conducir a una reducción en los gastos generados por el consumo de energía y a su vez, en parte del presupuesto total de la obra, ya que se podría conseguir un ahorro en el material de aislamiento de fachada, al disminuir su espesor.

Capítulo 5

Análisis térmico-numérico de los muros por FEM

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 manera, simulaciones en 2-D, mediante el FEM. Al final de este capítulo, se presentan una serie de conclusiones basadas en los resultados obtenidos.

5.2 Análisis térmico-numérico de los muros

El análisis numérico para la evaluación del comportamiento térmico de los prototipos se llevó a cabo utilizando el software comercial de elementos finitos ANSYS v. 16© [178]. El comportamiento térmico de los tres muros se realiza mediante una simulación 2-D, en estado estacionario. Según un estudio [179] el análisis en 2-D, empleando este software, reproduce resultados cercanos a los obtenidos en un análisis en 3-D. El método de cálculo utilizado es el proporcionado en la norma UNE-EN 1745 (en su anexo D) [109]. El modelo combina el entorno Workbench de ANSYS con pequeños códigos programados mediante APDL (*Ansys Parametric Design Language*).

Antes de realizar la simulación es necesario entender el proceso de transferencia de calor y flujo de fluidos dentro de una pared de bloques de hormigón hueco, ya que es un proceso complejo, puesto que ocurre combinando los tres fenómenos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación [180].

El proceso general de transferencia de calor desde el interior de una habitación al ambiente exterior se compone de: desde el lado interno hasta la superficie interna de la pared mediante convección y transferencia de calor por radiación, desde la superficie interna de la pared hasta la superficie exterior de la pared a través de la conducción de calor y de la superficie exterior de la pared al medio ambiente mediante convección y radiación [181]. Mientras que en las cavidades de los bloques la transferencia es a través de convección en el contorno y radiación a través del hueco.

5.2.1 Conductividad térmica de los tres tipos de hormigón

Entre de los datos de entrada necesarios para realizar la simulación están las conductividades térmicas de los tres tipos de hormigón que constituyen los bloques y la del mortero. Estos datos fueron determinados con el equipo Hot Disk, usando la metodología expuesta en el apartado 3.3.2.5. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 39.

Tipo de bloque	Conductividad térmica [W/(m.K)]	Difusividad térmica [mm ² /s]	Calor específico volumétrico [MJ/(m ³ .K)]
MREF	1.12	0.70	1.60
MS	0.83	0.50	1.66
MSLM	0.92	0.56	1.64
Mortero	0.70	0.35	2.00

Tabla 39 Conductividad térmica, difusividad térmica y calor específico de los materiales.

Estos resultados se obtuvieron a partir de muestras acondicionadas mediante secado al horno, mientras que los resultados del ensayo experimental se obtuvieron a partir de muros que no estaban en condiciones libres de humedad. Teniendo en cuenta que la

conductividad térmica de los materiales varía en función del contenido de humedad, estos valores se deben ajustar para que la comparación parta de la misma base. Además, la en la guía ACI 122R-14 [155] establece que se debe realizar una corrección de las conductividades térmicas de las muestras secadas al horno, para obtener un valor de diseño práctico, ya que en la etapa de uso normalmente el hormigón no se encuentra en estas condiciones. Por consiguiente, los valores de conductividad térmica de los materiales en estado seco, se multiplicaron por un factor corrector de humedad.

De acuerdo con dicha guía [155], se puede usar un factor corrector de humedad de 1.22, para corregir las conductividades térmicas de hormigones con piedra caliza. Mientras que para los casos de las mezclas con incorporación de virutas y lodos de cal, no se encontró un valor tabulado, por tanto, se asumió un factor de corrección ligeramente mayor, de 1.25, ya que al ser un hormigón más poroso, su contenido de humedad en el momento del ensayo era ligeramente mayor. Cabe destacar, que este valor es modesto en comparación con los sugeridos por dicha normativa para otros tipos de hormigones (con piedra pómez, perlita, vermiculita, cenizas volantes, escorias o cenizas de carbón), cuyo factor de corrección es de 1.30. En cuanto al mortero dicha norma establece un factor corrector de humedad de 1.20. Los valores de conductividad térmica corregidos se muestran en la Tabla 40.

Tipo de bloque	Conductividad térmica corregida [W/(m.K)]
MREF	1.37
MS	1.04
MSLM	1.15
Mortero	0.84

Tabla 40 Conductividad térmica de los materiales corregidos por efectos de humedad.

5.2.2 Definición de la geometría

Para definir la geometría del modelo de cálculo en 2-D, se partió de la geometría de una hilada del muro analizado en el ensayo experimental de la Caja Caliente Guardada, la cual estaba compuesta por tres piezas unidas por mortero, cuyo ancho de junta era de 10mm.

La Figura 94 muestra la geometría de una fila del muro, vista desde la parte superior e inferior, la cual fue dibujada a partir de las representaciones gráficas de los bloques, siguiendo la metodología descrita en el capítulo 4, apartado 4.2.1.5. Como se puede observar una hilada del muro tiene dos tipos de huecos no rectangulares, los huecos formados por la unión de dos bloques y los propios del bloque. Como ya se mencionó en el capítulo 3, la diferencia entre las áreas de los huecos de la parte superior e inferior, se debe a que los huecos de los bloques presentan una forma de pirámide truncada, lo cual facilita el desmoldeo de las piezas, en el proceso de fabricación.

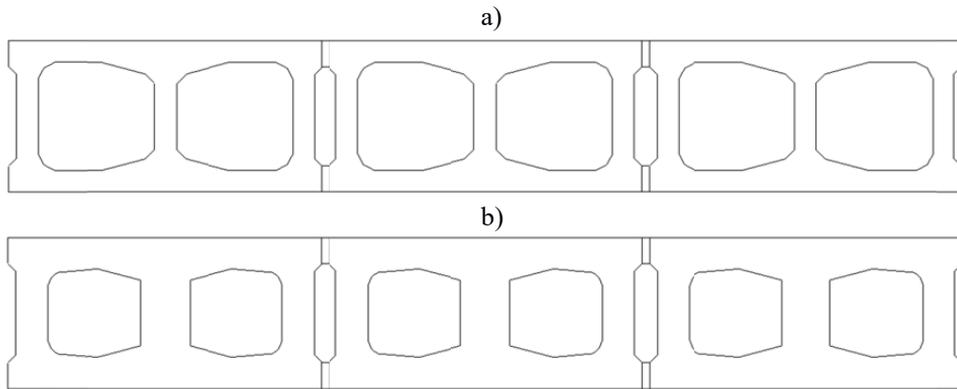


Figura 94 Geometría real de una fila del muro visto desde la parte: a) superior e b) inferior.

A fin de simplificar el modelo, se modificó la geometría real del muro, de tal forma que la nueva geometría fuese representativa a la real, es decir, que se conservaran los mismos volúmenes de hormigón y de los huecos de los bloques, con la diferencia de que en la nueva geometría todos los huecos fueran rectangulares, tal y como se muestra en la Figura 95.

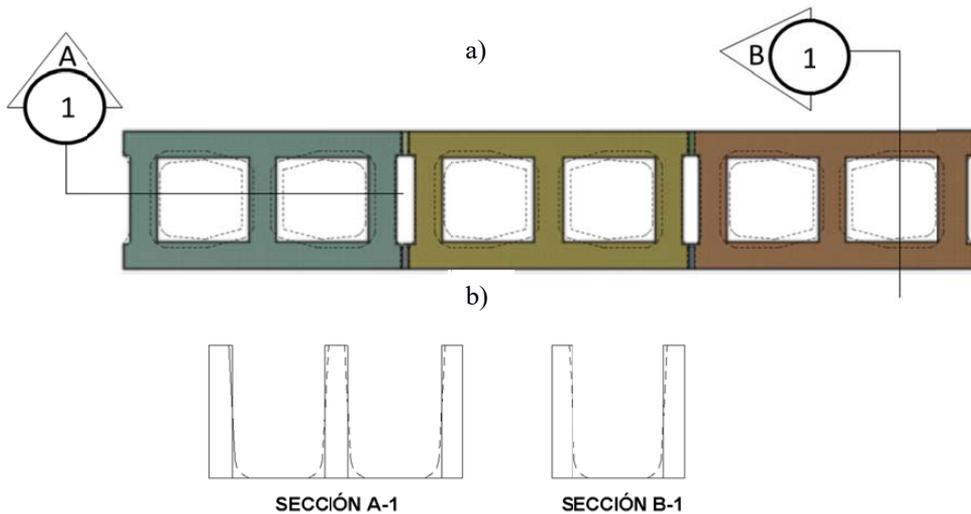


Figura 95 a) Vista en planta del muro y b) secciones del bloque, con la geometría real (líneas segmentadas) y la representativa (líneas continuas).

Para ello, se siguieron los siguientes criterios:

- Los huecos equivalentes serán rectángulos definidos por una longitud “b” (en este caso al tener dos tipos de huecos sería b’ y b”) perpendicular al flujo de calor (Q), y por un espesor “d” (d’ y d”) paralelo al flujo de calor, tal y como se muestra en la Figura 96.

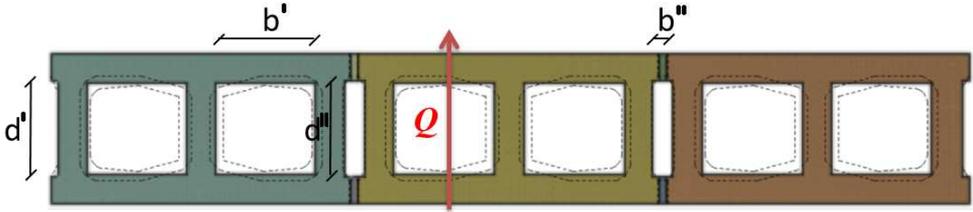


Figura 96 Longitud “b” perpendicular al flujo de calor, y por un espesor “d” paralelo al flujo de calor.

- La longitud del hueco equivalente “b” (b' y b'') es la longitud del hueco real, entendida como las distancia de los dos puntos más alejados entre sí del hueco, en la dirección perpendicular al flujo de calor.

Para el caso de los huecos de los bloques, debido a su forma real, se tiene una b' superior (b' sup) y una b' inferior (b' inf), por lo que para determinar la b' , se calculó la media entre ambas (véase la Figura 97). Mientras que para los huecos formados por la unión de los bloques, no fue necesario calcular la media de b'' , ya que su forma es constante en la altura del bloque (véase la Figura 98).

- Los espesor del hueco equivalente “d” (d' y d'') es la resultante del cociente del área del hueco real entre la longitud “b” (b' y b'') del hueco equivalente.

En el caso del área de los huecos de los bloques, se usó una media de los resultados obtenidos en el capítulo 4, en el apartado 4.3.5, ya que se encontró que la diferencia de las áreas de los tres tipos de bloques era mínima (menor a un 1%); mientras que, para los huecos formados por la unión de los bloques, se determinó el área empleando el procedimiento descrito en el apartado 4.2.1.5.

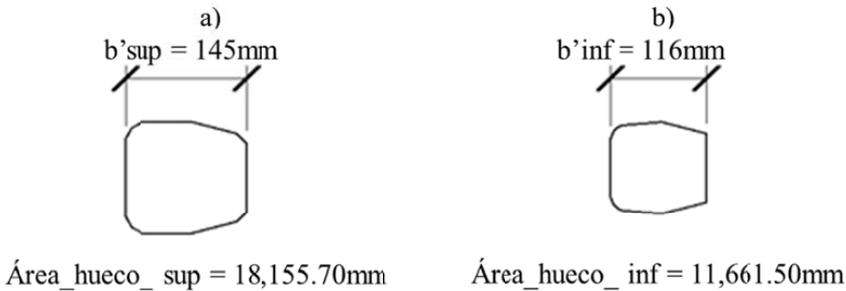
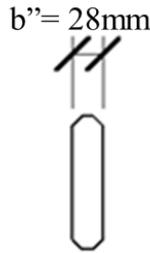


Figura 97 Áreas reales y b' del hueco de los bloques en la parte: a) superior y b) inferior.



$$\text{Área_huevo_2} = 11,661.50\text{mm}$$

Figura 98 Área real y b'' del hueco formado por la unión de los bloques.

Las dimensiones empleadas para representar gráficamente los huecos se muestran en la Tabla 41. La geometría empleada en el modelo numérico de cálculo se presenta en la Figura 99. Para este primer análisis todas las cavidades contendrán aire en su interior.

Dimensiones	Unidad	Hueco de los bloques	Hueco entre bloques
Área	mm ²	14908.60	3313.98
Largo (b)	mm	130.50	28.40
Ancho (d)	mm	118.36	114.24

Tabla 41 Dimensiones de los dos tipos de huecos.

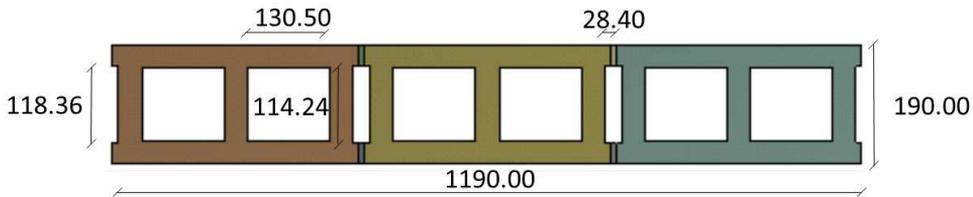


Figura 99 Geometría para el modelo de cálculo (mm).

5.2.3 Determinación del coeficiente de radiación en los huecos

Para simular el intercambio de calor dentro de las cavidades se desarrolló un algoritmo basado en un método estandarizado con el que se calcula el coeficiente de radiación de la cavidad, cuyo procedimiento de cálculo se establece en la norma UNE-EN ISO 6946 [109], concretamente en su anexo A; en éste se define la expresión aplicable en la determinación del coeficiente de radiación en huecos de aire sin ventilación con formas rectangulares caracterizadas por una longitud “b” (perpendicular al flujo de calor) y por un espesor “d” (paralelo al flujo de calor). El coeficiente de radiación (h_r) viene dado por la siguiente ecuación:

$$h_r = \frac{h_{r0}}{\frac{1}{E} - 1 + \frac{2}{1 - \frac{d}{b} + \sqrt{1 + \frac{d^2}{b^2}}}} \quad (5-1)$$

Dónde: h_{r0} es el coeficiente de radiación para una superficie o cuerpo negro. Viene dado por $h_{r0} = 4\sigma T_m^3$, dónde σ es la constante de Stefan-Boltzman, [5.67×10^{-8} ($W.m^2/K^4$)]; y T_m es la temperatura media termodinámica de la superficie y sus alrededores, que para todas las cavidades se tomará como $T_m = 283K$; b es la dimensión del hueco perpendicular al flujo de calor, (mm); d es la dimensión del hueco paralela al flujo de calor, (mm); y E es el factor de emisividad entre superficies que viene dado por:

$$E = \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_2}\right) - 1} \quad (5-2)$$

Dónde: ε_1 y ε_2 son las emisividades hemisféricas de las superficies de las caras de espacio confinados, las cuales fueron determinadas experimentalmente, siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo 3, apartado 4.2.1.10.

La emisividad, el factor de emisividad y los coeficientes de radiación de los dos tipos de huecos para los tres tipos de bloques se muestran en la Tabla 42.

Propiedad	Unidad	Hueco del bloque	Hueco entre dos bloques
Emisividad $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$	Adimensional	0.95	0.94
Factor de emisividad (E)	Adimensional	0.89	0.89
Coefficiente de radiación, cuerpo negro (h_{r0})	W/(m ² .K)	5.14	5.14
Coefficiente de radiación (h_r)	W/(m ² .K)	3.42	2.68

Tabla 42 Caracterización del hueco del bloque y del hueco entre dos bloques.

5.2.4 Condiciones de contorno

En base al proceso físico fundamental y a las condiciones iniciales del ensayo experimental, se consideraron para la simulación las siguientes condiciones de contorno:

- Un flujo térmico de $40W/m^2$ aplicado en el lado interior del muro, (véase la Figura 100).
- Un coeficiente de película externa de $25W/(m^2.K)$, que representa los 0.04 ($m^2.K$)/W de resistencia superficial externa que se utiliza en las caras externas de la envolvente (véase la Figura 100).

Ambos valores se corresponden con los establecidos en el Anexo A de la Norma UNE EN-ISO 6946 [109].

- Una temperatura ambiente exterior de $5^\circ C$, para simular la misma temperatura usada en el ensayo experimental.

- Las otras dos superficies se consideraron adiabáticas (véase la Figura 100), para simular el efecto del aislamiento alrededor del muro, en el ensayo experimental.

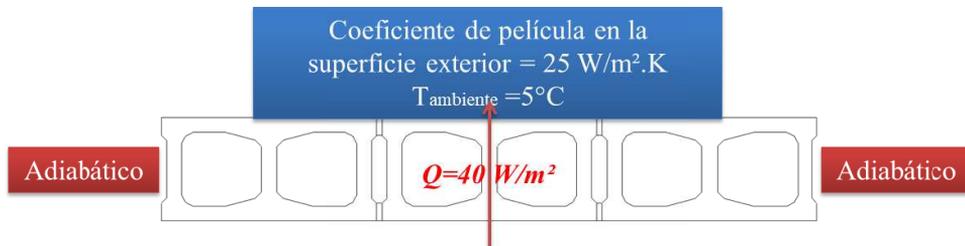


Figura 100 Condiciones de contorno.

5.2.5 Mallado del modelo

El modelo realiza un mallado uniforme de todo el muro, incluyendo las uniones. La malla del modelo está formada por 4886 nodos y 2119 elementos. La malla tiene un tamaño de celda promedio de 1mm. La apariencia de la malla se puede ver en la Figura 101. Según varios estudios [176,182] el mallado influye en un nivel mínimo en la precisión del cálculo térmico, debido a la gran influencia de los fenómenos de transporte de calor por radiación y convección en los huecos de los bloques.

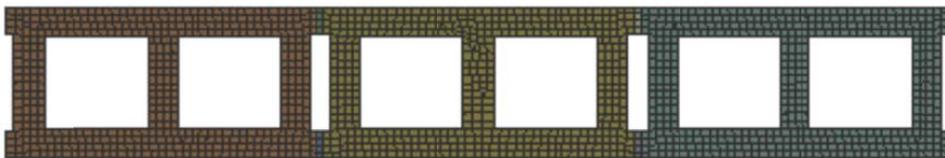


Figura 101 Aspecto global de la malla del modelo.

5.2.6 Definición y descripción de los elementos utilizados

A la hora de realizar un análisis mediante un programa basado en elementos finitos, es fundamental seleccionar el tipo de elemento y atributo más apropiado, lo cual dependerá de las especificaciones del problema. Los elementos que se emplearon fueron los siguientes: PLANE77, CONTA172, TARGE169 y SURF151, los tres primeros los crea el programa por defecto y el último se ha introducido mediante la programación Ansys Parametric Design Language (APDL). El elemento "PLANE77" se ha empleado para aquellos elementos que forman las zonas macizas del bloque. "CONTA172" y "TARGE169" son los elementos que definen el contacto entre bloques. Un contacto siempre se encuentra definido por un par de contactos, el elemento de contacto y el elemento objetivo. El elemento "SURF151" se ha utilizado para aquellos elementos que forman el contorno de los huecos. Las características de este último elemento se introdujeron mediante un comando que permite la caracterización de dichos elementos. Los elementos SURF 151 poseen un nodo central, extranodo, que actúa como núcleo y transfiere el calor a todos los elementos que lo rodean, en este caso el contorno del

huelco. Estos nodos se ubicaron en el centro de cada uno de los huecos y permitieron simular con fiabilidad la transferencia de calor a través del aire de los huecos. Mediante el comando que los define se identificaron las coordenadas de estos nodos (véase la Figura 102).

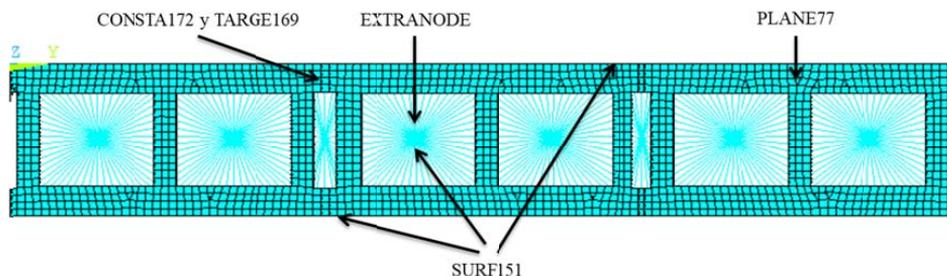


Figura 102 Representación de los elementos en el muro.

A continuación, se detallan las características que poseen los elementos:

- **Elemento tipo PLANE77:**

Se trata de una versión de orden superior del elemento térmico bidimensional de cuatro nodos (PLANE55), con un grado de libertad y temperatura en cada nodo. La convección o el flujo de calor (pero no ambos) y la radiación pueden aplicarse como cargas superficiales en las caras del elemento mostradas por un círculo en la Figura 103.

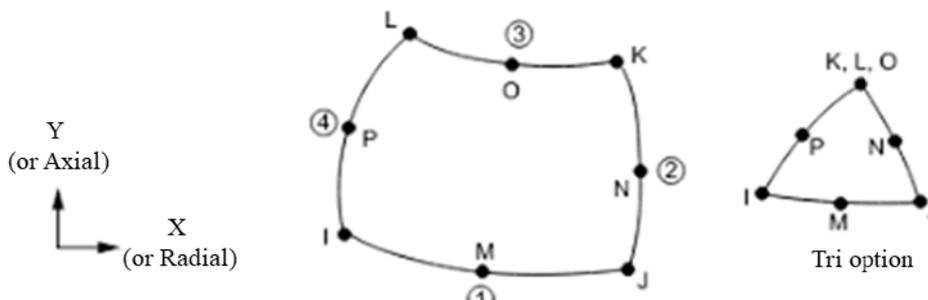


Figura 103 Elemento PLANE77 [183].

- **Elementos de contacto (CONTA172 y TARGE169):**

Se emplean para representar el contacto y el deslizamiento entre superficies bidimensionales (TARGE169) y una superficie deformable, definida por estos elementos. Así mismo, estos elementos se usan para representar varias superficies "segmento" 2-D, para los elementos de contacto asociados (CONTA171 y CONTA172). Los elementos del "par de contacto" CONTA172 y TARGE169 se muestran en la Figura 104 y 105, respectivamente.

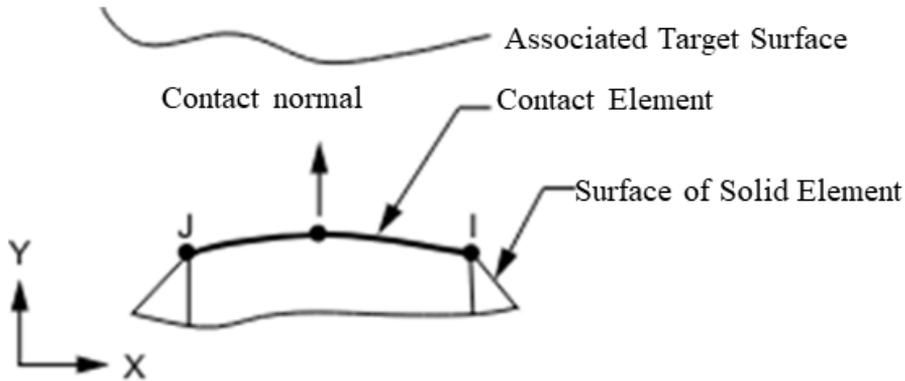


Figura 104 Elemento CONTACT172 [183].

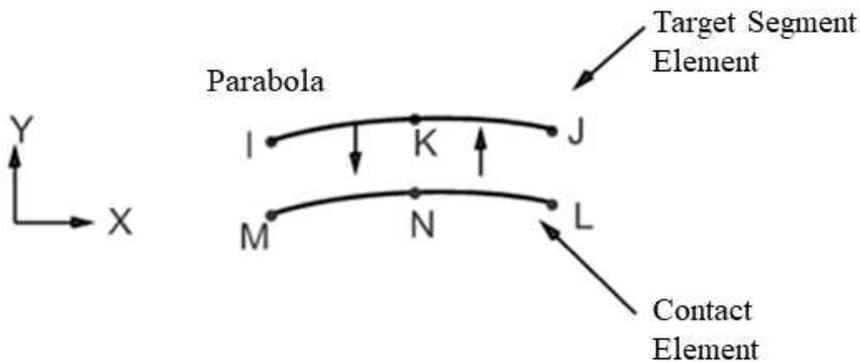


Figura 105 Elemento TARGET169 [183].

- **Elemento tipo SURF151**

Se emplea para modelizar el efecto de convección en las superficies exteriores del muro, y de convección y radiación conjunta en los huecos del muro, en los casos de análisis bidimensional. El elemento se define sobre el elemento PLANE77 descrito anteriormente. SURF151 posee de dos a cuatro nodos (depende de la configuración establecida por el usuario en la definición de las KEYOPTIONS del propio elemento) con un nodo adicional, que permite modelizar los fenómenos de transferencia de calor por convección y radiación. La definición del elemento se resume en la Tabla 43. El elemento SURF151 se muestra en la Figura 106.

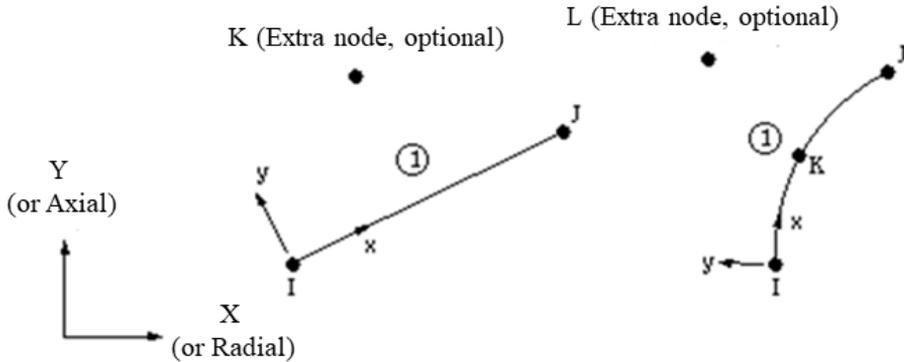


Figura 106 Elemento SURF151 [183].

Nodes	I, J if KEYOPT (4) = 1, and KEYOPT (5) = 0 I, J, K if KEYOPT (4) = 1, and KEYOPT(5) = 1 I, J, K if KEYOPT (4) = 0, and KEYOPT(5) = 0 I, J, K, L if KEYOPT (4) = 0, and KEYOPT(5) = 1
Degrees of Freedom	TEMP
Real Constants	FORMF, SBCONST, (Blank), OMEG, NRF, (Blank), TKI, TKJ, (Blank), (Blank), (Blank), TKPS
Material Properties	DENS (for density) EMIS (for emissivity, if KEYOPT(9) > 0)
Surface Loads	Convections: face 1 (I-J) if KEYOPT (8) >1 Heat Fluxes: face 1 (I-J) if KEYOPT (8) = 1
Body Loads	Heat Generation: HG (I), HG (J); also HG (K) if KEYOPT (4) = 0
Special Features	Birth and death
KEYOPT(3)	0 - Plane
KEYOPT(4)	1 - No midside node
KEYOPT(5)	1 - Has extra node (optional if KEYOPT (8) > 1; required if KEYOPT (9) > 0)
KEYOPT(6) (used only if KEYOPT(5)=1 and KEYOPT(8)>1)	1 - Adiabatic wall temperature used as bulk temperature
KEYOPT(8)	3 - Evaluate h_f at element surface temperature, TS
KEYOPT(9)	0 - Do not include radiation

Tabla 43 Resumen de la entrada del elemento SURF 151 [183].

5.2.7 Determinación de las propiedades térmicas

La determinación de la resistencia térmica (R), la conductividad térmica (λ) y la transmitancia térmica (*Valor de U*) de un muro, se calcularon con las siguientes ecuaciones:

$$R = A \cdot \Delta T / \varphi_p = A \cdot (T_o - T_n) / \varphi_p \quad (5-3)$$

Dónde: R es la resistencia térmica, [(m².K)/W]; A es la superficie de la pared a ensayar, (m²); ΔT es la diferencia de temperatura entre las caras opuestas del muro, (°C); φ_p es el flujo de calor a través del muro, (W); T_o es la temperatura de la cara del muro en el lado caliente, (°C); y, T_n es la temperatura de la cara del muro en el lado frío, (s).

$$\lambda = e/R \quad (5-4)$$

Dónde: λ representa la conductividad térmica, [(W.m)/K]; e es el espesor del muro (m); y, R es la resistencia térmica, [(m².K)/W].

$$\text{Valor de } U = 1/R_T = 1/(R_{si} + R + R_{so}) \quad (5-5)$$

Dónde: R_{si} y R_{so} son las resistencias de la superficie interior y exterior, respectivamente, (m².K/W); R es la resistencia térmica de cada capa, [(m².K)/W]; y, R_T es la resistencia térmica total, [(m².K)/W]. En el caso del flujo de calor horizontal, la norma EN-ISO 6946 [109] establece en su apartado 5.2 que $R_{si} = 0.13(\text{m}^2.\text{K})/\text{W}$ y $R_{so} = 0.04(\text{m}^2.\text{K})/\text{W}$.

5.2.8 Resultados del análisis numérico

La Tabla 44 muestra las temperaturas mínimas máximas y medias de los muros obtenidas en la simulación con las condiciones impuestas. La Figura 107 permite identificar los puentes térmicos de los muros de bloques, los cuales se encuentran en mayor medida en la zona donde se unen dos bloques y en los tabiques transversales del bloque, en donde se crea una variación de la resistencia térmica y por tanto se rompe la superficie aislante de las cavidades. Mientras que, en las zonas más cercanas al punto medio de las cavidades, del lado interior del muro, se observa que hay mayor aislamiento ya que disminuye la transmisión de energía calorífica, encontrándose los colores de mayor temperatura de cada caso.

Designación		Muro MREF			Muro MS			Muro MSLM		
		Media	Min.	Max.	Media	Min.	Max.	Media	Min.	Max.
TM (zona caliente)	°C	18.1	17.4	18.8	20.3	19.5	21.1	19.5	18.7	20.3
TM (zona fría)	°C	6.7	6.3	7.0	6.7	6.3	7.0	6.7	6.3	7.0

Tabla 44 Temperaturas obtenidas en el análisis térmico-numérico.

La Tabla 45 presenta un resumen de las temperaturas obtenidas en los ensayos a escala real. Al comparar las medias de dichas temperaturas con las obtenidas en el análisis numérico (véase la Tabla 44), se puede apreciar que la diferencia entre las mediciones y

los cálculos es pequeña para todos los casos estudiados, obteniendo una diferencia máxima de 1.6°C, en las temperaturas frías mínimas de los muros MSML.

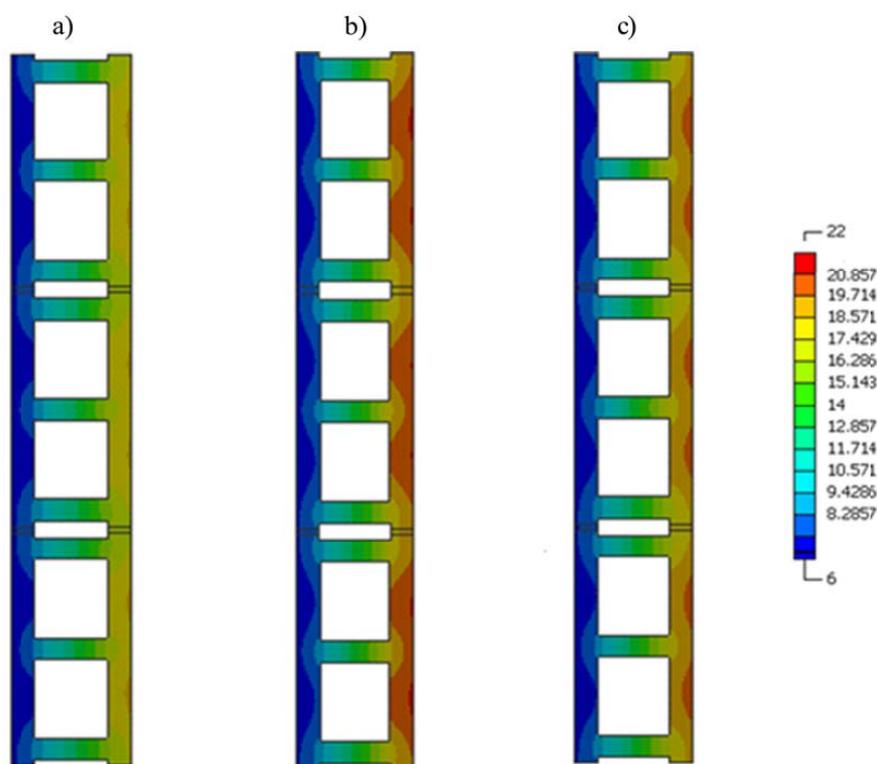


Figura 107 Distribución de las temperaturas mínimas y máximas para los muros: a) MREF, b) MS y c) MSML.

Designación	Muro MREF			Muro MS			Muro MSML		
	Media	Min.	Max.	Media	Min.	Max.	Media	Min.	Max.
TM (zona caliente) °C	19.2	17.6	19.3	19.6	18.4	20.7	19.4	19.1	19.9
TM (zona fría) °C	8.1	7.8	9.1	8.1	7.8	9.1	8.3	7.9	9.1

TM= Temperatura del muro.

Tabla 45 Temperaturas obtenidas con el ensayo experimental.

Los resultados de resistencia térmica, conductividad térmica y valor de U de los muros, obtenidos por el FEM (calculados a partir de los resultados de la Tabla 44), así como los obtenidos con la Caja caliente Guardada, se muestran en la Tabla 46. Comparándolos, se encontró que los muros se comportaron de manera similar al ensayo experimental, el muro MS con el menor valor de U, el muro MSML con un comportamiento intermedio y el muro MREF con el mayor valor de U. Esto era de esperar, ya que la conductividad térmica de las muestras MS era menor que la de los demás tipos y la de las muestras MREF era la mayor.

Tipo de muro	R (m ² .K/W)		λ (m.K/W)		Valor de U (W/m ² .K)	
	Simulación	Caja Caliente	Simulación	Caja Caliente	Simulación	Caja Caliente
MREF	0.29	0.27	0.664	0.699	2.19	2.26
MS	0.34	0.32	0.557	0.601	1.96	2.05
MSLM	0.32	0.30	0.591	0.643	2.04	2.10

Tabla 46 Resistencia térmica, conductividad térmica y valor de U de los muros, obtenidos a partir de las simulaciones y el ensayo experimental (Caja caliente guardada).

Asimismo, se puede observar que los valores de U obtenidos en el análisis numérico fueron ligeramente menores que los resultados medidos experimentalmente, con una diferencia pequeña de entre el 2.9 y el 4.4%.

Basados en estos resultados, se puede afirmar que el modelo de elementos finitos reproduce, con bastante precisión, el mecanismo de transferencia de calor de los muros. Otras investigaciones también obtuvieron porcentajes de diferencia aproximados al obtenido en este estudio. En sus investigaciones, Principi y Fioretti [175] obtuvieron que la diferencia era menor al 7%, Zukosky y Haese [176] encontraron una diferencia de 2.5%, del Coz et al. [179] obtuvieron una diferencia de 2.6% y Ghazi y Tanner [177] encontraron una diferencia de hasta 5%.

Para una mayor exactitud se recomienda realizar un análisis en 3-D y considerar el mortero horizontal entre las hiladas, así como también el exceso de mortero que se encuentra en las cavidades de los bloques [177], ya que esto genera mayores puentes térmicos y reduce ligeramente el volumen de las cavidades; lo que daría como resultado un muro con menor resistencia térmica, puesto que el mortero aportaría menor resistencia térmica al muro, que el aire en las cavidades. Sin embargo, estimar el volumen de mortero en exceso puede llegar a ser muy complejo puesto que es un error aleatorio, ya que al ser una técnica manual, dependerá de la fuerza que se aplique al golpear los bloques y al peso del bloque, siendo en este caso distinto para los 3 bloques analizados.

Otros aspectos que pudieron haber influido levemente en la diferencia de los resultados fueron: los factores de corrección de humedad de los bloques empleados, y el cálculo simplificado con el que se determinó el coeficiente radiación de los huecos del muro [175,179]; especialmente en este caso bajo estudio, en el que los huecos del bloque constituyen una porción importante del volumen total del bloque. Adicionalmente, pudo haber influido la aproximación geométrica que se realizó en los huecos, ya que en la realidad, los huecos tienen una geometría de pirámide troncada y en la simulación numérica se considera que el espesor del bloque era constante. Esto es una aproximación, que aunque no supone una desviación de los resultados elevada, posiblemente sumó a los otros aspectos anteriormente mencionados.

5.3 Análisis térmico-numérico de los muros con bloques rellenos de aislamiento

En vista de que en el anterior análisis se demostró que el método numérico permite estimar el comportamiento térmico de los muros de una manera suficientemente aproximada, en ésta sección se realiza un segundo análisis, en el cual se estudia otra vía alternativa de actuación para la mejora del comportamiento térmico de los bloques, que consistió en la incorporación de aislamiento en los huecos de los bloques.

Esta técnica ya fue estudiada por algunos autores [175,184,185] y se encontró una mejora importante en el comportamiento de los bloques. Aunque presenta un coste añadido, tiene como ventaja la mayor facilidad de ejecución de los cerramientos, ya que en algunos casos no es necesario añadir la capa de aislante. Esto a su vez, supone un ahorro de espesor en los muros, y de tiempo de ejecución de la obra.

En base a esto, se realizó del mismo modo, un análisis numérico para estudiar la respuesta térmica de los tres muros con bloques cuyos huecos estaban rellenos en su interior con material aislante. En este caso, no se consideró la convección y radiación en los huecos y toda la transferencia de calor ocurrió por conducción entre los diferentes materiales. Se evaluó el comportamiento térmico, que presentaron estos bloques con un aislamiento interno añadido y se comparó con los resultados obtenidos con el método numérico en la sección anterior.

Para el análisis se consideró un aislamiento de tipo celulosa reciclada, cuya conductividad térmica es de $0.034\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Este tipo de aislamiento presenta muy buenas prestaciones y se ofrece en el mercado de dos maneras como panel o insuflado en obra. Aunque actualmente existen aislamiento con propiedades térmicas mejores que la celulosa, los cuales podrían optimizar en mayor medida las prestaciones térmicas del elemento, se decidió realizar el análisis con la conductividad térmica de este material, ya que es un material sostenible, con un coste asequible y de fácil aplicación en este caso, frente a las espumas que tienen un carácter expansivo.

5.3.1 Mallado del modelo

Para este segundo análisis, el mallado del modelo estuvo formado por 8270 nodos y 4239 elementos. Esta malla también tuvo un tamaño de celda promedio de 1mm. La apariencia de la malla se puede ver en la Figura 108.

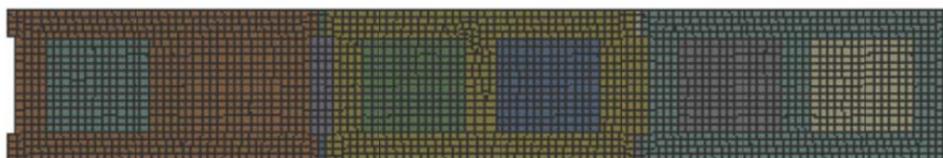


Figura 108 Aspecto global de la malla del modelo.

5.3.2 Definición de los elementos utilizados

Los elementos que se emplearon para este caso fueron los siguientes: PLANE77, CONTA172 y TARGE169. El elemento "PLANE77" se empleó para aquellos elementos que forman las zonas macizas del muro (bloque y aislamiento). Mientras que los elementos "CONTA172" y "TARGE169" se emplearon para definir el contacto entre los diferentes materiales (véase la Figura 109).

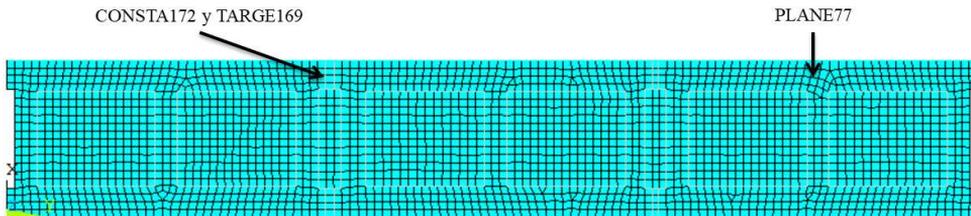


Figura 109 Representación de los elementos en el muro.

5.3.3 Resultados de las simulaciones considerando la incorporación de aislamiento en las cavidades

La Tabla 47 y la Figura 110 muestran las temperaturas obtenidas en la simulación, con las condiciones impuestas. Tal y como ocurrió en el análisis anterior, los puentes térmicos de los muros de bloques con aislamiento, se encontraron en la zona donde se unen dos bloques y en los tabiques transversales del bloque.

Designación		Muro MREF			Muro MS			Muro MSLM		
		Media	Min.	Max.	Media	Min.	Max.	Media	Min.	Max.
TM (zona caliente)	°C	22.7	21.4	24.0	27.3	25.7	28.9	25.5	24.0	27.0
TM (zona fría)	°C	6.7	6.1	7.3	6.7	6.1	7.3	6.7	6.1	7.3

TM= Temperatura del muro.

Tabla 47 Temperaturas obtenidas con el análisis térmico-numérico, para los muros de bloques rellenos con aislamiento.

Los resultados de resistencia térmica, conductividad térmica y valor de U de los muros se muestran en la Tabla 48. Como se puede observar, la incorporación de aislamiento en los muros con MREF mejoró los valores de U en un 20.4% en comparación con el muro MREF sin aislamiento, mientras que los muros MS y MSLM con aislamiento mejoraron los valores en un 25.5y 23.5%, respectivamente, en comparación con los muros MS y MSML sin aislamiento, respectivamente. Por otro lado, si se comparan los valores de U de los muros MS y MSML con aislamiento, con respecto al muro MREF sin aislamiento, la optimización fue mucho más notoria, siendo esta del 33.3 y 28.8%, respectivamente. Cabe enfatizar que, de dichos porcentajes de mejora, casi una tercera parte corresponde al diseño de los nuevos bloques con subproductos.

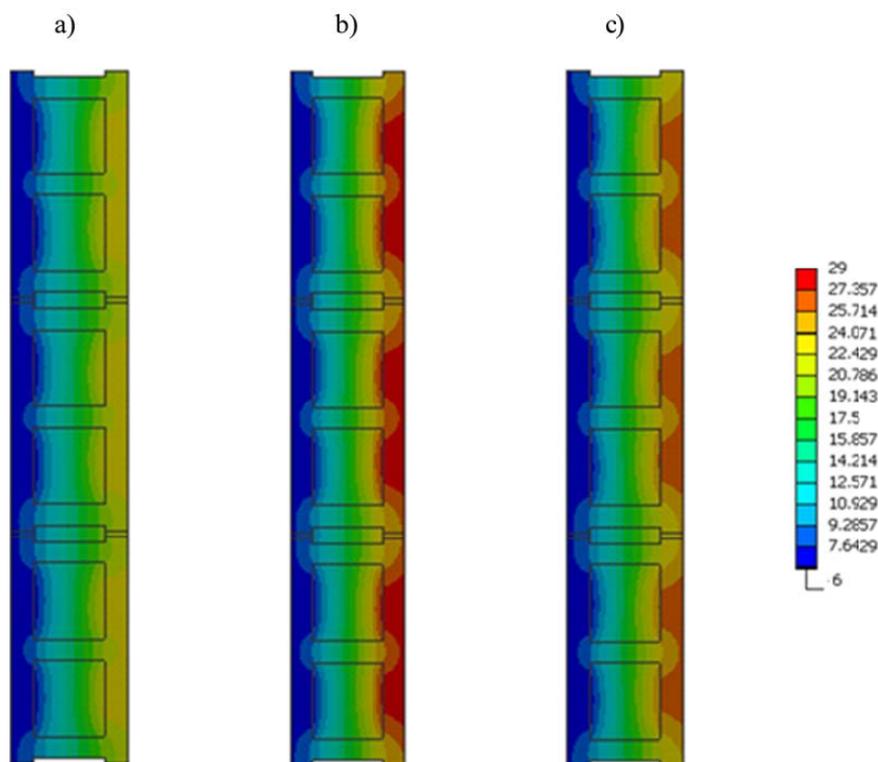


Figura 110 Distribución de las temperaturas para los muros con aislamiento: a) MREF, b) MS y c) MSLM.

Tipo de muro	R (m ² .K/W)		λ (m.K/W)		Valor de U (W/m ² .K)	
	Con aislamiento	Sin aislamiento	Con aislamiento	Sin aislamiento	Con aislamiento	Sin aislamiento
MREF	0.40	0.29	0.475	0.664	1.75	2.19
MS	0.52	0.34	0.369	0.557	1.46	1.96
MSLM	0.47	0.32	0.404	0.591	1.56	2.04

Tabla 48 Resistencia térmica, conductividad térmica y valor de U de los muros con y sin aislamiento, obtenidos a partir de las simulaciones.

Cabe destacar que, aunque los muros de bloques con aislamiento por el interior presentan valores de U menores, que los muros de bloques sin aislamiento, también superan los valores máximos permitidos por el CTE [132]; con lo cual, estos muros de bloques con aislamiento, también requerirán la colocación de una capa de aislamiento térmico como parte de los componentes de la fachada. Así pues, se mantendría el coste en mano de obra para la colocación del aislamiento, a lo que habría que añadir el incremento del coste del bloque con aislamiento. En contraste, con esta técnica se podría aumentar la superficie útil de una vivienda, al reducir los espesores del aislamiento térmico y en consecuencia el de la fachada, con lo cual se debe realizar un

análisis previo, a fin de determinar si conviene o no emplear estos bloques rellenos con aislamiento.

5.4 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos en este capítulo, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El análisis térmico-numérico en 2-D, mediante el FEM, permite obtener resultados del comportamiento térmico de los muros, muy aproximados a los obtenidos en un ensayo experimental; acercándose por debajo, a los valores de U obtenidos en el ensayo, con diferencias de entre un 2.9 y 4.4%.
- El uso de aislamiento de relleno en las cavidades de los bloques, como vía alternativa para optimizar el comportamiento térmico de los bloques, ofrece una mejora en comparación con los bloques sin aislamiento. Sin embargo, esta técnica puede resultar más costosa que si se emplease el bloque convencional, con lo cual se deben realizar estudios previos para determinar su viabilidad económica. Se puede afirmar entonces que, la vía de actuación más económica para optimizar las propiedades térmicas de los bloques, viene dada por incorporar en la mezcla, subproductos con baja conductividad térmica y de bajo coste o sin coste alguno.
- Entre las ventajas de usar el método de elementos finitos para evaluar el comportamiento térmico de los bloques de hormigón está la reducción de tiempo y esfuerzo que conlleva la fabricación de los muros. Por lo que, puede ser aprovechado especialmente en la etapa de diseño de un nuevo tipo de bloque de hormigón. El poder de la predicción permite a los diseñadores operar de manera más segura y eficiente, lo que a su vez, permite obtener beneficios económicos, ya que se evita el gasto innecesario en material. Sin embargo, esta técnica requiere de una buena comprensión de la naturaleza de los procesos y de la metodología del programa, para predecir cuantitativamente el comportamiento térmico de los elementos de una manera eficaz.

Capítulo 6
Sostenibilidad

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:

- Ciclo de vida: se describe el ciclo de vida del producto que se analiza.
- Producción: se introduce la estructura jerárquica del producto y se especifican los materiales y los procesos de producción de cada pieza (parte), a partir de un amplio grupo de materiales y procesos disponibles.
- Uso: se especifica la demanda de electricidad, transporte y material en la fase de uso.
- Fin de vida: permite especificar cuál es el destino final del producto, o las distintas piezas o materiales, tras finalizar su vida útil.

El software Eco-it emplea el sistema de puntos ecoindicador basado en el método de evaluación de impacto ReCiPe y el CO₂-equivalente del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés, *Intergovernmental Panel on Climate Change*), para evaluar el impacto ambiental del proceso o ciclo de vida de un producto. La unidad empleada para expresar los ecoindicadores son los milipuntos (mPt), siendo un punto la representación de la centésima parte de la carga ambiental anual de un ciudadano medio europeo; mientras que para expresar el CO₂-equivalente se emplea el CO₂-eq.

La metodología ReCiPe [196] fue creada por RIVM, CML, PRé Consultants, Radboud Universiteit, Nijmegen y CE Delft. Se desarrolló para combinar las ventajas de los métodos CML2001 y Eco-Indicator99. La ventaja del método CML es su solidez científica, mientras que la ventaja del Eco-indicator99 es su facilidad de interpretación. Se trata de una metodología internacionalmente aceptada que integra el enfoque orientado al problema ambiental y al daño. Actualmente, esta metodología está considerada como la sucesora de las metodologías anteriores.

Esta metodología traduce las emisiones y extracciones de recursos, en un número limitado de puntuaciones de impacto ambiental, por medio de los llamados factores de caracterización, los cuales representan la contribución relativa de un recurso a una categoría de impacto. Existen dos formas principales para obtener los factores de caracterización, a nivel de punto medio y a nivel de punto final. ReCiPe calcula 18 indicadores de punto medio y 3 indicadores de punto final.

Los indicadores punto medio se centran en problemas ambientales únicos, siendo estos: el cambio climático, la disminución de la capa de ozono, la toxicidad humana, la formación de oxidantes fotoquímicos, la formación de materia particulada, la radiación ionizante, la acidificación terrestre, la eutrofización de agua dulce, la eutrofización marina, la ecotoxicidad terrestre, la ecotoxicidad de agua dulce, la ecotoxicidad marina, la ocupación de terreno agrícola, la ocupación de terreno urbano, la transformación de

terreno natural, la disminución de cantidad de agua dulce, la disminución de recursos minerales y la disminución de combustibles fósiles.

Los indicadores de punto final muestran el impacto ambiental en tres niveles de adición más altos, siendo estos, el efecto sobre la salud humana, la biodiversidad y la escasez de recursos. La conversión de puntos medios a puntos finales simplifica la interpretación de los resultados de Evaluación del Inventario del Ciclo de Vida (LCIA, por sus siglas en inglés, *Life Cycle Inventory Assessment*). Sin embargo, con cada paso de adición, aumenta la incertidumbre en los resultados. La Figura 111 muestra las relaciones entre el parámetro del Inventario del Ciclo de Vida (LCI, por sus siglas en inglés, *Life Cycle Inventory*), en el lado izquierdo, el indicador de punto medio, que está en el centro, y el indicador de punto final a la derecha.

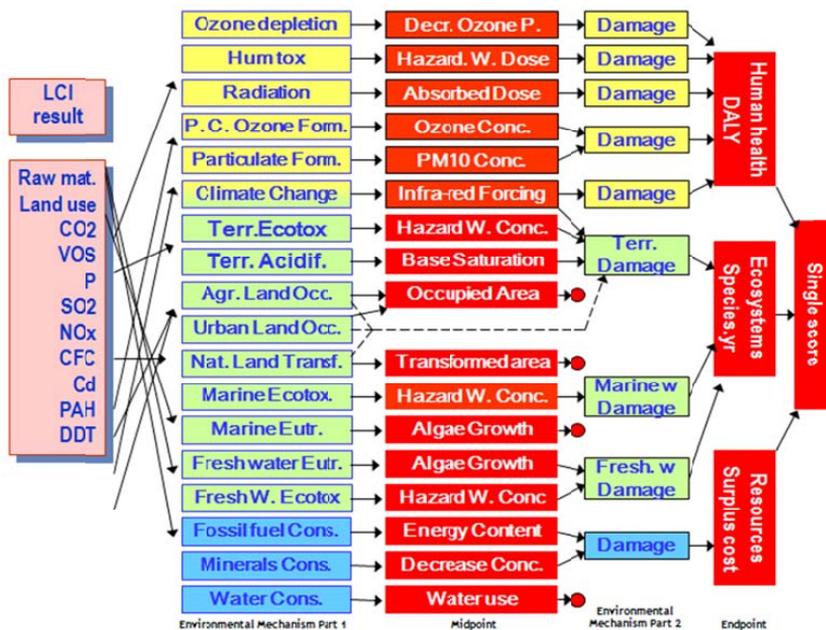


Figura 111 Descripción general de la estructura de ReCiPe [196].

Por otra parte, la metodología IPCC [197], cuya definición comenzó en 1988, fue establecida por dos organizaciones de las Naciones Unidas, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), y posteriormente, fue ratificada por la Asamblea General de las Naciones Unidas mediante la Resolución 43/53. Esta metodología recoge los factores de caracterización para el potencial del calentamiento global directo debido a emisiones al aire.

Comparación de las bases de datos

Para facilitar la realización de un LCA, existen bases de datos con información de diversos productos y procesos, que fueron investigados y recopilados por diversos institutos e investigadores a fin de agilizar y simplificar los LCA. A continuación se compara y analiza el impacto ambiental de los componentes del hormigón, según la literatura encontrada y diferentes bases de datos de programas informáticos encontrados, incluyendo las del programa Eco-it.

• Cemento Portland

El impacto ambiental del cemento Portland se muestran en la Tabla 49. Como se puede observar, la cantidad de datos aportados por las diferentes bases de datos varía dependiendo de las categorías analizadas en cada LCA, siendo la categoría Potencial del Calentamiento Global (GWP, por sus siglas en inglés, *Global Warming Potential*) una de las más estudiadas debido a su relevancia. También se puede apreciar en dicha Tabla que, el impacto ambiental para el mismo producto o proceso difiere de una base de datos a otra. Estas variaciones se pueden atribuir a los diferentes límites asumidos, diferentes suposiciones que se hayan considerado en el inventario y diferentes procesos productivos, por ejemplo los tipos de fuentes de energía y de suministro empleados, tipos de transporte, distancias supuestas, etc. [198]. Para este caso en concreto, el del cemento, también influye la selección del combustible para los hornos, los sistemas de control de contaminación atmosférica [57,59] y la incorporación de adiciones al cemento. Esto último tiene una gran influencia, ya que como puede observarse en la Tabla 49, existe una diferencia importante entre las emisiones de CO₂-eq de los cementos Portland tipo I y tipo II.

Producto	CED		AD kgSb-eq	GWP kgCO ₂ -eq	ODP kgR11-eq	AP kgSO ₂ -eq	NP kgPO ₄ -eq	POCP kgC ₂ H ₄ -eq	Fuente
	Non-Ren.	Ren.							
	MJ	MJ							
I 32.5R	5.65	8.74E-02	-	9.51E-01	1.64E-08	5.31E-04	3.30E-05	2.20E-06	[199]
I 45R	5.75	9.40E-02	-	9.56E-01	1.75E-08	5.60E-04	3.44E-05	2.31E-05	[199]
I 52.5R	5.80	9.71E-02	-	9.76E-01	1.79E-08	5.74E-04	3.50E-05	2.36E-05	[199]
I 52.5R	-	-	-	8.33E-01	-	-	-	-	[195]
II 42.5R*	-	-	-	7.62E-01	-	-	-	-	[195]

* Dato empleado para este estudio.

Tabla 49 Impacto ambiental expresado por kg de cemento Portland producido.

• Caliza

La Tabla 50 muestra el impacto ambiental de la caliza, de acuerdo con algunas investigaciones y bases de datos. En este caso, la dispersión de los datos se debe a que en algunos inventarios se haya incluido o no los explosivos usados en las canteras y el consumo de agua empleado en el proceso [200].

Producto	CED		AD	GWP	ODP	AP	NP	POCP	Fuente
	Non-Ren.	Ren.							
	MJ	MJ							
C	-	-	4.04E-09	2.39E-03	3.76E-10	3.61E-05	8.96E-06	-	[201]
AC	4.64E-03	1.14E-01	-	6.11E-03	3.19E-09	5.31E-05	6.05E-06	6.10E-06	[199]
PC	3.50E-01	2.10E-02	-	1.72E-02	5.72E-09	1.24E-04	9.22E-06	8.71E-06	[199]
C*	-	-	-	1.90E-02	-	-	-	-	[195]

C = Caliza, AC = Arena caliza y PC = Polvo de caliza.

* Dato empleado para este estudio.

Tabla 50 Impacto ambiental expresado por kg de caliza producida.

- **Agua**

La Tabla 51 muestra el impacto ambiental del agua. Como se puede observar los valores de GWP por kg de agua son iguales para ambas bases de datos.

Producto	CED		AD	GWP	ODP	AP	NP	POCP	Fuente
	Non-Ren.	Ren.							
	MJ	MJ							
Agua	-	-	9.92E-10	3.00E-04	3.23E-11	1.54E-06	8.00E-07	-	[201]
Agua*	-	-	-	3.00E-04	-	-	-	-	[195]

* Dato empleado para este estudio.

Tabla 51 Impacto ambiental expresado por kg de agua producida.

- **Aditivos**

En la Tabla 52 se muestra el impacto ambiental de los plastificantes, superplastificantes y reductores de agua. Como se puede observar, los superplastificantes tienen mayor impacto que los plastificantes y que los aditivos reductores de agua. Estas variaciones se deben principalmente a las diferencias en los componentes y concentraciones empleados en su fabricación; aunque, tal y como se ha mencionado anteriormente, los valores también pueden variar dependiendo de los datos considerados en el inventario.

Producto	CED		ADff	GWP	ODP	AP	NP	POCP	Fuente
	Non-Ren.	Ren.							
	MJ	MJ							
P	14.3	1.7	-	7.39E-01	-	9.04E-03	4.55E-04	9.91E-04	[199]
SP	27.95	1.2	-	9.44E-01	3.29E-08	1.19E-02	5.97E-03	5.85E-04	[202]
RA	-	-	-	2.20E-03	-	-	-	-	[203]

SP = Superplastificante, P = Plastificante y RA=Reductor de agua.

Nota: Debido a las bajas concentraciones de aditivo empleadas para la producción de los bloques, sus emisiones no se consideraron como dato de entrada para este estudio.

Tabla 52 Impacto ambiental expresado por kg de plastificante producido.

6.2.1 Definición del objetivo y alcance

El objetivo de LCA es comparar el impacto ambiental general de los bloques convencionales y los bloques con incorporación de subproductos.

El alcance general de este estudio es de "cradle-to-site", incluye las 3 primeras etapas de la fase de fabricación descritas en la Figura 112. La primera etapa, comprende la extracción y el transporte de recursos, la producción de materias primas y el transporte de recursos refinados; la segunda etapa engloba la fabricación del producto, y la tercera incluye el empaquetado y transporte de la fábrica a la obra. En este estudio, se excluyen la fase de uso y fin de vida, ya que se asume que los 3 tipos de bloques bajo estudio tienen el mismo uso y final de vida.

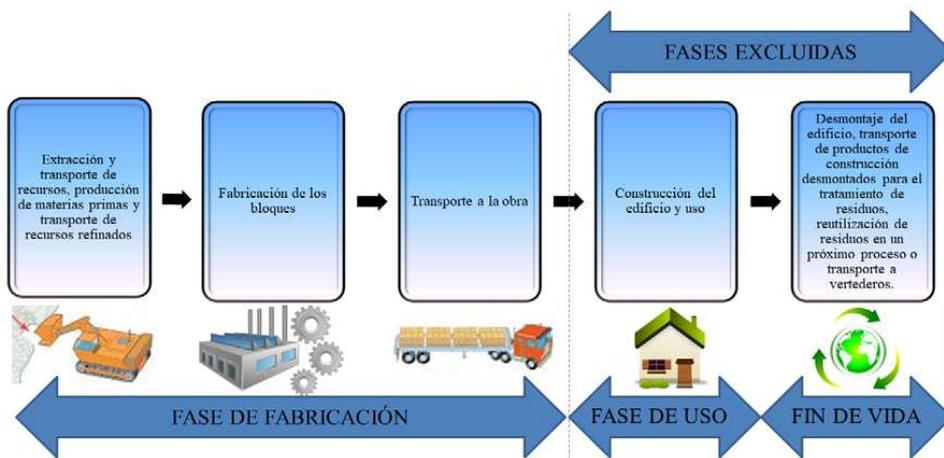


Figura 112 Límite del sistema: de la cuna al sitio.

Para garantizar que todas las entradas y salidas del LCA de los bloques estén relacionadas, el análisis se realizó sobre la base de una unidad de referencia con respecto a la cuantificación de los resultados ambientales. La unidad funcional de un bloque, se usó para la comparación de los tres sistemas de producción.

6.2.2 Desarrollo del inventario de ciclo de vida

Esta sección proporciona información sobre los datos correspondientes a las entradas y salidas de todos los procesos involucrados dentro del sistema elegido "cradle-to-site", y las suposiciones que se consideraron para este estudio.

Los resultados de LCI comparan los estudios seleccionados en términos de consumos ambientales (materiales, agua y consumo de energía) y productos (impacto ambiental y emisiones) cuantificados dentro del límite del sistema LCA. Un diagrama con las entradas, límite operacional y salidas del LCA se muestra en la Figura 113.

($\leq 180\text{kg/m}^3$) y por tanto bajos contenidos de plastificante ($\leq 1.8\text{kg/m}^3$), la contribución de este último al impacto ambiental total del hormigón será mucho menor.

Cabe destacar que, en los estudios del LCA, algunas suposiciones lógicas son consistentemente necesarias debido a la dificultad de modelar un producto estrictamente, siguiendo el proceso real paso a paso [205]. Algunas sugerencias dadas por las directrices comunes de LCA [206] son excluir del análisis los componentes que se encuentren por debajo de un porcentaje límite (p. ej. menor de 1% del peso del producto) y en caso de que no se encuentre el material o proceso en las bases de datos, se puede emplear uno con características similares. El estándar UNE-EN ISO 14040 [109] además permite que se omitan datos del inventario tales como: la información espacial y temporal, que se necesitaría para la evaluación específica del sitio. Aunque estos problemas afectan la precisión del análisis, el tamaño y la complejidad de las tareas de recopilación y manipulación de datos, conllevan un gran esfuerzo, tiempo y coste adicional, haciendo que el estudio no sea viable, por lo que muchas veces los profesionales tienen que abordar estas limitaciones en sus estudios [207].

Por otro lado, se supuso que las virutas y los lodos de cal tienen un impacto nulo, ya que son subproductos industriales y no contienen ningún tipo de sustancias peligrosas para las personas o el medio ambiente. Esta suposición también se ha establecido en otros estudios similares [187,189].

6.2.2.2 Mezclado de las materias primas y fabricación de los bloques

La electricidad consumida en la fabricación de los bloques se estimó sumando la energía requerida durante todo el proceso de fabricación y dividiéndolo de forma proporcional entre el número de bloques fabricados, con el fin de simplificar el análisis y los cálculos. Para esto, se consideró el consumo de amasadoras, skip, cintas pesadoras, sinfines transportadores, robot manipulador y robot enfardador. Siendo el total de la electricidad consumida de aproximadamente 0.556kW.h por bloque fabricado. Esta información fue proporcionada por la empresa de prefabricados.

Una vez fabricadas los bloques, estos se secan en condiciones ambientales. Por lo tanto, se supuso que la energía solar cubría la demanda de energía del proceso de acondicionamiento de los bloques. Todos los siguientes procesos, tales como la limpieza de los moldes, se realizan manualmente y en seco, empleando cepillos, por lo que su impacto ambiental es tan reducido que se ha despreciado.

6.2.2.3 Transporte de las materias primas y los subproductos

En este estudio, se consideraron los impactos ambientales generados al transportar los componentes convencionales de los bloques y los subproductos, desde el sitio de producción de los mismos hasta la empresa de prefabricados Alberdi. Así mismo, se consideró el impacto del transporte de los bloques al sitio de construcción. Por otra parte, el impacto ambiental generado al transportar los lodos de cal al vertedero se

consideró como impacto evitado. Esta consideración también puede ser respaldada por las declaraciones de Turk et al. [187] y Hossain et al. [189]. Por el contrario, el transporte de las virutas no se consideró como impacto evitado, ya que no se llevan a vertederos. Este subproducto, como ya ha comentado anteriormente, se almacena en el mismo lugar donde se produce hasta su reutilización.

La distancia recorrida al transportar los bloques a la obra, se calculó sobre la base de la distancia media de recorrido de los bloques desde la Empresa de prefabricados Alberdi hasta los clientes habituales. Por lo tanto, el estudio supone que la distancia del transporte de los bloques es de media unos 100Km alrededor de la ubicación de la planta. Adicionalmente, se asumió que el tipo de combustible empleado para el transporte era Diésel. De acuerdo con algunas investigaciones [59], la inclusión de los impactos del transporte es un paso esencial en los cálculos del LCI, ya que ocurre en las fases principales del ciclo de vida y la carga ambiental asociada puede ser considerable.

Los lugares de salida, tipo de transporte y las distancias que recorren los materiales estudiados, desde los puntos de salida hasta la empresa de Prefabricados Alberdi, se presentan en la Tabla 53. De igual forma, los lugares de salida, el tipo de transporte utilizado y la distancia que habitualmente recorren los lodos de cal al vertedero se muestra en la Tabla 54. Las distancias se midieron sobre mapa.

Material	Lugar de salida	Tipo de transporte	Distancia (Km)
CEM	Valderribas, Arraibi alkatea, 48330 Lemona, Bizkaia.	Camión 16-32T	13.2
AG	Hijos de León Amantegui, Lugar Barrio Aldebarrena, 0 S/N, 48212 Mañaria, Bilbao, Bizkaia.	Camión 16-32T	5.9
AF	Hijos de León Amantegui, Lugar Barrio Aldebarrena, 0 S/N, 48212 Mañaria, Bilbao, Bizkaia.	Camión 16-32T	5.9
S	Barrio Arriandi, s/n, 48215 Yurreta, Bizkaia.	Camión 16-32T	2
LM	Barrio Arriandi, s/n, 48215 Yurreta, Bizkaia.	Camión 16-32T	2
Palets	Ebaki, Barrio de Ugarte, 48392 Ugarte, Bizkaia.	Camión 3.5-7.5T	19.7
Film	Calle B, Parcela 1-A (Polígono Industrial, Las Casas, 42005 Soria.	Camión <3.5T	219

CEM = Cemento; AF = Árido fino; AG = Árido Grueso; LM = Lodos de cal y S = Virutas.

Tabla 53 Distancias recorridas por los materiales hasta la empresa de prefabricados.

Material	Lugar de salida	Tipo de transporte	Distancia (Km)
LM	Barrio Arriandi, s/n, 48215 Yurreta, Bizkaia.	Camión 16-32T	14.9

LM = Lodos de cal.

Tabla 54 Distancias recorrida por los lodos de cal hasta el vertedero.

6.2.2.4 Embalaje

Para calcular cuánto embalaje se emplea para un bloque, se partió de la base de que los bloques se transportan en palets de madera de tipo europalet (dimensiones de 800mm x 1200mm) y se envuelven en un film de poliuretano. Cada palet pesa 27kg y está diseñado para soportar una carga dinámica máxima de 1000kg. Se determinó el número máximo de bloques que pueden almacenarse (ya que los bloques en estudio varían en peso) y la cantidad de palet y de film necesaria para almacenar 1 bloque.

Los materiales, el transporte, el embalaje y la energía necesarios para 1 bloque MREF, MS y MSLM se muestran en la Tabla 55.

Ecoindicador	Tipo de bloque		
	MREF	MS	MSLM
Cemento Portland II (kg)	1.0000000	1.0000000	0.8500000
Transporte del Portland cemento II (T.Km)	0.0132000	0.0132000	0.0112200
Caliza (kg)	13.3333333	12.8055556	12.8055556
Transporte de la caliza (T.Km)	0.0786667	0.0755528	0.0755528
Agua (kg)	0.4000000	0.4000000	0.4000000
Palets (kg)	0.3698630	0.3417720	0.3552630
Transporte del palet (T.Km)	0.0072863	0.0067329	0.0069987
Film de poliuretano (kg)	0.0033383	0.0030847	0.0032064
Transporte del film de poliuretano (T.Km)	0.0007310	0.0006756	0.0007022
Electricidad, España (kW.h)	0.5555556	0.5555556	0.5555556
Transporte del bloque (T.Km)	1.3600000	1.2700000	1.3100000
Virutas (kg)	-	0.1110000	0.1110000
Transporte de las virutas (T.Km)	-	0.0002220	0.0002220
Lodos de cal (kg)	-	-	0.0408333
Transporte de los lodos de cal (T.Km)	-	-	0.0000817
Transporte de los lodos a vertedero (T.Km)	-	-	-0.0006084

Tabla 55 Datos de entrada para el LCA.

6.2.3 Evaluación del impacto del ciclo de vida

El índice de impacto ambiental y las emisiones de CO₂ asociadas a la producción y puesta en obra de un bloque de MREF, MS y MSML se presentan en la Tabla 56. De los resultados, se puede apreciar que el bloque MREF es el que mayor índice de impacto ambiental presenta, seguido por el bloque MS, mientras que el que posee menor índice de impacto ambiental es el bloque MSLM.

De acuerdo con los resultados del LCA, se generan 1.61kg de emisiones de CO₂-eq al producir y transportar a obra un bloque MREF; de los cuales, alrededor del 47.34% están asociadas con el cemento Portland, un 20.50% con la electricidad utilizada en el proceso de fabricación, 15.78% con la caliza, 15.49% con el transporte, 0.88% con el embalaje y 0.01% con el agua.

Según la base de datos Eco-it, un kilogramo de bloque convencional es equivalente a 0.122kgCO₂-eq y 8.4mPt. Si se comparan estos valores, con los resultados obtenidos para un kilogramo del bloque MREF (1.61kgCO₂-eq/13.6kg= 0.118kgCO₂-eq y 148mPt/13.6kg= 10.9mPt), se puede apreciar que los resultados obtenidos son cercanos a los valores de la base de datos del software empleado.

Ecoindicador	Tipo de bloque					
	MREF		MS		MSLM	
	kg CO ₂ -eq	mPt	kg CO ₂ -eq	mPt	kg CO ₂ -eq	mPt
Cemento Portland II	0.76200	45.00000	0.76200	45.00000	0.64700	38.00000
Transporte del cemento	0.00220	0.22000	0.00220	0.22000	0.00190	0.19000
Caliza	0.25400	47.00000	0.24400	45.00000	0.24400	45.00000
Transporte de la caliza	0.01300	1.30000	0.01300	1.30000	0.01300	1.30000
Agua	0.00013	0.01200	0.00013	0.01200	0.00013	0.01200
Electricidad, España	0.33000	30.00000	0.33000	30.00000	0.33000	30.00000
Palets	0.00510	0.55000	0.00470	0.50000	0.00470	0.50000
Transporte del palet	0.00480	0.47000	0.00440	0.43000	0.00440	0.43000
Film	0.00900	1.10000	0.00830	1.10000	0.00860	1.10000
Transporte del film	0.00140	0.14000	0.00130	0.13000	0.00140	0.13000
Transporte del bloque	0.22800	23.00000	0.21300	21.00000	0.22000	22.00000
Virutas			0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Transporte de las virutas			0.00004	0.00370	0.00004	0.00370
Lodos de cal					0.00000	0.00000
Transporte de los lodos de cal					0.00001	0.00140
Transporte de los lodos de cal al vertedero					-0.00009	-0.01000
Total=	1.61	148	1.58	144	1.47	138

Tabla 56 Índice de impacto ambiental y kg de emisiones de CO₂ para un bloque MREF, MS y MSLM.

En referencia a las emisiones de CO₂-eq relacionadas con la producción de un bloque MS se puede observar que un bloque de MS genera 1.58kg de emisiones de CO₂-eq; de los cuales, 48.13% de las emisiones totales de CO₂-eq están asociadas con el cemento Portland, 20.85% con la electricidad empleada en el proceso de fabricación, 15.41% con la caliza, 14.78% con el transporte, 0.82% con el embalaje y 0.01% con el agua. Así pues, se puede decir que el reemplazo en volumen del 5% de caliza por virutas, es decir 530g de caliza por bloque producido, puede minimizar la extracción de caliza, reduciendo las emisiones de CO₂-eq asociadas a la fabricación y puesta en obra en un 1.9%.

Con respecto al bloque MSLM, se puede apreciar que la producción y puesta en obra de éste genera 1.47kg de CO₂-eq, de los cuales, 43.86% de las emisiones totales están asociadas con el cemento Portland, un 22.37% con la electricidad, 16.54% con la caliza, 16.31% con el transporte, 0.90% con el embalaje y 0.01% con el agua. En este caso,

como en el caso anterior, la sustitución parcial de la arena caliza por virutas contribuyó a la reducción del CO₂-eq. Sin embargo, es la sustitución del 15% de cemento por los lodos de cal, que se traducen en un ahorro de 150g de cemento por bloque producido, lo que contribuye en mayor medida a dicha reducción. Con esta adición, no solo se evitan las emisiones de CO₂ relacionadas con el vertido, sino que también, se reducen las asociadas con la producción del cemento. Se puede afirmar por tanto, que un bloque de MSML puede ofrecer una importante reducción en los kg de CO₂-eq, siendo esta de 8.7%.

Adicionalmente, si consideramos que en promedio, una empresa de prefabricados puede producir 6,000 bloques en un día laboral de 8h, y que por tanto, en 247 días laborales que tiene un año, se fabrican un total de 1,482,000 unidades, se puede decir que la reducción anual del impacto ambiental anual, por la producción de bloques MS y MSML, de una empresa de prefabricados puede llegar a ser significativa (véase la Figura 114), de aproximadamente 44,460kg de CO₂-eq para el caso de los bloques MS y de 207,480kg de CO₂-eq para el caso de los bloques MSML.

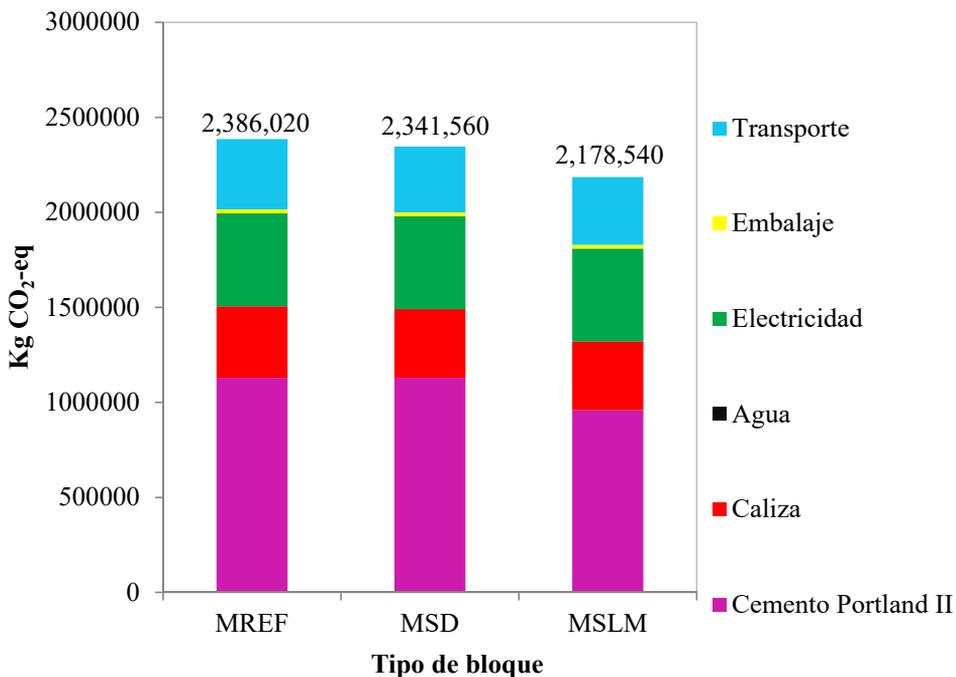


Figura 114 Kg de emisiones de CO₂ anuales de una empresa de prefabricados por la producción de bloques MREF, MS y MSML.

6.3 Beneficios económicos

Los beneficios económicos asociados a la producción de bloques con subproductos se estudiaron mediante un análisis de coste. Los precios de los materiales, fueron

calculados a partir de la media de los diferentes precios proporcionados por los distintos proveedores del sector del hormigón, a nivel nacional, y las cantidades de producción diaria fueron proporcionadas por la empresa de prefabricados Alberdi. La Tabla 57 muestra el precio unitario de los componentes necesarios para la fabricación de los bloques y la Tabla 58 presenta las cantidades de materiales necesarios para elaborar 1m³ de hormigón y el coste de dichos materiales, para los 3 tipos de bloque.

Material	Precio (€)	Unidad	Volumen (m ³)	Precio unitario por 1m ³ (€)
CEM	95.00	Ton	0.328	289.75
AG	11.00	Ton	0.370	29.70
AF	12.00	Ton	0.369	32.52
SP	0.95	kg	0.001	995.60
A	1.23	m ³	1.000	1.23
S	35.00	Ton	1.754	19.95
LM*	0.00	Ton	1.000	0.00

CEM = Cemento, AG = Árido grueso, AF = Árido fino, SP = Superplastificante, A = Agua, S = Virutas y LM = Lodos de cal.

*Los lodos de cal no tienen coste (0.00€/Ton), ya que de lo contrario se llevarían a un vertedero.

Tabla 57 Precio unitario de los materiales empleados para la fabricación de los bloques.

Material	MREF			MS			MSLM			
	VR (m ³)	PU para 1m ³	Cantidad	VR (m ³)	PU para 1m ³	Cantidad	VR (m ³)	PU para 1m ³	Cantidad	
CEM	0.059	289.75	17.10	0.059	289.75	17.58	0.050	289.75	14.54	
AG	0.185	29.70	5.50	0.185	29.70	6.11	0.185	29.70	5.50	
AF	0.701	32.52	22.80	0.666	32.52	23.20	0.666	32.52	21.66	
SP	0.002	995.60	1.71	0.002	995.60	1.76	0.002	995.60	1.71	
A	0.072	1.23	0.09	0.072	1.23	0.09	0.072	1.23	0.09	
S	-	-	-	0.035	17.85	0.67	0.035	19.95	0.70	
LM	-	-	-	-	-	-	0.009	0.00	0.00	
Coste de los materiales para 1m ³ :			47.20				46.76			

CEM = Cemento, AG = Árido grueso, AF = Árido fino, SP = Superplastificante, A = Agua, S = Virutas, LM = Lodos de cal, VR = Volumen requerido y PU = Precio unitario.

Tabla 58 Coste de los materiales para fabricar 1m³ de mezcla de MREF, MS y MSLM.

En base a estos resultados, se puede afirmar que se lograría un ahorro por metro cúbico de hormigón de 0.44€ si se fabricasen los bloques MS, lo que se traduce en un ahorro porcentual de aproximadamente 1%. En cuanto a los bloques MSLM, los ahorros por metro cúbico de hormigón serían de 3.01€, lo cual es un ahorro porcentual del 6.4%. En este último caso, el ahorro económico es mayor, debido a la sustitución del cemento, el

cual es el componente más costoso de la mezcla. Aunque estos porcentajes son bajos, el ahorro anual podría ser significativo si se fabricase uno de estos 2 tipos de bloques.

Como ya se comentó anteriormente, aproximadamente 1,482,000 bloques se fabrican anualmente en una planta de Prefabricados, para ello, se requieren unos 8,233m³ de hormigón. Por lo tanto, la compra de los materiales para la fabricación de los bloques convencionales le costaría a una fábrica 388.613€, mientras que para la fabricación de los bloques MS y MSLM esa cantidad de m³ costaría 384,991 y 363,831€, respectivamente. Por lo tanto, una empresa de prefabricados de bloques podría lograr una reducción en el coste de los materiales de aproximadamente 3,600 o 24,700€ por año mediante la producción de bloques con virutas o con la combinación de ambos subproductos, respectivamente.

Asimismo, países europeos, tales como Suecia, Finlandia, Alemania e Italia, con una importante producción de madera y papel, y en consecuencia, con grandes cantidades de virutas y lodos de cal, tendrán beneficios económicos similares, dada la similitud en el coste de los materiales de construcción. Por el contrario, otros países fuera de Europa, como Estados Unidos, China, Japón y Rusia; los cuales, también generan cantidades significativas de dichos subproductos, obtendrían menores beneficios económicos, ya que el coste del cemento y de los áridos es menor; mientras que países como Canadá y Brasil, tendrían mayores beneficios económicos ya que, contrariamente a los otros casos, el coste del cemento es mayor.

Otro aspecto económico a considerar es el ahorro asociado a la eliminación de los lodos de cal en los vertederos [208]. En España, el coste del vertedero es de alrededor de 105,60€ por tonelada. En el caso de los bloques MSLM, se usaría anualmente un total de 60.52 toneladas de lodos de cal. Por lo tanto, el ahorro sería de al menos 6,300€ por año. Cabe destacar que, los mayores beneficios económicos se derivarían de la fabricación de MSLM, ya que aunque las virutas son un subproducto, tienen salida comercial.

Por otra parte, se obtendría un ahorro adicional en el coste de los materiales de construcción para soportar la carga muerta de la estructura, al reducir el tamaño de las vigas, columnas y cimientos; asimismo, se podría reducir ligeramente el presupuesto total de la obra al reducir el espesor del aislamiento térmico en la fachada del edificio.

Por el contrario, se obtendrían gastos adicionales relacionados con el almacenamiento de los subproductos en la planta de prefabricados de bloques, p. ej. se necesitarían dos silos para el almacenamiento de los subproductos, con lo cual, habría que gastar aproximadamente 40,000€ en la compra e instalación de estos. Así pues, el período de recuperación de la inversión para la empresa de prefabricados sería de aproximadamente 2 años.

6.4 Conclusiones

En este capítulo se ha comparado el impacto ambiental de los bloques con y sin subproductos, a través de un Análisis de Ciclo de Vida (LCA) de "cradle-to-site". Las siguientes conclusiones han sido extraídas de la investigación:

- Se encontró que el mayor impacto ambiental se produce en la fabricación de los bloques de referencia, debido al mayor consumo de recursos. Por el contrario, la mayor reducción en el impacto ambiental ocurrió cuando las virutas y los lodos de cal se incorporaron en los bloques como sustitutos de la caliza y el cemento Portland, siendo esta reducción de 8.7% para las emisiones de CO₂-eq y de 6.3% para el índice de impacto ambiental. El mismo comportamiento se observó cuando solo se incorporaba virutas en los bloques, aunque la reducción fue menor, de 1.9% para las emisiones de CO₂-eq y de 2.7% para el índice de impacto ambiental, debido a que no hubo una sustitución parcial del cemento, que es el componente de los bloques que mayor impacto ambiental produce.

Adicionalmente, en este capítulo se ha realizado un análisis de los costes asociados con la producción de bloques con y sin subproductos. De este estudio se concluye lo siguiente:

- La incorporación de virutas como reemplazo único o en conjunto con los lodos de cal en los bloques, podría conducir a un ahorro a las empresas de prefabricados de aproximadamente 3,600 o 24,700€ por año, respectivamente. A su vez, la empresa papelera tendría un ahorro anual de 6,300€ al reducir el uso de vertederos. Adicionalmente, se podría reducir el presupuesto total del proyecto, debido a los ahorros en el material aislante del revestimiento de la fachada y a la reducción de la carga muerta de la estructura, con sus implicaciones en el tamaño de los elementos que lo soportan.

Capítulo 7

Conclusiones y futuras líneas de investigación

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

embargo, la mejora significativa obtenida en las propiedades térmicas lo hace un material con gran potencial, para ser usado como aislante térmico.

La sustitución parcial del cemento por cenizas de madera produce hormigones con menor asentamiento y mayor absorción de agua, porosidad y absorción por capilaridad del hormigón, y este incremento se hace más evidente a mayores contenidos de este subproducto en la mezcla. En contraste, este tipo de hormigón presenta menor densidad, lo que mejora sus propiedades térmicas. Sin embargo, esta mejora no es tan significativa, como lo es para el hormigón con virutas. En cuanto a la resistencia a compresión, se encontró que a mayores contenidos de cenizas de madera en la mezcla, menor es su resistencia a compresión.

Por otra parte, los lodos de cal tienen un gran potencial para ser empleado como sustituto parcial del cemento en la mezcla de hormigón. De acuerdo con los resultados, la incorporación de lodos de cal, disminuye el asentamiento, la absorción, la absorción por capilaridad y la porosidad del hormigón. Esta reducción de los poros, conduce a un ligero aumento en la densidad; no obstante, contribuye a la durabilidad del material. Además, todos los porcentajes estudiados de incorporación de lodos de cal aportaron una mejora en la resistencia a compresión del hormigón. En cuanto a las propiedades térmicas, se puede afirmar que la adición de lodos de cal tiene una influencia insignificante en estas propiedades. Debido a los buenos resultados obtenidos, se puede concluir que este subproducto tiene el potencial de convertirse en un material cementante complementario.

- **Respecto a la incorporación de virutas de madera y lodos de cal en los bloques**

La configuración de los bloques no se ve afectada por la incorporación de virutas como único subproducto, o en combinación con los lodos de cal; por tanto, se puede concluir que las propiedades morfológicas de los bloques con subproductos no difieren con los bloques convencionales.

Los bloques con subproductos presentaron menor densidad y mayor absorción de agua en comparación con los bloques convencionales, siendo más evidente este comportamiento, cuando solo se incorporaron las virutas en la mezcla. Así mismo, la incorporación de las virutas en los bloques, conduce a un aumento de la absorción por capilaridad de los bloques. No obstante, de acuerdo con los requisitos del CTE referente a la absorción por capilaridad, los 3 tipos de bloques pueden emplearse como bloque cara vista.

Como se esperaba, el reemplazo parcial del árido fino por virutas, resultó en una disminución en la resistencia a compresión de las piezas; sin embargo, al adicionar de manera conjunta las virutas y los lodos en la mezcla, esta disminución fue menor. Con lo cual, se puede decir que la adición de los lodos de cal permite contrarrestar parcialmente la bajada de resistencia ocasionada por las virutas, y aun así conseguir una

mejora en las propiedades térmicas, aunque no tan pronunciada, como la obtenida cuando solo se incorporaron las virutas.

Según el CTE, los 3 tipos de bloques pueden ser utilizados como piezas para fábricas sustentantes. No obstante, para el caso de los bloques con virutas como único reemplazo, sería necesario limitar la tensión de trabajo a compresión en estado límite último al 75% de la resistencia de cálculo de la fábrica, o realizar estudios específicos sobre la resistencia a compresión de la misma.

La muestra de referencia presenta un mejor comportamiento acústico, en comparación con las muestras con subproductos, aunque las variaciones en los resultados demuestran que la diferencia no es significativa. Por otro lado, el aislamiento por reflexión (emisividad) de los 3 tipos de bloques es similar.

Los resultados del ensayo térmico demostraron que tanto los bloques con virutas como los bloques con virutas y lodos de cal se comportan mejor térmicamente que los bloques convencionales, siendo este efecto más notorio, cuando solo se reemplazó en la mezcla el árido fino por las virutas.

- **En relación a la sostenibilidad**

Tal y como se esperaba, el mayor impacto ambiental se genera en la fabricación de los bloques de referencia, y el menor, en la fabricación de los bloques con incorporación de virutas y lodos de cal. Éste hecho se debe principalmente a la sustitución parcial del árido fino y del cemento Portland por subproductos. En cuanto a los bloques con incorporación de virutas, también generan menor impacto ambiental que los bloques de referencia, aunque la reducción no es tan notoria como el de los bloques con incorporación de virutas y lodos de cal, debido a que no hubo una sustitución parcial del cemento, el cual es el componente de los bloques que mayor impacto genera al ambiente.

En base a los resultados del análisis del ciclo de vida, se confirma que al reducir el uso de materias primas y emplear recursos disponibles localmente (subproductos), se puede disminuir significativamente los impactos ambientales del sistema de producción de bloques. Por lo tanto, para minimizar el consumo de recursos naturales no renovables, es necesario promover la sustitución, en la medida de lo posible, de algunos de sus componentes por subproductos locales, cerrando los ciclos de productos, lo cual significa claramente, apostar por la economía circular. De esta forma, también se logra promover el uso de los recursos disponibles en las áreas locales y se minimiza el transporte de las materias primas a las plantas y de los subproductos a los vertederos.

En este sentido, y dado que los subproductos pueden considerarse nutrientes técnicos en la economía circular, su uso en la fabricación de piezas de hormigón de baja resistencia garantiza el cumplimiento de los objetivos establecidos en la Directiva 2008/98/CE de reducir el uso de recursos y favorecer la aplicación práctica de la jerarquía de residuos.

La incorporación de subproductos en los bloques generará ahorros, tanto a las empresas involucradas, como a los usuarios. Por ejemplo, la empresa papelera tendría un ahorro anual al no ser necesario el uso de vertederos, la empresa de prefabricados reduciría los gastos en la compra del cemento y el árido para la fabricación de los bloques, y esto a su vez, repercutiría en el coste de los bloques, lo que disminuiría el presupuesto total de la obra, a esto también habría que añadirle, la reducción de los costes en el material aislante de la fachada y de la estructura que soporta las cargas muertas, ya que los bloques con subproductos poseen mejores propiedades térmicas y menor densidad que los bloques convencionales. Todo ello, reduciría el coste final de la obra y por consiguiente el usuario obtendría un ahorro en el coste de la vivienda u oficina. Adicionalmente, los posibles ahorros en la factura energética, generando no solo un beneficio económico, sino que también, aportaría un beneficio social.

- **En cuanto al análisis térmico numérico, mediante el método de elementos finito**

Los resultados obtenidos presentaron un buen nivel de precisión con los hallazgos del ensayo experimental, por lo que se recomienda emplear esta técnica en futuras investigaciones como paso previo al ensayo experimental; con ello, se conseguiría reducir el esfuerzo físico, el tiempo de ejecución y el coste asociados al desarrollo de un ensayo como el de la Caja Caliente Guardada. Además, esta técnica permitiría al diseñador analizar fácilmente el efecto de los cambios en los parámetros, aportando mayor eficiencia al estudio.

Una vía alternativa para optimizar el comportamiento térmico del bloque de referencia, es la incorporación de aislamiento en las cavidades de los huecos de la pieza. Sin embargo, esta técnica puede resultar más costosa que si se empleasen los bloques sin aislamiento por el interior, por lo cual, se debe realizar un análisis previo, a fin de evaluar su viabilidad económica. Por tanto, resulta más económico optimizar térmicamente los bloques, mediante la sustitución parcial de los componentes habituales de la mezcla por subproductos con mejores propiedades térmicas, ya que el coste puede ser menor que el material que sustituye o incluso puede obtenerse de forma gratuita.

7.3 Futuras líneas de investigación

Dado que se ha demostrado el potencial que tiene la valorización de estos subproductos en el campo de los elementos prefabricados de hormigón, concretamente en los bloques de hormigón, se hace necesario potenciar ciertos aspectos que no se han podido tratar durante el desarrollo de esta Tesis Doctoral, por lo que se sugieren para futuras líneas de investigación los siguientes temas:

- Se considera necesario evaluar el comportamiento mecánico de los bloques trabajando en conjunto con el mortero, para ello, se aconseja realizar el ensayo de resistencia a la adherencia a cortante.

- Se deben realizar ensayos adicionales a los bloques de permeabilidad al vapor de agua y resistencia al fuego.
- Aunque la norma Europea sobre bloques no lo contempla, se recomienda ampliar los ensayos de durabilidad, llevando a cabo los ensayos de contracción por secado, permeabilidad, resistencia al hielo y deshielo y choque térmico.
- Se recomienda analizar a partir de simulaciones, el comportamiento térmico de viviendas, cuyas fachadas estén constituidas con los bloques analizados en esta investigación.
- Evaluar la optimización de la configuración de los bloques variando su geometría, a través de simulaciones térmicas, empleando el método de elementos finitos.
- Se recomienda explorar la posibilidad de utilizar las cenizas de madera como sustituto del árido fino, con el fin de explorar otras vías, que permitan valorar este subproducto.
- Teniendo en cuenta los excelentes resultados obtenidos con la incorporación de los lodos de cal a la mezcla de hormigón, se recomienda evaluar este subproducto, en otros tipos de hormigón (como el fluido o de alta resistencia) con otras aplicaciones.
- Resulta interesante analizar el efecto de la incorporación de virutas con diferentes tratamientos en las propiedades del hormigón.

Referencias

REFERENCIAS

- [1] Cetin M, Sevik H. The change of air quality in Kastamonu city in terms of particulate matter and CO₂ 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 CO₂ on the CaCO₃ 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.

- [17] Aigbomian EP, Fan M. Development of Wood-Crete building materials from sawdust and waste paper. *Constr Build Mater* 2013;40:361-6.
- [18] FEDEMCO y ECOEMBES. Situación de los residuos de envases, embalajes y palets de madera en España en 2015. 2016.
- [19] Nozahic V, Amziane S, Torrent G, Saïdi K, De Baynast H. Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice–lime binder. *Cement and Concrete Composites* 2012;34:231-41.
- [20] Raju CA, Jyothi KR, Satya M, Praveena U. Studies on development of fuel briquettes for household and industrial purpose. *International Journal of Research in Engineering and Technology* 2014;3:54-63.
- [21] Ganiron Jr TU. Effect of sawdust as fine aggregate in concrete mixture for building construction. *International Journal of Advanced Science and Technology* 2014;63:73-82.
- [22] Pitman RM. Wood ash use in forestry—a review of the environmental impacts. *Forestry* 2006;79:563-88.
- [23] Risse LM, Gaskin JW. Best management practices for wood ash as agricultural soil amendment. 2010.
- [24] Union E. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. *Official Journal of the European Union* 2009;5:2009.
- [25] European Biomass Association. European bioenergy outlook 2013. Statistical Report. AEBIOM, Brussels 2013.
- [26] Rajamma R, Ball RJ, Tarelho LA, Allen GC, Labrincha JA, Ferreira VM. Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials. *J Hazard Mater* 2009;172:1049-60.
- [27] Modolo R, Silva T, Senff L, Tarelho L, Labrincha J, Ferreira V et al. Bottom ash from biomass combustion in BFB and its use in adhesive-mortars. *Fuel Process Technol* 2015;129:192-202.
- [28] Demeyer A, Nkana JV, Verloo M. Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview. *Bioresour Technol* 2001;77:287-95.
- [29] Pitman RM. Wood ash use in forestry-a review of the environmental impacts. *Forestry* 2006;79:563-88.
- [30] Okunade EA. The effect of wood ash and sawdust admixtures on the engineering properties of a burnt laterite-clay brick. *J Appl Sci* 2008;8:1042-8.

- [31] Parashar AK, Parashar R. Comparative study of compressive strength of bricks made with various materials to clay bricks. *International Journal of Scientific and Research Publications* 2012;2:1-4.
- [32] Mukherji S, Dan T, Machhoya B. Characterization and utilization of wood ash in the ceramic industry. *Interceram* 1995;44:31-3.
- [33] Wirojanagud W, Tantemsapya N, Tantriratna P. Precipitation of heavy metals by lime mud waste of pulp and paper mill. *Songklanakarinn J.Sci.Technol* 2004;26.
- [34] Sun R, Li Y, Liu C, Xie X, Lu C. Utilization of lime mud from paper mill as CO₂ sorbent in calcium looping process. *Chem Eng J* 2013;221:124-32.
- [35] ASPAPEL (Asociación Española de Fabricantes de Pasta, Papel y Cartón). El sector papelero. Datos estadísticos de 2016 en España. 2017;2018.
- [36] Castro F, Vilarinho C, Trancoso D, Ferreira P, Nunes F, Miragaia A. Utilisation of pulp and paper industry wastes as raw materials in cement clinker production. *International Journal of Materials Engineering Innovation* 2009;1:74-90.
- [37] Buruberri LH, Seabra MP, Labrincha JA. Preparation of clinker from paper pulp industry wastes. *J Hazard Mater* 2015;286:252-60.
- [38] Gaskin JW, Miller WP, Morris L. Land application of pulp mill lime mud. The University of Georgia, College of Agriculture and Environmental Sciences, Cooperative Extension Service along with the Pollution Prevention Assistance Division. 2009.
- [39] He J, Lange CR, Dougherty M. Laboratory study using paper mill lime mud for agronomic benefit. *Process Saf Environ Prot* 2009;87:401-5.
- [40] Demir I, Baspınar MS, Orhan M. Utilization of kraft pulp production residues in clay brick production. *Build Environ* 2005;40:1533-7.
- [41] Qin J, Cui C, Yang C, Cui X, Hu B, Huang J. Dewatering of waste lime mud and after calcining its applications in the autoclaved products. *J Clean Prod* 2016;113:355-64.
- [42] Verma V. EU Statistics on Income and Living Conditions (EU-SILC). Sampling Guidelines, Statistical Office of the European Communities, Luxembourg 2016.
- [43] Tirado Herrero S. Pobreza, vulnerabilidad y desigualdad energética. Nuevos enfoques de análisis. 2016.
- [44] Daly M. Assessing the EU approach to combating poverty and social exclusion in the last decade. *Europe* 2010;2020:143-61.
- [45] Tod A, Thomson H, In: Csiba K,. Health Impacts of Cold Housing and Energy Poverty. (ed.) *Energy Poverty Handbook*. The European Union. The Greens/EFA Group in the European Parliament, Brussels , pp. 39-56. ISBN 978-92-846-0286-5. 2017.

- [46] Código Técnico de la Edificación-CTE (Technical code for Building). Ministerio de Fomento. España.
- [47] Hendry EAW. Masonry walls: materials and construction. *Constr Build Mater* 2001;15:323-30.
- [48] Gao T, Jelle BP, Gustavsen A, Jacobsen S. Aerogel-incorporated concrete: An experimental study. *Constr Build Mater* 2014;52:130-6.
- [49] Chen B, Liu N. A novel lightweight concrete-fabrication and its thermal and mechanical properties. *Constr Build Mater* 2013;44:691-8.
- [50] Haas W, Krausmann F, Wiedenhofer D, Heinz M. How circular is the global economy?: An assessment of material flows, waste production, and recycling in the European Union and the world in 2005. *J Ind Ecol* 2015;19:765-77.
- [51] Boulding KE. The economics of the coming spaceship earth. *Environmental Quality Issues in a Growing Economy* 1966.
- [52] Pearce DW, Turner RK. *Economics of natural resources and the environment*. : JHU Press, 1990.
- [53] MacArthur E. *Towards the Circular Economy, Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*. Ellen MacArthur Foundation: Cowes, UK 2013.
- [54] Ghisellini P, Cialani C, Ulgiati S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production* 2016;114:11-32.
- [55] Bhatti JI, Miller FM, Kosmatka SH, Bohan R. *Innovations in Portland cement manufacturing*. : Portland Cement Association Skokie, Ill, USA, 2004.
- [56] Huntzinger DN, Eatmon TD. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production* 2009;17:668-75.
- [57] Van den Heede P, De Belie N. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: Literature review and theoretical calculations. *Cement and Concrete Composites* 2012;34:431-42.
- [58] Cardim de Carvalho Filho, Arnaldo. *Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento-Aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento*. : Universitat Politècnica de Catalunya, 2001.
- [59] Petek Gursel A, Masanet E, Horvath A, Stadel A. Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. *Cement and Concrete Composites* 2014;51:38-48.

- [60] Adebakin I, Adeyemi A, Adu J, Ajayi F, Lawal A, Ogunrinola O. Uses of sawdust as admixture in production of low-cost and lightweight hollow sandcrete blocks. *Am.J.Sci.Indus.Res* 2012;3:458-63.
- [61] EPA. Emission factor documentation for AP-42, section 11.6: Portland cement manufacturing, final report, EPA Contract 68-D2-0159, MRI Project No. 4601-01; 1994.
- [62] Oates T. Lime and limestone. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* 2007.
- [63] Mehta KP. Reducing the environmental impact of concrete. *Concr Int* 2001;23:61-6.
- [64] Smakhtin V. Basin closure and environmental flow requirements. *Int J Water Resour Dev* 2008;24:227-33.
- [65] European Federation of Concrete Admixtures Associations, EFCA. Environmental declaration superplasticizing admixtures. EFCA doc 325 ETG. ;2006.
- [66] El Reguil S.L. Impacto ambiental de una planta de hormigón. ;2008.
- [67] Babor D, Plian D, Judele L. Environmental impact of concrete. *Buletinul Institutului Politehnic din Iasi.Sectia Constructii, Arhitectura* 2009;55:27.
- [68] Ministerio de Fomento, Secretaría General Técnica. Instrucción de Hormigón Estructural EHE-98 (Spanish Structural Concrete Code). Madrid 2008.
- [69] Turgut P, Algin HM. Limestone dust and wood sawdust as brick material. *Build Environ* 2007;42:3399-403.
- [70] Korpinen R. On the potential utilisation of sawdust and wood chip screenings. : Åbo Akademi, 2010.
- [71] Taoukil D, Sick F, Mimet A, Ezbakhe H, Ajzoul T. Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood-concrete composite. *Constr Build Mater* 2013;48:104-15.
- [72] Delgado G. Diseño de un modelo de vivienda social implementando el hormigón con fibras de madera. Tesis Doctoral. Escuela de Arquitectura de la UEES. 2016.
- [73] Bederina M, Laidoudi B, Goullieux A, Khenfer MM, Bali A, Quéneudec M. Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes. *Constr Build Mater* 2009;23:1311-5.
- [74] Becchio C, Corgnati SP, Kindinis A, Pagliolico S. Improving environmental sustainability of concrete products: Investigation on MWC thermal and mechanical properties. *Energy Build* 2009;41:1127-34.

- [75] Aigbomian EP, Fan M. Development of wood-crete from treated sawdust. *Constr Build Mater* 2014;52:353-60.
- [76] Coatanlem P, Jauberthie R, Rendell F. Lightweight wood chipping concrete durability. *Constr Build Mater* 2006;20:776-81.
- [77] Ledhem A, Dheilly R, Queneudec M. Reuse of waste oils in the treatment of wood aggregates. *Waste Manage* 2000;20:321-6.
- [78] Semple K, Evans P, Cunningham R. Compatibility of 8 temperate Australian Eucalyptus species with Portland cement. *European Journal of Wood and Wood Products* 2000;58:315-6.
- [79] Yamagishi K, Kasai N. Fabrication de panneaux de bois-ciment utilisant un bois de mauvaise prise—influence d'un prétraitement des particules de mélèze avec de l'huile et des produit chimiques. *J Hokaido Forest prod Res Inst* 1990;7.
- [80] Paramasivam P, Loke Y. Study of sawdust concrete. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* 1980;2:57-61.
- [81] Jorge F, Pereira C, Ferreira J. Wood-cement composites: a review. *Holz als Roh- und Werkstoff* 2004;62:370-7.
- [82] Uprichard J. Chemistry of wood and bark. Properties and uses of New Zealand radiata pine 1991;1:4-1.
- [83] Steward DJ. Interactions between ordinary Portland cement and wood. Phd. University of Wales (UCNW, Bangor: Forestry and Wood Science). 1986.
- [84] Miller D, Moslemi A. Wood-cement composites: effect of model compounds on hydration characteristics and tensile strength. *Wood Fiber Sci* 2007;23:472-82.
- [85] Bamber R, Burley J. The wood properties of radiata pine. : Commonwealth Agricultural Bureaux, 1983.
- [86] Semple K, Evans PD. Adverse effects of heartwood on the mechanical properties of wood-wool cement boards manufactured from radiata pine wood. *Wood Fiber Sci* 2007;32:37-43.
- [87] Chauchard L. Poda del Pino radiata en Euskadi. Financiado por: Diputación Foral de Guipúzcoa. 2005.
- [88] Baver L. Sawdust concrete investigation. Division of Agricultural Engineering Journal of American Society of Agriculture Engineers 1940;21.
- [89] Taoukil D, El-Bouardi A, Ezbakhe H, Ajzoul T. Thermal proprieties of concrete lightened by wood aggregates. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 2011;3:113-6.

- [90] Awal A, Mariyana A, Hossain M. Some aspects of physical and mechanical properties of sawdust concrete. *Int.J* 2016;10:1918-23.
- [91] Aigbomian EP, Fan M. Development of wood-crete from hardwood and softwood sawdust. *Open Construction and Building Technology Journal* 2013;7:108-17.
- [92] Ogundipe O. The Use of Wood By-Products for Making Concrete Blocks. *Journal of Engineering and Applied Sciences* 2007;2:768-70.
- [93] Annual Book of ASTM Standards, ASTM International. West Conshohocken, 19429–2959, PA, USA. 2008.
- [94] Ravindrarajah RS, Carroll C, Appleyard N. Development of sawdust concrete for block making. Center for Infrastructure Research, University of Technology, Sydney, Australia 2001.
- [95] Memon RP, Sam ARM, Awal AA, Achekzai L. Mechanical and Thermal Properties of Sawdust Concrete 2016.
- [96] Coronel J, Rodríguez P. Análisis del comportamiento de mezclas cementicias con la inclusión de fibras de madera 2016.
- [97] Memona RP, Achekzaia L, Mohd AR. Performance of sawdust concrete at elevated temperature. *Jurnal Teknologi*. 2017.
- [98] Wolfe RW, Gjinolli A. Durability and strength of cement-bonded wood particle composites made from construction waste. *For Prod J* 1999;49:24.
- [99] Stahl DC, Skoraczewski G, Arena P, Stempski B. Lightweight concrete masonry with recycled wood aggregate. *J Mater Civ Eng* 2002;14:116-21.
- [100] Garcia Calvo JL, Hidalgo A, Alonso A, Cruz M, Luxán Gómez del Campillo, Maria del Pilar de, Fernandez Luco L. Caracterización de residuos procedentes de los procesos de combustión de biomasa. Viabilidad de uso como materiales de Construcción. 2010.
- [101] Hinojosa MJR, Galvín AP, Agrela F, Perianes M, Barbudo A. Potential use of biomass bottom ash as alternative construction material: Conflictive chemical parameters according to technical regulations. *Fuel* 2014;128:248-59.
- [102] Rajamma R. Biomass fly ash incorporation in cement based materials. Tesis Doctoral. Universidade de Aveiro (Portugal). 2011.
- [103] Vassilev SV, Baxter D, Andersen LK, Vassileva CG. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel* 2010;89:913-33.
- [104] Martins FM, Martins JM, Ferracin LC, da Cunha CJ. Mineral phases of green liquor dregs, slaker grits, lime mud and wood ash of a Kraft pulp and paper mill. *J Hazard Mater* 2007;147:610-7.

- [105] Cheah CB, Ramli M. The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview. *Resour Conserv Recycling* 2011;55:669-85.
- [106] Vassilev SV, Baxter D, Andersen LK, Vassileva CG. An overview of the composition and application of biomass ash. *Fuel* 2013:19-39.
- [107] Udoeyo FF, Inyang H, Young DT, Oparadu EE. Potential of wood waste ash as an additive in concrete. *J Mater Civ Eng* 2006;18:605-11.
- [108] Abdullahi M. Characteristics of wood ash/OPC concrete. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies* 2006;8:9-16.
- [109] CEN European Committee for standardization. Rue de Stassart, 36 Brussels B-1050.
- [110] Elinwa AU, Ejeh SP, Akpabio IO. Using metakaolin to improve sawdust-ash concrete. *Concr Int* 2005;27:49-52.
- [111] Subramaniam P, Subasinghe K, Fonseka WK. Wood ash as an effective raw material for concrete blocks. *International Journal of Research in Engineering and Technology* 2015;4:2319-1163.
- [112] Naik T, Kraus R, Siddique R. Demonstration of manufacturing technology for concrete and CLSM utilizing wood ash from Wisconsin, Wisconsin Department of Natural Resources (Madison, WI) for project# 1—06 UWM report no 2002.
- [113] Carrasco B, Cruz N, Terrados J, Corpas F, Pérez L. An evaluation of bottom ash from plant biomass as a replacement for cement in building blocks. *Fuel* 2014;118:272-80.
- [114] Udoeyo FF, Dashibil PU. Sawdust ash as concrete material. *J Mater Civ Eng* 2002;14:173-6.
- [115] Sashidhar C, Sudarsana Rao H. Durability studies on concrete with wood ash additive. 35th Conference on our World in Concrete and Structures. 2010.
- [116] Modolo R, Senff L, Labrincha J, Ferreira V, Tarelho L. Lime mud from cellulose industry as raw material in cement mortars. *Materiales de Construcción* 2014;64.
- [117] Cheng J, Zhou J, Liu J, Cao X, Cen K. Physicochemical Characterizations and Desulfurization Properties in Coal Combustion of Three Calcium and Sodium Industrial Wastes. *Energy & Fuels* 2009;23:2506-16.
- [118] Sahariah B, Sinha I, Sharma P, Goswami L, Bhattacharyya P, Gogoi N et al. Efficacy of bioconversion of paper mill bamboo sludge and lime waste by composting and vermiconversion technologies. *Chemosphere* 2014;109:77-83.

- [119] Zhang J, Zheng P, Wang Q. Lime mud from papermaking process as a potential ameliorant for pollutants at ambient conditions: a review. *J Clean Prod* 2015;103:828-36.
- [120] Modolo R, Senff L, Ferreira V, Labrincha J, Tarelho L. Use of lime-mud from pulp mill plant in cement-mortars. In 1St International conference. 2011.
- [121] Péra J, Husson S, Guilhot B. Influence of finely ground limestone on cement hydration. *Cement and Concrete Composites* 1999;21:99-105.
- [122] Liu X, Chen L, Liu A, Wang X. Effect of nano-CaCO₃ on properties of cement paste. *Energy Procedia* 2012;16:991-6.
- [123] Erođlu¹ H, Üçüncü O, Acar H. The effect of dry sludge addition supplied from pulp mill on the compressive strength of cement. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy* 2007;42:169-74.
- [124] Shaikh FU, Supit SW. Mechanical and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concrete containing calcium carbonate (CaCO₃) nanoparticles. *Constr Build Mater* 2014;70:309-21.
- [125] Bederina M, Makhloufi Z, Bouziani T. Effect of limestone fillers the physic-mechanical properties of limestone concrete. *Physics Procedia* 2011;21:28-34.
- [126] Sato T, Beaudoin J. Effect of nano-CaCO₃ on hydration of cement containing supplementary cementitious materials. *Advances in Cement Research* 2011;23:33-43.
- [127] De Weerd K, Justnes H, Kjellsen KO, Sellevold E. Fly ash-limestone ternary composite cements: synergetic effect at 28 days. *Nordic Concrete Research* 2010;42:51-70.
- [128] ANDECE. Catálogo de soluciones constructivas con bloques y ladrillos de hormigón de árido denso. 2012.
- [129] Venta GJ, Eng P. Life cycle analysis of brick and mortar products. : Athena [TM] Sustainable Materials Institute, 1998.
- [130] El-Hassan H, Shao Y, Ghoulh Z. Effect of Initial Curing on Carbonation of Lightweight Concrete Masonry Units. *ACI Mater J* 2013;110.
- [131] Worrell E, Kermeli K, Galitsky C. Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers. 2013.
- [132] Código Técnico de la Edificación -CTE (Technical code for Building): Documento Básico Seguridad Estructural: Fábrica (DB SE-F). Ministerio de Fomento. España.

- [133] Sear F. Roman architecture. : Routledge, 2002.
- [134] Oxlade C. Solar power. : Capstone, 2011.
- [135] Jones GG, Bouamane L. " Power from Sunshine": A Business History of Solar Energy. 2012.
- [136] John AD, William AB. Solar engineering of thermal processes. America 2006.
- [137] Marszal AJ, Heiselberg P, Bourrelle JS, Musall E, Voss K, Sartori I et al. Zero Energy Building–A review of definitions and calculation methodologies. Energy Build 2011;43:971-9.
- [138] Spitler JD. Building performance simulation: the now and the not yet, HVAC&R Research, 12:S1, 711-713 2006.
- [139] Vale B, Vale RJD. The Autonomous House: design and planning for self-sufficiency. : Thames and Hudson, 1975.
- [140] Holladay M. The history of superinsulated houses in North America. Vancouver, British Columbia: British Columbia Building Envelope Council 2010.
- [141] Wang S. Intelligent buildings and building automation. : Routledge, 2009.
- [142] Spiegelhalter T, Lee A. Designing carbon neutral plus-energy-buildings with site adaptive heliotropism cycles. 2012;5:3712-6.
- [143] Aflaki A, Mahyuddin N, Al-Cheikh Mahmoud Z, Baharum MR. A review on natural ventilation applications through building façade components and ventilation openings in tropical climates. Energy Build 2015;101:153-62.
- [144] Capdevila I, Linares E, Folch R. Eficiencia energética en la rehabilitación de edificios. 2012.
- [145] Lemona. Characteristics of Portland cement CEM II/A-M (V-L) 42,5 R. 2016;2017.
- [146] Ban CC, Ramli M. Properties of high calcium wood ash and densified silica fume blended cement. International Journal of Physical Sciences 2011;6:6596-606.
- [147] Campbell A. Recycling and disposing of wood ash. Tappi J 1990;73:141-6.
- [148] Li H, Niu S, Lu C, Liu M, Huo M. Use of lime mud from paper mill as a heterogeneous catalyst for transesterification. Science China Technological Sciences 2014;57:438-44.
- [149] Fagerlund G. The capillarity of concrete. Nordic Concrete Research 1982.

- [150] Gustafsson SE. Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials. *Rev Sci Instrum* 1991;62:797-804.
- [151] Jannot Y, Acem Z. A quadrupolar complete model of the hot disc. *Measurement science and technology* 2007;18:1229.
- [152] He Y. Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor: Part 1. Theoretical considerations. *Thermochimica acta* 2005;436:122-9.
- [153] Gustafsson SE. Transient hot strip techniques for measuring thermal conductivity and thermal diffusivity. *The Rigaku Journal* 1987;4:16-28.
- [154] Bederina M, Marmoret L, Mezreb K, Khenfer M, Bali A, Quéneudec M. Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: experimental study and modelling. *Constr Build Mater* 2007;21:662-8.
- [155] ACI 122R-14, Guide to Thermal Properties of Concrete and Masonry Systems, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI , 2014.
- [156] Kula I, Olgun A, Erdogan Y, Sevinc V. Effects of colemanite waste, cool bottom ash, and fly ash on the properties of cement. *Cem Concr Res* 2001;31:491-4.
- [157] Khan M. Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models. *Build Environ* 2002;37:607-14.
- [158] Kim K, Jeon S, Kim J, Yang S. An experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cem Concr Res* 2003;33:363-71.
- [159] Valore RC. Calculations of U-values of hollow concrete masonry. *Concr Int* 1980;2:40-63.
- [160] Bouguerra A, Ledhem A, De Barquin F, Dheilly R, Queneudec M. Effect of microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, cement, and wood aggregates. *Cem Concr Res* 1998;28:1179-90.
- [161] Al-Jabri KS, Hago AW, Al-Nuaimi AS, Al-Saidy AH. Concrete blocks for thermal insulation in hot climate. *Cem Concr Res* 2005;35:1472-9.
- [162] Avdelidis N, Moropoulou A. Emissivity considerations in building thermography. *Energy Build* 2003;35:663-7.
- [163] Consejería de medio ambiente y ordenación del territorio. Servicio de normativa técnica, supervisión y control. Dirección general de arquitectura y vivienda. Normativa de Ladrillos y Bloques. 2004.
- [164] Awwad E, Choueiter D, Khatib H. Concrete masonry blocks reinforced with local industrial hemp fibers and hurds. 2013.

- [165] Merle J, Birot M, Deleuze H, Trinsoutrot P, Carré H, Huyette Q et al. Valorization of Kraft black liquor and tannins via porous material production. *Arabian Journal of Chemistry* 2016.
- [166] Sutcu M, del Coz Díaz, Juan José, Rabanal FPÁ, Gencel O, Akkurt S. Thermal performance optimization of hollow clay bricks made up of paper waste. *Energy Build* 2014;75:96-108.
- [167] LIU L, ZHANG L, TANG K. Research on the application of lime mud in new wall materials and its performance. *New Building Materials* 2013;4:007.
- [168] Antonova EE, Looman DC. Finite elements for thermoelectric device analysis in ANSYS. 2005:215-8.
- [169] Arendt K, Krzaczek M, Florczuk J. Numerical analysis by FEM and analytical study of the dynamic thermal behavior of hollow bricks with different cavity concentration. *International Journal of Thermal Sciences* 2011;50:1543-53.
- [170] Sun J, Fang L. Numerical simulation of concrete hollow bricks by the finite volume method. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2009;52:5598-607.
- [171] Bouchair A. Steady state theoretical model of fired clay hollow bricks for enhanced external wall thermal insulation. *Building and Environment* 2008;43:1603-18.
- [172] del Coz Diaz J, Nieto PG, Rodriguez AM, Martinez-Luengas AL, Biempica CB. Non-linear thermal analysis of light concrete hollow brick walls by the finite element method and experimental validation. *Appl Therm Eng* 2006;26:777-86.
- [173] del Coz Díaz JJ, García Nieto PJ, Betegón Biempica C, Prendes Gero MB. Analysis and optimization of the heat-insulating light concrete hollow brick walls design by the finite element method. *Appl Therm Eng* 2007;27:1445-56.
- [174] del Coz Díaz JJ, García Nieto PJ, Domínguez Hernández J, Álvarez Rabanal FP. A FEM comparative analysis of the thermal efficiency among floors made up of clay, concrete and lightweight concrete hollow blocks. *Applied Thermal Engineering* 2010;30:2822-6.
- [175] Principi P, Fioretti R. Thermal analysis of the application of pcm and low emissivity coating in hollow bricks. *Energy and Buildings* 2012;51:131-42.
- [176] Zukowski M, Haese G. Experimental and numerical investigation of a hollow brick filled with perlite insulation. *Energy and Buildings* 2010;42:1402-8.
- [177] Ghazi Wakili K, Tanner C. U-value of a dried wall made of perforated porous clay bricks: Hot box measurement versus numerical analysis. *Energy and Buildings* 2003;35:675-80.
- [178] Manual A. Version 12.0, 2009. ANSYS Inc., Canonsburg, USA.

- [179] del Coz Díaz JJ, García Nieto PJ, Suárez Sierra JL, Peñuelas Sánchez I. Non-linear thermal optimization and design improvement of a new internal light concrete multi-holed brick walls by FEM. *Applied Thermal Engineering* 2008;28:1090-100.
- [180] Li LP, Wu ZG, He YL, Lauriat G, Tao WQ. Optimization of the configuration of 290×140×90 hollow clay bricks with 3-D numerical simulation by finite volume method. *Energy and Buildings* 2008;40:1790-8.
- [181] Ponni M, Baskar R. Evaluation of Indoor Temperature through Roof and Wall Temperatures-An Experimental Study in Hot and Humid Climate. *Evaluation* 2014;4.
- [182] del Coz Díaz J, Nieto PG, Hernández JD, Sánchez AS. Thermal design optimization of lightweight concrete blocks for internal one-way spanning slabs floors by FEM. *Energy Build* 2009;41:1276-87.
- [183] ANSYS. ANSYS release 9.0 documentation. SAS IP, Inc. 2004.
- [184] Hichem N, Noureddine S, Nadia S, Djamila D. Experimental and numerical study of a usual brick filled with PCM to improve the thermal inertia of buildings. *Energy Procedia* 2013;36:766-75.
- [185] Zhang C, Chen Y, Wu L, Shi M. Thermal response of brick wall filled with phase change materials (PCM) under fluctuating outdoor temperatures. *Energy and Buildings* 2011;43:3514-20.
- [186] Chen C, Habert G, Bouzidi Y, Jullien A, Ventura A. LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: An application to mineral additions in concrete. *Resources, Conservation and Recycling* 2010;54:1231-40.
- [187] Turk J, Cotič Z, Mladenović A, Šajna A. Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA. *Waste Manage* 2015;45:194-205.
- [188] Habert G, d'Espinose de Lacaillerie JB, Roussel N. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. *Journal of Cleaner Production* 2011;19:1229-38.
- [189] Hossain MU, Poon CS, Lo IM, Cheng JC. Evaluation of environmental friendliness of concrete paving eco-blocks using LCA approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 2016;21:70-84.
- [190] Lippiatt BC, Ahmad S. Measuring the life-cycle environmental and economic performance of concrete: the BEES approach. 2004:213-30.
- [191] Omar, Wan Mohd Sabki Wan, Doh J, Panuwatwanich K, Miller D. Assessment of the embodied carbon in precast concrete wall panels using a hybrid life cycle assessment approach in Malaysia. *Sustainable Cities and Society* 2014;10:101-11.

- [192] Arrigoni A, Pelosato R, Melià P, Ruggieri G, Sabbadini S, Dotelli G. Life cycle assessment of natural building materials: the role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks. *Journal of Cleaner Production* 2017;149:1051-61.
- [193] Bueno C, Hauschild MZ, Rossignolo JA, Ometto AR, Mendes NC. Sensitivity analysis of the use of Life Cycle Impact Assessment methods: a case study on building materials. *Journal of Cleaner Production* 2016;112:2208-20.
- [194] Bueno C, Rossignolo J, Ometto AR. Comparative Life cycle assessment: structural masonry of concrete and clay blocks. 2012.
- [195] ECO-it 1.4. Guía de utilización de ECO-it 1.4. PRé Consultants, Holanda, www.pre.nl. 2001.
- [196] Goedkoop M, Heijungs R, Huijbregts M, De Schryver A, Struijs J, Van Zelm R. ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level 2009;1.
- [197] Hiraishi T, Krug T, Tanabe K, Srivastava N, Baasansuren J, Fukuda M et al. 2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands. IPCC, Switzerland 2014.
- [198] Khasreen MM, Banfill PF, Menzies GF. Life-cycle assessment and the environmental impact of buildings: a review. *Sustainability* 2009;1:674-701.
- [199] Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V. (Eds.). *Green Building Challenge Handbuch.* ;2017.
- [200] Josa A, Aguado A, Heino A, Byars E, Cardim A. Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU. *Cement and Concrete Research* 2004;34:1313-20.
- [201] Kellenberger D, Kunniger T, Althaus H. Life cycle Inventories of building products: Cement products and processes. Final report ecoinvent 2007;2.
- [202] Schiessl P, Stengel T. Nachhaltige Kreislaufführung mineralischer Baustoffe. Forschungsbericht der Technischen Universität München, Abteilung Baustoffe, München 2006.
- [203] Flower DJM, Sanjayan JG. Chapter 1 - Greenhouse Gas Emissions Due to Concrete Manufacture. In: Nazari A, Sanjayan JG, editors. *Handbook of Low Carbon Concrete: Butterworth-Heinemann*; 2017, p. 1-16.
- [204] Marceau M, Nisbet MA, Van Geem MG. Life cycle inventory of portland cement manufacture 2006.

- [205] Blengini GA, Fantoni M, Busto M, Genon G, Zanetti MC. Participatory approach, acceptability and transparency of waste management LCAs: Case studies of Torino and Cuneo. *Waste Management* 2012;32:1712-21.
- [206] SETAC B. Guidelines for Life-Cycle Assessment: A Code of Practice. Consoli, Allen, Boustead, Fava, Franklin, Jense de Oude, Parrish, Perriman, Postelthwaite, Quay, Sequin, and Vigon 1993.
- [207] Ross S, Evans D, Webber M. How LCA studies deal with uncertainty. *The international journal of life cycle assessment* 2002;7:47.
- [208] Baeza-Brotons F, Garcés P, Payá J, Saval JM. Portland cement systems with addition of sewage sludge ash. Application in concretes for the manufacture of blocks. *J Clean Prod* 2014;82:112-24.