



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

**EVALUACIÓN AMBIENTAL Y
ECONÓMICA DE LA
UTILIZACIÓN DE MATERIALES
RECICLADOS PARA LA
PRODUCCIÓN DEL HORMIGÓN
ESTRUCTURAL Y NO
ESTRUCTURAL EN CATALUÑA**

Trabajo realizado por:
Dania Licon David

Dirigido por:
Xavier Roca
Santiago Gassó

Master en:
Ingeniería Ambiental

Barcelona, 16 de junio 2017

Departamento de Ingeniería de Proyectos y de la
Construcción

TRABAJO FINAL DE MASTER

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Introducción | 1 |
| 1.1 | Justificación | 1 |
| 1.2 | Contenido de la Tesis | 2 |
| 1.3 | Objetivos | 2 |
| 1.3.1 | Objetivo General..... | 2 |
| 1.3.2 | Objetivos Específicos | 2 |
| 2 | Estado del Arte | 3 |
| 2.1 | Problemática Actual | 3 |
| 2.2 | Residuos de Construcción y Demolición..... | 5 |
| 2.3 | Legislación en la Gestión de Residuos de Construcción y Demolición | 7 |
| 2.3.1 | Unión Europea..... | 7 |
| 2.3.2 | España..... | 8 |
| 2.3.3 | Cataluña | 8 |
| 2.4 | Reciclaje de los Residuos de Construcción y Demolición | 8 |
| 2.4.1 | Tipos de Reciclaje en Cataluña | 9 |
| 2.4.2 | Proceso de Reciclaje..... | 10 |
| 2.5 | Utilización de los RCD en Hormigón de Aplicación Estructural y No Estructural | 11 |
| 2.5.1 | Aplicación Estructural | 12 |
| 2.5.2 | Aplicación No Estructural..... | 14 |
| 2.6 | Análisis Ambiental de los Residuos de Construcción y Demolición..... | 16 |
| 2.7 | Aspectos Económicos de los Residuos de Construcción y Demolición..... | 17 |
| 2.8 | Conclusiones Estado del Arte | 18 |
| 3 | Metodología del Trabajo..... | 20 |
| 3.1 | Fases de la metodología propuesta | 21 |
| 3.1.1 | Fase 1: Definición y localización del estudio | 21 |
| 3.1.2 | Fase 2: Proceso de producción | 21 |
| 3.1.3 | Fase 3: Criterios de evaluación | 21 |
| 3.1.4 | Fase 4: Evaluación ambiental y económica | 22 |
| 3.1.5 | Fase 5: Análisis y discusión de los resultados | 24 |
| 3.1.6 | Fase 6: Conclusiones | 24 |
| 3.2 | Aplicación general de la propuesta metodológica..... | 25 |
| 3.2.1 | Fase 1: Definición y localización del estudio | 25 |
| 3.2.2 | Fase 2: Proceso de producción | 26 |
| 3.2.3 | Fase 3: Criterios de evaluación | 28 |
| 3.2.4 | Fase 4: Evaluación ambiental y económica | 28 |
| 3.2.5 | Fase 5: Análisis y discusión de los resultados | 56 |
| 4 | Conclusiones | 60 |
| 5 | Referencias Bibliográficas..... | 62 |
| 6 | Anexos..... | 66 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 Población del mundo: estimados, 1950-2015, proyección media variante, 80% y 95% de intervalos de confianza, 2015-2100..... | 3 |
| Figura 2 Composición de residuos de construcción y demolición..... | 6 |
| Figura 3 Gestión residuos de construcción y demolición en Cataluña años 2009-2013.6 | |
| Figura 4 Modelo catalán de residuos de construcción. | 10 |
| Figura 5 Esquema de las etapas de la metodología propuesta. | 20 |
| Figura 6 Categorías específicas de impacto según el método de evaluación de impacto. | 23 |
| Figura 7 Ubicación de las instalaciones de las plantas de reciclaje pertenecientes a GRC..... | 26 |
| Figura 8 Límites del sistema..... | 27 |
| Figura 9 Ciclo de Vida del Hormigón..... | 28 |
| Figura 10 Límites del sistema, procesos y materiales para el sistema convencional de concreto y el sistema de reciclaje de concreto..... | 29 |
| Figura 11 Análisis de incertidumbre hormigón convencional. | 47 |
| Figura 12 Análisis de incertidumbre hormigón estructural 25% árido reciclado..... | 48 |
| Figura 13 Análisis de incertidumbre hormigón no estructural 50% árido reciclado..... | 48 |
| Figura 14 Producción de hormigón en una economía circular. | 53 |
| Figura 15 Comparación de producción de hormigón convencional y hormigón 25% árido reciclado. | 57 |
| Figura 16 Comparación de producción de hormigón convencional y hormigón 50% árido reciclado. | 58 |

ÍNDICE DE GRÁFICAS

| | |
|---|----|
| Gráfica 1 Caracterización hormigón convencional. | 38 |
| Gráfica 2 Ponderación por categoría de daño – hormigón convencional..... | 40 |
| Gráfica 3 Caracterización hormigón estructural con 25% árido reciclado..... | 42 |
| Gráfica 4 Ponderación por categoría de daño – hormigón estructural 25% árido reciclado | 43 |
| Gráfica 5 Ponderación por categoría de daño – hormigón no estructural 50% árido reciclado | 45 |
| Gráfica 6 Ponderación por categoría de daño – Hormigón no estructural 50% árido reciclado | 46 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

| | |
|--|----|
| Ilustración 1 Proceso de producción de hormigón con áridos naturales..... | 31 |
| Ilustración 2 Proceso de producción de hormigón con áridos reciclados..... | 33 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Producción de RCD por Comunidad Autónoma..... | 4 |
| Tabla 2 Producción de RCD en Cataluña. | 5 |
| Tabla 3 Generación y gestión de residuos de construcción y demolición en 2012..... | 10 |
| Tabla 4 Número de instalaciones que reciben RCD en 2013. | 11 |
| Tabla 5 Dosificación de alternativas..... | 25 |
| Tabla 6 Tipos de alternativas de hormigón. | 27 |
| Tabla 7 Proceso modificado de árido grueso natural. | 31 |
| Tabla 8 Proceso de salida de árido grueso natural. | 31 |
| Tabla 9 Proceso de entrada de árido natural. | 32 |
| Tabla 10 Entradas a la planta de producción de hormigón con 100% árido natural. ... | 32 |
| Tabla 11 Salidas a la planta de producción de hormigón con 100% árido natural..... | 33 |
| Tabla 12 Proceso de entrada de 25% árido reciclado..... | 34 |
| Tabla 13 Entradas a la planta de producción de hormigón con 25% árido reciclado... 34 | 34 |
| Tabla 14 Proceso de entrada de 50% árido reciclado..... | 35 |
| Tabla 15 Entradas a la planta de producción de hormigón con 50% árido reciclado... 35 | 35 |
| Tabla 16 Caracterización hormigón convencional en porcentaje..... | 39 |
| Tabla 17 Caracterización hormigón estructural con 25% árido reciclado. | 42 |
| Tabla 18 Caracterización hormigón no estructural con 50% árido reciclado. | 45 |
| Tabla 19 Coste de referencia según alternativa de producción de hormigón | 52 |
| Tabla 20 Comparativa de alternativas de áridos y cemento. | 53 |
| Tabla 21 Eficiencia de recursos para cada alternativa..... | 55 |

Resumen

Los residuos de construcción y demolición (RCD) presentan un grave problema ambiental a nivel mundial, ya que en su mayoría, estos residuos terminan en vertederos o depósitos incontrolados, provocando grandes agravantes ambientales.

Se conoce que Cataluña es la primera Comunidad Autónoma de España que genera mayor producción de residuos de construcción y demolición, por lo que en este estudio se plantea realizar una evaluación para conocer la diferencia en cuanto a la realización de un hormigón convencional (con áridos naturales) y dos alternativas de hormigón con distintos porcentajes de áridos reciclados (25% y 50% respectivamente), tanto ambiental como económico, para conocer las alternativas de mejora a este problema.

La evaluación ambiental se realiza a través de una metodología de análisis de ciclo de vida, mientras que el análisis económico se realiza por medio de una economía lineal y el desarrollo de un indicador que representa el rendimiento de una economía circular.

La unidad funcional empleada para la metodología de análisis de ciclo de vida es 1m^3 de hormigón, tanto de árido natural como las otras dos alternativas que se agregan los áridos reciclados descritos anteriormente, tanto para hormigón estructural como no estructural.

Para los áridos reciclados, se le da importancia al tipo de residuo utilizado en la planta de reciclaje, que proviene exclusivamente de residuos de hormigón; se asume que el proceso de reciclaje se realiza por medio de la planta fija de Les Franqueses del Vallés.

Los resultados indican que al comparar el hormigón convencional con hormigón estructural con 25% de áridos reciclados, este último presenta la mayor cantidad de impactos ambientales debido a que los áridos naturales (que son un 75%), generan la extracción de minerales pero también por los áridos reciclados ya que se emplean grandes energías y transporte para su movilización. En cuanto al aspecto económico, el de menor coste es el hormigón estructural con 25% de áridos naturales, esto es debido a la gran diferencia de coste entre el árido natural y el árido reciclado, aunque al producir 1m^3 de hormigón, en ambos casos el cemento es el material que mayor coste implica, generando aproximadamente el 50% del coste total de la producción del hormigón.

Al comparar el hormigón convencional con hormigón no estructural con 50% de áridos reciclados, este último presenta la mayor cantidad de impactos ambientales debido a que los áridos naturales (que son un 50%), generan la extracción de minerales y presentan grandes impactos en cuanto a la salud humana, pero también por los áridos reciclados ya que se emplean grandes energías y transporte para su movilización. En cuanto al aspecto económico, el de menor coste es el hormigón estructural con 50% de áridos naturales, esto es debido a la gran diferencia de coste entre el árido natural y el árido reciclado, que en esta comparación se puede apreciar mejor ya que el árido reciclado llega a un 50%.

Los índices de rendimiento de la economía circular indican que actualmente, el rendimiento de las dos alternativas de áridos reciclados tienen aproximadamente un 68%-69% de reutilización de los residuos, esto implica que parte de los residuos, no se reutilizan y en una economía circular todos los residuos deben de reutilizarse de ser posible en un 100%.

Los resultados indican que en cuanto a la metodología de análisis de ciclo de vida, específicamente para este estudio y tomando en cuenta las especificaciones del estudio, el hormigón estructural con 25% de árido reciclado y el hormigón no estructural con 50% de árido reciclado no son viables en comparación con un hormigón convencional, debido a los grandes impactos medioambientales que presentan.

Mientras que en cuanto al análisis económico los hormigones que presentan áridos reciclados son más viables en comparación con el hormigón convencional. Esto es debido al precio de los áridos reciclados en comparación con los áridos naturales.

Palabras clave: RCD, evaluación ambiental, ACV, económico, circular.

Abstract

Construction and demolition waste (CDW) present serious environmental problems worldwide, and most of these wastes end up in landfills or uncontrolled deposits, causing great environmental aggravation.

It is known that Catalonia is the first Autonomous Community of Spain that generates an important production of construction and demolition waste, this is why in this study it is proposed the analysis of an environmental evaluation, to know the difference in the realization of a conventional concrete (with natural aggregates) and two alternatives of concrete with different percentages of recycled aggregates (25% and 50%, respectively), and an economic evaluation, to determine the alternatives to improve this problem.

The environmental assessment is carried out through a life cycle analysis methodology, while the economic analysis is performed through a linear economy and the development of an indicator that represents the performance of a circular economy.

The functional unit used for the methodology of life cycle analysis is 1m^3 of concrete, for natural arid and also for other two alternatives that have recycled aggregates for structural and non-structural concrete.

For recycled aggregates, importance is given to the type of waste used in the recycling plant, which comes exclusively from concrete waste; it is assumed that the recycling process is carried out through the fixed plant of Les Franqueses del Vallés.

The results indicate that when comparing conventional concrete with structural concrete with 25% of recycled aggregates, the greatest amount of environmental impacts is produced by the structural concrete with 25% of recycled aggregates due to the fact that natural aggregates (75%) generate mineral extraction, but also the recycled aggregates, since they use energies and transport for their mobilization. As for the economic aspect, the lowest cost is the structural concrete with 25% of natural aggregates, this is due to the great cost difference between the natural aggregate and the recycled aggregate, although producing 1m^3 of concrete, in both cases cement is the material that carries the highest cost, generating approximately 50% of the total cost of production of the concrete.

When comparing conventional concrete with non-structural concrete with 50% of recycled aggregates, the non-structural concrete presents the greatest amount of environmental impacts due to the fact that natural aggregates (which are 50%), generate mineral extraction and have large impacts as to human health, but also for the recycled aggregates, since they use energies and transport for their mobilization. As for the economic aspect, the lowest cost is the structural concrete with 50% of natural aggregates, this is due to the great cost difference between the natural aggregate and the recycled aggregate, which in this comparison can be better appreciated since the recycled aggregate reaches 50%.

The rating performance of the circular economy indicate that the yields of the two recycled aggregate alternatives are currently between 68% and 69% of waste reuse, which means that some of the waste is not reused and in the circular economy, all waste must be reused if possible by 100%.

The results indicate that in terms of the life cycle analysis methodology, specifically for this study and taking into account the specifications, structural concrete with 25% recycled aggregate and non-structural concrete with 50% recycled aggregate are not viable compared to conventional concrete, due to the large environmental impacts they present.

Whereas in the economic analysis the concrete that present recycled aggregates are more viable in comparison with the conventional concrete. This is due to the price of recycled aggregates compared to natural aggregates.

Key words: CDW, environmental assessment, LCA, economic, circular.

1 Introducción

La Revolución Industrial generó una línea muy fina entre el ser humano y los recursos naturales. Se presentó un gran desarrollo y fundó el consumo masivo industrial, llevando la producción a gran escala. De aquí parte la economía lineal que se trata de producir, consumir y tirar, sin importar que los recursos naturales sean limitados. Específicamente la Unión Europea, desde la década de los ochenta, ha dado importancia a la protección del medio ambiente y los recursos naturales, brindando legislaciones y desarrollando grandes medidas de aplicación a la política del medio ambiente, proponiendo una gestión adecuada a los residuos generados.

En España y concretamente en Cataluña, la gestión de los residuos es una temática muy importante ya que es una de las Comunidades Autónomas (CCAA) con mayor producción de residuos.

Uno de los residuos que mayor impacto generan dentro de esta CCAA son los residuos de construcción y demolición. Estos generan un alto impacto en el medioambiente, a través del aire, agua y la utilización de energía en su producción. El impacto que produce en el aire y el agua proviene básicamente del transporte de residuos y su eliminación a vertederos (contribuye a gases de efecto invernadero y lixiviación). En el uso de la energía, se crea un impacto ambiental al momento que se producen las actividades de reciclaje, debido a que la mayoría de las operaciones son realizadas por procesos mecánicos que precisan electricidad.

Es por esto que se realiza una evaluación ambiental, por medio de una metodología de análisis de ciclo de vida y una evaluación económica lineal y el desarrollo de un indicador de economía circular para conocer la importancia de la utilización de residuos de construcción y demolición como una nueva materia prima dentro de la producción de hormigón.

1.1 Justificación

Debido a la problemática ambiental que se enfrentan los residuos de construcción y demolición en Cataluña, se realiza una metodología de análisis de ciclo de vida para mejorar la toma de decisiones basado en los posibles impactos ambientales generados. Sin embargo, es importante conocer también el aspecto económico del mismo, puesto que existen pocos estudios en cuanto a un análisis económico en la construcción. También se considera importante el planteamiento de un índice de rendimiento de la economía circular.

1.2 Contenido de la Tesis

Este trabajo está estructurado por cinco capítulos los cuales se describen a continuación.

Capítulo 1 – es una breve introducción que explica de manera general la problemática, las razones por las que se debe llevar a cabo este estudio, su justificación y los objetivos.

Capítulo 2 – define a detalle la necesidad de este estudio, las limitaciones, las legislaciones vigentes necesarias para desarrollar el trabajo y las revisiones bibliográficas realizadas que engloban todos los aspectos necesarios para el correcto desarrollo del estudio.

Capítulo 3 – se desarrolla la metodología del trabajo, evaluando el comportamiento ambiental y económico de cada alternativa. Dentro de la propuesta se incluyen los resultados y el análisis de los resultados obtenidos.

Capítulo 4 – se presentan las conclusiones finales y futuras líneas de trabajo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

El objetivo principal de este trabajo es realizar un análisis económico y de los impactos ambientales asociados a la incorporación de materiales reciclados en la producción de hormigón tanto para uso estructural como no estructural. El desarrollo del trabajo permitirá obtener información, mediante el análisis de ciclo de vida ambiental y de costes, sobre la producción del hormigón tradicional con diferentes opciones de producción de hormigón a partir de materiales reciclados procedentes de los residuos de construcción y demolición (RCD). Aportándose datos que son de gran utilidad a la hora de plantear alternativas en la gestión de RCD, específicamente en Cataluña que es el ámbito de aplicación del trabajo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Análisis de la información disponible sobre la generación y gestión de los RCD en Cataluña, sobre los procesos de reciclaje y los actuales usos en la producción de hormigón.
- Evaluación del impacto ambiental asociado a la utilización de materiales reciclados en la producción de hormigón estructural y no estructural, en comparación con la producción tradicional del hormigón a partir de materiales naturales.
- Estimación de los costes asociados a la utilización de materiales reciclados en la producción de hormigón estructural y no estructural, en comparación con la producción tradicional del hormigón a partir de materiales de construcción.
- Evaluación económica mediante criterios de economía circular.

2 Estado del Arte

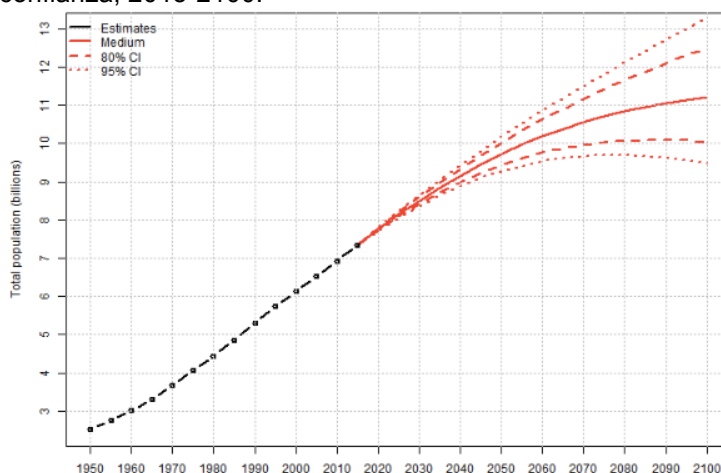
2.1 Problemática Actual

El sector de la construcción a nivel mundial, genera una cantidad significativa de residuos de construcción y demolición (RCD), llevando grandes impactos ambientales negativos, esto es debido, principalmente, al aumento de la población y su necesidad de construir zonas residenciales, edificios y en general, el crecimiento acelerado urbanístico. En ellos se presentan impactos durante todas las fases del ciclo de vida, siendo los ejemplos más claros, el consumo de energía, generación de emisiones y de residuos. Este sector es responsable por el consumo de energía de hasta un 40% en países desarrollados (Junnila & Arpad 2003).

En los países europeos se intenta modificar la gestión con que regularmente se manejan dichos residuos; desean prevenir su generación por medio de la reutilización y el reciclado, valorizando los residuos generados.

La ONU prevé que la población aumentará en las próximas décadas, llegando a los 10 billones de habitantes, produciendo un aumento en el consumo de energía para el 2050 de un 50%, dando como consecuencia un impacto ambiental significativo (Melorose et al. 2015).

Figura 1 Población del mundo: estimados, 1950-2015, proyección media variante, 80% y 95% de intervalos de confianza, 2015-2100.



Fuente: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2015). *World Population Prospects: The 2015 Revision*

Las consecuencias en el aumento de la población está directamente ligada con el sector de la construcción, ya que implica mayores edificaciones para el desarrollo y con ello el cambio climático. Tratando de brindar una solución, en el año 2014, se realizó en Barcelona, lo que es el Congreso Mundial de Edificación Sostenible (WSB por sus siglas en inglés – World Sustainable Building), el cual dejó de manifiesto que el sector de la edificación deberá reducir un 23% sus emisiones para evitar el colapso energético y climático en 2050. Para estas mejoras, se supone una inversión necesaria de 31 billones de dólares, generando 10 millones de empleos estables adicionales.

También se consideró en conocer, medir y reducir el impacto ambiental de la edificación y contribuir al avance social hacia la sostenibilidad, mediante una metodología en específico como la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), siendo éste un instrumento para la valorización de la sostenibilidad de la edificación; es un instrumento clave en la evaluación ambiental. También se llegó a la conclusión que se priorizan las ciudades urbanas, ya que es el medio donde vive la mitad de la humanidad y donde se producirá el aumento futuro de la población y por ende, la demanda de habitabilidad en las ciudades (Green Building Council España 2014).

Se estima que el consumo de hormigón es de 6 billones de toneladas anuales y es considerado como el material de construcción más utilizado. Es por esto que la utilización inteligente del hormigón es importante en la industria de la construcción (García-Rey & Yepes 2012).

Específicamente en España, el control de la gestión de los RCD recae en las Comunidades Autónomas, y varía la gestión que hay en ellas, las políticas ambientales que siguen y la normativa que se ha generado para la regulación de estos residuos (GERD 2013).

En la siguiente tabla, se puede apreciar las toneladas de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) gestionadas en España en los años 2009 – 2013 para cada Comunidad Autónoma.

Tabla 1 Producción de RCD por Comunidad Autónoma.

| Producción RCD CCAA | Población | t/año | t/hab/año |
|----------------------------|------------------|-------------------|------------------|
| Andalucía | 8.397.657 | 2.396.573 | 0,29 |
| Aragón | 1.347.096 | 642.126 | 0,48 |
| Asturias | 1.079.328 | 293.152 | 0,27 |
| Baleares | 1.109.140 | 359.396 | 0,32 |
| Canarias | 2.117.261 | 482.183 | 0,23 |
| Cantabria | 592.071 | 105.055 | 0,18 |
| Castilla y León | 2.549.490 | 862.562 | 0,34 |
| Castilla-La Mancha | 2.103.579 | 591.194 | 0,28 |
| Cataluña | 7.530.395 | 3.340.178 | 0,44 |
| Valencia | 5.113.331 | 1.937.936 | 0,38 |
| Extremadura | 1.106.226 | 98.053 | 0,09 |
| Galicia | 2.787.320 | 542.067 | 0,19 |
| Madrid | 6.465.551 | 2.552.463 | 0,39 |
| Murcia | 1.465.013 | 234.300 | 0,16 |
| Navarra | 639.719 | 243.705 | 0,38 |
| País Vasco | 2.183.979 | 997.427 | 0,46 |
| Rioja | 322.542 | 213.443 | 0,66 |
| Total en España | 2.759.394 | 934.812,53 | 0,34 |

Fuente: Federación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición. 2015

El ratio de producción oficial en el periodo 2009 – 2013, se sitúa en 0,34 t/hab/año, y la producción oficial de RCD en el mismo periodo es de 79,4 millones de toneladas (15,89 de media al año en el periodo).

Debido a que cada CCAA tienen producciones diferentes, se analizó para cada CCAA, incluyendo en este estudio los datos oficiales para Cataluña, partiendo de la base de datos ofrecido por la misma.

Tabla 2 Producción de RCD en Cataluña.

| Año | Población | t/año | Planta de Reciclaje | Otros Gestores | Vertedero | No Especificado |
|--------------|-----------|-------------------|---------------------|----------------|------------------|-------------------|
| 2009 | 7.475.420 | 4.714.237 | 0 | 0 | 0 | 4.714.237 |
| 2010 | 7.512.381 | 3.527.020 | 0 | 0 | 0 | 3.527.020 |
| 2011 | 7.539.618 | 3.200.000 | 0 | 0 | 0 | 3.200.000 |
| 2012 | 7.570.908 | 2.540.320 | 1.093.570 | 0 | 1.446.750 | 0 |
| 2013 | 7.553.650 | 2.719.314 | 0 | 0 | 0 | 2.719.314 |
| Total | | 16.700.891 | 1.093.570 | 0 | 1.446.750 | 14.160.571 |

Fuente: Federación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición. 2015

Cataluña es una de las comunidades autónomas con mayor producción de RCD, por lo que se debe analizar la forma de minimizar este residuo. Se puede observar que el porcentaje de gestión de los RCD para los años 2009-2013 fue de un 37,9% y el uso de vertederos tiene un 57%. Conociendo el impacto ambiental que se genera al llevar los RCD a vertederos, es demandante para la comunidad de Cataluña generar una solución para que estos residuos se puedan reciclar o reutilizar dentro de la misma comunidad y minimizar los impactos generados.

2.2 Residuos de Construcción y Demolición

La Ley de residuos y suelo contaminado (Ley 22/2011) define como residuo cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseche o tenga la intención o la obligación de desechar. Más específicamente según el Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, residuo de construcción y demolición es cualquier sustancia u objeto que, cumpliendo con la definición de “residuo” se genera en una obra de construcción y demolición. Abarca las actividades consistentes en la construcción, reparación, reforma o demolición de un bien inmueble, como por ejemplo un edificio, carretera, puerto, aeropuerto, ferrocarril, canal, presa, instalación deportiva o de ocio, u otro análogo de ingeniería civil. También se consideran en este ámbito la realización de trabajo que modifiquen la forma o sustancia del terreno o del subsuelo, tales como excavaciones, inyecciones, urbanizaciones u otros análogos con exclusión de los residuos procedentes de industrias extractivas (CEDEX 2014).

Otra definición que se emplea para residuos de construcción y demolición, son aquellos que se generan en el entorno urbano y no se encuentran dentro de los comúnmente conocidos como Residuos Sólidos Urbanos (residuos domiciliarios y comerciales, fundamentalmente), ya que su composición es cuantitativa y cualitativamente distinta. Se trata de residuos, básicamente inertes, constituidos por: tierras, áridos mezclados, piedras, restos de hormigón, restos de pavimentos asfálticos, materiales refractarios, ladrillos, cristal, plásticos, yesos, ferrallas, maderas y, en general, todos los desechos que se producen por el movimiento de tierras y construcción de edificaciones nuevas y obras de infraestructura, así como los generados por la demolición o reparación de edificaciones antiguas (Landau 2006).

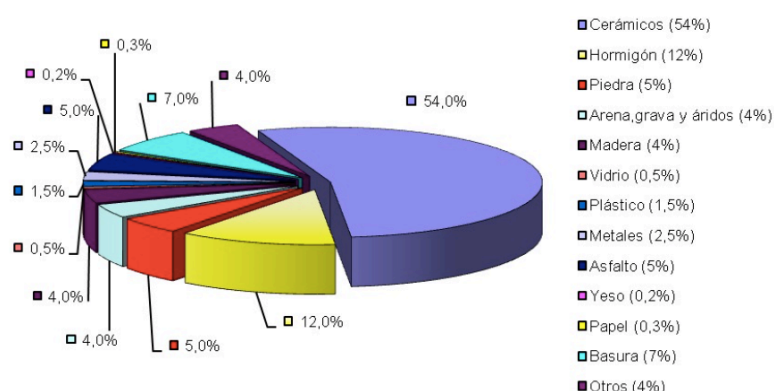
Según el Catálogo Europeo de Residuos de Construcción y Demolición (Parlamento Europeo 2001), éstas se dividen en:

- Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos.
- Madera vidrio y plástico.
- Mezclas bituminosas, alquitrán de hulla y otros productos alquitranados.
- Metales (incluidas sus aleaciones): aluminio, plomo, zinc, hierro, acero, etc.
- Tierra (incluida la excavada en zonas contaminadas), piedras y lodos de drenaje.
- Materiales de aislamiento y materiales de construcción que contienen amianto.

- Materiales de aislamiento y materiales de construcción que contienen amianto,
- Materiales de construcción a base de yeso.
- Otros: materiales con mercurio y otras sustancias peligrosas y residuos muy mezclados.

Los residuos de construcción y demolición están compuestos por una diversidad de materiales, dentro de los cuales se encuentran productos cerámicos, residuos de hormigón, material asfáltico y en menor medida componentes como madera, vidrio, plásticos, entre otros. En España la mayor parte de los residuos de demolición lo forman este tipo de materiales, indicando una homogeneidad en la composición de los RCD. La composición media de estos residuos se observa en la siguiente figura.

Figura 2 Composición de residuos de construcción y demolición.

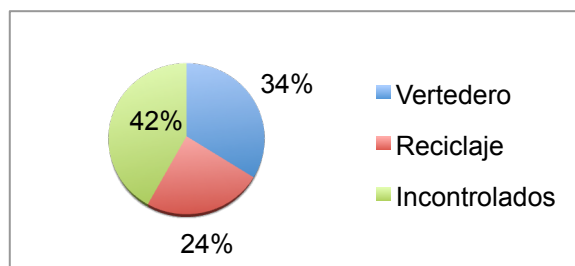


Fuente: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Ministerio de Fomento. 2010.

Gran parte de estos residuos se llevan a vertederos, creando un impacto visual y paisajístico, además de la contaminación medioambiental, ya que este material, con un adecuado tratamiento, se podría reciclar. Es por esto que es necesario una correcta gestión, para así reducir cantidades generadas de residuo y utilizarlo como un material secundario.

Datos oficiales de Cataluña 2009-2013, estiman una producción de RCD de 0,44 t/hab/año, una producción de RCD incontrolados de 0,32 t/hab/año, indicando una gestión de los RCD en Cataluña de un 42% de la producción de incontrolados y un reciclaje de 24%, llevando a vertedero un 34% de la gestión. Existe un descenso máximo de la producción en el periodo del 58% en el año 2013. La producción de 2013 se estabiliza en producciones de 0,5 t/hab/año (FERCD 2015).

Figura 3 Gestión residuos de construcción y demolición en Cataluña años 2009-2013.



Fuente: FERCD (2009-2013).

2.3 Legislación en la Gestión de Residuos de Construcción y Demolición

A través de los años, la Unión Europea y cada país de él, ha impuesto una serie de leyes, decretos o planes de acción, para reducir la incorrecta gestión de los residuos, reduciendo sus impactos a lo largo de los años. Se presenta, a continuación, la legislación más importante en cuanto a la gestión de residuos de construcción y demolición.

2.3.1 Unión Europea

Del Parlamento Europeo y del Consejo, se ha implantado la Directiva 2008/98/CE de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos, la cual establece medidas destinadas a proteger el medio ambiente y la salud humana mediante la prevención o reducción de los impactos adversos de la generación y gestión de los residuos, la reducción de los impactos globales del uso de los recursos y la mejora de la eficacia de dicho uso. Esta directiva es una de las más importantes a nivel Europeo en cuanto a la gestión de los residuos, ya que especifica que antes de 2020 deberá aumentarse hasta un mínimo del 70% de su peso la preparación para la reutilización, el reciclado y otra valorización de materiales, incluidas las operaciones de relleno que utilicen residuos como sucedáneos de otros materiales, de los residuos no peligrosos procedentes de la construcción y de las demoliciones.

Existe el Plan de Acción de la UE para la economía circular que propone alejarse del modelo de crecimiento lineal hacia un modelo circular, brindando cambios en las cadenas de suministro que afecten el diseño de productos, modelos de negocio, opciones de consumo y la prevención y gestión de los residuos (siendo este último uno de los factores más relevantes).

La Unión Europea brinda una hoja de ruta hacia una Europa eficiente en el uso de los recursos, exponiendo cómo se puede transformar la economía de la UE en una economía sostenible para el año 2050 dentro del marco de la Estrategia Europea 2020. En ella, se propone modos de aumentar la productividad de los recursos y desvincular el crecimiento económico del uso de los recursos y de su impacto medioambiental. También propone como objetivos la reducción en la generación per cápita de residuos, introducir como materias primas secundarias al reciclado y la reutilización y ser económicamente llamativas para operadores (Union Europea 2017).

También se ha desarrollado por medio de la Comisión Europea, una comunicación específica sobre las “Oportunidades para un uso más eficiente de los recursos en el sector de la construcción” con el fin de fomentar una utilización más eficiente de los recursos naturales disponibles, así como la prevención y valorización de los RCD (Agricultura & Ambiente 2016). En este proceso la comunicación propone estudiar como mínimo los siguientes ámbitos:

- La planificación de la demolición.
- La gestión de RCD.
- El porcentaje de material reciclado contenido en los materiales de construcción.
- La durabilidad de los materiales de construcción.

2.3.2 España

En España, interviene lo que es la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, que tiene por objeto la regulación de la gestión de los residuos impulsando medidas que prevengan su generación y mitiguen los impactos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente asociados a su generación y gestión, mejorando la eficiencia en el uso de los recursos (Jefatura de Estado 2011).

El Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción de gestión de los residuos de construcción y demolición (RCD). Establece las siguientes obligaciones: el productor de RCD ha de incluir en el proyecto de ejecución de obra un Estudio de Gestión de Residuos, el poseedor o la persona física o jurídica que ejecute la obra, ha de presentar un Plan de Gestión de RCD para la aplicación del mencionado estudio.

2.3.3 Cataluña

En el Consejo de Dirección de 16 de abril de 2014, la Generalitat de Catalunya, desarrolló un instrumento de planificación llamado Programa General de Prevención y Gestión de Residuos y Recursos de Cataluña 2013-2020. Es un programa orientado al origen de la generación de residuos; su objetivo es que la cantidad de residuos peligrosos de la construcción y la demolición destinados a preparación para la reutilización, reciclaje y otra valorización material, alcancen como mínimo el 70% en peso de los producidos para el año 2020 (ARC 2013).

El Decreto Legislativo 1/2009, de 21 de julio, por el que se aprueba el Texto refundido de la Ley reguladora de los residuos, establece que su objetivo es mejorar la calidad de vida de la ciudadanía de Cataluña, obtener un alto nivel de protección del medio ambiente y dotar a los entes públicos competentes por razón de la materia de los mecanismos de intervención y control necesarios para garantizar que la gestión de los residuos se lleva a cabo sin poner en peligro la salud de las personas, reduciendo el impacto ambiental y en particular previniendo los riesgos para el agua, el aire, la flora y la fauna, impedimento del abandono, el vertido y, en general, toda disposición incontrolada de residuos, fomentar la prevención y la reducción de la producción de los residuos y su peligrosidad, su reutilización, el reciclaje y otras formas de valorización material (Generalitat de Catalunya 2009).

El Decreto 89/2010, de 29 de junio, indica que se aprueba el Programa de Gestión de Residuos de las Construcción de Cataluña (PROGROC), se regula la producción y gestión de los residuos de la construcción y demolición, y el canon sobre la disposición controlada de los residuos de la construcción (Generalitat de Catalunya 2010).

2.4 Reciclaje de los Residuos de Construcción y Demolición

La actividad productiva que extrae materia prima directamente de la naturaleza normalmente utiliza el término de producción primaria. Cuando se habla de materiales e industria, el término de producción secundaria se considera como el proceso productivo que emplea materia prima secundaria (aquel material que ya ha sido utilizado y que es considerado como un residuo). Es por ello importante reconocer cuando se habla de producción primaria y secundaria, ya que en este trabajo se utilizan los residuos de construcción y demolición como materia “prima” para la realización de un nuevo producto, llamándose producción secundaria.

2.4.1 Tipos de Reciclaje en Cataluña

Según (Rueda Páramo 2011), para clasificar las plantas de reciclaje, se pueden tomar tres criterios distintos: por su grado de automatización, grado de admisión y capacidad de transporte.

2.4.1.1 Según grado de automatización

Se establecen tres niveles de tecnología en las plantas de acuerdo con el grado de separación de residuos dentro de los cuales se tienen: equipos de trituración autónomos, equipos de nivel intermedio y niveles superiores de tecnología.

Los equipos de trituración autónomos constan exclusivamente de tolvas de alimentación, sistemas de trituración, separadores magnéticos y cintas transportadoras.

Los equipos de nivel intermedio constan de equipos móviles en un emplazamiento fijo (plantas semifijas).

Los niveles superiores de tecnología sirven para tratar residuos de entrada de naturaleza muy variada. Son plantas estacionarias que pueden contener equipos como: sistemas de trituración, cabinas de triaje y separadores neumáticos, hidráulicos y/o magnéticos.

2.4.1.2 Según grado de admisión

Los RCD aceptados para ser tratados en plantas de reciclaje, establecen tres tipologías de residuos originales:

- Plantas que aceptan RCD muy variado (Categoría 1): son las plantas que aceptan RCD tanto orgánica e inorgánica, sin importar cuál está en mayor proporción.
- Plantas que acepta RCD variado (Categoría 2): predominando la fracción pétreo: incluye hormigón, cerámica, piedra natural, permitiendo que los niveles de impureza superen el 10%, restringiendo el contenido de yeso para evitar el contenido de compuestos de sulfatos en el producto final.
- Plantas que aceptan únicamente RCD seleccionados (Categoría 3): aceptan residuo que se compone de escombros de naturaleza pétreo (hormigón, piedra natural y/o materiales cerámicos), con niveles de impureza inferiores al 10%.

En las últimas dos plantas mencionadas el cálculo de nivel de impurezas son por medio de valoraciones subjetivas, ya que se basan en inspecciones visuales, dependiendo de la interpretación del personal de cada planta.

2.4.1.3 Según su capacidad de transporte

Plantas fijas – instalaciones ubicadas en un emplazamiento determinado, con autorización administrativa para realizar operaciones de tratamiento de RCD, cuya maquinaria (equipos de trituración) es fija; estas plantas no operan fuera del emplazamiento donde estén ubicadas.

Plantas móviles – están constituidas por maquinaria y equipos que se desplazan a las obras con una determinada autorización, para tratar en origen o en centros de tratamiento para realizar temporalmente determinados tratamientos.

2.4.2 Proceso de Reciclaje

Se expone el proceso de reciclaje de los residuos en la región estudiada una vez los RCD han sido tratados por las plantas de reciclaje.

Modelo catalán de residuos de construcción – este modelo de basa en acciones de prevención y en la máxima reutilización y recuperación material de residuos. Establece el principio de la responsabilidad del productor y fija un objetivo de reciclaje del 50% de los residuos para el 2012 (Maria & Borr 2013).

Como se puede observar en la Figura 4, los residuos de construcción, dependiendo de su grado de peligrosidad, se dividen en inertes, no peligroso y peligrosos.

- RCD inertes: pueden ser gestionados por medio de una planta, siendo un gestor autorizado para que lo lleve a un reciclaje ex situ en planta valorización, puede ser reutilizada in situ por medio de una planta móvil o puede desviarse a un depósito controlado.
- RCD no peligrosos: estos residuos pueden ir a una planta de gestor autorizado, para que su destino final sea un reciclaje ex situ en planta de valorización, o podría llevarse como un depósito controlado también.
- RCD peligrosos: estos residuos van directamente a tratamiento, valorización y disposición, dependiendo de su valorización.

Figura 4 Modelo catalán de residuos de construcción.



FONT: Palau Robert DISSENY: Lamosca

Fuente: Palau Robert.

Para el año 2012, se generan los últimos datos del INE sobre la generación y gestión de los RCD en España, los cuales se definen en la siguiente tabla:

Tabla 3 Generación y gestión de residuos de construcción y demolición en 2012.

| Tipo | Residuos Generados (t) | Residuos destinados a Valorización material (t) | Residuos destinados a Operaciones de relleno (t) | Residuos destinados a Incineración (t) | Residuos depositados en vertedero (t) |
|----------------|------------------------|---|--|--|---------------------------------------|
| No Peligrosos | 27.637.698 | 19.007.146 | 4.328.999 | 0 | 4.301.553 |
| Peligrosos | 66.156 | 3.878 | 0 | 0 | 62.278 |
| Totales | 27.703.854 | 19.011.024 | 4.328.999 | 0 | 4.363.831 |

Fuente: Instituto Nacional de Estadística (INE).

En la siguiente tabla, se incluye la distribución de Cataluña de las instalaciones de tratamiento incluidos los vertederos que reciben RCD.

Tabla 4 Número de instalaciones que reciben RCD en 2013.

| Comunidad Autónoma | Plantas de transferencia (n°) | Plantas de tratamiento fija (n°) | Plantas de tratamiento móvil (n°) | Vertederos (n°) |
|--------------------|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| Cataluña | 12 | 50** | 0 | 57 |

Fuente: Comunidades Autónomas y Empresas para la Gestión de Residuos Industriales Sociedad Estatal (EMGRISA).

** 45 disponen de partes móviles.

2.5 Utilización de los RCD en Hormigón de Aplicación Estructural y No Estructural

El aumento en la población mundial y el aumento de población en las zonas urbanas, provoca una expansión en el sector de la construcción, provocando un impacto crítico en los materiales básicos de construcción como ser los agregados, necesarios para realizar el hormigón. Debido a que los agregados son un recurso no renovable, al existir una alta demanda, se produce la escasez de dichos materiales. Es por esto que se estudia la opción de utilizar los residuos de construcción y demolición como una aplicación de hormigón tanto estructural como no estructural, ya que la tasa media de reciclaje de los residuos de construcción apenas es de un 20% aproximadamente (DES 2007).

El hormigón es el material más utilizado en el mundo. Aunque pueda presentar un impacto ambiental reducido por kilogramo comparado con otros materiales, el volumen de hormigón utilizado en el mundo hace que la industria del mismo tenga una larga contribución de emisiones globales de CO₂. La industria del cemento y del hormigón han adoptado numerosas medidas para mejorar el rendimiento medioambiental del hormigón: se ha mejorado la eficiencia del proceso, se ha reducido la energía no renovable y se ha reducido considerablemente el factor clinker (su cantidad en el cemento). Otra oportunidad que se propone para mejorar el perfil ambiental de la industria del concreto premezclado es la sustitución de una parte del agregado virgen por materiales reciclados. Los áridos reciclados provienen de la demolición de edificios e infraestructuras y pueden ser hormigón triturado, ladrillos triturados o tejas, entre otros. En la industria de la construcción, la introducción de un hormigón de material reciclado es compleja porque a veces se vende a un precio ligeramente superior al del hormigón ordinario y el usuario secundario puede tener la convicción de que un producto reciclado es de menor calidad y por lo tanto no es tan bueno como el "ordinario" (Kleijer et al. 2017).

Según la industria del concreto en Inglaterra, el resultado sostenible de incluir mayores volúmenes de materiales reciclados y secundarios en la fabricación de concreto no está claro. Debe tenerse en cuenta el impacto del transporte y la producción en comparación con el uso de material virgen disponible localmente. En términos simples, depende de las circunstancias de los proyectos individuales y de la oferta potencial. En general, cuando se transportan por carretera, el uso de áridos reciclados es sólo una opción de menor contenido de carbono que los agregados vírgenes cuando se utilizan a una distancia de 15 km de su fuente. (The Concrete Center 2013)

Algunos países de la UE han alcanzado altas tasas de reciclado para la fracción de piedras derivadas de hormigón, ladrillos y baldosas (áridos reciclados y arenas), pero la mayoría se utilizan tradicionalmente en ciertas aplicaciones de bajo grado en ingeniería civil como aplicaciones no unidas (terraplén, nivelación de carreteras). Sin embargo, este mercado de áridos reciclados se está saturando cada vez más. Por lo tanto, actualmente se investiga y promueve un cambio hacia aplicaciones concretas más estructurales, que requieren una mayor calidad de los agregados reciclados que para aplicaciones de bajo grado y la manera más efectiva de realizar esto es que la demolición sea de manera selectiva y no tener contaminantes que afecten la resistencia de los áridos (Vegas et al. 2015).

2.5.1 Aplicación Estructural

A continuación, se presentan estudios efectuados que evalúan el reciclaje de los RCD en aplicaciones estructurales.

En el estudio realizado por (Gonzalez & Etxeberria 2014), se produjo un hormigón de alto rendimiento utilizando 20%, 50% y 100% de RCA en la sustitución de agregados gruesos naturales. Se utilizaron tres tipos de RCA, producido por el triturado del hormigón original de 100, 60 y 40 MPa de resistencia a la compresión. Se analizaron las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de los hormigones de áridos reciclados y del hormigón convencional. Los resultados mostraron que, considerando las propiedades mecánicas, el reemplazo de agregados gruesos naturales del 100% sería posible cuando se produjeran RCA a partir de hormigón original con una resistencia mínima a la compresión de 60 MPa. Cuando se consideraron las propiedades de durabilidad, se podría utilizar hormigón producido con hasta un 50% de RCA en la producción del concreto de alto rendimiento.

En el estudio (Etxeberria et al. 2007), se utilizaron agregados gruesos reciclados obtenidos por hormigón triturado para la producción de hormigón; el hormigón fabricado con 100% de áridos gruesos reciclados tiene un 20-25% menos de resistencia a la compresión que el hormigón convencional. El hormigón fabricado con 100% de agregado grueso reciclado requiere gran cantidad de cemento para lograr una alta resistencia a la compresión y, en consecuencia, no es una propuesta económica, ya que no es rentable.

Según (De Brito et al. 2016), se evaluó los efectos de los agregados gruesos reciclados de alta calidad sobre el rendimiento del material y estructural del hormigón. Se encontró que los elementos de hormigón de alta calidad y el proceso de trituración y un proceso terciario industrial produjeron con éxito áridos reciclados con mejor calidad que lo normal. Los resultados de los diversos experimentos han demostrado que estos agregados reciclados gruesos pueden usarse en hormigón nuevo sin efectos perjudiciales insuperables.

(Laserna 2015) indica que de manera general, los resultados de resistencia a la compresión obtenidos del hormigón con RCD no presentan diferencias significativas con respecto al hormigón convencional, hasta una tasa de reciclado del 50%, por lo que la restricción del 20% de sustitución máxima que propone la EHE-08 parece ser excesiva.

(Duan & Poon 2014) presentan los resultados experimentales de un estudio de comparación de la diferencia de propiedades de agregados reciclados con cantidades variables de mortero adherido antiguo obtenido de diferentes fuentes. Se diseñan cuatro mezclas de hormigón (una con agregado natural y otras tres con agregados reciclados) con una resistencia a la compresión objetivo de 28 días variando de 30 MPa a 80 MPa. Los resultados experimentales muestran que el rendimiento de los agregados reciclados de diferentes fuentes varió mucho y que los agregados de reciclados de buena calidad puede utilizarse para producir hormigones de alta resistencia con propiedades endurecidas comparables a los del hormigón natural agregado.

En un estudio realizado en Egipto (Wagih et al. 2013), indica que en las principales ciudades egipcias hay existe la posibilidad de reemplazar el agregado grueso natural con agregado de concreto reciclado en hormigón estructural. Los resultados muestran que los escombros de hormigón pueden ser utilizados en la producción de hormigón con propiedades adecuadas para la mayoría de las aplicaciones de hormigón estructural en Egipto. Se observó una reducción significativa de las propiedades del hormigón agregado reciclado con 100% en comparación con el hormigón natural agregado, mientras que las propiedades hechas de una mezcla de 75% agregado natural y 25% agregado reciclado no mostraron cambios significativos en las propiedades de hormigón.

Hay varios estudios que evalúan el rendimiento mecánico del hormigón con RCD como (Bravo et al. 2015). Dentro de la investigación se analizó el comportamiento de durabilidad del hormigón elaborado con áridos reciclados a partir de varias plantas de reciclaje en Portugal. Se encontró que el uso de áridos reciclados causa una disminución en la densidad del hormigón; el uso de áridos reciclados es perjudicial para la calidad del hormigón endurecido en términos de su durabilidad.

El objetivo de (Tošić et al. 2015) fue determinar la elección óptima del tipo agregado y el escenario de transporte en la producción de hormigón, empleando un método de optimización multicriterio teniendo en cuenta los límites y limitaciones técnicas, económicas y ambientales. Se analizaron varios tipos de hormigón con diferentes tipos de agregados usados y diferentes escenarios de transporte. Los criterios de evaluación del sistema ambiental fueron elegidos de acuerdo con la metodología de análisis del ciclo de vida y los criterios de evaluación del sistema económico fueron determinados con el estado actual del mercado de concreto premezclado en Serbia. Los resultados han demostrado que el concreto con una relación de reemplazo del 50% del agregado grueso con RCD se puede presentar como solución óptima.

Existen varios usos para los residuos de construcción y demolición como agregados para el hormigón con aplicaciones estructurales, por lo que en Cataluña se puede utilizar este tipo de reutilización, adecuándose a la legislación europea, española y catalana. A medida que surjan estudios dentro de Cataluña que pruebe la eficacia del uso de RCD en aplicaciones estructurales, la legislación deberá ir cambiando para ser menos rigurosa en cuanto al porcentaje de los agregados reciclados dentro del hormigón, teniendo en cuenta que la correcta separación de RCD es el clave del éxito para este tipo de aplicación.

2.5.2 Aplicación No Estructural

A continuación, se presentan estudios efectuados que evalúan el reciclaje de los RCD en aplicaciones no estructurales.

Actualmente en el Reino Unido, los escombros de concreto no se envían a los vertederos, se tratan para que puedan tener una segunda vida en el sector de la construcción. De hecho, el concreto es un material que puede ser totalmente reciclado. En 2011, los agregados reciclados y secundarios representaron alrededor del 5,3% de todos los agregados utilizados en hormigón (The Concrete Center 2013). Este material se utiliza principalmente en la construcción de carreteras, pero los agregados de concreto reciclado (RCA) pueden contar hasta un 30% de los agregados en una mezcla de hormigón. En el Reino Unido materiales reciclados y materiales secundarios representan el 28% de los agregados totales utilizados en el mercado, el más alto de Europa. La industria del hormigón prefabricado ofrece mayores oportunidades para el uso de áridos reciclados de más del 20% (The Concrete Center 2013). Sin embargo, los siguientes puntos deben ser considerados al usar RCA:

- Puede contener contaminantes que pueden alterar la resistencia y durabilidad del hormigón.
- La resistencia del hormigón disminuirá hasta un 40%, y su permeabilidad aumentará junto con las deformaciones por arrastre y contracción (dependiendo de la cantidad de materiales reciclados utilizados).

Según (Etxeberria & Galindo 2016) el reciclaje de los residuos de construcción y demolición y su utilización como sustitución del árido natural es una de las maneras más sostenibles medioambientalmente para minimizar su depósito en vertederos y reducir el consumo de recursos naturales no renovables. En este estudio se utilizó lo que son los áridos reciclados mixtos (ARM), que son los productos más abundantes del tratamiento de RCD y están compuestos en su mayoría por una mezcla de hormigón, cerámicos y mezclas asfálticas. Se realizaron dos casos de estudio en cuanto a la utilización de ARM para bases de pavimentos y zanjas drenantes y para relleno de zanjas en Barcelona.

- Hormigón poroso para bases de pavimentos y zanjas drenantes: se pudo concluir que el hormigón poroso con una sustitución del 100% de árido natural por el reciclado mixto alcanzó unos valores de resistencia a compresión adecuados, indicando que los ARM son aptos para su uso en hormigones porosos para capas de base de pavimentos drenantes. Se comprobó también que los resultados obtenidos en las zanjas fueron similares o superiores a valores referenciados en diversos documentos técnicos como valores de permeabilidad habituales. Y de acuerdo al ensayo de lixiviación realizado, el material ARM no presenta ninguna restricción medioambiental para su utilización.
- Relleno de Zanjas: se analizó la aplicación de árido reciclado como relleno de zanjas de canalización de agua. El residuo de demolición a tratar para la producción del árido reciclado provenía de dos tipos de obras: reparación de zanjas y de zanjas de obra nueva. Aproximadamente se utilizó 50% de cada tipo de obra. Las propiedades físicas, químicas y mecánicas alcanzan los requerimientos necesarios, las muestras procedentes de la planta de reciclaje presentaron muy poca dispersión entre ellas, por lo que se puede asegurar que la variabilidad de la calidad del material reciclado en el tiempo es mínima. El árido reciclado obtenido del tratamiento del material de desecho procedente de la construcción o reparación de zanjas es adecuado para ser utilizado como nuevo material reciclado de relleno de zanjas.

El objetivo del estudio realizado por (Özalp et al. 2016) es investigar los criterios de utilización de los áridos reciclados obtenidos de los residuos de construcción y demolición en la producción de diversos elementos de hormigón premezclado y prefabricado. Al final de los estudios, estos áridos reciclados se consideraron viables para su uso en la construcción de adoquines, bordillos, tuberías de hormigón y elementos de tuberías de hormigón armado de acuerdo con las normas relacionadas. Las propiedades mecánicas y de durabilidad de los productos se observaron dentro de los límites requeridos. Es obvio que los áridos reciclados obtenidos de residuos construcción demolición pueden ser utilizados en nuevos productos como materia prima secundaria. Se ve que los problemas ambientales que se originan en el sector de la construcción pueden ser eliminados y una solución alternativa puede ser proporcionada usando estos agregados reciclados en nuevos productos de construcción. Se puede concluir que el uso de áridos reciclados en la producción de diversos elementos de hormigón es posible con separación y clasificación apropiadas.

Dentro del estudio realizado por (Marrero et al. 2017), se concluye que la huella ecológica total en todos los proyectos estudiados es principalmente la de la Huella de Carbono (97%) debido a la importancia de la maquinaria, los materiales de construcción y el transporte de materiales y residuos en este tipo de proyecto. La gestión de los RCD representa un promedio de aproximadamente el 50% de la huella ecológica en todos los proyectos. La mano de obra representa sólo el 1% de las fuentes de impacto.

En un estudio realizado por (Vegas et al. 2015), se mostró que las fracciones problemáticas en los agregados reciclados se reducen fuertemente o incluso se eliminan durante el tratamiento de clasificación de tecnología de infrarrojos cercanos (NIR), impulsando un mayor uso de agregados reciclados en aplicaciones de alto grado como la fabricación de hormigón. Como resultado, la calidad de los agregados mezclados reciclados se mejoró no solo en el nivel de los componentes no deseados (impurezas), sino también en cuanto al impacto en el medio ambiente (fuertemente reducida la lixiviación de sulfato, niveles reducidos de sulfato total y soluble).

(Puthussery et al. 2016) indica que aunque la resistencia a la compresión de las mezclas de hormigón sea comparable a la de del hormigón convencional, se observó una marcada disminución en la resistencia a la tracción a medida que aumentaba la cantidad de RCD en la mezcla de hormigón, concluyendo que los RCD pueden utilizarse para secciones ligeramente reforzadas, obras de hormigón en masa y construcción de carreteras.

Un estudio realizado en Escocia, (Medina et al. 2014) discuten los resultados sobre la sustitución parcial de agregados gruesos naturales con un agregado reciclado de mala calidad de residuos de construcción y demolición en la fabricación de hormigón de grado de resistencia de 30 MPa. Los resultados mostraron que el uso de hasta el 50% del agregado reciclado no tuvo efectos adversos sobre la trabajabilidad del hormigón fresco. Se encontró que los hormigones que contienen los agregados reciclados mezclados eran aptos para la construcción de viviendas. Las mejoras técnicas, económicas y medioambientales derivadas de la posible sustitución de áridos gruesos naturales por estos RCD contribuirían a la sostenibilidad de la industria de la construcción.

En el estudio de (Cardoso et al. 2016) se indica que logran un rendimiento similar al de agregados naturales y por lo tanto puede ser considerado en el uso aplicaciones no consolidadas, como ser materiales de relleno o capas de pavimento no consolidadas.

2.6 Análisis Ambiental de los Residuos de Construcción y Demolición

Es necesario una herramienta de diseño que investigue o evalúe esos impactos ambientales de los RCD y el análisis de ciclo de vida brinda una metodología en la que emplea el estudio del ciclo de vida de un producto, evaluándolas durante todas las etapas de su existencia: extracción, producción, distribución, uso y fin de vida.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta que permite identificar problemas ambientales relacionados tanto con productos terminados como con servicios, y permite enfocar esfuerzos para resolverlos.

También, existen estudios que indican que un ACV, aún a la fecha, tiene limitaciones e incertidumbres en los resultados (Garcia-Rey & Yepes 2012). Otro problema al que se enfrenta es a la subjetividad introducida. Indica, también, que cuando se realiza un estudio de ACV, hay un gran número de herramientas y bases de datos que producen resultados significativamente diferentes cuando se evalúa un sistema, dependiendo de los criterios del profesional, de las suposiciones inherentes y de las opciones hechas. Esto se podría resolverse estableciendo claramente cada hipótesis sobre la meta de la evaluación y la definición del alcance, así como también introduciendo el concepto de métodos estadísticos para minimizar la inexactitud y mejorar la fiabilidad de los datos utilizados.

(Hossain et al. 2016) han evaluado y comparado las consecuencias ambientales de la producción de agregados RCD por medio de un ACV. Los resultados revelan que en comparación con los agregados gruesos naturales, los agregados gruesos reciclados reducen el 65% de las emisiones de gases de efecto invernadero, con un ahorro del 58% de consumo de energía no renovable. Según el método IMPACT 2002+, se pueden ahorrar importantes daños a la salud, los recursos, el cambio climático y los ecosistemas al producir agregados reciclados de materiales de desecho en comparación con la producción e importación de agregados de fuentes vírgenes.

(Glavind 2009) indica que una vez que se lleva a cabo una evaluación del ciclo de vida de los gases de efecto invernadero, puede utilizarse para señalar la etapa más contaminante de la vida del hormigón, de manera que se puedan realizar mejoras al respecto. Una evaluación del ciclo de vida es, hasta ahora, el marco más completo para estimar la huella de carbono de un producto.

Para explicar los avances científicos de los estudios de ACV sobre el concreto, (Rodrigues et al. 2016) revisó varios estudios para caracterizar el escenario actual, manifestando que en la actualidad, es posible clasificar los estudios de ACV sobre hormigón en 3 límites de sistema: de cuna a puerta, de cuna a tumba y de cuna a cuna. Aunque la frontera más comúnmente usada es la cuna-a-puerta, la tendencia es avanzar al acercamiento de la cuna a cuna; en el ACV del uso de residuos reciclados como agregados en la producción de hormigón, se debe prestar mucha atención a los tipos de transporte utilizados en el proceso y a la distancia de la planta de procesamiento de residuos para asegurar ganancias considerables en el mayor número de categorías de impacto ambiental.

2.7 Aspectos Económicos de los Residuos de Construcción y Demolición

El factor económico juega un rol muy importante en cuanto a la utilización de residuos de construcción y demolición como producción secundaria, ya que así como debe cumplir con las especificaciones técnicas un RCD, también debe ser económicamente atractivo para los clientes y beneficioso medioambientalmente.

Comparando España de otros países europeos, se puede observar que carece de un porcentaje óptimo de reciclaje de RCD, mientras que en países como Finlandia, Austria o Reino Unido reciclan el 40-45% de los residuos básicos de construcción y demolición debido a los factores que impulsan el reciclaje, siendo uno de ellos la política de gestión de residuos de tipo económico (impuestos sobre el vertido) y legales (obligación de demoler selectivamente, acuerdos voluntarios, planificación y control) (Landau 2006). Esto es debido a que no existe un incentivo económico importante para que los clientes estén interesados en construir con RCD, así como también la desconfianza del mismo en que los RCD no cumplan satisfactoriamente las necesidades técnicas de la obra.

(Silva et al. 2017) sostiene que en la mayoría de los casos, los clientes, los productores de concreto y los contratistas reclaman la desconfianza con respecto a la viabilidad técnica de los agregados reciclados. Suponiendo que el producto cumpla con altos estándares de calidad, el uso de agregados reciclados en la fabricación de hormigón estructural es ampliamente aceptado en la comunidad científica como una alternativa realista a los agregados naturales. La experiencia ha demostrado que, aparte de los insuficientes incentivos fiscales, una de las principales excusas para no considerar el uso de agregados reciclados es la alta inconsistencia de sus propiedades. Dicho esto, también es cierto que los profesionales que trabajan en la mayoría de las plantas de reciclaje a menudo no están interesados en producir agregados reciclados razonablemente de alta calidad para aplicaciones de construcción de alta calidad o simplemente desconocen los métodos de procesamiento más adecuados para obtenerlos. En ambos casos, ya que la calidad del producto final puede variar diariamente y normalmente baja, la desconfianza respecto a su viabilidad técnica perdurará.

En el estudio realizado en Serbia por (Tošić et al. 2015) se demostró que el hormigón natural agregado con agregado de río tenía el precio más bajo que el agregado derivado del RCD; se llevó a cabo un análisis adicional para determinar qué medidas económicas deberían adoptarse para lograr igualdad en el costo de hormigón reciclado y agregado natural. El análisis identificó añadir impuestos sobre el agregado de los ríos, los impuestos sobre el relleno de tierras y los subsidios para el uso de RCD como medidas viables.

También, los costes del reciclaje dependen de la ubicación territorial, ya que los gastos de transporte, inventario, fabricación y eliminación puede contener consecuencias importantes en cuanto a los costes finales de un RCD.

Aunque la economía circular aún es hasta cierto punto nuevo para aplicaciones reales, es una transición necesaria para una sociedad más sostenible, no obstante es un reto ya que existen barreras (Bourguignon 2016a) como:

- Financiación: una transición hacia la economía circular incluye costes significativos, ya que se debe promover nuevos modelos de negocio, especialmente para las pequeñas y medianas empresas, debido a la falta de apoyo financiero e innovación.
- Incentivos económicos: incentivos para productores y recicladores para que trabajen en conjunto.
- Habilidades técnicas: para generar una economía circular es necesario contar con habilidades técnicas que actualmente no se tiene por parte de los trabajadores.
- Comportamiento del consumidor y modelos de negocios: estos tienen poco conocimiento de los beneficios potenciales de una economía circular y tienden a ser reacios a adoptar nuevos modelos de negocios.
- Gobernanza multinivel: para tener una economía circular, es necesario una acción en todos los niveles (internacional, europeo, nacional, local, negocios e individuos).

Es por esto muy importante reconocer que al hablar de una economía circular, se afecta a varias personas/empresas que engloban esta economía, ya que al emplearla se ven afectadas directamente.

2.8 Conclusiones Estado del Arte

Debido al crecimiento acelerado de la población mundial y la necesidad de construcción para satisfacer sus necesidades, da como consecuencia uno de los impactos ambientales más significativos - dentro de los cuales se destaca por este estudio - la generación de grandes residuos de construcción y demolición (RCD). La metodología de Análisis de Ciclo de Vida ayuda a conocer, medir y reducir estos impactos ambientales generados de la edificación, ayudando a valorizar la sostenibilidad de los elementos.

Las CCAA de España que generan más RCD son Cataluña, Madrid, Andalucía y Valencia como se puede observar en la siguiente tabla.

| CCAA | t/año |
|-----------|-----------|
| Cataluña | 3.340.178 |
| Madrid | 2.552.463 |
| Andalucía | 2.396.573 |
| Valencia | 1.937.936 |

Las toneladas anuales producidas por cada CCAA, es un indicativo específicamente para la producción controlada de RCD, por lo que no hay bases de datos que indiquen la información de la producción incontrolada, sino más bien un aproximado o lo que se supone de ello. En Cataluña, se especifica que los RCD son de tipo: incontrolados 42%, reciclaje 24% y vertedero 34%.

La composición de RCD en España en general, es homogéneo para todo el territorio del país; son residuos cerámicos, de hormigón, de piedra, entre otros, y su correcta división en las plantas de reciclaje puede brindar un mejor estudio en sus aplicaciones tanto estructurales como no estructurales.

La mala gestión de los RCD provocan gran contaminación de las aguas, suelo y/o aire, contribuyendo al cambio climático, afectando ecosistemas y vida humana. Es por esto que cada vez más se debe ir normalizando, por medio de legislación, la producción controlada de RCD, brindándole un reciclaje apropiado.

Para mejorar la gestión de los RCD, la Unión Europea, España y Cataluña, como Comunidad Autónoma, han realizado varias leyes, decretos, programas, entre otros para el aprovechamiento de los RCD. Diferencian notablemente entre la producción primaria y la producción secundaria. Informando que la producción primaria es una actividad productiva que extrae materia prima directamente de la naturaleza, mientras que la producción secundaria es el proceso productivo en el cual se empela como materia prima, a la que ha sido utilizado y considerado como residuo. Se espera que para el 2020, la cantidad de residuos peligrosos de construcción y demolición preparados como una producción secundaria alcancen como mínimo el 70% en peso de los producidos.

La industria del concreto en Inglaterra no tiene claro si el resultado es sostenible al incluir mayores volúmenes de materiales reciclados y secundarios en la fabricación de concreto; para ellos, depende del transporte de la producción secundaria.

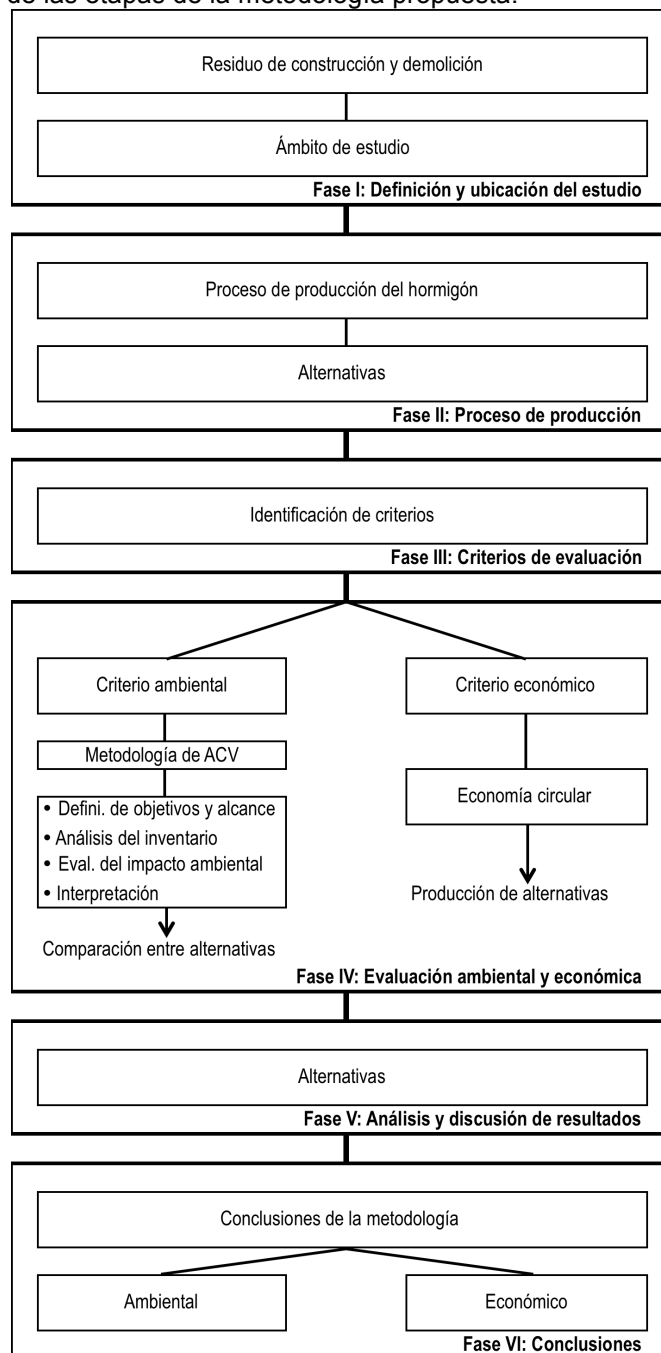
En la mayoría de los países de la UE utilizan el reciclaje para usos en aplicaciones de bajo grado en ingeniería civil; sin embargo se está investigando hacia aplicaciones más estructurales, realizando una demolición más selectiva para no tener contaminantes que afecten la resistencia de los áridos.

Se analiza la CCAA de Cataluña debido a la proximidad de la ubicación de Barcelona, pero sobre todo porque es la Comunidad con mayor producción de RCD en España, por lo que ésta investigación será relevante e importante para tratar de reducir estos residuos que afectan el medioambiente.

3 Metodología del Trabajo

En este capítulo se propone la metodología utilizada para evaluar los posibles impactos ambientales y los recursos empleados a través del ciclo de vida del producto. En este caso, se plantea estudiar los residuos de construcción y demolición, analizando los residuos que se utilizan en el proceso de producción del hormigón, delimitando el sistema del hormigón por medio de criterios de evaluación. Se realiza una evaluación ambiental y económica para identificar las alternativas que se pueden generar, dando lugar a las conclusiones de ambos criterios.

Figura 5 Esquema de las etapas de la metodología propuesta.



3.1 Fases de la metodología propuesta

Se indica paso a paso las fases de la metodología propuesta, detallando específicamente para el caso de estudio.

3.1.1 Fase 1: Definición y localización del estudio

3.1.1.1 Residuo de construcción y demolición

Se debe definir el residuo de construcción y demolición que se utiliza para el caso de estudio. Se tiene en cuenta el lugar donde se produce y los materiales que se utiliza para obtener ese producto final. Es importante conocer información acerca de los sistemas de producción y las plantas de reciclaje más cercanas y con la cual se pueda trabajar.

3.1.1.2 Ámbito de estudio

Se determina la zona de estudio, ya que condiciona las distancias de transporte, sistemas de reciclaje y costes de producción.

3.1.2 Fase 2: Proceso de producción

3.1.2.1 Proceso de producción del hormigón

En este estudio, se obtiene información acerca de las etapas del proceso de producción, las tecnologías empleadas, tipos de materias primas, combustibles, entre otros, mediante revisiones bibliográficas o proyectos similares ya realizados. Se toma en cuenta también las propiedades del comportamiento mecánico para poder identificar el tipo de hormigón específico para uso estructural y no estructural.

3.1.2.2 Alternativas

Debido a que se compara la producción de hormigón con áridos naturales y áridos reciclados, tanto del ámbito estructural y no estructural, se escogen alternativas que den el mejor uso.

Se definen diferentes alternativas de producción ya que se deben tener en cuenta parámetros para obtener un mismo comportamiento técnico que garantice una misma funcionalidad, entre ellos estos parámetros son: unidad funcional, materias primas, cantidad de residuo que puede ser empleado como parte de la materia prima, resistencia del producto, entre otros.

3.1.3 Fase 3: Criterios de evaluación

3.1.3.1 Identificación de criterios

Existen dos criterios de evaluación fundamentales para poder comparar el uso de residuos de construcción y demolición en la fabricación de hormigón, los cuales son el impacto medioambiental y el criterio económico.

La comprensión de saber qué impacto medioambiental tiene un producto es fundamental ya que con él, se puede llegar a conocer si es factible utilizar ciertos tipos de residuos como materias primas para la fabricación del hormigón y reducir los residuos generados derivados de la construcción, ya que como se habló en el estado del arte, estos residuos generados implican un gran problema ambiental mundial.

El criterio económico es importante también, ya que las decisiones son basadas dependiendo del factor económico, por lo que se debe conocer qué riesgo o beneficio económico conllevaría el realizar estos cambios en el hormigón.

3.1.4 Fase 4: Evaluación ambiental y económica

Con las alternativas presentadas, más la identificación de criterios para poder realizar una comparación entre productos, se realiza la evaluación ambiental y económica, definiéndose detalladamente cada una a continuación.

3.1.4.1 Criterio ambiental

Para tener en cuenta el criterio ambiental, es importante conocer la forma de producción del hormigón en el área designada de estudio, por lo cual será importante conocer ciertos criterios de la empresa a utilizar, siendo éstos:

- Proceso de producción
- Materias primas y combustibles empleados
- Distancia de transporte de las materias primas desde el sitio de generación hasta la planta de producción
- Tipo de transporte empleado
- Consumo energético
- Capacidad de producción de la planta
- Tipo de maquinaria y equipos
- Emisiones de CO₂ y residuos generados

Para conocer los impactos ambientales de los residuos de construcción y demolición, es necesario conocer cierta información de la planta de reciclaje de RCD a utilizar, siendo éstos:

- Proceso de reciclaje
- Tipo de residuos que entran a la planta
- Distancia de transporte desde el sitio de generación del residuo hasta la planta de reciclaje
- Tipo de transporte empleado
- Tipo y cantidad de combustible consumido
- Maquinaria empleada
- Consumo energético
- Tipo y gestión de los residuos generados. Distancia de transporte hasta el sitio de gestión

En el caso que los datos no se provean ya sea por medio de las empresas a utilizar, se maneja información obtenida por estudios previos, libros o de la fuente de la base de datos de ACV, que en este caso será una de las bases de datos europeas, Ecoinvent.

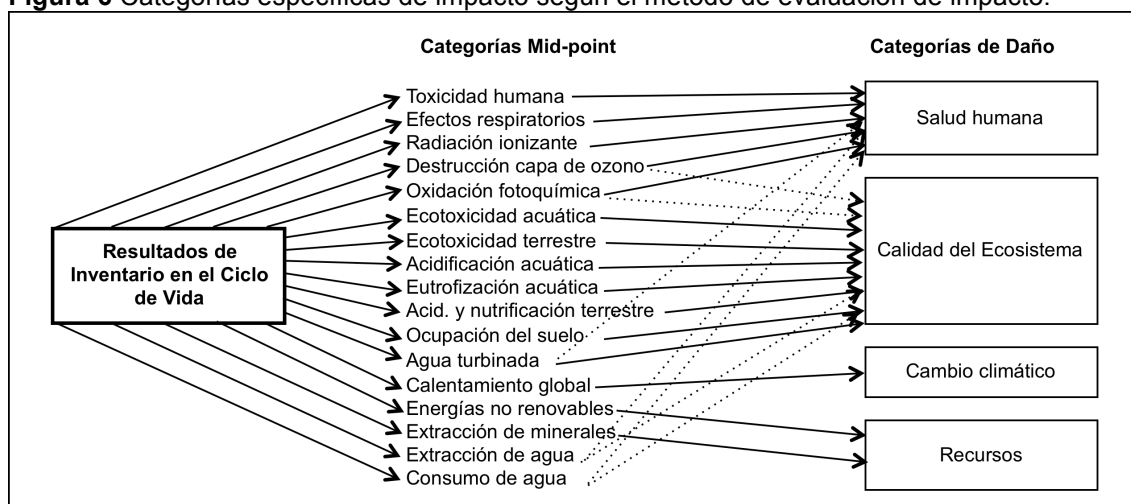
Una vez obtenidos los datos, se agrupan en categorías de impacto específicas de acuerdo con un método de evaluación de impacto, con el objetivo de clasificar, caracterizar, normalizar y valorar los impactos potenciales sobre los ecosistemas, la salud humana y el agotamiento de los recursos naturales.

El objetivo de la etapa de Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV) es evaluar la importancia de los impactos ambientales potenciales utilizando los resultados del impacto de ciclo de vida (ISO 14044), por lo que se han desarrollado varios métodos de evaluación del impacto (Bovea & Powell 2016), que pueden agruparse en dos tipos:

- Los métodos EICV de punto medio (mid-point) – EDIP, Cumulative Energy Demand (CED), CML, EIO-LCA, Impact 2002+, TRACI, eXoinvent, IPCC, BEES, ReCiPe, USEtox, BMVBS y
- Los métodos EICV de punto final (end-point) – Ecoindicator 95, Eco-Scarcity, EPS2000, Ecoindicator 99, Huella Ecológica, CSERGE, Impact 2002+, externE, ReCiPe).

Como programa informático para el estudio de un ACV específicamente involucrado en la construcción, el más utilizado es el Simapro, el cual también será utilizado en este caso de estudio; el programa incluye varios métodos para la evaluación de impactos descritos anteriormente, pero debido a varios estudios analizados sobre el ACV de la gestión de RCD por (Súarez 2015), se considera como método de evaluación el IMPACT 2002+, ya que se proporciona una implementación que combina mid-point y orientación al daño causado, relacionando los resultados del inventario del ACV con catorce categorías de mid-point a cuatro categorías de daño (Cámara 2012), como se puede apreciar en la Figura 6.

Figura 6 Categorías específicas de impacto según el método de evaluación de impacto.



Fuente: (Cámara 2012).

3.1.4.2 Criterio económico

Como criterio económico, se implementará el modelo lineal para conocer el impacto que tiene la utilización de RCD como agregados dentro de un hormigón estructural y no estructural; así como también se implementa el modelo circular, para conocer la afectación que tendría ésta utilización si se pudiera tener un ciclo de vida de cuna a cuna.

Para realizar un crecimiento sostenible dentro de la Unión Europea, es necesario utilizar los recursos de manera eficiente y sostenible, ya que en la actualidad el modelo lineal de crecimiento económico no ayuda a generar este crecimiento debido a que conlleva a muchos problemas, como por ejemplo, recursos naturales agotados, muchos residuos y emisiones negativas al ambiente.

Una solución a este problema es la reutilización de dichos residuos y utilizarlos como materia secundaria (economía circular). El concepto de economía circular se describe generalmente como el que los productos y los materiales que contienen son altamente valorados, a diferencia del modelo económico tradicional lineal, basado en un patrón de tomar-hacer-consumir-tirar. Este modelo de producción y consumo se basa en dos lazos complementarios inspirados en ciclos biológicos: uno para materiales biológicos y otro para materiales técnicos. En ambos casos, el objetivo es limitar lo más posible la fuga de recursos (Bourguignon 2016b).

Este trabajo se enfoca en realizar un estudio de economía lineal como circular para el hormigón estructural y no estructural.

3.1.5 Fase 5: Análisis y discusión de los resultados

3.1.5.1 Alternativas

En esta fase, se realiza una evaluación de las alternativas tanto para el criterio medioambiental como para el criterio económico, por medio de los resultados obtenidos al realizar la metodología de análisis de ciclo de vida y por medio de la economía lineal y circular para el criterio económico.

3.1.6 Fase 6: Conclusiones

Se analiza y se indican las conclusiones de los resultados obtenidos, presentando las conclusiones ambientales y económicas respectivamente.

3.2 Aplicación general de la propuesta metodológica

Se indica, a detalle, la aplicación específica del caso de estudio para todas las fases anteriores.

3.2.1 Fase 1: Definición y localización del estudio

3.2.1.1 Residuo de construcción y demolición

El RCD se puede utilizar para la producción de hormigones para así promover la reutilización de estos materiales. En este caso, se añaden como árido reciclado dentro de dos de las tres alternativas propuestas.

A continuación, se añaden las principales características de las alternativas de hormigón estudiadas.

Tabla 5 Dosificación de alternativas.

| Tipo | Arena | AN | AR | Cemento | Aditivo (%) | Agua | a/c |
|------------------------------------|-------|----------|-------|---------|-------------|------|------|
| Hormigón con áridos naturales | 765,1 | 1.206,97 | 0 | 300 | 1,40 | 165 | 0,55 |
| Hormigón con 25% áridos reciclados | 765,1 | 905,2 | 265,7 | 300 | 1,66 | 165 | 0,55 |
| Hormigón con 50% áridos reciclados | 1.018 | 1.527 | 435 | 240 | - | 144 | 0,6 |

3.2.1.2 Ámbito de estudio

El ámbito de estudio es Cataluña, ya que es la Comunidad Autónoma de España que genera más toneladas al año por habitante, así como es una de las CCAA que más empresas existen que reciclan RCD. La ubicación dentro de Cataluña que se realizará el estudio, es en Barcelona ciudad.

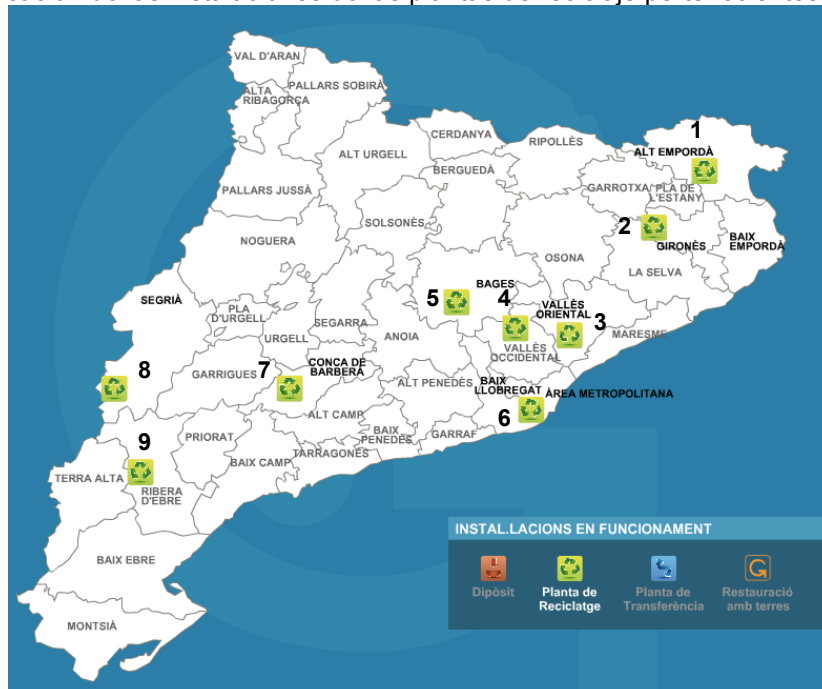
Se consideran las distancias de transporte de los RCD como materia prima hasta Barcelona ciudad de las plantas de reciclaje pertenecientes a la Gestora de Runes de Catalunya S.A. (GRC), siendo éstas:

1. **Peralada**, con una distancia al centro de Barcelona de 150km.
2. **Sant Julià de Ramis**, con una distancia al centro de Barcelona de 117km.
3. **Les Franqueses del Vallés**, con una distancia al centro de Barcelona de 45km.
4. **Viladecavalls**, esta instalación no está en funcionamiento.
5. **Callús**, con una distancia al centro de Barcelona de 70km.
6. **Port de Barcelona**, con una distancia al centro de Barcelona de 10km.
7. **L'Espluga de Francolí**, con una distancia al centro de Barcelona de 100km.
8. **Montoliu**, con una distancia al centro de Barcelona de 183km.
9. **Vinebre**, con una distancia al centro de Barcelona de 165km.

Debido a la importancia de la categoría de residuos de construcción y demolición, la distancia de transporte, por su cercanía con el área metropolitana de Barcelona, se considera una de las nueve plantas de reciclaje: Planta de les Franqueses del Vallés, dicha planta cuenta con una distancia hasta Barcelona de 45km.

La planta de Franqueses del Vallés es la única que se clasifica como una planta de Categoría 2 según su grado de admisión, que es una planta fija y estacionaria con un nivel tecnológico avanzado, la cual únicamente aceptan RCD seleccionados, brindando una mejor opción de áridos reciclados a los hormigones estudiados.

Figura 7 Ubicación de las instalaciones de las plantas de reciclaje pertenecientes a GRC.



Fuente: Gestora de Runes de la Construcció, S.A.

Debido a que se estudiarán dos tipos de hormigones, se utilizará un tipo de planta de reciclaje, ya que la Planta de les Franqueses del Vallés, por su categoría, puede utilizar su reciclaje como materia prima para el uso del hormigón estructural y no estructural, con la diferencia que para el hormigón estructural, se utilizará el estudio realizado por (Etxeberria et al. 2007) y para el hormigón no estructural el estudio realizado por (Rueda Páramo 2011) los cuales indican las dosificaciones de las alternativas estudiadas.

3.2.2 Fase 2: Proceso de producción

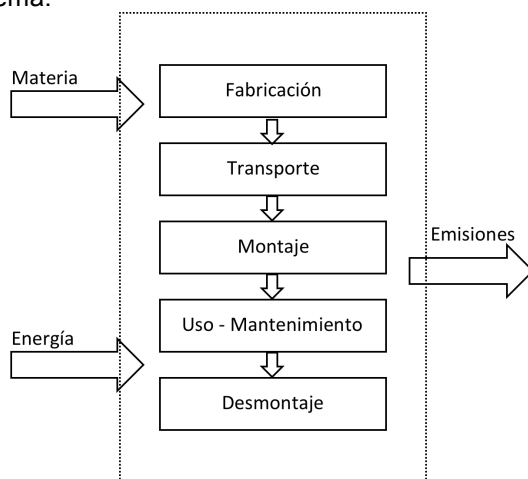
3.2.2.1 Proceso de producción del hormigón

Dependiendo de la planta en que se realice la producción del hormigón, se tendrá un efecto mayor o menor en cuanto al consumo de energía generada, utilización de las materias primas, emisiones producidas y los residuos generados.

Los principales materiales utilizados para la fabricación del hormigón incluyen: áridos (habitualmente en forma de arena, constituyendo aproximadamente un 34% de la composición del hormigón), grava (en aproximadamente un 48% de hormigón) - siendo estos los agregados naturales -, cemento (en un 12% de la composición del hormigón), agua (en proceso seco alrededor de un 6%), y cenizas volantes. Los agregados naturales consumen la mayor proporción de la mezcla de hormigón, el cemento es el ingrediente clave ya que hace posible la unión en los otros componentes (Medina 2006).

Para la producción de hormigón, las entradas consideradas en este trabajo son: materias (materias primas, recursos) y energía (combustible y electricidad). Se consideran como salidas todas las emisiones que se tiene dentro de la producción, como ser emisiones atmosféricas, aguas residuales y residuos sólidos), como se puede apreciar en la Figura 8.

Figura 8 Límites del sistema.



Fuente: (Rivela 2010)

Al realizar una producción de hormigón con agregados naturales y una producción con agregados reciclados, su única diferencia es que al realizarse el segundo, se agrega como materias el agregado reciclado en combinación con el agregado natural, indicando un impacto asociado en la obtención de cada materia y en su emisión.

3.2.2.2 Alternativas

Se escogen diferentes alternativas de producción de hormigón. Se plantea realizar una evaluación con tres tipos de alternativas:

Alternativa 1

- hormigón con áridos naturales (hormigón convencional)

Alternativa 2

- hormigón estructural con áridos reciclados (25%)

Alternativa 3

- hormigón no estructural con áridos reciclados (50%)

Se han escogido estas alternativas ya que así se podrá analizar la evaluación del impacto ambiental de un hormigón natural con los dos tipos de áridos reciclados presentes, además de esta manera se describen en los estudios que se utilizan para identificar las alternativas.

Para el caso del hormigón estructural, para la producción de hormigón reciclado, se realizará con 25% de árido reciclado, el resto con árido natural. Para el caso del hormigón no estructural, para la producción de hormigón reciclado, se realizará con 50% de árido reciclado, el resto con árido natural.

Tabla 6 Tipos de alternativas de hormigón.

| Alternativas | % árido natural | % árido reciclado |
|-----------------------------|-----------------|-------------------|
| Hormigón Convencional | 100 | 0 |
| Hormigón Estructural 25% | 75 | 25 |
| Hormigón No Estructural 50% | 50 | 50 |

3.2.3 Fase 3: Criterios de evaluación

3.2.3.1 Identificación de criterios

Los criterios a evaluar para este estudio, son el criterio medioambiental y económico. El primer criterio, se realiza por medio de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, mientras que el segundo criterio, se realiza por medio una economía lineal y circular, ejecutando una estimación de costes para cada economía.

3.2.4 Fase 4: Evaluación ambiental y económica

3.2.4.1 Criterio medioambiental. Metodología de análisis de ciclo de vida

- **Definición de objetivos y alcance**

- **Objetivo**

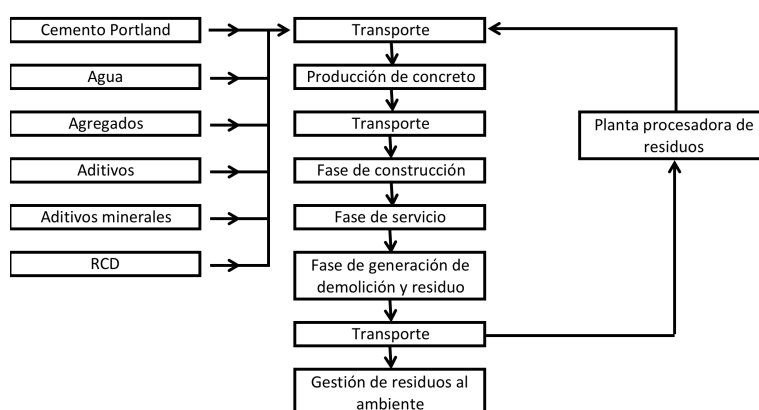
El objetivo de este estudio es establecer un análisis de ciclo de vida comparativo de hormigón con agregados naturales y hormigón con agregados reciclados, provenientes de los residuos de construcción y demolición; para luego comparar la economía respectiva de cada hormigón, para brindar los dos aspectos más importantes: el medio ambiente y la economía.

- **Alcance**

Como se puede apreciar en la Figura 9, se define el ciclo de vida del hormigón de la cuna a la tumba, indicando los materiales que comúnmente se utilizan. Debido a que a la planta de producción normalmente se llegan los materiales que necesitan, todos implican un transporte, se realiza la producción de concreto dentro de la planta, una vez culminado, se transporta al lugar donde se utilizará, cumple con su etapa de servicio y una vez desempeña su vida útil, entra a la fase de generación de demolición de residuos, a la que se transporta a la gestora de residuos que se utilizará o a una planta procesadora de residuos.

Se delimita como parte de este estudio, las entradas al proceso: el cemento, el agua, los agregados y los residuos de construcción y demolición, el resto de las entradas quedan excluidas.

Figura 9 Ciclo de Vida del Hormigón.

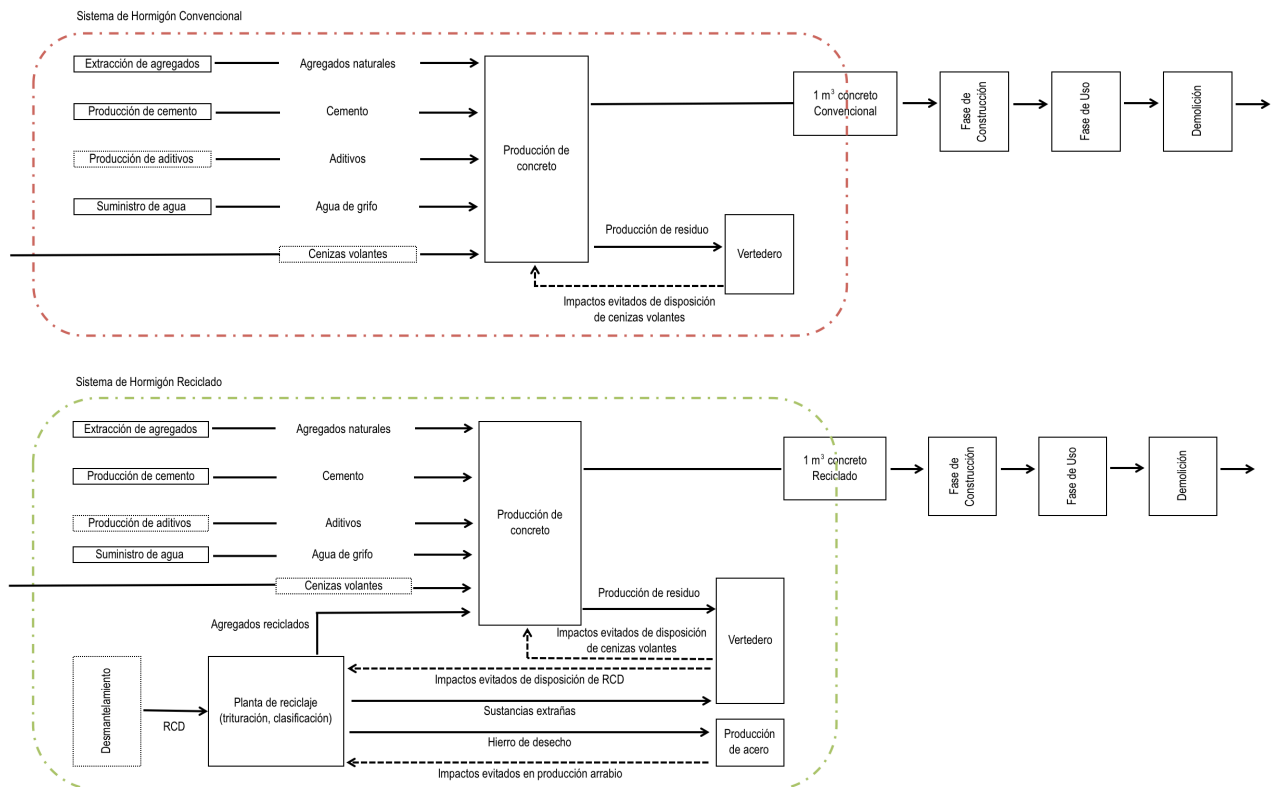


Fuente: (Rodrigues et al. 2016)

La Figura 10 muestra los sistemas convencionales de hormigón y de producción de hormigón reciclado considerados. Ambos sistemas incluyen la producción de materias primas y la ceniza volante como insumos incluyendo sus etapas de transporte y producen hormigón como una salida transportada al sitio de construcción.

El sistema de hormigón reciclado incluye además el tratamiento de residuos de construcción y demolición y los transportes relacionados. El sistema de reciclaje de concreto considera los impactos evitados relacionados con la reutilización de RCD. Se trata de la eliminación evitada de los RCD y su transporte, así como de los impactos evitados relacionados con la recuperación de chatarra de hierro obtenida de la planta de reciclaje.

Figura 10 Límites del sistema, procesos y materiales para el sistema convencional de concreto y el sistema de reciclaje de concreto.



Fuente: (Knoeri et al. 2013).

○ **Unidad funcional**

La unidad funcional es de 1m³ de hormigón, ya que debido a estudios como (Knoeri et al. 2013) optaron por este tipo de unidad funcional al realizar comparación de hormigón.

▪ **Alternativas o escenarios propuestos**

Se tienen tres tipos de alternativas, por lo que para poder comparar estos tipos de hormigones, es necesario tener una misma funcionalidad, debiendo tener un aspecto técnico similar.

Las primeras dos alternativas, es la producción de un hormigón convencional y estructural, que según el Artículo 37° Durabilidad del hormigón y de las armaduras, de la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) indica que la resistencia mínima recomendada sea de 25 MPa.

Mientras que la tercera alternativa, siendo la producción de un hormigón no estructural, según el Anejo 18° Hormigones de uso no estructural, de la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08), indica que la resistencia característica mínima será de 15 MPa.

Para el caso de las primeras dos alternativa, se utiliza la dosificación del hormigón con agregados naturales empleada por (Etxeberria et al. 2007), con la que se obtiene una resistencia de 35MPa, empleando 300kg de cemento, 165kg de agua y una relación de a/c de 0,55 y la dosificación del hormigón con agregados reciclados, empleando 300kg de cemento, 165kg de agua y una relación de a/c de 0,55.

En la tercera alternativa, se utiliza la dosificación del hormigón con agregados reciclados empleada por (Rueda Páramo 2011), con la que se obtiene una resistencia de 35MPa, empleando 240kg de cemento, 144kg de agua y una relación a/c de 0,6. Debido a que las producciones de hormigón en este caso deben tener la misma funcionalidad, se sobre diseña este tipo de hormigón.

- **Análisis de Inventario**

Para realizar el inventario de forma adecuada, se utilizaron datos recolectados a través de estudios previos (Súarez 2015), la Gestora de Runes de Catalunya que es la empresa que lleva la planta de reciclaje de RCD, empresas fabricantes de materiales de construcción, entre otros. Estos datos sirven para obtener información acerca del proceso de producción y reciclaje, capacidad de la planta de producción y reciclaje, extracción de los áridos, maquinaria empleada, consumo de electricidad y gasoil, transporte interno, distancias de transporte del residuo hasta el lugar de gestión, tipo y cantidad de residuos generados en el proceso de reciclaje.

- **Alternativas estudiadas**

- ✓ **Hormigón convencional con 100% árido natural**

En esta alternativa se emplea una cantidad de cemento de 300kg/m³ y 165kg de agua, teniendo una relación a/c de 0,55.

El proceso llevado a cabo de la producción de hormigón convencional con 100% de áridos naturales se puede observar en la Ilustración 1. Como se puede apreciar, se especifica el proceso de extracción de los agregados, ya que es lo que se enfoca este estudio, en el que se parte de la base de datos de Ecoinvent v3.3, al igual que el resto de las entradas al proceso de hormigón.

Ilustración 1 Proceso de producción de hormigón con áridos naturales.



Entradas

- Áridos naturales: Se toma como base el proceso existente para el material de áridos naturales, dentro del cual se incluye aparte de las entradas, las emisiones por el uso de explosivos debido a la extracción de árido natural y las emisiones al aire debido a la trituración de ese árido natural. Se agrega el consumo de materia prima de la grava natural y la arena de cantera. Se incluye la infraestructura de la mina, asumiendo que la producción anual es de 400.000t anuales, con una vida útil de 50 años. Se agrega el proceso de explosión para la extracción de la grava, ya que es la que comúnmente se utiliza en España. Se toma en cuenta maquinaria para trituración y cinta transportadora que incluye la obtención de materiales y su transporte. Se añade la electricidad utilizada en oficinas, iluminación y maquinaria adaptada al mix eléctrico español. Consumo de gasoil en la maquinaria de trituración y cinta transportadora. Se añade el fuelóleo en caldera necesaria en la planta de producción, se añaden también piezas de desgaste y el transporte interno de la mina. Como salida de esta entrada se obtiene el tratamiento del agua y la restauración de la mina.

En la siguiente tabla, se añade lo que se cambió del proceso ya establecido por Ecoinvent v3.3 de árido grueso natural.

Tabla 7 Proceso modificado de árido grueso natural.

| Nuevo Proceso | Unidad | Cantidad |
|--|------------------|----------|
| Árido grueso natural | kg | 1 |
| Ocupación del sitio de extracción | m ² a | 2.88E-04 |
| Transformación de sitios de alrededor | m ² | 3.51E-05 |
| Transformación del sitio de extracción | m ² | 2.88E-05 |
| Agua de origen natural | m ² | 1.35E-03 |

Tabla 8 Proceso de salida de árido grueso natural.

| Material | Unidad | Cantidad |
|---------------------------------|--------|----------|
| Disposición de residuos solidos | kg | 2.12E-06 |

En la siguiente tabla se delimita los materiales/ensamblajes y los procesos que se consideran para la fabricación de áridos naturales.

Tabla 9 Proceso de entrada de árido natural.

| Materiales | Unidad | Cantidad |
|---------------------------------------|----------------|-----------------|
| Árido grueso natural | kg | 1 |
| Infraestructura de la mina | p | 4.75E-11 |
| Aceite lubricante | kg | 2.50E-06 |
| Piezas de desgaste (acero) | kg | 5.10E-05 |
| Piezas de desgaste (caucho sintético) | kg | 4.00E-06 |
| Agua | kg | 1.22E-02 |
| Procesos | Unidad | Cantidad |
| Extracción con explosivos | kg | 1.36E-04 |
| Cinta transportadora | m | 9.51E-08 |
| Diesel para maquinaria | MJ | 1.40E-02 |
| Electricidad | kWh | 1.80E-03 |
| Restauración de la mina | m ² | 1.27E-06 |
| Fuelóleo en caldera | MJ | 4.91E-03 |
| Maquinaria | kg | 9.51E-05 |
| Transporte interno | tkm | 1.55E-05 |

- Cemento: se toma el proceso existente en la base de datos de Ecoinvent v3.3 llamado "Cement, Portland {CH} market for | Alloc Def, U", adaptándose al contexto español en cuanto a su mix eléctrico. El transporte se toma desde el supuesto que se utilizará el cemento de la empresa Cementos Molins, que está aproximadamente a 20km de la planta de hormigón supuesta que es la Planta Hanson ubicada en Barcelona.
- Agua: se utiliza el proceso existente en la misma base de datos llamado "Tap wáter {CH} market for | Alloc Def, U", agregando la cantidad necesaria de agua para producir 1m³ de hormigón; adicionando al mismo tiempo el transporte a planta.
- Planta de producción de hormigón: se asume que la maquinaria empleada en la producción es de un hormigón pre mezclado; asumiendo una vida útil de la infraestructura de 50 años, con producción anual de 1000,000t, utilizando el proceso ya existente en la base de datos llamado "Concrete mixing factory {GLO} market for | Alloc Def, U". Se agrega el consumo de diesel, fuelóleo, gas natural y electricidad generada en planta; así como también se añade el proceso ya establecido por la base de datos del aceite lubricante necesario.

Tabla 10 Entradas a la planta de producción de hormigón con 100% árido natural.

| Material | Unidad | Cantidad |
|---------------------------------------|---------------|-----------------|
| Árido grueso natural | kg | 1,206.97 |
| Árido fino natural | kg | 765.1 |
| Cemento Portland | kg | 300 |
| Agua | kg | 165 |
| Planta de producción | p | 4.57E-07 |
| Diesel (maquinaria) | MJ | 22.7 |
| Fuelóleo pesado en horno | MJ | 3.09 |
| Fuelóleo ligero en horno | kg | 13.3 |
| Gas natural | MJ | 1.16 |
| Electricidad | kWh | 4.36 |
| Aceite lubricante | kg | 0.119 |
| Piezas de desgaste (acero) | kg | 2.38E-02 |
| Piezas de desgaste (caucho sintético) | kg | 7.13E-03 |

Salidas

- Residuos de hormigón: se transportan desde la planta de producción hasta al vertedero de residuos inertes gestionado por Grupo Hera, al Depósito controlado de Coll Cardús, ubicado en Vacarisses, realizando una aproximación de distancia de 45km. Mientras que los residuos municipales son llevados a Ecoparc de Barcelona, ubicado a 3km de la planta de fabricación de hormigón.
- Aguas residuales: esta agua es tratada por medio de una estación depuradora, por lo que se usará la base de datos Ecoinvent v3.3 para añadir el agua residual proveniente de la fabricación del hormigón.

Tabla 11 Salidas a la planta de producción de hormigón con 100% árido natural.

| Material | Unidad | Cantidad |
|-------------------------------------|----------------|----------|
| Calor | MJ | 15.7 |
| Disposición de residuos de hormigón | kg | 16.9 |
| Disposición de residuos solidos | kg | 9.51E-02 |
| Aguas residuales | m ³ | 1.43E-02 |

✓ *Hormigón estructural con 25% áridos reciclados*

En esta alternativa se emplea una cantidad de cemento de 300kg/m³ y 165kg de agua, teniendo una relación a/c de 0,55.

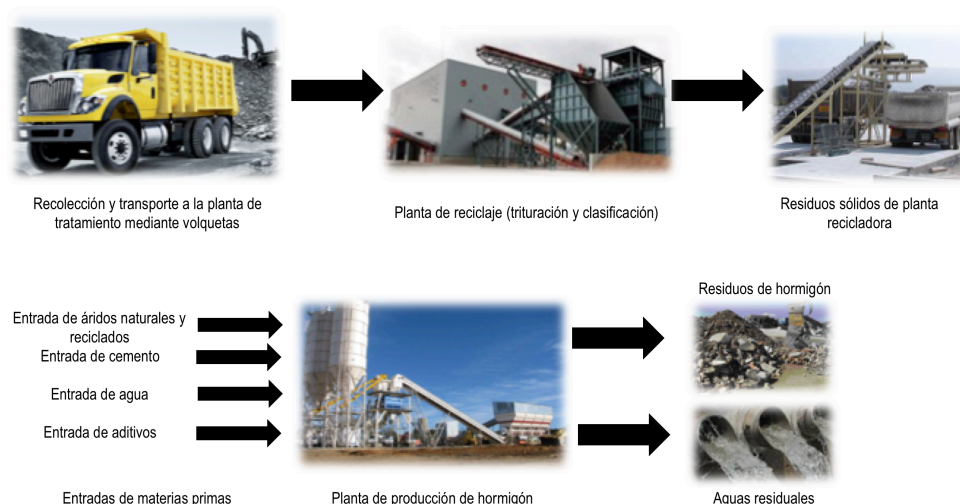
Se utiliza el 25% de áridos gruesos reciclados en sustitución del árido natural debido a que el estudio realizado por (Etxeberria et al. 2007) indica resistencia similares al comparar el hormigón convencional con esta alternativa.

Las entradas que se utilizan en este proceso son similares a la Alternativa 1, con la diferencia de árido grueso y fino empleado, así como la cantidad de aditivo, que es mayor.

Debido a que el árido reciclado es subproducto de la demolición de construcción, no se toma en cuenta los procesos anteriores a él, ya que su ciclo de vida inicia con el transporte del residuo del subproducto, como se puede apreciar en la Ilustración 2.

Ilustración 2 Proceso de producción de hormigón con áridos reciclados.

PROCESO DE PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN CON ÁRIDOS RECICLADOS



Entradas

Áridos Reciclados: Se inicia un nuevo proceso para el material de áridos reciclados, que parte del estudio realizado por (Súarez 2015). No se toma en cuenta el subproducto en si ya que todo el impacto que tiene lo absorbe su primera vida útil, por lo que sí se añade en este apartado es el transporte del subproducto que se asume una distancia de 10km hasta la planta de reciclaje de Les Franqueses, indicando que se transportan al año 400,000t de residuos hasta la planta de reciclaje. Se incluye la infraestructura de la planta de reciclaje, que incluye una trituradora de cono, reemplazo de piezas, uso del suelo y energía utilizada. Se asume que la planta tendrá una vida útil de 50 años, con capacidad de 200,000t anuales. Se agrega también agua, cinta transportadora, el diesel utilizado en la maquinaria, en el proceso de transporte, separación, trituración y separación granulométrica del subproducto. Como salidas se agregan las emisiones al aire provenientes del proceso de trituración del árido (siendo las mismas del árido natural).

Tabla 12 Proceso de entrada de 25% árido reciclado.

| Material | Unidad | Cantidad |
|---|--------|----------|
| Transporte del residuo | tkm | 7.00E-03 |
| Infraestructura de la planta de reciclaje | p | 5.00E-11 |
| Cinta transportadora | m | 9.51E-08 |
| Diesel empelado en maquinaria | MJ | 1.50E-02 |
| Electricidad | kWh | 2.00E-03 |
| Piezas de desgaste (caucho sintético) | kg | 4.00E-06 |
| Agua | kg | 1.22E-02 |

Tabla 13 Entradas a la planta de producción de hormigón con 25% árido reciclado.

| Material | Unidad | Cantidad |
|--|--------|----------|
| Infraestructura de la planta de producción | p | 4.57E-07 |
| Diesel empleado en maquinaria | MJ | 22.7 |
| Electricidad | kWh | 4.36 |
| Árido fino natural | kg | 765.1 |
| Árido grueso natural | kg | 905.2 |
| Árido grueso reciclado | kg | 265.7 |
| Fuelóleo (pesado) en horno | MJ | 3.09 |
| Fuelóleo (ligero) en horno | kg | 13.3 |
| Aceite lubricante | kg | 1.19E-02 |
| Gas natural | MJ | 1.16 |
| Cemento Portland | kg | 300 |
| Piezas de desgaste (acero) | kg | 2.38E-02 |
| Piezas de desgaste (caucho sintético) | kg | 7.13E-03 |
| Agua | kg | 165 |

✓ *Hormigón no estructural con 50% áridos reciclados*

En esta alternativa se emplea una cantidad de cemento de 240kg/m³ y 144kg de agua, teniendo una relación a/c de 0,6.

Se utiliza el 50% de áridos gruesos reciclados en sustitución del árido natural debido a que el estudio realizado por (Rueda Páramo 2011) indica resistencia similares al comparar el hormigón convencional con esta alternativa.

Las entradas que se utilizan en este proceso son similares a la Alternativa 2, con la diferencia de árido grueso y fino empleado, así como la cantidad de aditivo, que no se identifica en este proceso.

Debido a que el árido reciclado es subproducto de la demolición de construcción, no se toma en cuenta los procesos anteriores a él, ya que su ciclo de vida inicia con el transporte del residuo del subproducto, como se puede apreciar en la Ilustración 2.

Tabla 14 Proceso de entrada de 50% árido reciclado.

| Material | Unidad | Cantidad |
|---|--------|----------|
| Transporte del residuo | tkm | 7.00E-03 |
| Infraestructura de la planta de reciclaje | p | 5.00E-11 |
| Cinta transportadora | m | 9.51E-08 |
| Diesel empelado en maquinaria | MJ | 1.50E-02 |
| Electricidad | kWh | 2.00E-03 |
| Piezas de desgaste (caucho sintético) | kg | 4.00E-06 |
| Agua | kg | 1.22E-02 |

Tabla 15 Entradas a la planta de producción de hormigón con 50% árido reciclado.

| Material | Unidad | Cantidad |
|--|--------|----------|
| Infraestructura de la planta de producción | p | 4.57E-07 |
| Diesel empleado en maquinaria | MJ | 22.7 |
| Electricidad | kWh | 4.36 |
| Árido fino natural | kg | 1018 |
| Árido grueso natural | kg | 356 |
| Árido grueso reciclado | kg | 438 |
| Fuelóleo (pesado) en horno | MJ | 3.09 |
| Fuelóleo (ligero) en horno | kg | 13.3 |
| Aceite lubricante | kg | 1.19E-02 |
| Gas natural | MJ | 1.16 |
| Cemento Portland | kg | 240 |
| Piezas de desgaste (acero) | kg | 2.38E-02 |
| Piezas de desgaste (caucho sintético) | kg | 7.13E-03 |
| Agua | kg | 144 |

3.2.4.2 Evaluación del impacto del ciclo de vida

A continuación se presenta el análisis de los resultados del inventario, el cual indica la importancia de los impactos ambientales potenciales. Como se mencionó anteriormente, para llevar a cabo la evaluación de impactos, en este trabajo se escoge el método Impact 2002+, el cual propone una implementación que combina midpoint y orientación al daño causado, relacionando los resultados del inventario del ACV con 14 categorías midpoint a cuatro categorías de daño.

Las unidades en que se miden las categorías de impacto implementadas en este método, son:

- DALY, para la salud humana, representando la pérdida de años de vida y calidad de la misma debida a los efectos causadas por esos impactos ambientales.
- PDF·m²·yr para ecosistemas, como representación de la pérdida de especies vegetales por superficie y año debido a los impactos.
- MJ como medida de energía, para los recursos naturales.

Las categorías de impacto consideradas por este método son las siguientes:

- *Carcinogénicos (C) y No carcinogénicos (NC)*, efectos cancerígenos causados por emisiones de sustancias cancerígenas al aire, agua o suelo (riesgo toxicológico).
- *Respiración inorgánicos (IR)*, efectos respiratorios resultantes de la niebla de invierno, debido a las emisiones de polvo, sulfuros y óxidos de nitrógeno al aire.
- *Radiación ionizante (RI)*, resultado de la radiación radioactiva.
- *Agotamiento de la capa de ozono (ACO)*, efectos causados por el incremento de emisiones de radiación UV como resultado de la emisión de sustancias que contribuye al agotamiento del ozono estratosférico.
- *Sustancias orgánicas respiratorias (SOR)*, efectos respiratorios resultantes de la niebla de verano o smog fotoquímico, debido a las emisiones de sustancias orgánicas al aire.
- *Ecotoxicidad acuática (ECA) y Ecotoxicidad terrestre (ET)*, resultado de los problemas asociados a las emisiones de sustancias tóxicas al aire, agua y suelo.
- *Acidificación terrestre (ANT) y Acidificación acuática (AC)*, modificación del equilibrio químico natural de un entorno debido a un aumento de la concentración de elementos ácidos. La acidificación está ligada a la lluvia ácida, óxidos de nitrógeno, componentes volátiles orgánicos, amoníaco, metales pesados y contaminantes orgánicos persistentes.
- *Ocupación del suelo (OS)*, tiene impacto en la diversidad de especies, ya que dependen del tipo de uso del terreno y del tamaño del área. Es el resultado de la conversión del terreno para otro uso y se expresa en m² equivalentes de terreno cultivable por año.
- *Eutrofización acuática (EA)*, enriquecimiento excesivo de las aguas con nutrientes y los efectos biológicos adversos asociados.
- *Calentamiento global (CG)*, afecta la calidad de los ecosistemas, a la salud humana e incluso a los materiales.
- *Energías no renovables (ENR)*, representa el total de la energía primaria extraída, calculado a partir del PCI por unidad.
- *Extracción minerales (EM)*, representa el esfuerzo extra que experimentarán las futuras generaciones para la extracción de los recursos que queden.

▪ **Resultados y discusión de la evaluación del impacto del ciclo de vida**

Los resultados se presentan como caracterizaciones y ponderaciones para cada hormigón estudiado.

Caracterización – su objetivo es la aplicación de modelos a las categorías de impacto para obtener indicadores ambientales. Se agrupan todos los valores de las cargas ambientales que forman una categoría de impacto, para dar un valor global del impacto.

Ponderación – su objetivo es evaluar cuantitativamente la importancia relativa de las distintas categorías de impacto.

○ *Hormigón convencional con 100% árido natural*

Se muestra a continuación el gráfico indicando la caracterización para el hormigón convencional. Para cada categoría de impacto se ejecuta el porcentaje de la carga ambiental, demostrando que las cargas que mayor peso tienen dentro de las categorías de impacto son el cemento, infraestructura de planta, árido fino, árido grueso, diesel y electricidad.

Como se puede apreciar en la red simulada por SimaPro que se encuentra como parte de los Anexos, este indica que el impacto más grande del cemento se lo lleva su producción, el clínker, el transporte, y la utilización del combustible producido en refinerías de petróleo. Dentro de los áridos, se ve afectado mayormente debido por el diesel consumido en la maquinaria.

El cemento portland es el que mayor participación brinda en todas las categorías de impacto, especialmente en calentamiento global (93,26%), no carcinogénico (85,57%), radiación ionizante (82,60%) y energía no renovable (79,85%). El calentamiento global es el impacto más importante en esta etapa ya que las cementeras producen emisiones de dióxido de carbono (5% de la emisión mundial). Conlleva también un riesgo toxicológico importante debido a presenta emisiones al aire, agua y suelo que producen contaminación importante. La radiación ionizante en este caso es alta debido a que se recibe una radiación importante procedente de los materiales de construcción, en este caso específicamente del cemento. El impacto en energías no renovables es debido a la cantidad importante de energía primaria brindada para la producción del cemento que es significativa.

El impacto debido a la infraestructura en planta afecta mayormente a las categorías de impacto de energías no renovables (28,04%) debido a la cantidad de energía primaria brindada para el funcionamiento de la planta, eutrofización acuática (16,03%), ocupación del suelo (8,86%) debido a que es una planta que necesita una parcela importante de tierra y su uso es exclusivo para la producción y carcinogénicos (4,76%) ya que emiten sustancias carcinógenas al aire, agua y suelo.

El impacto debido a los áridos finos naturales afecta mayormente a las categorías de impacto de ocupación del suelo (23,47%), sustancias orgánicas respiratorias (12,06%), respiración inorgánicos (11,40%) y agotamiento de la capa de ozono (10,78%), todo esto debido a la extracción del materiales en el suelo y emisiones al aire.

El impacto debido a los áridos gruesos naturales afecta mayormente a las categorías de impacto de ecotoxicidad acuática (78,76%), ecotoxicidad terrestre (73,64%), sustancias orgánicas respiratorias (26,25%) y ocupación del suelo (22,57%) todo esto debido a la extracción del materiales del suelo y emisiones al aire, agua y suelo.

El impacto debido al diesel afecta mayormente a las categorías de impacto de sustancias orgánicas respiratorias (4,79%), respiración inorgánicos (4,29%), acidificación terrestre (3,74%) y agotamiento de la capa de ozono (3,02%), debido a que se emiten sustancias tóxicas al aire, suelo y agua.

El impacto debido a la electricidad afecta mayormente a las categorías de impacto de radiación ionizante (10,24%) debido a la radiación radioactiva presente en su producción, agostamiento de la capa de ozono (2,81%), energías no renovables (2,58%) y eutrofización acuática (1,24%), debido a la emisión de sustancias tóxicas al aire, suelo y agua.

El resto de las cargas ambientales tienen poca influencia en las categorías de impacto como se puede apreciar en la Gráfica 1.

Gráfica 1 Caracterización hormigón convencional.

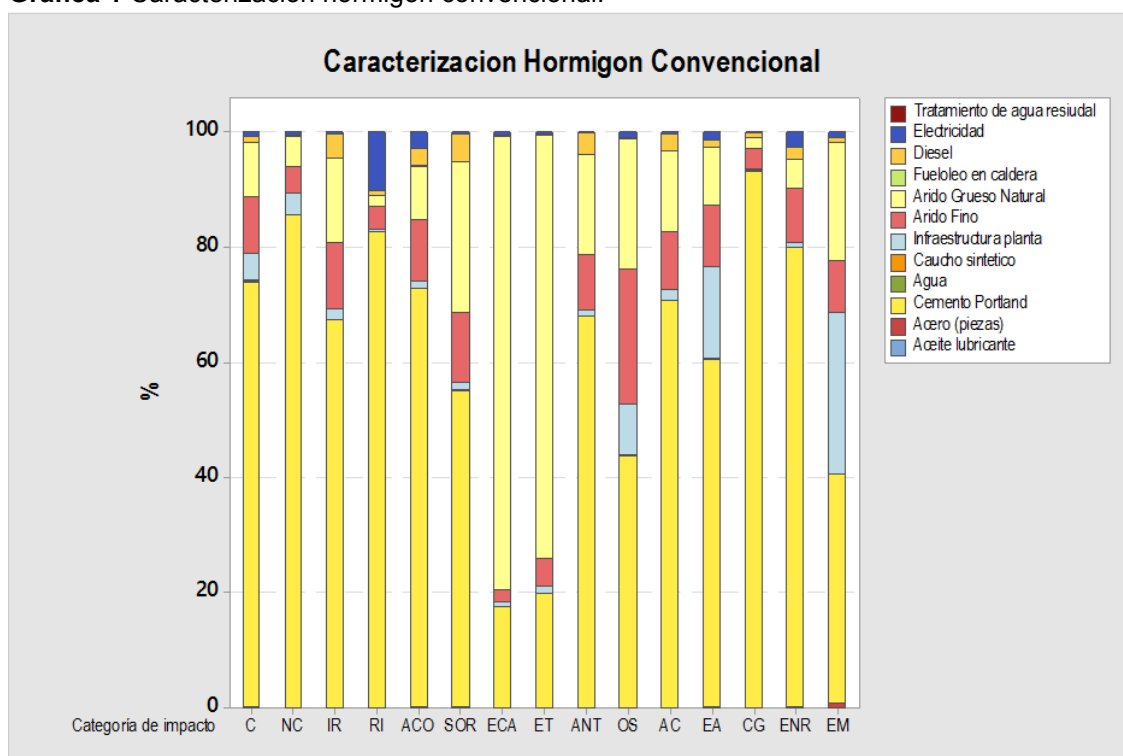


Tabla 16 Caracterización hormigón convencional en porcentaje.

| Categoría de Impacto | Cemento (%) | Infraestructura planta (%) | Árido fino (%) | Árido grueso (%) | Diesel (%) | Electricidad (%) |
|----------------------|-------------|----------------------------|----------------|------------------|------------|------------------|
| C | 73.59 | 4.76 | 9.75 | 9.35 | 1.24 | 0.60 |
| NC | 85.57 | 3.81 | 4.56 | 5.22 | 0.26 | 0.40 |
| IR | 67.35 | 1.82 | 11.40 | 14.73 | 4.29 | 0.28 |
| RI | 82.60 | 0.34 | 3.89 | 2.13 | 0.55 | 10.24 |
| ACO | 72.78 | 1.11 | 10.78 | 9.25 | 3.02 | 2.81 |
| SOR | 54.83 | 1.43 | 12.06 | 26.25 | 4.79 | 0.27 |
| ECA | 17.49 | 0.90 | 2.14 | 78.76 | 0.26 | 0.40 |
| ET | 19.87 | 1.22 | 4.77 | 73.64 | 0.22 | 0.21 |
| ANT | 68.15 | 1.00 | 9.46 | 17.41 | 3.74 | 0.18 |
| OS | 43.82 | 8.86 | 23.47 | 22.57 | 0.20 | 0.99 |
| AC | 70.68 | 1.87 | 10.20 | 13.91 | 2.95 | 0.28 |
| EA | 60.25 | 16.03 | 10.65 | 10.00 | 1.43 | 1.24 |
| CG | 93.26 | 0.47 | 3.31 | 1.93 | 0.77 | 0.20 |
| ENR | 79.85 | 0.94 | 9.29 | 4.93 | 2.17 | 2.58 |
| EM | 39.75 | 28.04 | 9.05 | 20.67 | 0.79 | 0.78 |

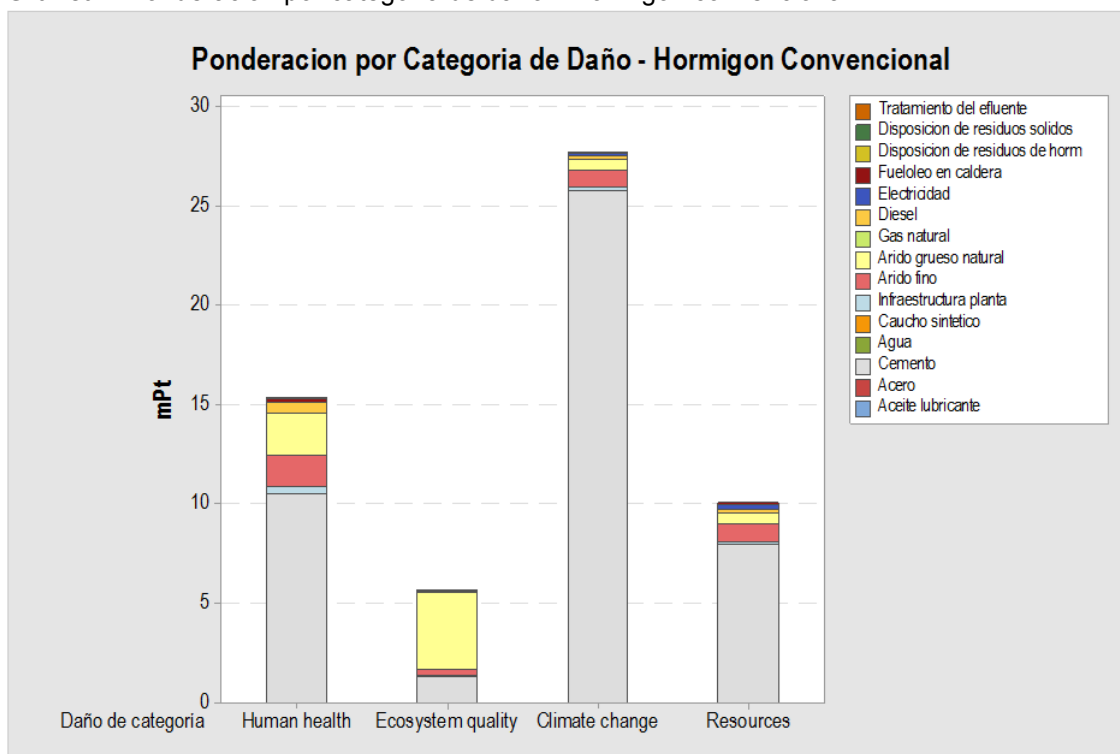
La ponderación realizada en la Gráfica 2, se trata en el nivel de categoría de daño; consiste en una valoración subjetiva de los resultados, sin embargo son aceptados por la comunidad científica. Se evalúan las cuatro categorías de daño con las cargas ambientales de la producción del hormigón convencional.

La unidad uPt indica los puntos que es la unidad empleada por el programa para agrupar las distintas categorías de impacto en categorías de daños en el proceso de ponderación.

| Categoría de daño | Unidad | Total |
|------------------------|--------|-------|
| Salud humana | uPt | 15.38 |
| Calidad del ecosistema | uPt | 5.69 |
| Cambio climático | uPt | 27.84 |
| Recursos | uPt | 10.21 |

Como se puede apreciar en la Gráfica 2, en las cuatro categorías de daño, la carga ambiental más significativa es el cemento, seguida del árido grueso natural, árido fino natural, esto es debido a la extracción de árido natural y la energía utilizada para la producción del árido reciclado. El diesel sobresale en la categoría de daño de salud humana como una carga ambiental significativa.

Gráfica 2 Ponderación por categoría de daño – hormigón convencional.



○ *Hormigón estructural con 25% áridos reciclados*

Se muestra a continuación la Gráfica 3 indicando la caracterización para el hormigón estructural con 25% de áridos reciclados. Para cada categoría de impacto se ejecuta el porcentaje de la carga ambiental, demostrando que las cargas que mayor peso tienen dentro de las categorías de impacto son el cemento, infraestructura de planta, árido fino, árido grueso natural y reciclado, diesel, electricidad y fuelóleo.

Como se puede apreciar en la red simulada por SimaPro que se encuentra como parte de los Anexos, este indica que el impacto más grande del cemento se lo lleva su producción, el clínker, el transporte, y la utilización del combustible producido en refinerías de petróleo. Dentro de los áridos, se ve afectado mayormente debido al árido natural y por el diesel consumido en la maquinaria.

El cemento portland es el que mayor participación brinda en todas las categorías de impacto, especialmente en radiación ionizante (79,67%), calentamiento global (78,01%), no carcinogénico (68,64%), y energía no renovable (63,11%). El calentamiento global es importante en esta etapa ya que las cementeras producen emisiones de dióxido de carbono (5% de la emisión mundial).

Conlleva también un riesgo toxicológico importante debido a que presenta emisiones al aire, agua y suelo que producen contaminación importante. La radiación ionizante en este caso es alta debido a que se recibe una radiación importante procedente de los materiales de construcción, en este caso específicamente del cemento. El impacto en energías no renovables es debido a la cantidad importante de energía primaria brindada para la producción del cemento que es significativa.

El impacto debido a la infraestructura en planta afecta mayormente a las categorías de impacto de extracción de minerales (18,85%), eutrofización acuática (11,31%), ocupación del suelo (5,91%) debido a que es una planta que necesita una parcela importante de tierra y su uso es exclusivo para la producción y carcinogénicos (3,38%) ya que emiten sustancias tóxicas al aire, agua y suelo.

El impacto debido a los áridos finos naturales afecta mayormente a las categorías de impacto de ocupación del suelo (15,66%), sustancias orgánicas respiratorias (9,70%), respiración inorgánicos (8,84%) y agotamiento de la capa de ozono (8,30%), todo esto debido a la extracción del materiales en el suelo y emisiones al aire.

El impacto debido a los áridos gruesos naturales afecta mayormente a las categorías de impacto de ecotoxicidad acuática (66,87%), ecotoxicidad terrestre (57,72%), sustancias orgánicas respiratorias (15,83%) y ocupación del suelo (11,30%) todo esto debido a la extracción del materiales del suelo y emisiones al aire, agua y suelo.

El impacto debido a los áridos reciclados afecta mayormente a las categorías de impacto de extracción de minerales (35,57%), ocupación del suelo (32,52%), eutrofización acuática (29,80%) y carcinogénicos (27,23%).

El impacto debido al diesel afecta mayormente a las categorías de impacto de sustancias orgánicas respiratorias (3,85%), respiración inorgánicos (3,32%), acidificación terrestre (3,08%) y acidificación acuática (2,34%), debido a que se emiten sustancias tóxicas al aire, suelo y agua.

El impacto debido a la electricidad afecta mayormente a las categorías de impacto de radiación ionizante (3,64%) debido a la radiación radioactiva presente en su producción, carcinogénicos (2,75%), energías no renovables (2,15%) y agotamiento de la capa de ozono (1,85%), debido a la emisión de sustancias tóxicas al aire, suelo y agua.

El impacto debido al fuelóleo afecta mayormente a las categorías de impacto de ocupación del suelo (4,13%), agotamiento de la capa de ozono (2,42%), no carcinogénicos (1,44%) y extracción de minerales (1,41%).

El resto de las cargas ambientales tienen poca influencia en las categorías de impacto como se puede apreciar en la siguiente gráfica.

Gráfica 3 Caracterización hormigón estructural con 25% árido reciclado.

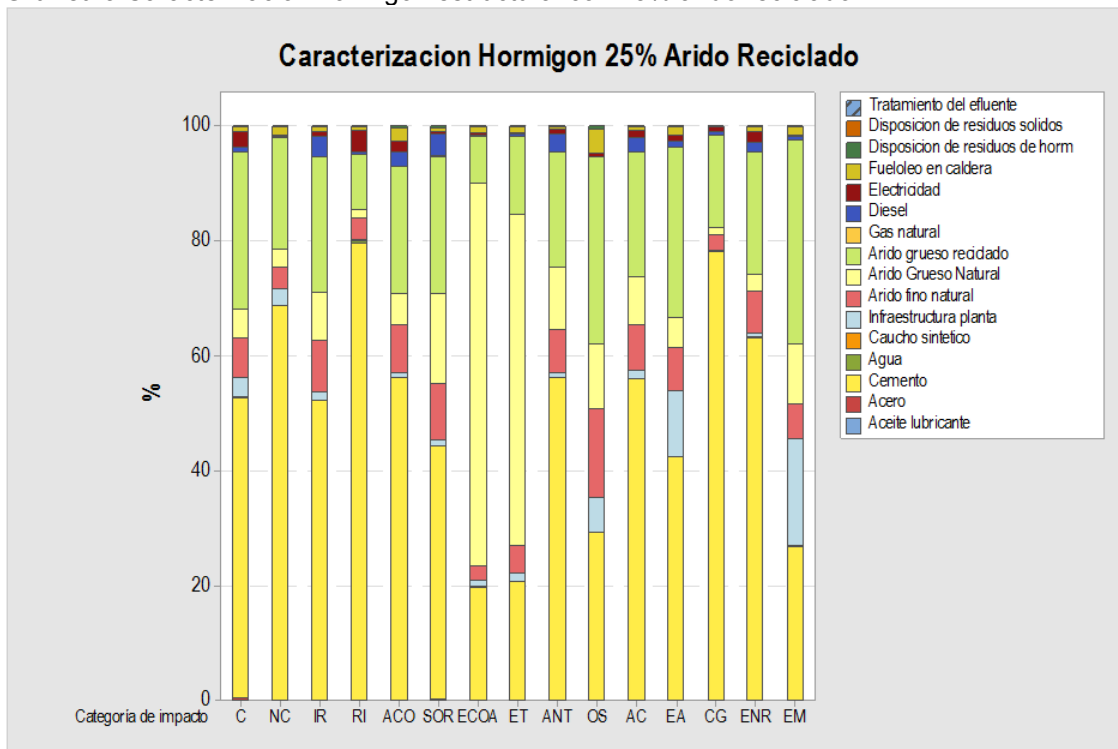


Tabla 17 Caracterización hormigón estructural con 25% árido reciclado.

| Categoría de Impacto | Cemento (%) | Infraestructura planta (%) | Árido Fino Natural (%) | Árido Grueso Natural (%) | Árido reciclado (%) | Diesel (%) | Electricidad (%) | Fuelóleo (%) |
|----------------------|-------------|----------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------|------------|------------------|--------------|
| C | 52.31 | 3.38 | 6.93 | 4.98 | 27.23 | 0.88 | 2.75 | 0.82 |
| NC | 68.64 | 3.05 | 3.65 | 3.14 | 19.38 | 0.21 | 0.28 | 1.44 |
| IR | 52.23 | 1.41 | 8.84 | 8.56 | 23.74 | 3.32 | 1.04 | 0.62 |
| RI | 79.67 | 0.33 | 3.76 | 1.54 | 9.61 | 0.53 | 3.64 | 0.63 |
| ACO | 56.09 | 0.86 | 8.30 | 5.35 | 22.38 | 2.33 | 1.85 | 2.42 |
| SOR | 44.08 | 1.15 | 9.70 | 15.83 | 23.86 | 3.85 | 0.52 | 0.55 |
| ECA | 19.80 | 1.02 | 2.42 | 66.87 | 8.14 | 0.29 | 0.33 | 1.02 |
| ET | 20.77 | 1.27 | 4.98 | 57.72 | 13.60 | 0.23 | 0.17 | 1.13 |
| ANT | 56.08 | 0.83 | 7.78 | 10.74 | 20.11 | 3.08 | 0.80 | 0.40 |
| OS | 29.25 | 5.91 | 15.66 | 11.30 | 32.52 | 0.13 | 0.54 | 4.13 |
| AC | 55.97 | 1.48 | 8.07 | 8.26 | 21.83 | 2.34 | 1.36 | 0.48 |
| EA | 42.50 | 11.31 | 7.51 | 5.29 | 29.80 | 1.01 | 0.90 | 1.41 |
| CG | 78.01 | 0.39 | 2.77 | 1.21 | 16.13 | 0.65 | 0.62 | 0.14 |
| ENR | 63.11 | 0.74 | 7.34 | 2.92 | 21.12 | 1.72 | 2.15 | 0.54 |
| EM | 26.72 | 18.85 | 6.09 | 10.42 | 35.57 | 0.53 | 0.25 | 1.41 |

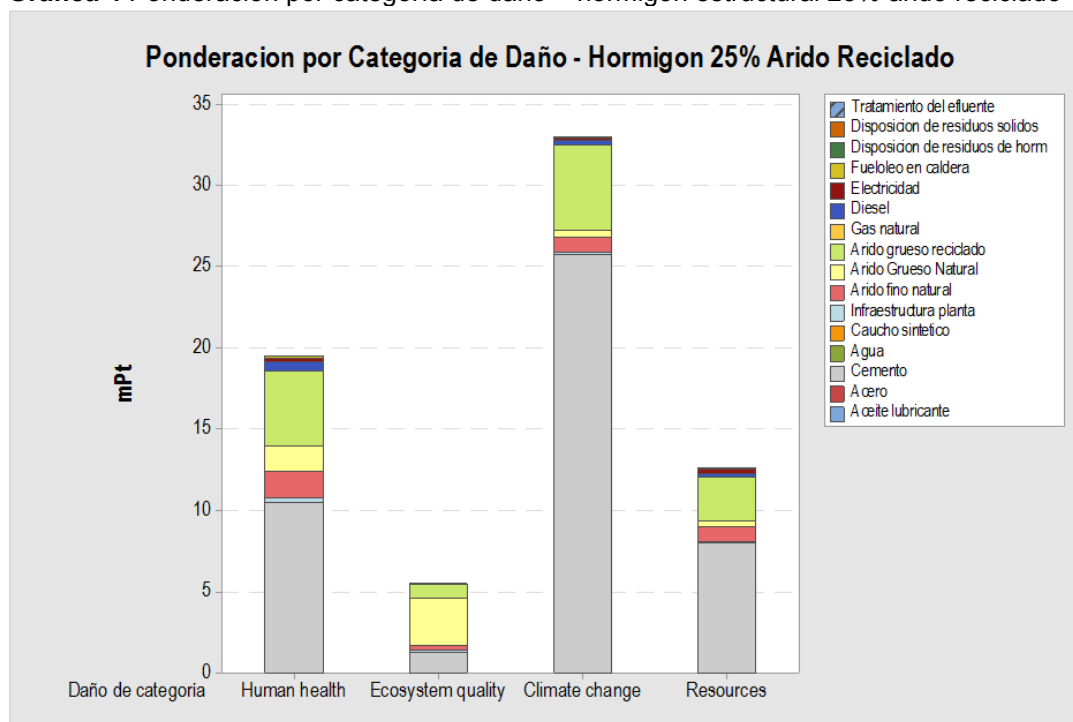
La ponderación realizada en la Gráfica 4, se trata en el nivel de categoría de daño; consiste en una valoración subjetiva de los resultados, sin embargo son aceptados por la comunidad científica. Se evalúan las cuatro categorías de daño con las cargas ambientales de la producción del hormigón estructural con 25% de áridos reciclados.

La unidad uPt indica los puntos que es la unidad empleada por el programa para agrupar las distintas categorías de impacto en categorías de daños en el proceso de ponderación.

| Categoría de daño | Unidad | Total |
|------------------------|--------|-------|
| Salud humana | uPt | 19.59 |
| Calidad del ecosistema | uPt | 5.54 |
| Cambio climático | uPt | 33.18 |
| Recursos | uPt | 12.77 |

Como se puede apreciar en la Gráfica 4, en las cuatro categorías de daño, la carga ambiental más significativa es el cemento, seguida del árido grueso reciclado y árido fino natural, esto es debido a la extracción de árido natural y la energía utilizada para la producción del árido reciclado. El diesel sobresale en la categoría de daño de salud humana y cambio climático como una carga ambiental significativa.

Gráfica 4 Ponderación por categoría de daño – hormigón estructural 25% árido reciclado



○ *Hormigón no estructural con 50% áridos reciclados*

Se muestra a continuación el gráfico indicando la caracterización para el hormigón no estructural con 50% de áridos reciclados. Para cada categoría de impacto se ejecuta el porcentaje de la carga ambiental, demostrando que las cargas que mayor peso tienen dentro de las categorías de impacto son el cemento, infraestructura de planta, árido fino, árido grueso natural y reciclado, diesel, electricidad y fuelóleo.

Como se puede apreciar en la red simulada por SimaPro que se encuentra como parte de los Anexos, este indica que el impacto más grande del cemento se lo lleva su producción, el clínker, el transporte, y la utilización del combustible producido en refineries de petróleo. Dentro de los áridos, se ve afectado mayormente debido al árido natural y por el diesel consumido en la maquinaria.

El cemento portland es el que mayor participación brinda en todas las categorías de impacto, especialmente en radiación ionizante (70,55%), calentamiento global (65,82%), no carcinogénico (56,18%), y energía no renovable (49,95%). El calentamiento global es importante en esta etapa ya que las cementeras producen emisiones de dióxido de carbono (5% de la emisión mundial). Conlleva también un riesgo toxicológico importante debido a que presenta emisiones al aire, agua y suelo que producen contaminación importante. La radiación ionizante en este caso es alta debido a que se recibe una radiación importante procedente de los materiales de construcción, en este caso específicamente del cemento. El impacto en energías no renovables es debido a la cantidad importante de energía primaria brindada para la producción del cemento que es significativa.

El impacto debido a la infraestructura en planta afecta mayormente a las categorías de impacto de extracción de minerales (16,64%), eutrofización acuática (10,31%), ocupación del suelo (5,29%) debido a que es una planta que necesita una parcela importante de tierra y su uso es exclusivo para la producción y carcinogénicos (3,18%) ya que emiten sustancias tóxicas al aire, agua y suelo.

El impacto debido a los áridos finos naturales afecta mayormente a las categorías de impacto de ocupación del suelo (18,65%), sustancias orgánicas respiratorias (12,98%), respiración inorgánicos (11,51%) y agotamiento de la capa de ozono (10,84%), todo esto debido a la extracción del materiales en el suelo y emisiones al aire.

El impacto debido a los áridos gruesos naturales afecta mayormente a las categorías de impacto de ecotoxicidad acuática (42,93%), ecotoxicidad terrestre (32,21%), sustancias orgánicas respiratorias (6,26%) y acidificación terrestre (4,33%) todo esto debido a la extracción del materiales del suelo y emisiones al aire, agua y suelo.

El impacto debido a los áridos reciclados afecta mayormente a las categorías de impacto de extracción de minerales (51,63%), ocupación del suelo (46,34%), eutrofización acuática (44,4%) y carcinogénicos (42,02%).

El impacto debido al diesel afecta mayormente a las categorías de impacto de sustancias orgánicas respiratorias (3,87%), respiración inorgánicos (3,25%), acidificación terrestre (3,15%) y acidificación acuática (2,33%), debido a que se emiten sustancias tóxicas al aire, suelo y agua.

El impacto debido a la electricidad afecta mayormente a las categorías de impacto de radiación ionizante (4,03%) debido a la radiación radioactiva presente en su producción, carcinogénicos (2,59%), energías no renovables (2,12%) y agotamiento de la capa de ozono (1,82%), debido a la emisión de sustancias tóxicas al aire, suelo y agua.

El impacto debido al fuelóleo afecta mayormente a las categorías de impacto de ocupación del suelo (3,69%), agotamiento de la capa de ozono (2,37%), ecotoxicidad acuática (1,66%) y ecotoxicidad terrestre (1,61%).

El resto de las cargas ambientales tienen poca influencia en las categorías de impacto como se puede apreciar en la siguiente gráfica.

Gráfica 5 Ponderación por categoría de daño – hormigón no estructural 50% árido reciclado

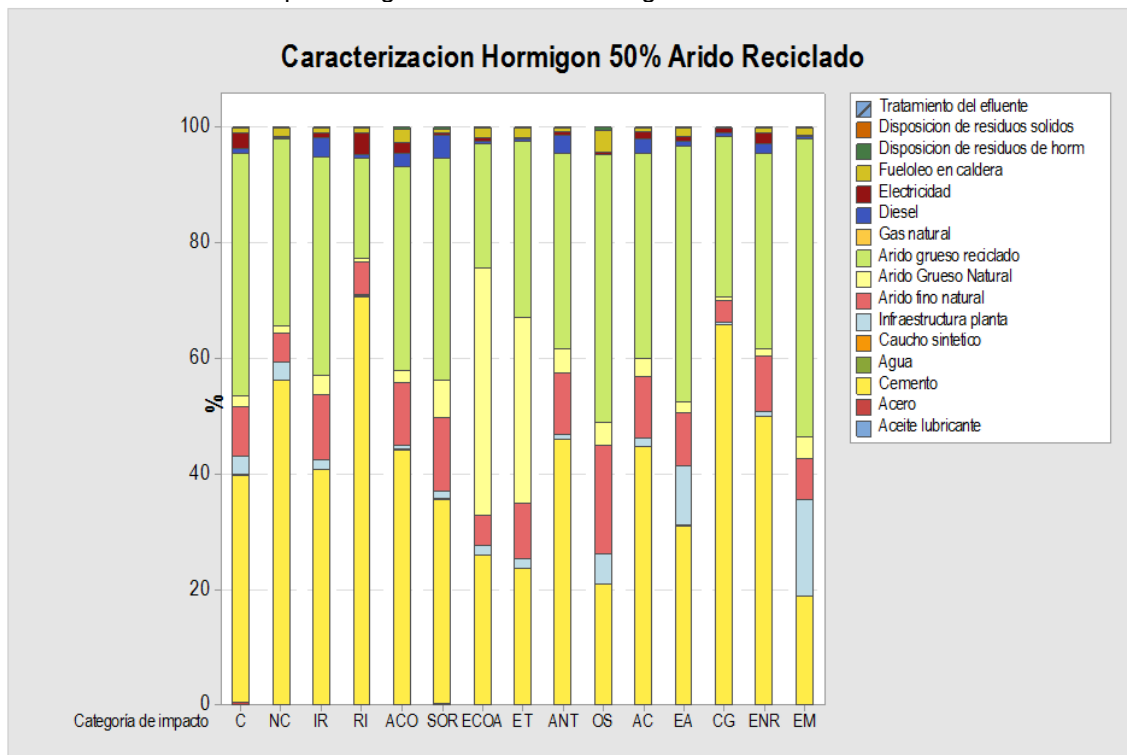


Tabla 18 Caracterización hormigón no estructural con 50% árido reciclado.

| Categoría de Impacto | Cemento | Infraestructura planta | Árido fino natural | Árido Grueso Natural | Árido grueso reciclado | Diesel | Electricidad | Fuelóleo |
|----------------------|---------|------------------------|--------------------|----------------------|------------------------|--------|--------------|----------|
| C | 39.41 | 3.18 | 8.69 | 1.85 | 42.02 | 0.83 | 2.59 | 0.77 |
| NC | 56.18 | 3.12 | 4.98 | 1.26 | 32.28 | 0.21 | 0.29 | 1.47 |
| IR | 40.86 | 1.38 | 11.51 | 3.29 | 37.87 | 3.25 | 1.02 | 0.61 |
| RI | 70.55 | 0.36 | 5.53 | 0.67 | 17.28 | 0.59 | 4.03 | 0.69 |
| ACO | 44.01 | 0.84 | 10.84 | 2.06 | 35.35 | 2.28 | 1.82 | 2.37 |
| SOR | 35.48 | 1.16 | 12.98 | 6.26 | 38.71 | 3.87 | 0.52 | 0.56 |
| ECA | 25.86 | 1.67 | 5.26 | 42.93 | 21.45 | 0.47 | 0.53 | 1.66 |
| ET | 23.57 | 1.80 | 9.40 | 32.21 | 30.65 | 0.33 | 0.24 | 1.61 |
| ANT | 45.98 | 0.85 | 10.61 | 4.33 | 33.66 | 3.15 | 0.82 | 0.41 |
| OS | 20.94 | 5.29 | 18.65 | 3.98 | 46.34 | 0.12 | 0.48 | 3.69 |
| AC | 44.65 | 1.48 | 10.71 | 3.24 | 35.56 | 2.33 | 1.36 | 0.48 |
| EA | 31.00 | 10.31 | 9.11 | 1.90 | 44.40 | 0.92 | 0.82 | 1.28 |
| CG | 65.82 | 0.41 | 3.88 | 0.50 | 27.81 | 0.68 | 0.65 | 0.15 |
| ENR | 49.95 | 0.73 | 9.66 | 1.14 | 33.80 | 1.70 | 2.12 | 0.53 |
| EM | 18.88 | 16.64 | 7.15 | 3.62 | 51.63 | 0.47 | 0.22 | 1.25 |

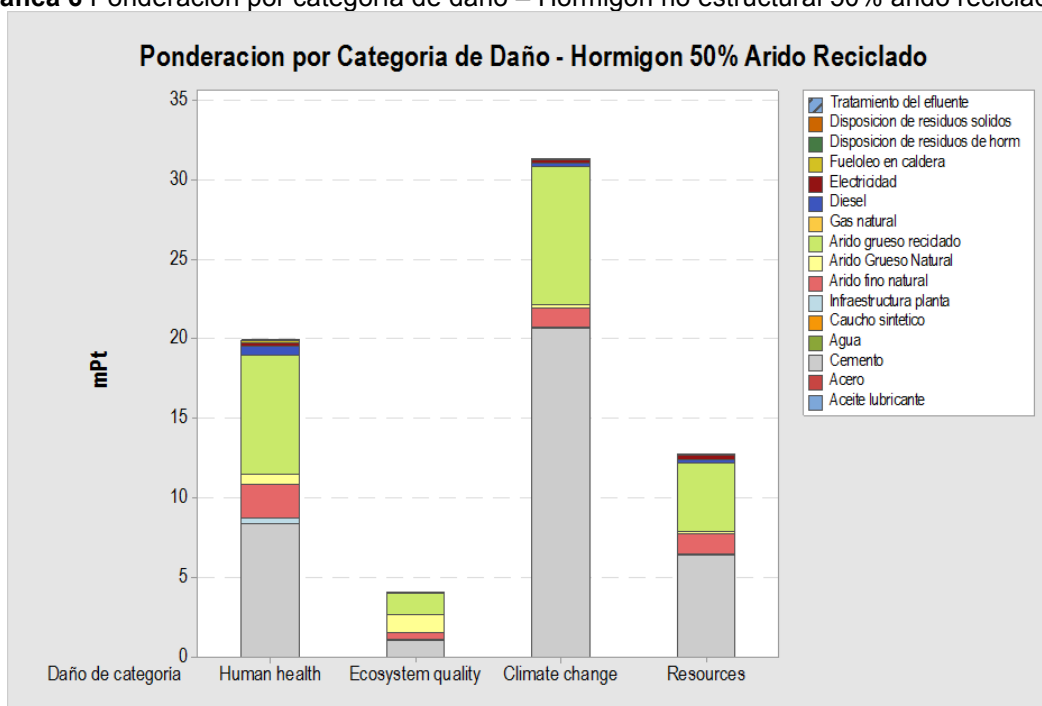
La ponderación realizada en la siguiente gráfica, se trata en el nivel de categoría de daño; consiste en una valoración subjetiva de los resultados, sin embargo son aceptados por la comunidad científica. Se evalúan las cuatro categorías de daño con las cargas ambientales de la producción del hormigón estructural con 50% de áridos reciclados.

La unidad uPt indica los puntos que es la unidad empleada por el programa para agrupar las distintas categorías de impacto en categorías de daños en el proceso de ponderación.

Como se puede apreciar en la Gráfica 6, en las cuatro categorías de daño, la carga ambiental más significativa es el cemento, del seguida del árido grueso natural, árido fino natural, esto es debido a la extracción de árido natural y la energía utilizada para la producción del árido reciclado. El diesel sobresale en la categoría de daño de salud humana y cambio climático como una carga ambiental significativa.

| Categoría de daño | Unidad | Total |
|------------------------|--------|-------|
| Salud humana | uPt | 19.97 |
| Calidad del ecosistema | uPt | 4.10 |
| Cambio climático | uPt | 31.47 |
| Recursos | uPt | 12.92 |

Gráfica 6 Ponderación por categoría de daño – Hormigón no estructural 50% árido reciclado



○ *Análisis de incertidumbre*

La metodología de ACV constituye un marco objetivo y científicamente de gran potencial para la evaluación medioambiental, ya que es una herramienta que ayuda con el análisis y la comparación de productos, procesos o servicios, para la toma de decisiones. Sin embargo, presenta ciertas limitaciones (Cámara 2012), especialmente las relacionadas con la incertidumbre y la subjetividad, ya que pueden ser introducidas de varias formas como ser:

- en los datos dentro del inventario
- en la definición de los límites del sistema
- en la metodología que se emplea para el análisis y evaluación de impacto
- en la valoración debido a sus subjetividad
- el origen y marco que amparen los datos usados como referencia para realizar la normalización.

Por lo que en este estudio se realiza un análisis de incertidumbre por cada alternativa planteada y para cada categoría de impacto, y así conocer qué datos son confiables y que otros no son los mejores para la toma de decisiones. Dicho análisis se realiza por medio del SimaPro, con el método IMPACT 2002+ V2.12/IMPACT 2002+, con intervalo de confianza de 95%.

Como se muestra en las siguientes tres figuras, para las tres alternativas, los datos menos confiables en cuanto a posibles impactos medioambientales están en los no carcinógenos, radiación ionizante, agotamiento de la capa de ozono, ecotoxicidad acuática, ecotoxicidad terrestre y eutrofización acuática. En cambio, las categorías de impacto que presentan un mejor análisis de incertidumbre son los carcinógenos, inorgánicas respiratorias, sustancias orgánicas respiratorias, acidificación terrestre, ocupación del suelo, acidificación acuática, calentamiento global, energía no renovable y extracción de minerales. Las diferencias entre el porcentaje de incertidumbre de cada categoría de impacto podría estar relacionado con las limitaciones descritas anteriormente.

Figura 11 Análisis de incertidumbre hormigón convencional.

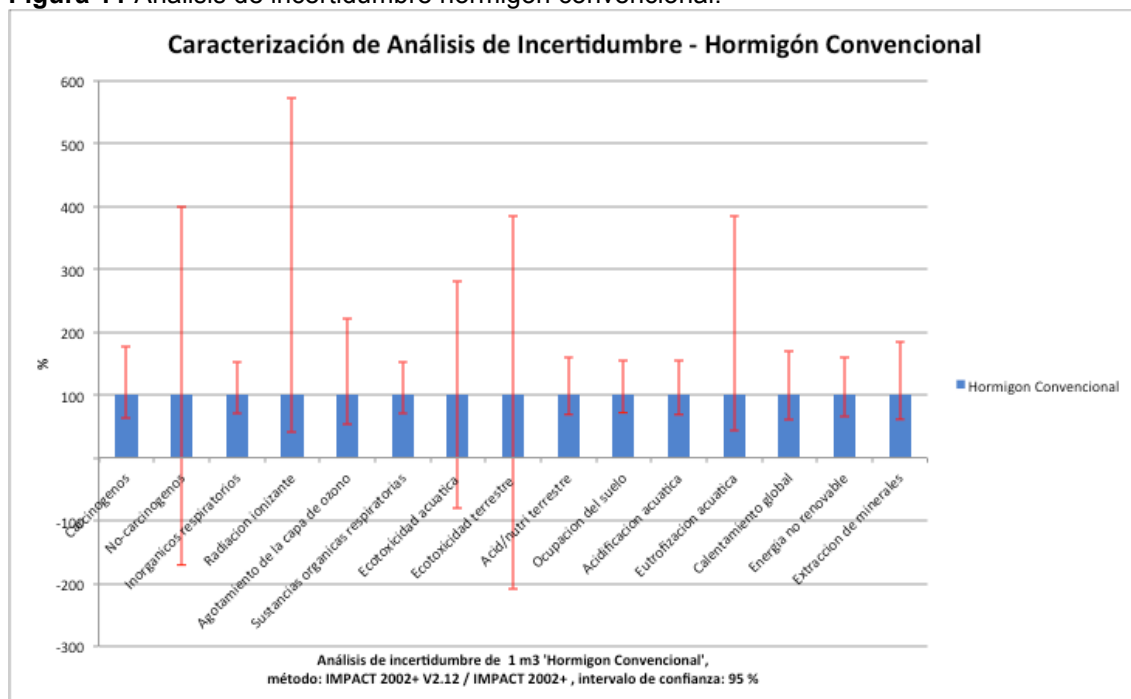


Figura 12 Análisis de incertidumbre hormigón estructural 25% árido reciclado.

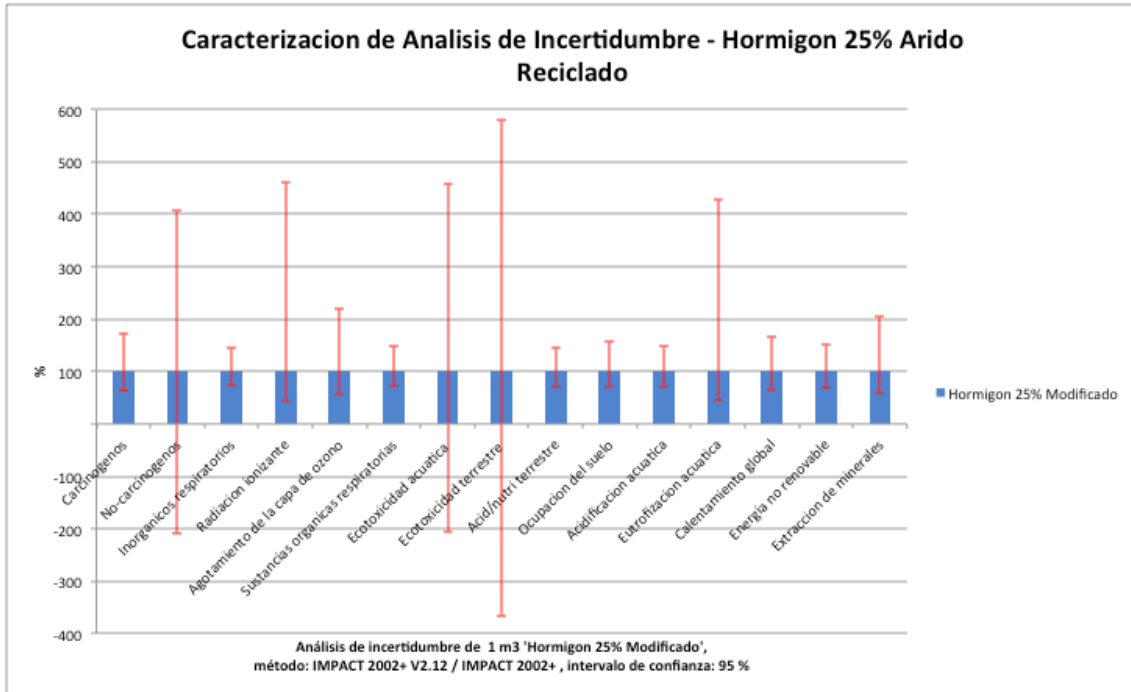
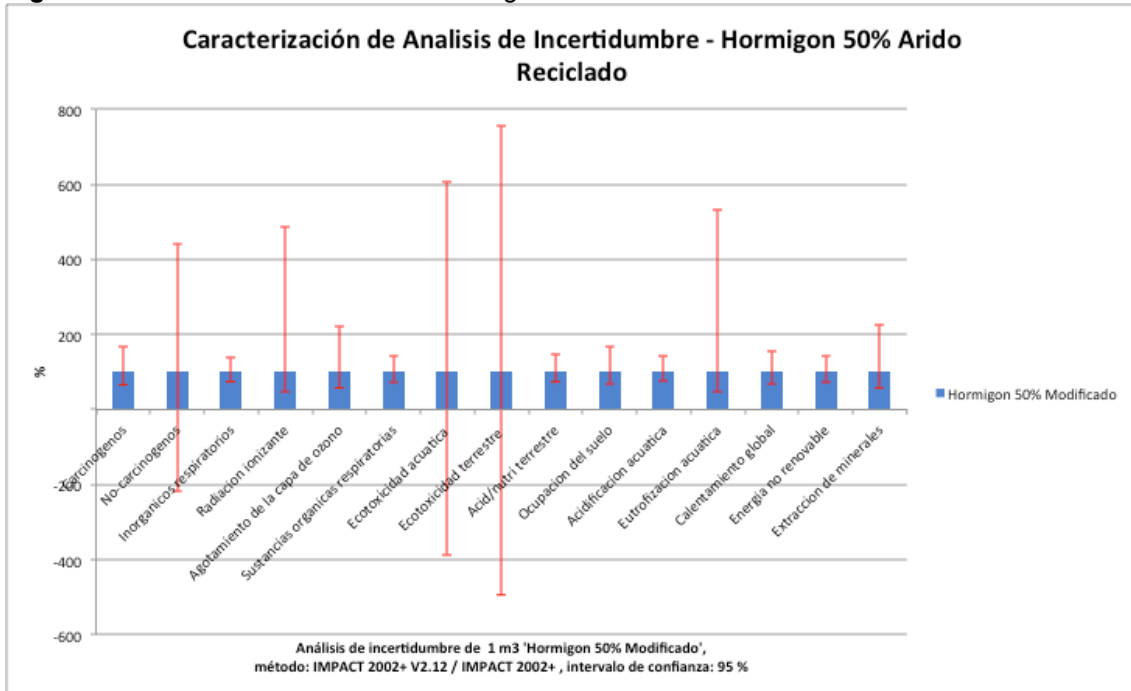


Figura 13 Análisis de incertidumbre hormigón no estructural 50% árido reciclado.



3.2.4.3 Criterio económico

Para el criterio económico, es necesario evaluar el coste de ejecución para cada alternativa de hormigón, así se conoce su coste aproximado y se logra comparar económicamente cada alternativa.

Dentro del coste de ejecución se incluyen los costes directos e indirectos. En los costes directos se incluye: mano de obra, materiales, conservación de la maquinaria y gastos auxiliares. Los costes indirectos se incluye: gastos de instalación de oficinas a pie de obra, de comunicaciones, edificación de almacenes, personal técnico y administrativo adscrito exclusivamente a la obra e imprevistos, que corresponden normalmente a un 5% de aquellos otros directos (Súarez 2015).

Se trabaja con datos de las empresas de fabricación de los materiales y planta de reciclaje estudiada. Si no se obtiene un dato a partir de lo anterior, se toma como válido el dato que provenga de los costes de ejecución de la zona de estudio (Cataluña).

Específicamente para la materia secundaria (reciclada), se debe tener en cuenta el coste del proceso de reciclado, transporte del residuo hasta la planta de reciclaje y el coste de gestión de los residuos generados, esto se hará con ayuda de las siguientes ecuaciones:

Ecuación 1

$$C_{pr} = ct + cr + cg$$

Ecuación 2

$$ct = dr \cdot cdr$$

Ecuación 3

$$cdr = pc \cdot cc$$

Donde,

C_{pr}: coste del producto reciclado (€/t).

ct: coste de transporte de los residuos (€/t).

dr: distancia recorrida por tonelada (km/t).

cdr: coste de distancia recorrida (€/km).

pc: precio de combustible (€/l).

cc: consumo de combustible (l/km).

cr: coste del proceso de reciclaje (€/t).

cg: coste de gestión de los residuos (€/t).

Coste transporte del residuo – se toma en cuenta los kilómetros recorridos y el tipo de vehículo utilizado, para luego añadir el precio del combustible y su consumo.

Coste proceso de reciclaje – se obtiene la información necesaria por medio de otros estudios ya realizados o de la información brindada por la empresa.

Coste de gestión de los residuos (C_{gv}) – cuando se vierten a vertedero, se toma en cuenta la tasa de vertido del residuo más el transporte desde la planta de reciclaje hasta el vertedero.

Ecuación 4

$$C_{gv} = ct + t$$

Donde,

C_{gv} : coste de gestión del residuo vertido (€/t).

ct : coste de transporte (€/t).

t : tasa del vertedero (€/t).

Cuando los residuos se reciclan (C_{gr}), se toma en cuenta los ingresos debido al reciclaje o valorización de la materia prima y los ahorros debidos a la no disposición de los residuos.

Ecuación 5

$$C_{gr} = -ir - cvr$$

Donde,

C_{gr} : coste de gestión del residuo reciclado (€/t).

ir : ingreso por el reciclaje (más transporte) (€/t).

cvr : coste de vertido del residuo, incluyendo el transporte (€/t).

▪ **Economía lineal**

Árido Natural

Para el coste de árido natural, se tomó como base una grava de cantera con tamaño máximo de 40mm, asumiendo a la empresa Àrids Solestany, S.A., que es un empresa ubicada en Cataluña, la cual brinda áridos para hormigones, con un coste aproximando de 17,50€/t.

Árido Reciclado

Para el coste de árido reciclado, se tomó como base a Gestora de Runes de la Construcció, S. A., específicamente la empresa Tecnocatalana de Runes, S.A. de la planta tratamiento de RCD de Les Franqueses del Vallés. Se tomó como base una grava de árido reciclado de hormigón de 20 - 40mm con un coste de 4,84€/t.

Tabla 19 Precio áridos por tonelada.

| Tipo de Árido | €/t |
|---------------|-------|
| Natural | 17,50 |
| Reciclado | 4,84 |

Gestión de residuos

En cuanto al coste de la gestión de los residuos está definido por:

- Residuos inertes
- Residuos municipales
- Tratamiento del efluente

Para la disposición de los residuos de hormigón en vertedero inerte (Ecuación 2 y 4) se considera el coste del transporte, brindando una distancia aproximada de 45km, como se describió en el capítulo anterior. Es por esto que el coste aproximado de transporte de los residuos por m³ de hormigón producido es de 1,10€.

Para los residuos municipales, la distancia de transporte es de 3km, como se describe anteriormente, da como resultado un coste de gestión de estos residuos de 2,71E-04€.

Para el vertido de agua residual, se calcula por medio del canon del agua de las industrias en Cataluña. Se obtiene que el coste aproximado de gestión los residuos generados, que es de $2,30E-02 \text{ €/m}^3$.

Hormigón Convencional

Coste de hormigón estructural, de consistencia blanda, con tamaño máximo de árido de 40mm, con las características descritas en capítulos anteriores, tiene un precio aproximado de $86,81\text{€/m}^3$. A este precio, se debe sumar la gestión de los residuos generados, resultando un coste total de $86,82\text{€/m}^3$ de hormigón producido.

Hormigón Estructural 25% Áridos Reciclados

Coste de hormigón estructural con 25% de árido reciclado, de consistencia blanda, con un tamaño máximo de árido de 40mm y con las características descritas en capítulos anteriores, se tomó en cuenta la cantidad empleada del agua, árido natural. El agua tiene un coste de $1,75\text{€/m}^3$, árido natural $17,50\text{€/t}$ se tiene un coste total de $30,98\text{€/m}^3$.

Se tuvo en cuenta el coste del árido reciclado con los 265,7kg de la producción de este hormigón y el coste por tonelada del mismo ($4,84\text{€/t}$). El árido tiene un coste aproximado de $1,29\text{€/m}^3$ de hormigón. Se agrega el coste de transporte, siendo $0,17\text{€/m}^3$, finalizando con un coste total de $1,46\text{€/m}^3$.

Para tomar una referencia, se utiliza el hormigón convencional, indicando que los costes de los áridos naturales son $34,51\text{€/m}^3$. En este caso no se toma en cuenta la diferencia del coste del cemento ya que en ambos casos, el cemento es el mismo (300kg).

Si al coste del hormigón convencional de $86,82\text{€/m}^3$ se le resta sus áridos naturales ($34,51\text{€/m}^3$) y se suma el coste de los áridos empleados en el hormigón reciclado ($30,98\text{€/m}^3$ y $1,46\text{€/m}^3$), dando un coste aproximado de hormigón 25% árido reciclado de $84,75\text{€/m}^3$.

Hormigón No Estructural 50% Áridos Reciclados

Coste de hormigón no estructural con 50% de árido reciclado, de consistencia blanda, con un tamaño máximo de árido de 40mm y con las características descritas en capítulos anteriores, se tomó en cuenta la cantidad empleada del agua, árido natural. El agua tiene un coste de $1,75\text{€/m}^3$, árido natural $17,50\text{€/t}$, se tiene un coste total de $25,80\text{€/m}^3$.

Se tuvo en cuenta el coste del árido reciclado con los 438kg de la producción de este hormigón y el coste por tonelada del mismo ($4,84\text{€/t}$). El árido tiene un coste aproximado de $2,12\text{€/m}^3$ de hormigón. Se agrega el coste de transporte, siendo $0,17\text{€/m}^3$, dando un coste un total de $2,29\text{€/m}^3$.

El coste del cemento para esta alternativa es ejecutada por medio del precio del cemento ($0,118\text{€/kg}$) con respecto a los 240kg, que indica un coste aproximado de $28,32\text{€}$; sumándole el coste transporte como se indica en las ecuaciones anteriores, tomando en cuenta una distancia de 20km, un coste de $0,24\text{€/m}^3$ de hormigón, dando un valor final de $28,56\text{€/m}^3$.

Para tomar una referencia, se utiliza el hormigón convencional, indicando que los costes de los áridos naturales son $34,51\text{€/m}^3$.

Se toma en cuenta también, el coste del cemento, que es 0,118€/kg, que su uso en el hormigón convencional para 1m³ de hormigón es de 300kg, dando un coste aproximado de 35,40€; se le suma el coste transporte como se indica en las ecuaciones anteriores, tomando en cuenta una distancia de 20km, un coste de 0,24€/m³ de hormigón, dando un valor final de 35,64€/m³.

Si al coste del hormigón convencional de 86.82€/m³ se le resta sus áridos naturales (34,51€/m³) y el cemento (35,64€/m³), se suma el coste de los áridos empleados en el hormigón reciclado (2,29€/m³) y (25,80€/m³) más el coste del cemento con 240kg (28,56€/m³), supone un coste aproximado de hormigón 50% árido reciclado de 73,32€/m³.

Tabla 20 Coste de referencia según alternativa de producción de hormigón

| Alternativa | €/m³ |
|---|------------------------|
| Hormigón Convencional | 86,28 |
| Hormigón Estructural 25% Áridos Reciclados | 84,75 |
| Hormigón No Estructural 50% Áridos Reciclados | 73,32 |

Al comparar el coste económico de las alternativas, se puede apreciar que con las variaciones de árido natural y cemento se puede obtener un coste mayor o menor, pero todo dependerá de la resistencia a compresión que se desee ya que va directamente ligado con la cantidad de cemento empleado.

De las alternativas, el coste mayor es el hormigón convencional, ya que como se puede apreciar en la siguiente tabla, es el que presenta mayor cantidad de árido natural (es el que presenta mayor coste que el árido reciclado), un 39,31% con respecto a las demás alternativas, y teniendo la mayor cantidad de cemento (siendo su coste aproximadamente el 50% de la totalidad de la producción de hormigón).

El coste del hormigón estructural con 25% áridos reciclados es el precio intermedio, no supera el coste del hormigón convencional. Esto es debido a la combinación realizada de áridos naturales y reciclados. El árido natural tiene un 33,30% con respecto a las demás alternativas, también su precio no se baja demasiado debido a la cantidad de cemento necesaria. Se obtiene un 37,36% de árido reciclado si se compara con la alternativas de 50%.

El coste del hormigón no estructural con 50% árido reciclados, es el que menor coste presenta, esto es debido a que existe un menor porcentaje necesario de árido natural (un 27,39% con respecto a las demás alternativas), añadiéndole una mayor cantidad de árido reciclado (62,24% con respecto al hormigón con 25% de AR). También tiene una menor cantidad de cemento, el cual influye de manera significativa.

Tabla 21 Comparativa de alternativas de áridos y cemento.

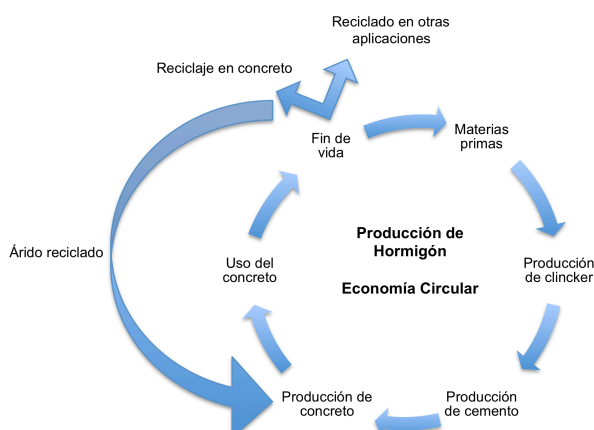
| Alternativa | Árido Natural (kg) | Árido Natural (%) | Árido Reciclado (kg) | Árido Reciclado (%) | Cemento (kg) |
|---|--------------------|-------------------|----------------------|---------------------|--------------|
| Hormigón Convencional | 1.972,07 | 39,31 | 0 | 0 | 300 |
| Hormigón Estructural 25% Áridos Reciclados | 1.670,30 | 33,30 | 265,7 | 37,76 | 300 |
| Hormigón No Estructural 50% Áridos Reciclados | 1.374,0 | 27,39 | 438,0 | 62,24 | 240 |

Si se llegara a comparar un hormigón no estructural con una resistencia a compresión menor, incluso podría llegar a ser más económico que el actual. Sin embargo, se toma en cuenta el uso que tendrá para poder dosificar de la mejor manera.

▪ **Economía circular**

En este trabajo se trata de analizar una economía circular para la producción de hormigón reciclado. Dicha economía trabajaría como se puede observar en la Figura 14. Se inicia con la generación de materias primas (recursos naturales), producción del clíncker, producción del cemento para lograr la producción de hormigón, a este se le brinda el uso ya sea en edificaciones u otro tipo de construcción y una vez llegada su vida útil, pasa a su fin de vida. Al llegar a este fin de vida, el propósito de la economía circular es que nada o casi nada llegue a ser un residuo, por lo que las opciones que se tienen de esos residuos de hormigón son: reciclaje para un uso en un nuevo hormigón o un reciclaje para otras aplicaciones.

Figura 14 Producción de hormigón en una economía circular.



Se parte del estudio realizado por (Huysman et al. 2017), donde propone un indicador para una economía circular, que es la tasa de beneficios de reciclabilidad (TBR), desarrollado por el Centro Común de Investigación (JRC) de la Comisión Europea, que está basado en un enfoque de ACV.

La TBR está definida como el ratio de los beneficios ambientales que se pueden obtener mediante el reciclaje de un producto, sobre las cargas ambientales relacionadas con la producción de recursos vírgenes seguido de la disposición. Estos beneficios y cargas son expresadas en términos de impactos ambientales, calculados mediante ACV.

Dentro del informe de JRC, se sugiere una versión alternativa del indicador TBR, tratando de tomar en cuenta la pérdida de calidad del producto que ocurre durante el proceso de reciclado. Para obtener este potencial de pérdida de calidad, el informe propone el uso de un factor de calidad que es definido como el ratio de la calidad del material reciclado sobre la calidad del material virgen. Se sugiere que esta calidad puede ser medida a través de parámetros físicos (resistencia a la compresión, por ejemplo) o mediante parámetros económicos.

Normalmente se utilizan los precios obtenidos del material reciclado versus el material virgen, pero el uso de valores económicos tiene sus desventajas, debido a que los valores del mercado y los precios fluctúan grandemente con el tiempo. Por otro lado, los parámetros físicos son independientes de la economía, sin embargo se utilizan muy poco y son raramente aplicados ya que es difícil de determinar un parámetro físico adecuado para cada tipo de material y es otra área de investigación.

Desarrollo del indicador

Para este caso se utiliza el impacto ambiental en términos de consumo de recursos, utilizando previamente el ACV descrito anteriormente para conocer el rendimiento de una economía circular.

La ISO 14044 hace una distinción entre dos tipos de reciclaje: bucle cerrado (ocurre cuando un material de un producto es reciclado para realizar el mismo producto) y bucle abierto (ocurre cuando el material de un producto es reciclado para realizar otro producto, distinto al inicial).

En este estudio se propone analizar la calidad del material, por lo que se propone:

- Opción 1: Si el material es de buena calidad y se puede sustituir parcialmente al material virgen, es un bucle semi-cerrado. Alternativa 2 – hormigón 25% árido reciclado.
- Opción 2: Si el material es de buena calidad y se puede sustituir parcialmente al material virgen, es un bucle semi-cerrado. Alternativa 3 – hormigón 50% árido reciclado.

Para estas dos propuestas, se puede calcular el indicador del rendimiento de la economía circular (IRC). Se define el IRC como el ratio como el beneficio ambiental actual sobre el beneficio ambiental ideal de acuerdo a la calidad.

$$IRC = \frac{\textit{beneficio actual}}{\textit{beneficio ideal de acuerdo a la calidad}}$$

Los beneficios ambientales son expresados en términos de consumo de recursos naturales, que pueden ser calculados por medio de ACV, por ejemplo utilizando el método CEENE (Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment) de la evaluación del impacto del ciclo de vida, pero para este análisis, se empleará de manera ilustrativa el análisis realizado por ACV anteriormente.

En las dos opciones, debido a que ambas son bucles semi-cerrado, el material reciclado se puede sustituir con material virgen “ α ” parcialmente. Por ejemplo, la Alternativa 2 y 3 de este estudio, se produce un hormigón con 25% de áridos reciclados y 75% de áridos naturales y se produce el siguiente hormigón con 50% de áridos reciclados y 50% áridos naturales. El material virgen es utilizado para rellenar los requerimientos de calidad. Para calcular el beneficio ambiental actual, el impacto evitado de la producción del material virgen ($V\alpha$) debe ser multiplicado por el porcentaje máximo del material virgen sustituido (p) y la tasa de reciclaje (r). Al resultado, se le resta el impacto del proceso de reciclaje (R). Mientras que para el beneficio ambiental ideal es la multiplicación del porcentaje máximo del material virgen sustituido por el impacto evitado de la producción del material virgen. Ambos se dividen para obtener el indicador del rendimiento de economía circular.

$$\text{Beneficio ambiental actual} = r \cdot p \cdot V\alpha - R$$

$$\text{Beneficio ambiental ideal} = p \cdot V\alpha$$

Donde,

- r : tasa de reciclaje (es la cantidad de material efectivamente reciclado producido por kg de residuo, ya que se considera que parte de los materiales son perdidos durante el reciclaje).
- p : porcentaje máximo del material virgen sustituido.
- $V\alpha$: impacto evitado de la producción del material virgen.
- R : impacto del proceso de reciclaje.

Una economía circular buena, tiene un valor de IRC igual a 1. En ese caso, el beneficio ambiental actual es igual al beneficio ambiental ideal, indicando que el proceso de reciclaje actual tiene una pérdida de material e impacto insignificante.

En la Tabla 21, se indican los valores obtenidos para cada alternativa. Para el caso del impacto del proceso de reciclaje (R), se toma en cuenta la energía producida debido a la limpieza, separación y trituración de los áridos reciclados, sustraída por la base de datos realizada para el ACV, que en ambos casos es de 0,049 MJ. Para la obtención de $V\alpha$, se toma en cuenta la cantidad de kg por cada m^3 de hormigón producido, en la cual, para cada alternativa es de 265,7kg y 438kg respectivamente, multiplicado por R . La tasa de reciclaje (r) se asume un 70% (como se describe en el Estado del Arte) ya que al momento de reciclar los RCD, siempre existe una cantidad generada de residuos que no se utiliza debido a que es arena muy fina y el objetivo de la Unión Europea es que para el 2020, se utilicen el 70% de RCD. Mientras que el porcentaje máximo del material virgen sustituido, se utilizan las cantidad del 25% y 50% respectivamente.

Tabla 22 Eficiencia de recursos para cada alternativa.

| | Hormigón 25% Árido Reciclado | Hormigón 50% Árido Reciclado |
|----------------|------------------------------|------------------------------|
| $V\alpha$ (MJ) | 13,11 | 21,46 |
| R (MJ) | 0,049 | 0,049 |
| r (%) | 70 | 70 |
| p (%) | 25 | 50 |
| IRC (%) | 68,50 | 69,87 |

Se puede observar mediante la tabla anterior, que actualmente el beneficio ambiental actual es menor que el beneficio ambiental ideal de acuerdo con la calidad. Esto significa que los RCD tienen una pérdida de material importante.

En ambos casos $IRC < 1$. Aquí es donde se puede conocer la importancia que se le da a la reutilización casi obligatoria del 100% de los residuos en la economía circular, indicando que la mejor opción desde el punto de vista de economía circular, el hormigón no estructural con 50% árido reciclado es la mejor opción.

Una limitante importante en cuanto a la economía circular y los residuos de construcción y demolición es que no se conoce aún cuántas veces más se podría utilizar un RCD reciclado, ya que a su resistencia es menor cada vez más con su uso y debido a que las construcciones tienen una vida útil de 50 años o más, es difícil de conocer en estos momentos su reutilización indefinida.

Para que la economía circular funcione correctamente y pueda tener un IRC más cercano a 1, es necesario buscar otras opciones de reciclaje al RCD, ya que muchas veces el residuo no se utiliza por su baja resistencia debido a la mezcla de materiales, entre otros problemas.

3.2.5 Fase 5: Análisis y discusión de los resultados

3.2.5.1 Alternativas

Se realizan dos comparaciones importantes: el hormigón convencional vs el hormigón estructural con 25% de áridos reciclados y el hormigón convencional vs el hormigón no estructural con 50% de áridos reciclados. Se observa qué hormigón implica mayores impactos en las categorías de impacto debido a su producción.

- **Alternativas o escenarios propuestos**

Hormigón convencional con 100% árido natural vs hormigón estructural con 25% árido reciclado

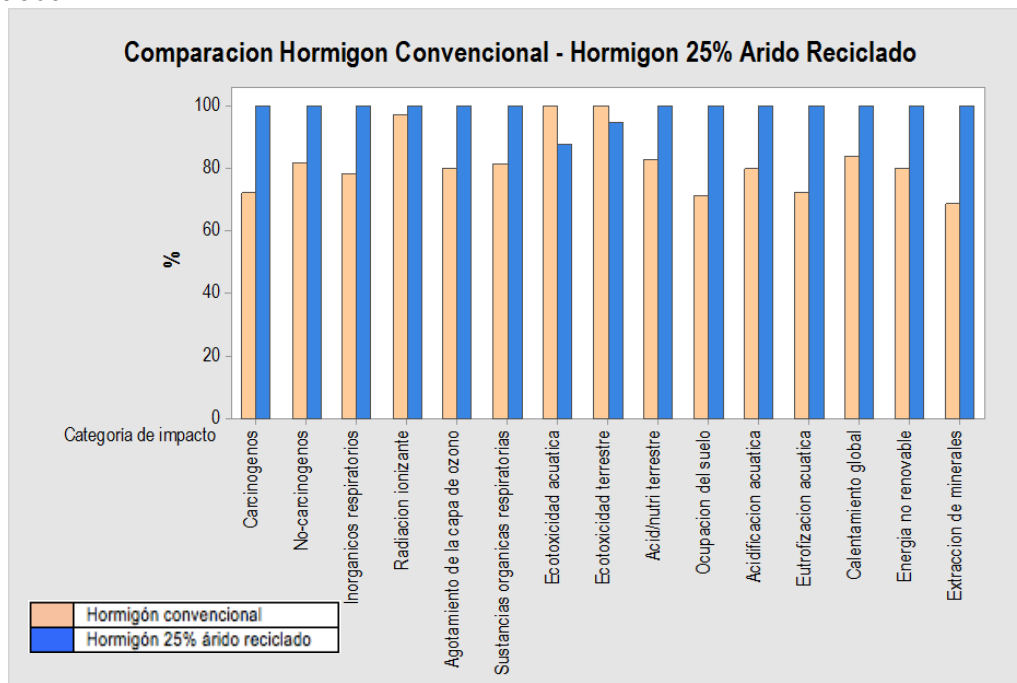
Se presentan los resultados obtenidos mediante el análisis de la información descrita anteriormente, comparando el hormigón convencional de árido natural con el hormigón estructural con 25% de árido reciclado.

Se debe tomar en cuenta que, para poder comparar los resultados en un mismo gráfico, se ha normalizado el valor máximo entre los dos escenarios para cada categoría de impacto al 100% y el otro se ha relativizado a dicho valor máximo.

Como se puede apreciar en la siguiente figura, el hormigón con mayor impacto ambiental es el hormigón estructural con 25% de árido reciclado. El hormigón convencional ocasiona un mayor impacto ambiental en dos categorías que son: eco toxicidad acuática y terrestre, pero debido al análisis de incertidumbre realizado, no es aconsejable tomar una decisión basada en estas dos categorías de impacto, sin embargo en el resto de categorías que tiene mejor porcentaje de confiabilidad, aún indica que el hormigón de árido reciclado tiene mayores impactos ambientales. Lo que más le ha afectado al hormigón estructural con 25% de árido reciclado mayormente es la distancia de transporte, la extracción de los áridos naturales (que es el 75%, aún mayor que el árido reciclado empleado) y el uso de cemento.

Se observa que el árido reciclado supone un coste de energía extra al utilizar maquinaria para triturar y producir el árido reciclado.

Figura 15 Comparación de producción de hormigón convencional y hormigón 25% árido reciclado.



En cuanto a la economía lineal, la comparativa de hormigón convencional con hormigón estructural con 25% de áridos reciclados, su diferencia es de 1,53 €/m³, siendo el convencional el del mayor precio. Debido a que no existe mayor impacto económico al comprar un hormigón reciclado, es mejor optar por pensar en ideas de cómo el hormigón con áridos reciclados es ambientalmente mejor, cómo podría ser económicamente atractivo el árido reciclado. Una de las ideas que se ha propuesto es que por medio de leyes gubernamentales, añadir un impuesto a los áridos naturales, que dé un mayor impacto económicamente y brindar una mejor oportunidad a los áridos reciclados.

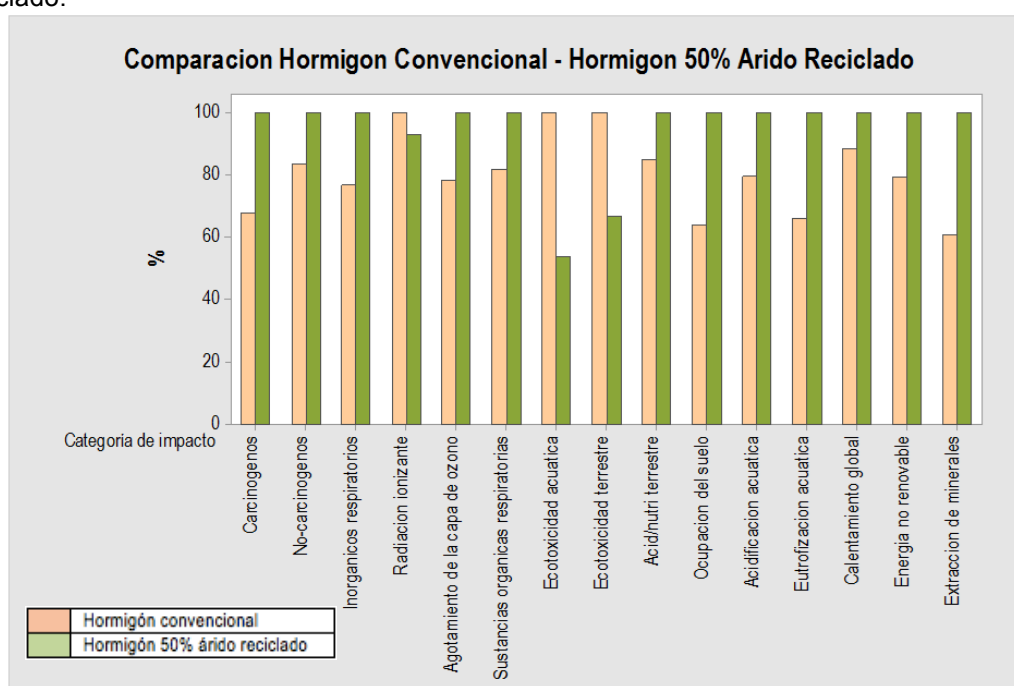
Hormigón convencional con 100% árido natural vs hormigón no estructural con 50% árido reciclado

Se presentan los resultados obtenidos mediante el análisis de la información descrita anteriormente, comparando el hormigón convencional de árido natural con el hormigón no estructural con 50% de árido reciclado.

Se debe tomar en cuenta que, para poder comparar los resultados en un mismo gráfico, se ha normalizado el valor máximo entre los dos escenarios para cada categoría de impacto al 100% y el otro se ha relativizado a dicho valor máximo.

Como se puede apreciar en la siguiente figura, el hormigón con mayor impacto ambiental es el hormigón no estructural con 50% de árido reciclado. El hormigón convencional ocasiona un mayor impacto ambiental en tres categorías que son: radiación ionizante, eco toxicidad acuática y terrestre, pero debido al análisis de incertidumbre realizado, no es aconsejable tomar una decisión basada en estas categorías de impacto, sin embargo en el resto de categorías que tiene mejor porcentaje de confiabilidad, aún indica que el hormigón de árido reciclado tiene mayores impactos ambientales. Lo que más le ha afectado al hormigón no estructural con 50% de árido reciclado mayormente es la distancia de transporte, el uso de cemento y el árido reciclado que supone un coste de energía extra al utilizar maquinaria para triturar y producir el árido reciclado.

Figura 16 Comparación de producción de hormigón convencional y hormigón 50% árido reciclado.



(Rodrigues et al. 2016) coincide en que el cemento es el principal responsable de los impactos ambientales causados a la producción de hormigón. Indica también que se debe tomar una atención especial a los tipos de transporte utilizado en los procesos y la distancia de la planta recicladora de RCD ya que este aspecto aumenta considerablemente las categorías de impacto ambientales, como se puede apreciar en estos resultados.

(Knoeri et al. 2013) demuestra que tiene poca influencia en los resultados el transporte adicional para el árido reciclado, pero que por encima de 15 km comienza a cambiar el equilibrio. En el análisis realizado en este estudio, se determinó que el transporte necesario de los áridos reciclados sería de 45km desde la planta de Les Franqueses del Vallés hasta la planta de producción de hormigón en Barcelona.

Se debe considerar reducir mayormente las distancias de transporte en cuanto a los RCD; una opción es utilizar instalaciones de trituración descentralizadas o la trituración in situ para que posiblemente sea preferible desde la perspectiva de impacto ambiental, tal como lo plantea (Butera et al. 2015).

En cuanto a la economía lineal, la comparativa de hormigón convencional con hormigón no estructural con 50% de áridos reciclados, la diferencia es de 12,96 €/m³, siendo el convencional el del mayor precio. Existe una gran diferencia económica, esto es debido al porcentaje de árido reciclado utilizado dentro de la producción del hormigón, por lo que se puede concluir que para que la producción de hormigón sea una opción económicamente viable, es necesario optar por estudios que ayuden a mejorar la resistencia de hormigones con la utilización máxima permisible de áridos reciclados.

4 Conclusiones

La gestión de residuos de construcción y demolición a nivel mundial es un gran problema medioambiental, ya que de ellos se emiten residuos importantes al aire, agua y suelo. Como parte de solución a este problema se estableció en este estudio realizar una evaluación ambiental y económica para tratar de analizar la mejor manera de gestionar estos residuos en Cataluña.

La propuesta metodológica empleada permite realizar una toma de decisiones en cuanto a la comparación de dos productos, dependiendo del impacto medioambiental generado.

Para este estudio en específico, se tomó en cuenta la producción de 1m^3 de hormigón convencional, para ser comparado con 1m^3 de hormigón estructural con 25% de áridos reciclados y 1m^3 de hormigón no estructural con 50% de áridos reciclados. Es importante mencionar que la recomendación del gobierno de España en cuanto a uso de árido reciclado en un hormigón estructural no debe ser mayor a 20% (proveniente exclusivamente de hormigón reciclado) para que las propiedades no se vean afectadas en comparación al hormigón convencional, pero existen varios estudios que utilizan un máximo de áridos reciclados de 25% y no se ve afectada sus propiedades, incluso en otros países como Egipto el 25% de áridos reciclados está permitido.

Muchas normativas a nivel mundial, restringe e incluso no permite el uso de árido reciclado mixto o cerámico dentro del hormigón estructural, debido a que pueden existir varias impurezas sin ningún tipo de control. El que se puede utilizar mejor para este tipo de aplicación es el árido proveniente del hormigón, limitándose a los porcentajes máximos que en algunos casos es del 20% o menos ya que así se puedan mantener sus propiedades similares al de un hormigón convencional.

Al analizar la metodología propuesta para la producción de hormigón en las tres alternativas, se observó:

- En las tres alternativas, el mayor impacto en las categorías fue el proceso del cemento, los siguientes procesos de mayor impacto fueron los áridos naturales y los áridos reciclados, debido a su proceso el cual afecta mayormente las categorías de extracción de minerales, respiración inorgánicas, agotamiento capa de ozono, ocupación del suelo y eutrofización acuática, todos estos impactos están relacionados. El resto de las cargas ambientales tienen poca influencia en los impactos de las categorías evaluadas.
- El precio de los áridos naturales con respecto a los áridos reciclados presentan una diferencia importante. Árido natural su precio es de 17,50€/t mientras que el árido reciclado es de 4,84€/t pero el precio total del hormigón se basa en el precio del cemento en un 50% y luego el resto es de los productos, transporte y reciclaje, por lo que en realidad lo que define el precio de 1m^3 de hormigón es el precio del cemento.
- El mayor coste de producción fue el hormigón convencional, con 86,28€/m³, hormigón con 25% de árido reciclado 84,75€/m³ y el hormigón con 50% de árido reciclado 73,32€/m³.

Para el hormigón estructural con árido reciclado en comparación con el hormigón convencional no es un coste fuertemente diferenciado, por lo que una solución para que sea más apetecible su uso, es el añadir impuestos al hormigón convencional (100% utilización de áridos naturales) para despertar interés de la sociedad y así poder incentivar la reutilización de áridos reciclados.

- El análisis de la economía circular, se realizó utilizando un indicador del rendimiento de la economía circular (IRC), por lo que el IRC del hormigón con 25% de áridos reciclados es de un 68,50% mientras que el hormigón con 50% de áridos reciclados es de un 69,87%, indicando que el IRC es bajo, ya que debería aproximarse a 100% para generar una economía circular confiable y que en realidad funcione el objetivo, que es la reutilización de la cantidad máxima de residuos generados. Sin embargo, en el sector de la construcción los RCD no se reutilizan en un 100% debido a que cierto porcentaje son escombros y no presentan la resistencia deseada para un nuevo producto, pero si se puede optar por investigar o analizar nuevos usos para ese residuo que actualmente no se utiliza y normalmente se lleva a vertedero. Una limitante importante en cuanto a la economía circular y los residuos de construcción y demolición es que no se conoce aún cuántas veces más se podría utilizar un RCD reciclado, ya que a su resistencia es menor cada vez más con su uso y debido a que las construcciones tienen una vida útil de 50 años o más, es difícil de conocer en estos momentos su reutilización indefinida.
 - La mejor producción de hormigón es el hormigón convencional en las alternativas ya que es el que presenta menores impactos ambientales. Esto puede ser debido a que los áridos reciclados tienen los largos tramos de transporte que generan impactos ambientales significativos. Como se indica en (Kleijer et al. 2017) existe un “límite” de distancia para cada indicador ambiental en la que los beneficios ambientales del hormigón con áridos reciclados son compensados, ya que las productoras de hormigón de cada región utilizan las mejores materias primas locales, el impacto ambiental real del concreto es distinto en todas las regiones y aunque la mezcla esté certificada en la misma clase de resistencia y utilizado para los mismos propósitos. Una opción para mejorar estos impactos ambientales es generar una instalación de trituradoras móviles para estar cercano a la planta productora de hormigón.
- ***Futuras líneas de investigación***
- Estudiar el uso del cemento con productos secundarios para conocer la viabilidad técnica entre un hormigón convencional y hormigón de cemento reciclado y también conocer su impacto económico, ya que es el producto con mayor impacto ambiental y económico en la producción del hormigón.
 - Se considera importante un estudio complementario acerca de propuestas de una economía circular para residuos de construcción y demolición y su modelización que permita observar su comportamiento a través de los años.

5 Referencias Bibliográficas

- Agricultura, D.E. & Ambiente, M., 2016. Plan Estatal Marco De Gestión De Residuos (Pemar). , pp.2016–2022.
- ARC, 2013. PreCAT.
- Bourguignon, D., 2016a. Closing the loop: New circular economy package. *European Parliamentary Research Service*.
- Bourguignon, D., 2016b. Closing the loop. New circular economy package. *European Parliamentary Research Service*.
- Bovea, M.D. & Powell, J.C., 2016. Developments in life cycle assessment applied to evaluate the environmental performance of construction and demolition wastes. *Waste Management*, 50, pp.151–172.
- Bravo, M. et al., 2015. Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. *Construction and Building Materials*, 77, pp.357–369. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.103>.
- De Brito, J. et al., 2016. Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete. *Journal of Building Engineering*, 6, pp.1–16. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2016.02.003>.
- Butera, S., Christensen, T.H. & Astrup, T.F., 2015. Life cycle assessment of construction and demolition waste management. *Waste Management*, 44, pp.196–205. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.011>.
- Cámbara, J.L., 2012. Análisis de la confiabilidad de las metodologías eicv. , p.143.
- Cardoso, R. et al., 2016. Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. *Waste Management*, 49, pp.131–145.
- CEDEX, 2014. Residuos de construcción y demolición. *Catálogo de residuos utilizables en construcción*. Available at: <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/35/residuos-de-construccion-y-demolicion/>.
- DES, D. de la sécurité et de l'environnement, 2007. Recyclage des déchets minéraux de chantier dans le canton de Vaud. , pp.1–54. Available at: http://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/territoire/construction/carrieres_gravieres/fichiers_pdf/Rapport_valorisation_materiaux.pdf.
- Duan, Z.H. & Poon, C.S., 2014. Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. *Materials and Design*, 58, pp.19–29. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.044>.

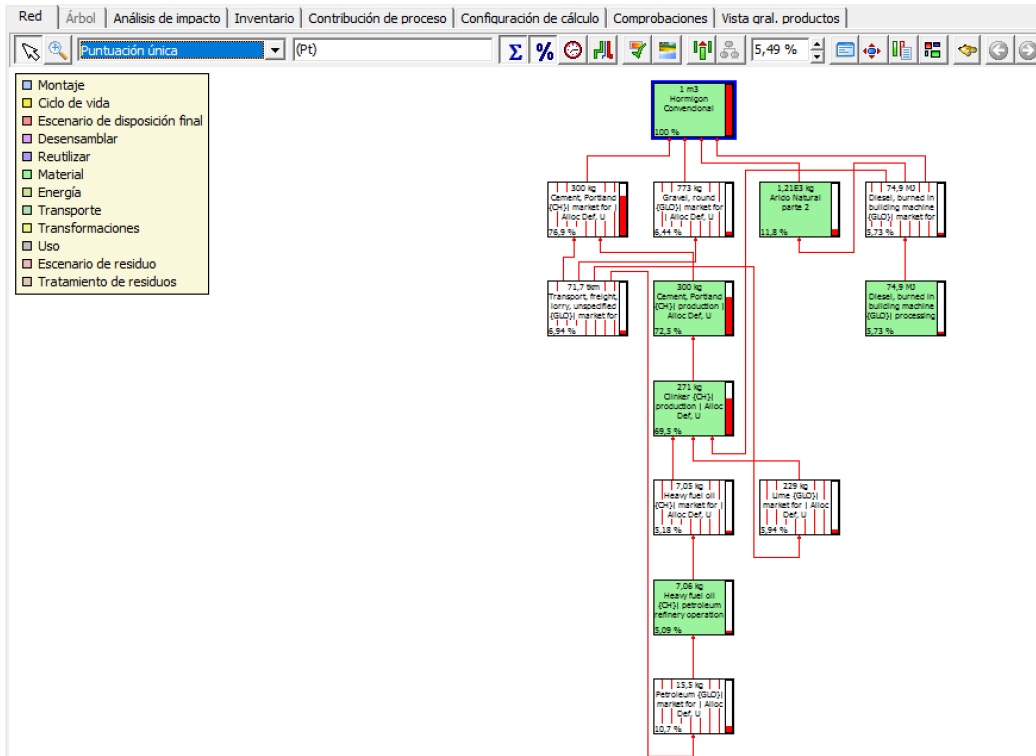
- Etxeberria, M. et al., 2007. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5), pp.735–742.
- Etxeberria, M. & Galindo, A., 2016. Estudio de la aplicación del árido reciclado mixto en hormigón poroso y como relleno de zanjas en la ciudad de Barcelona. *Informes de la Construcción*, 68(542), p.e142.
- FERCD, 2015. Informe De Produccion Y Gestion De Los Residuos De Construccion Y Demolicion (Rcd). , pp.1–50.
- Garcia-Rey, J. & Yepes, V., 2012. Environmental Assessment of Concrete Structures. *International Journal of Construction Engineering and Management*, 1(3), pp.33–41.
- Generalitat de Catalunya, 2010. Decreto 89/2010. *Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya*, pp.51930–51940.
- Generalitat de Catalunya, 2009. Decreto Legislativo 1/2009. *Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya*.
- GERD, 2013. Informe sobre gestión y control de la producción de los RCD en España periodo 2008 – 2011. , pp.1–41.
- Glavind, M., 2009. *Sustainability of cement, concrete and cement replacement materials in construction* Second Edi., Quebec: Elsevier Ltd. Available at: <https://books.google.com/books?hl=it&lr=&id=4VCKAgAAQBAJ&pgis=1>.
- Gonzalez, A. & Etxeberria, M., 2014. Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 52, pp.227–235. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.054>.
- Green Building Council Espana, 2014. Building a Common Home. In *World Sustainable Building Conference*. Available at: http://www.gbce.es/archivos/ckfinderfiles/WSB14/barcelona-manifesto_EN.pdf.
- Hossain, M.U. et al., 2016. Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA. *Resources, Conservation and Recycling*, 109, pp.67–77.
- Huysman, S. et al., 2017. Performance indicators for a circular economy: A case study on post-industrial plastic waste. *Resources, Conservation and Recycling*.
- Jefatura de Estado, 2011. Boletín Oficial del Estado (BOE-A-2011-13046). , pp.1–52.
- Junnila, S. & Arpad, H., 2003. Life-Cycle Environmental Effects of an Office Building. *Journal of Infrastructure Systems*, 9(4).
- Kleijer, A.L. et al., 2017. Product-specific Life Cycle Assessment of ready mix concrete: Comparison between a recycled and an ordinary concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, pp.210–218. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344917300393>.

- Knoeri, C., Sanyé-mengual, E. & Althaus, H., 2013. Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications. , 2006, pp.909–918.
- Landau, L., 2006. Residuos de construcción y demolición. *Universidad de Huelva*, pp.1–25. Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:No+Title#0>.
- Laserna, S., 2015. Avances en el comportamiento del propiedades mecánicas y simulación numérica.
- Maria, J. & Borr, T., 2013. Gestión de residuos en Cataluña.
- Marrero, M. et al., 2017. Assessing the economic impact and ecological footprint of construction and demolition waste during the urbanization of rural land. *Resources, Conservation and Recycling*, 117, pp.160–174. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092134491630297X>.
- Medina, C. et al., 2014. Influence of mixed recycled aggregate on the physical-mechanical properties of recycled concrete. *Journal of Cleaner Production*, 68, pp.216–225. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.002>.
- Medina, L., 2006. Proceso de fabricación del hormigón. , pp.51–57. Available at: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3319/55868-8.pdf>.
- Melrose, J., Perroy, R. & Careas, S., 2015. World population prospects. *United Nations*, 1(6042), pp.587–92. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21798940>.
- Özalp, F. et al., 2016. Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes. *Construction and Building Materials*, 110, pp.17–23.
- Parlamento Europeo, 2001. Catálogo Europeo de Residuos CER, aprobado por la Decisión 2000/532/CE. , p.24.
- Puthuserry, J. V., Kumar, R. & Garg, A., 2016. Evaluation of recycled concrete aggregates for their suitability in construction activities: An experimental study. *Waste Management*, 60, pp.270–276. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.008>.
- Rivela, B., 2010. Analisis de Ciclo de Vida. In *Construcción sostenible, nuevas perspectivas y normalización*. Madrid.
- Rodrigues, D., Luiz, J. & Zanellato, F., 2016. Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 124, pp.656–666.
- Rueda Páramo, A., 2011. Tipología de áridos reciclados en Cataluña y su aplicabilidad. , p.146.

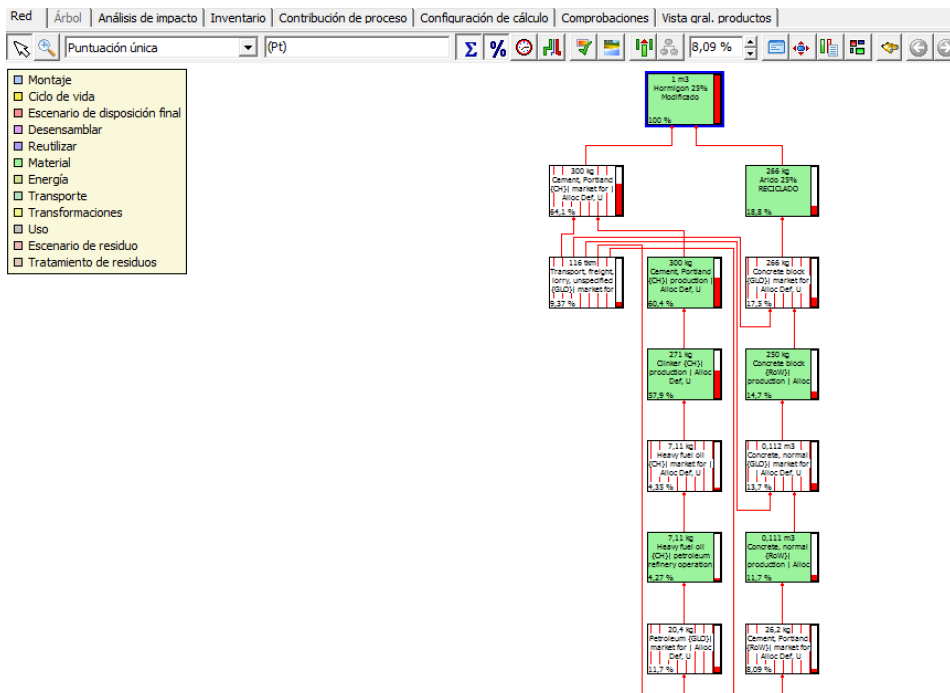
- Silva, R. V, de Brito, J. & Dhir, R.K., 2017. Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review. *Journal of Cleaner Production*, 143, pp.598–614. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616321357>.
- Súarez, S., 2015. Propuesta metodológica para evaluar el comportamiento ambiental y económico de los residuos de construcción y demolición (RCD) en la producción de materiales pétreos. , p.305.
- The Concrete Center, 2013. 5 Concrete Industry Sustainability Performance Report. , p.16. Available at: http://www.sustainableconcrete.org.uk/PDF/MB_7thPerformanceReport_SCF_2013data.pdf.
- Tošić, N. et al., 2015. Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use. *Journal of Cleaner Production*, 87(1), pp.766–776.
- Union Europea, 2017. La Eficiencia de los Recursos y los Residuos. Available at: http://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/es/FTU_5.4.6.pdf.
- Vegas, I. et al., 2015. Upgrading the quality of mixed recycled aggregates from construction and demolition waste by using near-infrared sorting technology. *Construction and Building Materials*, 75, pp.121–128.
- Wagih, A.M. et al., 2013. Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete. *HBRC Journal*, 9(3), pp.193–200. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1687404813000588>.

6 Anexos

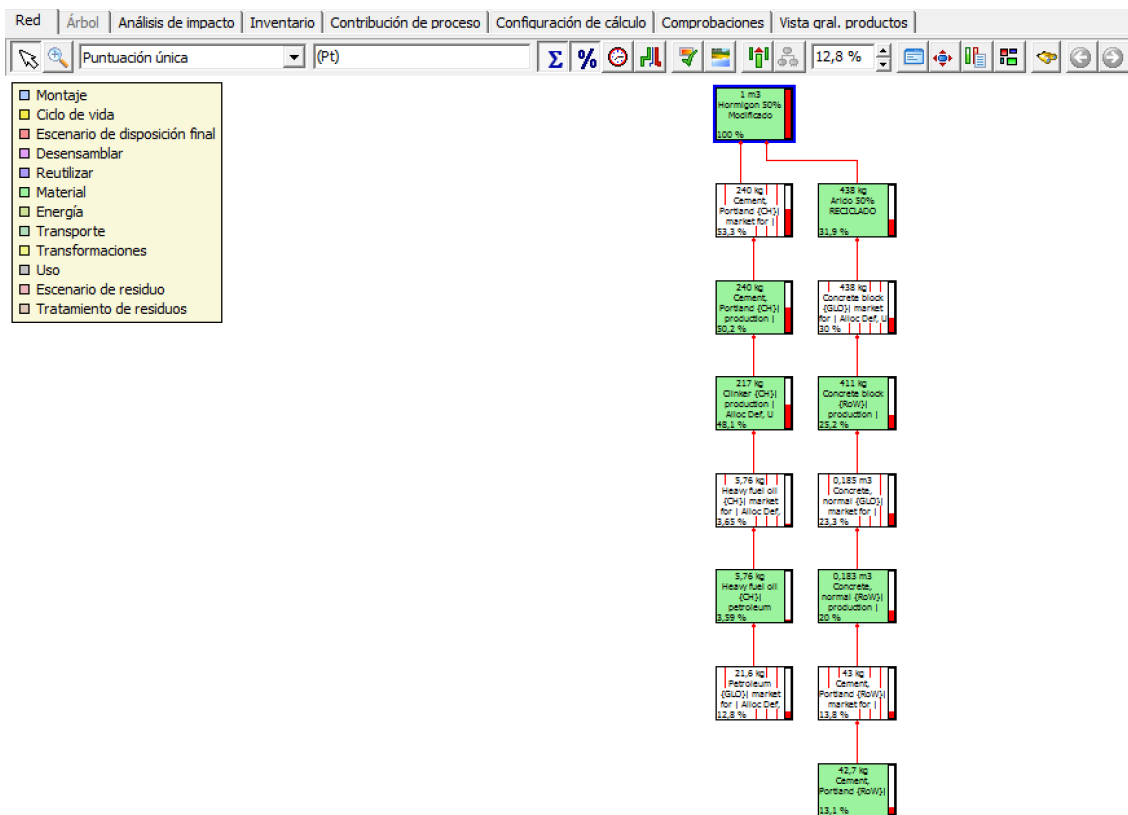
Anexo A. Red de 1m³ hormigón convencional



Anexo B. Red de 1m³ hormigón estructural con 25% árido reciclado



Anexo C. Red de 1m³ hormigón no estructural con 50% árido reciclado



Anexo D. Tabla de caracterización hormigón convencional

| Categoría de Impacto | Unidad | Aceite lubricante | Aceros | Cemento | Agua | Caucho sintético | Infraestructura planta | Árido fino | Árido grueso | Fuelo | Diesel | Electricidad | Tratamiento AR |
|----------------------|----------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|------------------|------------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|----------------|
| C | kg C2H3Cl eq | 0.000289693 | 0.004879647 | 1.0485113 | 0.003275482 | 0.001011486 | 0.067769159 | 0.13898144 | 0.13322418 | 0.000473505 | 0.017623512 | 0.008578289 | 0.000239185 |
| NC | kg C2H3Cl eq | 0.000219355 | 0.002534676 | 2.8339034 | 0.001705993 | 0.000210523 | 0.12603724 | 0.15087756 | 0.17299059 | 5.82607E-05 | 0.008667208 | 0.013281129 | 0.001383505 |
| IR | kg PM2.5 eq | 1.78157E-05 | 8.41116E-05 | 0.089958866 | 4.06618E-05 | 2.176E-05 | 0.002425283 | 0.015232061 | 0.019667804 | 1.10795E-05 | 0.005724761 | 0.000371302 | 5.64201E-06 |
| RI | Bq C-14 eq | 0.51479643 | 0.37776924 | 2317.4253 | 5.1819153 | 0.3626773 | 9.5662476 | 109.25631 | 59.841615 | 0.071964742 | 15.438107 | 287.36655 | 0.034985532 |
| AC O | kg CFC-11 eq | 1.13725E-08 | 2.88956E-09 | 9.27554E-06 | 8.48579E-09 | 4.70288E-09 | 1.41472E-07 | 1.37331E-06 | 1.17908E-06 | 4.25003E-09 | 3.8516E-07 | 3.57977E-07 | 2.97992E-10 |
| SOR | kg C2H4 eq | 8.57659E-05 | 3.55591E-05 | 0.025651778 | 1.78059E-05 | 1.94457E-05 | 0.000670435 | 0.005642511 | 0.012282642 | 1.44026E-05 | 0.002239365 | 0.000124796 | 2.07875E-06 |
| EC OA | kg TEG water | 2.301942 | 5.7937172 | 5514.6367 | 4.3666908 | 1.472745 | 284.14752 | 674.9753 | 24828.437 | 0.42736019 | 80.888512 | 124.88384 | 1.1522264 |
| ET | kg TEG soil | 0.52924878 | 2.3152455 | 1727.2179 | 1.0448997 | 0.39384273 | 105.72106 | 414.30979 | 6401.3177 | 0.088568346 | 19.463976 | 18.414259 | 1.3120865 |
| ANT | kg SO2 eq | 0.000313476 | 0.000849427 | 2.5282599 | 0.000602408 | 0.000340523 | 0.037261065 | 0.35082715 | 0.64583532 | 0.000257208 | 0.13873655 | 0.006539308 | 8.38226E-05 |
| OS | m2 org. arable | 0.000170645 | 0.000705356 | 0.9998147 | 0.000865911 | 0.000313319 | 0.20213256 | 0.53544161 | 0.51490858 | 3.56405E-05 | 0.00446118 | 0.02248641 | 0.000132502 |
| AC | kg SO2 eq | 0.000114772 | 0.000248092 | 0.48919669 | 0.000171941 | 0.000111986 | 0.012944816 | 0.070572352 | 0.096267561 | 6.48484E-05 | 0.020429918 | 0.001957442 | 2.20962E-05 |
| EA | kg PO4 P-lim | 5.91095E-06 | 2.96212E-05 | 0.007675132 | 6.79769E-06 | 4.28744E-06 | 0.002042023 | 0.001356148 | 0.001273507 | 6.64408E-07 | 0.000182157 | 0.000157974 | 4.34609E-06 |
| CG | kg CO2 eq | 0.013357726 | 0.04931617 | 255.07756 | 0.033571939 | 0.020655074 | 1.2772758 | 9.0502993 | 5.2786391 | 0.031560898 | 2.1186245 | 0.5441944 | 0.005295412 |
| ENR | MJ primary | 0.98556469 | 0.53200263 | 1205.3053 | 0.95640187 | 0.65184967 | 14.140464 | 140.20379 | 74.465416 | 0.54760065 | 32.794702 | 38.90301 | 0.05140395 |
| EM | MJ surplus | 0.001013178 | 0.046888119 | 2.3612722 | 0.003787346 | 0.00149301 | 1.6655545 | 0.53790567 | 1.2277633 | 0.000216819 | 0.046869246 | 0.046055561 | 0.002089893 |

EVALUACIÓN AMBIENTAL Y ECONÓMICA DE LA UTILIZACIÓN DE MATERIALES RECICLADOS PARA LA PRODUCCIÓN DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL Y NO ESTRUCTURAL EN CATALUÑA

Anexo E. Tabla de Caracterización hormigón 25% árido reciclado

| Categoría de Impacto | Unidad | Aceite lubricante | Aceero | Cemento | Agua | Caucho sintético | Infratructura planta | Árido fino natural | Árido Grueso Natural | Árido reciclado | Gas natural | Die sel | Electricidad | Fue lóleo | Disposición de residuos Hormigón | Disposición de residuos Sólidos | Tratamiento del efluente |
|----------------------|----------------|-------------------|--------------|------------|-------------|------------------|----------------------|--------------------|----------------------|-----------------|-------------|--------------|--------------|--------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| C | kg C2 H3 Cl eq | 0.000209317 | 0.0007042953 | 1.0485113 | 0.003275482 | 0.001043833 | 0.0067769159 | 0.13898144 | 0.000999151 | 0.545792 | 0.000473505 | 0.0017623512 | 0.005509276 | 0.0016469687 | 0.0002016631 | 7.10E-05 | 0.000239185 |
| NC | kg C2 H3 Cl eq | 0.000186681 | 0.0002250503 | 2.8339034 | 0.001705993 | 0.000212414 | 0.12603724 | 0.15087756 | 0.129739 | 0.80015812 | 5.83E-05 | 0.00867208 | 0.011531334 | 0.059460344 | 0.000239672 | 0.000415205 | 0.001383505 |
| IR | kg PM 2.5 eq | 1.49E-05 | 1.50E-05 | 89958866 | 4.07E-05 | 2.24E-05 | 0.002425283 | 0.015232061 | 0.014750405 | 0.040885904 | 1.11E-05 | 0.005724761 | 0.001798169 | 0.01073786 | 0.000273794 | 4.54E-06 | 5.64E-06 |
| RI | Bq C-14 eq | 0.5679129 | 0.40739915 | 2317.4253 | 5.1819153 | 0.32691244 | 9.5662476 | 109.25631 | 44.879849 | 279.51769 | 719.64742 | 15.438107 | 105.82814 | 18.248411 | 1.8408518 | 0.030865414 | 0.034985533 |
| ACO | kg CF C-11 eq | 1.15E-08 | 1.45E-09 | 9.28E-06 | 8.49E-09 | 4.52E-09 | 1.41E-07 | 1.37E-06 | 8.84E-07 | 3.70E-06 | 4.25E-09 | 3.85E-07 | 3.07E-07 | 4.00E-07 | 3.98E-08 | 3.75E-10 | 2.98E-10 |
| SOR | kg C2 H4 eq | 8.55E-05 | 5.49E-06 | 2565178 | 1.78E-05 | 1.93E-05 | 0.000670435 | 0.000564251 | 0.000921102 | 0.13885358 | 1.44E-05 | 0.002239365 | 0.000301191 | 0.000321976 | 0.000126194 | 1.21E-06 | 2.08E-06 |
| E COA | kg TE G water | 2.2367097 | 2.6061341 | 5514.6367 | 4.3666908 | 1.4625944 | 284.14752 | 674.9753 | 18620.762 | 2267.9872 | 0.42736019 | 80.888511 | 90.800723 | 283.9598 | 12.560741 | 2.5877728 | 1.1522264 |
| ET | kg TE G soil | 0.5076445 | 1.0075905 | 1727.2179 | 1.0448997 | 0.36525859 | 105.72106 | 414.30979 | 4800.8424 | 1131.181 | 88568346 | 19.463976 | 13.964301 | 94.10961 | 6.6761948 | 0.07897988 | 1.3120865 |
| ANT | kg SO 2 eq | 0.000274573 | 0.00021293 | 2.5282599 | 0.000602408 | 0.000333935 | 0.0037261065 | 0.35082715 | 0.48436177 | 0.9066285 | 0.000257208 | 0.13873655 | 0.036230853 | 0.0179479 | 0.0006552251 | 0.000303045 | 8.38E-05 |
| OS | m2 org. arable | 0.00064551 | 0.00073937 | 0.9991469 | 0.000865911 | 0.000271408 | 0.20213256 | 0.53544161 | 0.38616971 | 1.1116036 | 3.56E-05 | 0.00446118 | 0.018510798 | 0.14107312 | 0.017352143 | 0.00072342 | 0.00032502 |
| AC | kg SO 2 eq | 0.000181 | 5.91E-05 | 0.48919669 | 0.000171941 | 0.0001432 | 0.0012944816 | 0.0070572352 | 0.0072198477 | 0.1908981 | 6.48E-05 | 0.0020429918 | 0.011919502 | 0.000423376 | 0.0001160044 | 3.43E-05 | 2.21E-05 |

EVALUACIÓN AMBIENTAL Y ECONÓMICA DE LA UTILIZACIÓN DE MATERIALES RECICLADOS PARA LA PRODUCCIÓN DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL Y NO ESTRUCTURAL EN CATALUÑA

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|--------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--|---|--|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| E A | kg PO4 P-lim | 5.8 6E-06 | 3.4 4E-06 | 0.0 076 751 32 | 6.8 0E-06 | 4.4 3E-06 | 0.0 020 420 23 | 0.0 013 561 48 | 0.0 009 551 01 | 0.0 053 808 94 | 6.6 4E-07 | 0.0 001 821 57 | 0.0 001 632 68 | 0.0 002 537 98 | 2.2 1E-05 | 3.4 4E-06 | 4.3 5E-06 |
| C G | kg CO2 eq | 0.0 127 983 58 | 0.0 109 828 48 | 0.0 255 07 756 | 0.0 335 719 4 | 0.0 206 774 53 | 1.2 9.0 3.9 52. 315 2.1 2.0 694 431 200 052 954 12 | 9.0 3.9 52. 315 2.1 2.0 694 431 200 052 954 12 | 3.9 52. 315 2.1 2.0 694 431 200 052 954 12 | 52. 315 2.1 2.0 694 431 200 052 954 12 | 6.6 4E-07 | 0.0 001 821 57 | 0.0 001 632 68 | 0.0 002 537 98 | 2.2 1E-05 | 3.4 4E-06 | 4.3 5E-06 |
| E N R | MJ primary | 0.9 894 379 | 0.2 119 417 | 0.9 120 53 053 | 0.6 564 018 8 | 0.6 446 175 2 | 14. 140 20 464 | 140 20 464 | 55. 847 366 | 403 32 94 | 0.5 476 006 5 | 32. 794 702 | 40. 989 176 | 10. 305 752 | 3.6 259 275 | 0.0 409 854 42 | 0.0 514 039 51 |
| E M | MJ surplus | 0.0 010 049 58 | 0.0 011 761 73 | 2.3 037 612 722 | 0.0 037 873 46 | 0.0 016 484 94 | 1.6 379 207 545 | 0.5 379 207 7 | 0.9 207 944 9 | 3.1 440 579 | 0.0 002 168 19 | 0.0 468 692 46 | 0.0 220 226 69 | 0.1 247 490 8 | 0.0 047 634 14 | 0.0 001 797 82 | 0.0 020 898 93 |

Anexo F. Tabla de caracterización hormigón 50% árido reciclado.

| Categoría de Impacto | Unidad | Aceite lubricante | Aceero | Cemento | Agua | Caucho sintético | Infr aestructura planta | Árido fino natural | Árido Grosso Natural | Árido reciclado | Gas natural | Die sel | Electricidad | Fue lóleo | Disposición de residuos Hormigón | Disposición de residuos Sólidos | Tratamiento del efluente |
|----------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| C | kg C2 H3 Cl eq | 0.0 002 093 17 | 0.0 070 429 53 | 0.8 388 090 2 | 0.0 028 586 02 | 0.0 010 438 33 | 0.0 677 691 59 | 0.1 849 210 6 | 0.0 392 949 35 | 0.8 944 402 1 | 0.0 004 735 05 | 0.0 176 235 12 | 0.0 550 927 6 | 0.0 164 696 87 | 0.0 020 166 31 | 7.1 0E-05 | 0.0 002 391 85 |
| N C | kg C2 H3 Cl eq | 0.0 001 866 81 | 0.0 022 505 03 | 2.2 671 888 227 | 0.0 014 888 67 | 0.0 002 124 14 | 0.1 260 372 4 | 0.2 007 493 9 | 0.0 510 241 76 | 1.3 025 057 | 5.8 3E-05 | 0.0 086 672 08 | 0.0 115 313 34 | 0.0 594 603 44 | 0.0 020 396 72 | 0.0 004 152 05 | 0.0 013 835 05 |
| IR | kg PM 2.5 eq | 1.4 9E-05 | 1.5 0E-05 | 0.0 719 670 93 | 3.5 5E-05 | 2.2 4E-05 | 0.0 024 252 83 | 0.0 202 669 43 | 0.0 058 010 87 | 0.0 667 036 37 | 1.1 1E-05 | 0.0 057 247 61 | 0.0 017 981 69 | 0.0 010 737 86 | 0.0 002 737 94 | 4.5 4E-06 | 5.6 4E-06 |
| RI | Bq C-14 eq | 0.5 679 129 | 0.4 073 991 5 | 185 3.9 402 | 4.5 223 988 | 0.3 269 124 4 | 9.5 662 476 | 145 37 045 | 17. 650 493 | 454 16 394 | 0.0 719 647 42 | 15. 438 107 | 105 82 814 | 18. 248 411 | 1.8 408 518 | 0.0 308 654 14 | 0.0 349 855 33 |
| A C O | kg CF C-11 eq | 1.1 5E-08 | 1.4 5E-09 | 7.4 2E-06 | 7.4 1E-09 | 4.5 2E-09 | 1.4 1E-07 | 1.8 3E-06 | 3.4 8E-07 | 5.9 6E-06 | 4.2 5E-09 | 3.8 5E-07 | 3.0 7E-07 | 4.0 0E-07 | 3.9 8E-08 | 3.7 5E-10 | 2.9 8E-10 |
| S O R | kg C2 H4 eq | 8.5 5E-05 | 5.4 9E-06 | 0.0 205 214 23 | 1.5 5E-05 | 1.9 3E-05 | 0.0 006 704 35 | 0.0 075 076 14 | 0.0 036 228 08 | 0.0 223 893 73 | 1.4 4E-05 | 0.0 022 393 65 | 0.0 003 011 91 | 0.0 003 219 76 | 0.0 001 261 94 | 1.2 1E-06 | 2.0 8E-06 |

EVALUACIÓN AMBIENTAL Y ECONÓMICA DE LA UTILIZACIÓN DE MATERIALES RECICLADOS PARA LA PRODUCCIÓN DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL Y NO ESTRUCTURAL EN CATALUÑA

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| E C O A | kg TE G wat er | 2.2 367 097 | 2.6 061 341 | 441 1.7 093 | 3.8 109 301 | 1.4 625 944 | 284 .14 752 | 898 .08 502 | 732 3.2 338 | 365 9.6 985 | 0.4 273 601 9 | 80. 888 511 | 90. 800 723 | 283 .95 98 | 12. 560 741 | 2.5 877 728 | 1.1 522 264 |
| E T | kg TE G soil | 0.5 076 445 | 1.0 075 905 | 138 1.7 743 | 0.9 119 125 | 0.3 652 9 | 105 .72 106 | 551 .25 783 | 188 8.0 909 | 179 6.3 283 | 0.0 885 683 46 | 19. 463 976 | 13. 964 301 | 94. 109 61 | 6.6 761 948 | 0.0 789 8 | 1.3 120 865 |
| A N T | kg SO 2 eq | 0.0 002 745 73 | 0.0 002 129 3 | 2.0 226 079 | 0.0 005 257 38 | 0.0 003 339 35 | 0.0 372 610 65 | 0.4 667 913 2 | 0.1 904 913 7 | 1.4 805 752 | 0.0 002 572 08 | 0.1 387 365 5 | 0.0 362 308 53 | 0.0 065 522 479 | 0.0 065 51 | 0.0 001 030 45 | 8.3 8E- 05 |
| O S | m2 org .ar abl e | 0.0 001 645 51 | 0.0 002 739 37 | 0.7 998 517 5 | 0.0 007 557 04 | 0.0 002 714 08 | 0.2 021 325 6 | 0.7 124 291 7 | 0.1 518 740 8 | 1.7 700 437 | 3.5 6E- 05 | 0.0 044 611 8 | 0.0 185 107 98 | 0.1 410 731 2 | 0.0 173 521 43 | 0.0 002 723 42 | 0.0 001 325 02 |
| A C | kg SO 2 eq | 0.0 001 009 81 | 5.9 1E- 05 | 0.3 913 573 5 | 0.0 001 500 58 | 0.0 001 143 2 | 0.0 129 448 16 | 0.0 938 996 92 | 0.0 283 944 52 | 0.3 116 918 8 | 6.4 8E- 05 | 0.0 204 299 18 | 0.0 119 195 02 | 0.0 042 337 6 | 0.0 011 600 44 | 3.4 3E- 05 | 2.2 1E- 05 |
| E A | kg PO 4 P- lim | 5.8 6E- 06 | 3.4 4E- 06 | 0.0 061 401 05 | 5.9 3E- 06 | 4.4 3E- 06 | 0.0 020 420 23 | 0.0 018 044 15 | 0.0 003 756 25 | 0.0 087 926 34 | 6.6 4E- 07 | 0.0 001 821 57 | 0.0 001 632 68 | 0.0 002 537 98 | 2.2 1E- 05 | 3.4 4E- 06 | 4.3 5E- 06 |
| C G | kg CO 2 eq | 0.0 127 983 58 | 0.0 109 828 48 | 204 .06 204 | 0.0 292 991 47 | 0.0 206 774 53 | 1.2 772 758 | 12. 041 831 | 1.5 569 53 | 86. 234 031 | 0.0 315 608 98 | 2.1 186 245 | 2.0 125 725 | 0.4 694 268 5 | 0.1 431 168 6 | 0.0 200 413 01 | 0.0 052 954 12 |
| E N R | MJ pri ma ry | 0.9 894 379 | 0.2 119 417 | 964 .24 426 | 0.8 346 78 | 0.6 446 175 2 | 14. 140 464 | 186 .54 746 | 21. 963 834 | 652 .50 252 | 0.5 476 006 5 | 32. 794 702 | 40. 989 176 | 10. 305 752 | 3.6 259 275 | 0.0 409 42 | 0.0 514 039 51 |
| E M | MJ sur plu s | 0.0 010 049 58 | 0.0 011 761 73 | 1.8 890 177 | 0.0 033 053 21 | 0.0 016 484 94 | 1.6 655 545 | 0.7 157 077 2 | 0.3 621 330 5 | 5.1 661 498 | 0.0 002 168 19 | 0.0 468 692 46 | 0.0 220 226 69 | 0.1 247 490 8 | 0.0 047 634 14 | 0.0 001 797 82 | 0.0 020 898 93 |