05

HUELLA ECOLÓGICA DEL CEMENTO

Editor: Juan Cagiao Villar
Autores: Juan Cagiao • Juan Luis Doménech • Salvador Gutiérrez
Fernando Martínez • Belén González • Breixo Gómez

Fundación Ingeniería Civil de Galicia

UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Juan Cagiao Villar obtiene el título de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos en la Universidad Politécnica de Madrid en el año 1992. A continuación pasa a desempeñar labores de proyectista y de jefe de obra durante aproximadamente unos 5 años hasta que en 1997 decide vincularse con la Universidad de A Coruña (UdC) para comenzar a desarrollar su tesis doctoral en el área de Tecnologías del Medioambiente mediante una beca FPI en colaboración con el departamento de I+D+i de la empresa Aquagest Santiago hasta el año 1999. En este año se incorpora a la Dirección Técnica de la Confederación Hidrográfica del Norte para la puesta en marcha, diseño y gestión del sistema de depuración de A Coruña y del sistema de saneamiento integral de Ferrol, entre otros.

En el año 2002 se doctora con una tesis doctoral en materia de gestión de las aguas de lluvia en entornos urbanos obteniendo la calificación de sobresaliente cum laude.
Finalmente en el año 2004 abandona sus labores de dirección en la Confederación Hidrográfica del Norte para formar parte de la plantilla docente de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de A Coruña, año en el que también comienza su labor en la Dirección de la citada Escuela hasta la fecha actual. Actualmente su labor docente se reparte entre los grados de ingeniería civil (pre-Bolonia y Bolonia), el postgrado de ingeniería del agua y los programas de doctorado de ingeniería civil y de ingeniería del agua y del medioambiente de la UdC.

Autor de numerosos artículos científicos y partícipe en diversos proyectos de investigación, en el 2008 pone en marcha el Laboratorio de Ingeniería Sostenible (LIS) en colaboración con la Fundación de la Ingeniería Civil de Galicia y la ETS de Ingenieros de Caminos de la UdC, teniendo entre sus objetivos principales la introducción del concepto de desarrollo sostenible en la carrera de ingeniería de caminos, canales y puertos. La temática del libro que se presenta se enmarca en esta labor de diseño curricular, y por tanto, es parte integrante del mismo proyecto docente.

HUELLA ECOLÓGICA DEL CEMENTO

Cálculo de la huella ecológica de una industria cementera y propuesta de medidas de ingeniería sostenible destinadas a su reducción

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE
CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

laboratorio de ingeniería sostenible

Editor: Juan Cagiao Villar

COLECCIÓN INGENIERÍA CIVIL N. º 5

Portada:

Antonio Fernández Pérez

Edición:

FUNDACIÓN INGENIERÍA CIVIL DE GALICIA

© De esta edición:

FUNDACIÓN INGENIERÍA CIVIL DE GALICIA

Realización gráfica: Lugami Artes Gráficas

I. S. B. N.: 978-84-615-0034-5

Depósito legal: C 1014-2011

PRÓLOGO

El por qué de este libro

La anterior publicación de la Fundación de la Ingeniería Civil de Galicia en materia de Desarrollo Sostenible, *Ingeniería Civil para un Mundo Sostenible* (2.008), planteaba la necesidad de ir introduciendo transversalmente el concepto de DS en la formación del ingeniero de caminos, y la prolongación de esta enseñanza luego en la práctica profesional. Se trataba por tanto de una primera publicación que intentó abordar las principales temáticas relacionadas con el mundo de la ingeniería civil, como el territorio, la ciudad, el agua, la energía, los materiales, la propia formación, etc. a través de un primer acercamiento a ese espacio de intersección entre la ingeniería y el desarrollo sostenible, viendo cómo se pueden alimentar la una de la otra.

Esta nueva publicación responde de igual manera al proceso comenzado pero ya no de un modo generalista, sino que pone su atención en la temática de los materiales de construcción, y en particular en el mundo del hormigón y del cemento. Esta línea de acción se enmarca en el objetivo principal del Laboratorio de Ingeniería Sostenible (LIS, www.lis.edu.es) que no es otro que ir avanzando en las distintas disciplinas de la formación del ingeniero y de sus competencias profesionales, para ir explorando las posibilidades que el DS ofrece para conectar con los contenidos y empezar así a ir juntos de la mano.

¿Por qué el hormigón y el cemento?

Nunca es fácil decidir por dónde empezar, y a veces me pregunto si es aconsejable el formularse dicha cuestión. En cualquier caso, la motivación principal vino guiada por la indudable importancia del hormigón y del cemento en el mundo de la construcción y de la ingeniería en particular, tanto por las evidentes implicaciones funcionales como por las ambientales, ya no tan evidentes y conocidas, y que a continuación esbozo muy resumidamente.

El hormigón es el material de construcción más empleado en el mundo y, tras el agua, es el producto más consumido del planeta. Cada año, la industria del hormigón emplea 1.6 billones de toneladas de cemento, 10 billones de toneladas de roca y arena, y un billón de toneladas de agua. Cada tonelada de cemento requiere 1.5 toneladas de roca caliza así como del consumo de combustibles fósiles.

La gran popularidad del hormigón se debe a sus excelentes características, como gran durabilidad, resistencia, etc. No obstante, su uso también acarrea unos grandes costes medioambientales, destacando particularmente, la enorme cantidad de energía consumida y CO_2 liberado durante su fabricación.

En cualquier caso, y creo que es importante resaltarlo, no podemos caer en la injusticia de demonizar estos materiales, ni cualquier otro; no sería razonable ni justificable. Son indudables los beneficios que nos han reportado desde el comienzo mismo de su empleo, entre otras cosas porque su "no empleo" seguramente habría imposibilitado

construcciones que han hecho y siguen haciendo mucho por el DS, así como porque los materiales que los hubiesen sustituido podrían haber causado todavía un impacto mayor.

Un paso más: la cuantificación

Se introduce el empleo de la huella ecológica y de carbono al caso particular de una industria cementera. En particular, se aplica la metodología MC3 de la huella corporativa, cuyo padre es uno de los autores de la presente publicación, Juan Luis Doménech. Aprovecho para agradecerle todo el esfuerzo y dedicación mostrados así como el gran acierto de sus planteamientos teóricos y prácticos.

La alimentación de este modelo se realizó en base a datos reales de una industria cementera española, gracias a la inestimable colaboración de Salvador Mainar y Hortensia Mainar.

La Fundación de la Ingeniería Civil de Galicia y la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos de la Universidad de A Coruña

La consecución de un modelo de sociedad sostenible sin duda se sustenta, en buena medida, en la existencia de una adecuada sociedad de la información y de la comunicación. Lógicamente, en ello intervienen muchos agentes, pero quisiera destacar el papel fundamental que juegan las instituciones académicas y de investigación, y en particular, el de la Fundación de la Ingeniería Civil de Galicia y la E. T. S. I. de Caminos de la UDC por creer en proyectos como éste que nos ocupa. Mis más sinceros agradecimientos a Antonio Fernández Garitaonandía, Manolo Casteleiro, Fernando Martínez y Belén González.

Y finalmente, y no por ello menos importante, mi reconocimiento y agradecimiento a Breixo Gómez, un brillante e ilusionante ingeniero de caminos novel, cuyo compromiso y profesionalidad dedicados a este proyecto son del más digno elogio.

Juan Cagiao Villar

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

ÍNDICE

1. INTRUCCIÓN AL DESARROLLO SOSTENIBLE Y HUELLA ECOLÓGICA 12
1.1. El desarrollo sostenible 12
1.1.1. Ámbito de aplicación y definiciones 12
1.1.2. Un desarrollo económico y social respetuoso con el medio ambiente 13
1.1.3. Justificación del desarrollo sostenible 13
1.1.4. Condiciones para el desarrollo sostenible 13
1.1.5. Crítica en el uso del término 13
1.2. Breve historia del desarrollo sostenible 14
1.2.1. El medio ambiente pasado por alto en el siglo XIX 14
1.2.2. Desde 1968 15
1.3. Campos de aplicación 17
1.3.1. Agricultura 17
1.3.2. Actividades productivas y de servicios 17
1.4. División de Desarrollo Sostenible de la ONU 18
1.4.1. Comisión de la ONU para el Desarrollo Sostenible 18
1.4.2. Medidas 18
1.5. El desarrollo sostenible en España 19
1.6. El concepto de huella ecológica 20
1.6.1. Definición 20
1.6.2. Cálculo 20
1.6.3. Aplicación y metodologías 21
1.6.4. La huella ecológica en el mundo 22
2.1. Introducción 24
2.2. Vocabulario básico sobre residuos 25
2.3. Impacto ambiental de los componentes del hormigón 28
2.3.1. Introducción 28
2.3.2. Cemento Portland 28
2.3.2.1. Características generales 28
2.3.2.2. Uso de energía durante la producción de cemento Portland 29
2.3.2.3. Emisiones a la atmósfera 29
2.3.3. Agua 29
2.3.4. Áridos 30
2.3.5. Producción y transporte del hormigón 30
2.4. Reducción del impacto ambiental del cemento Portland 30
2.4.1. Reducción de la cantidad de cemento en la mezcla 31

2.4.2. Uso de sustitutos del cemento Portland 31
2.4.2.1. Cenizas volantes 31
2.4.2.2. Escoria molida granulada de alto horno 31
2.4.2.3. Humo de sílice 32
2.4.2.4. Escoria de cáscara de arroz 32
2.4.2.5. Metacaolín 32
2.4.2.6. Roca caliza molida 32
2.4.3. Sustitución de áridos naturales por materiales reciclados 32
2.4.3.1. Áridos de hormigón reciclado 32
2.4.3.2. Escoria de alto horno 33
2.4.3.3. Desechos plásticos reciclados 33
2.4.3.4. Vidrio triturado reciclado 33
2.5. Reducción del impacto ambiental mediante el uso de aditivos 33
2.6. Empleo de residuos como fuente de energía (valorización) 34
2.6.1. Utilización de residuos en plantas de cemento 34
2.6.1.1. Aspectos derivados del alto consumo energético 34
2.6.1.2. Emisiones de dióxido de carbono (CO_2) 34
2.6.1.3. Ventajas de las plantas de clínker para la valorización energética de residuos 35
2.6.1.4. Limitaciones en la valorización de residuos por emisiones a la atmósfera 36
2.6.1.5. Residuos susceptibles de tratamiento en plantas de clínker 37
2.6.2. Utilización de neumáticos fuera de uso 38
2.6.2.1. Antecedentes 38
2.6.2.2. Sistemas integrados de gestión de neumáticos fuera de uso 38
SIGNUS Ecovalor 38
Tratamiento de Neumáticos Usados – TNU 38
2.6.2.3. Neumáticos fuera de uso procedentes de desguaces de vehículos 39
2.6.2.4. El II Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso 2007 - 2015 39
2.6.3. Utilización de aceites usados 41
2.6.3.1.Antecedentes 41
2.6.3.2. Características de los aceites usados como combustible alternativo 41
2.6.3.3. Alternativas de gestión de los aceites usados 42
2.6.3.4. Regeneración de aceites usados 42
2.6.3.5. Sistema Integrado de Gestión. SIGAUS 43
2.6.3.6. Objetivos ecológicos establecidos en el Real Decreto 679/2006 44
2.6.4. Utilización de residuos industriales 45
2.6.4.1. Antecedentes 45
2.6.4.2. La valorización energética en el II Plan de Residuos Peligrosos 2007 - 2015 45
2.6.4.3. Inventario de residuos valorizables energéticamente 46
2.6.4.4. Instalaciones de blending de residuos para preparación de combustible 48

2.6.4.5. Valorización energética de residuos industriales no peligrosos 49
2.6.5. Utilización de harinas animales 50
2.6.5.1. Antecedentes 50
2.6.5.2. Transformación de subproductos en harinas de categoría 1 y 2 51
2.6.5.3. Valorización energética de harinas de categoría 1 y 2 51
2.6.6. Utilización de residuos procedentes de vehículos fuera de uso 52
2.6.6.1. Residuo ligero de fragmentación 52
2.6.6.2. Alternativas de gestión de la fracción ligera de fragmentación 53
2.6.6.3. Combustibles alternativos procedentes de Vehículos Fuera de Uso 53
2.6.7. Utilización de lodos de depuradoras de aguas residuales urbanas 54
2.6.7.1. Tratamiento de lodos de depuradora 54
2.6.7.2. Deshidratación mecánica 54
2.6.7.3. Estabilización biológica mediante compostaje 55
2.6.7.4. Secado térmico 55
2.6.7.5. Tratamiento térmico de lodos deshidratados 55
2.6.7.6. Aplicaciones de los lodos de depuradora 55
2.6.7.7. Utilización de lodos de depuradora en cementeras 56
2.6.7.8. Potencialidad de los lodos como combustible alternativo para cementeras 57
2.6.8. Utilización de residuos de plásticos agrícolas 57
2.6.8.1. Los residuos de plásticos agrícolas 57
2.6.8.2. Situación actual de la gestión de plásticos agrícolas 58
2.6.8.3. Valorización energética de plásticos agrícolas 58
2.6.9. Utilización de combustibles derivados de residuos urbanos 59
2.6.9.1. Antecedentes 59
2.6.9.2. Características de los Combustibles Derivados de Residuos para hornos de cemento 60
2.6.9.3. Posibilidades de obtención de Combustibles Derivados de Residuos a partir de residuos urbanos en España 60
2.6.9.4. Posibilidades de obtención de CDR en Galicia 61
2.6.9.5. Factores a considerar en la producción de Combustibles Derivados de Residuos 62
2.7. Uso eficiente del hormigón 63
2.7.1. Estructuras durables y no sobredimensionadas 63
2.7.2. Vida útil del hormigón 63
2.8. Otras medidas 63
3.1. Planteamiento del estudio 65
3.2. CASO A: Planta integral actual. Capacidad: 1,000,000 t/año 66
3.2.1. Descripción del proceso operativo 66
3.2.1.1. Canteras 66
3.2.1.2. Stock y prehomogenización 66

3.2.1.3.- Molienda y secado de crudo 66
3.2.1.4.- Homogenización y stock de crudo 66
3.2.1.5.- Cocción 67
3.2.1.6.- Añadidos al cemento 67
3.2.1.7.- Molienda de cemento 67
3.2.1.8.- Stock y expedición de cemento 68
3.2.1.9.- Tipos de cemento 68
3.2.1.10.- Datos de marcha 68
3.2.2. Esquema de funcionamiento 70
3.2.3. Análisis de costes 71
3.2.3.1. Costes de inversión 71
3.2.3.2. Terrenos – superficie construida 71
3.2.3.3. Gastos amortización 72
3.3. CASO B: Molienda de cemento. Capacidad: 1,000,000 t/año 74
3.3.1. Descripción del proceso operativo 74
3.3.1.1. Recepción y stock de materias primas 74
3.3.1.2. Molienda de cemento 74
3.3.1.3.- Stock y expedición de cemento 74
3.3.1.4.- Tipos de cemento 74
3.3.1.5.- Datos de marcha 75
3.3.2. Esquemas de funcionamiento 77
3.3.2.1. Procesado materias primas 77
3.3.2.2. Esquema tolvas 78
3.3.2.3. Esquema molienda 79
3.3.2.4. Esquema silos 80
3.3.2.5. Esquema ensacado – paletizado 81
3.3.3. Análisis de costes 82
3.3.3.1. Costes de inversión total 82
3.3.3.2. Terrenos – superficie construida 86
3.3.3.3. Costes de explotación 86
3.4. CASO C: Planta integral MTD. Capacidad: 1,000,000 t/año 87
3.4.1. Descripción del proceso operativo 87
3.4.1.1.-Canteras 87
3.4.1.2.-Stock y prehomogenización 87
3.4.1.3.- Molienda y secado del crudo 87
3.4.1.4.- Homogenización y secado del crudo 87
3.4.1.5.- Cocción 87
3.4.1.6.- Añadidos al cemento 88
3.4.1.7.- Molienda de cemento 88

3.4.1.8.- Stock y expedición de cemento 88
3.4.1.9.- Tipos de cemento 89
3.4.1.10.- Datos de marcha 89
3.4.2. Esquema de funcionamiento 91
3.4.2.1. Esquema de flujos 91
3.4.3. Análisis de costes 92
3.4.3.1. Costes de inversión 92
3.4.3.2. Terrenos – superficie construida 92
3.4.3.3. Gastos amortización 93
3.4.3.4. Costes de explotación 93
3.5. Datos generales 93
3.5.1. Empleo de materias primas 94
3.5.2. Huella equivalente materias primas 95
3.5.3. Personal total 96
3.5.4. Consumo de agua 97
3.5.5. Residuos generados 97
3.5.6. Caudales, gases y emisiones de polvo 98
3.5.7. Emisiones de gases 98
4.1. Introducción 99
4.2. La metodología MC3 99
4.2.1. Estructura de la herramienta de cálculo MC3 99
4.2.1.1. Selección de una metodología estandarizable 99
4.2.1.2. Antecedentes 101
4.2.1.3. Estructura de la herramienta MC3-V.2.0 102
4.2.2. Emisiones directas. Factores de emisión 104
4.2.2.1. Pasos para el cálculo de la huella del carbono de los combustibles 104
4.2.2.2. Conversión de huella de carbono a huella ecológica 105
4.2.2.3. Obtención de la contrahuella 106
4.2.3. Emisiones indirectas. La huella de la electricidad 106
4.2.3.1. Pasos para el cálculo de la huella del carbono del consumo eléctrico 106
4.2.3.2. Conversión de huella de carbono a huella ecológica 108
4.2.3.3. Obtención de la contrahuella 108
4.2.4. Otras emisiones indirectas. La huella de los materiales 108
4.2.4.1. Pasos para el cálculo de la huella del carbono de los materiales 108
4.2.4.2. Tipos de huella de materiales 112
4.2.4.3. Conversión de la huella de carbono a huella ecológica 115
4.2.4.4. Obtención de la contrahuella 115
4.2.5. La huella de los servicios y de las contratas 115
4.2.5.1. Pasos para el cálculo de la huella del carbono de los servicios 115

4.2.5.2. Tipos de servicios 118
4.2.6. La huella de los recursos agropecuarios y la pesca 121
4.2.6.1. Pasos para el cálculo de la huella agrícola, ganadera y pesquera 121
4.2.7. Huella forestal y huella hídrica 124
4.2.7.1. La huella forestal 124
4.2.7.2. Conversión de la huella de carbono a huella ecológica 126
4.2.7.3. Obtención de la contrahuella 126
4.2.7.4. La huella hídrica 126
4.2.7.5. Huella hídrica energética 126
4.2.7.6. Huella hídrica del suelo 127
4.2.8. La huella de la ocupación de suelo 127
4.2.9. La huella de los residuos, de los vertidos y de las emisiones 129
4.2.9.1. La huella de los residuos 129
4.2.9.2. Pasos para el cálculo de la huella de los vertidos 130
4.2.9.3. Obtención de la huella de los residuos 131
5.1. Introducción 135
5.2. Aplicación de la metodología MC3 al caso de una planta integral actual con capacidad de 1.000.000 t/año (Caso A) 135
5.2.1. Toma de datos 135
5.2.2. Aplicación 141
5.2.2.1. Costes de inversión 141
5.2.2.2. Terreno ocupado por la planta 141
5.2.2.3. Costes de explotación 142
5.2.2.4. Residuos generados 144
5.2.2.5. Emisiones de polvo 144
5.2.2.6. Emisiones de gases 144
5.2.2.7. Emisiones directas 145
5.2.2.8. PIB corporativo 145
5.2.2.9. Cantidad de producto 145
5.2.3. Comprobación final 145
5.3. Aplicación de la metodología MC3 al caso de una planta de molienda con capacidad de 1.000.000 t/año (Caso B) 146
5.3.1. Toma de datos 146
5.3.2. Aplicación 153
5.3.2.1. Costes de inversión 153
5.3.2.2. Terreno construido 153
5.3.2.3. Costes de explotación 154
5.3.2.4. Residuos generados 155
5.3.2.5. Emisiones de polvo 156

5.3.2.6. Emisiones de gases 156
5.3.2.7. Emisiones directas 156
5.3.2.8. Transporte marítimo 156
5.3.2.9. PIB corporativo 156
5.3.2.10. Cantidad de producto 157
5.4. Aplicación de la metodología MC3 al caso de una planta integral MTD con capacidad de 1.000.000 t/año (Caso C) 158
5.4.1. Toma de datos 158
5.4.2. Aplicación 161
5.4.2.1. Costes de inversión 161
5.4.2.2. Terreno ocupado por la planta 162
5.4.2.3. Costes de explotación 162
5.4.2.4. Residuos generados 163
5.4.2.5. Emisiones de polvo 164
5.4.2.6. Emisiones de gases 164
5.4.2.7. Emisiones directas 164
5.4.2.8. PIB corporativo 165
5.4.2.9. Cantidad de producto 165
5.5. Tablas de resultados 166
5.6. Gráficas de resultados 172
5.6.1. Emisiones de CO_2 según categorías de consumos 172
5.6.2. Huellas y contrahuellas totales 176
5.6.3. Huella neta total 177
5.6.4. Incidencia de cada categoría de consumo en la huella total de cada planta 177
6. CONCLUSIONES 179
6.1. Conclusiones y recomendaciones 179
6.2. Futuros desarrollos 185
6.3. Consideraciones finales 185
7. REFERENCIAS 187
ÍNDICE DE TABLAS 190
ÍNDICE DE FIGURAS 192