

7. ACV depósito armado acero inoxidable vs. acero al carbono.

En este apartado se desarrolla la comparación, mediante el análisis de ciclo de vida entre el hormigón armado de acero al carbono y el hormigón armado con barras corrugadas de acero inoxidable.

La realización de esta comparación exige establecer una unidad funcional. Esta elección se fundamenta en la búsqueda de una estructura de hormigón armado en que pudiera ser rentable en algún aspecto la utilización de barras corrugadas de acero inoxidable. En este caso se ha escogido como unidad funcional un depósito de aguas residuales. De este modo es posible aprovechar las ventajas que presenta el uso de acero inoxidable en ambientes corrosivos para la armadura. En la realización de este ACV se sigue el procedimiento definido por las normas ISO 14040 a 14043.

7.1. Definición del objetivo y alcance (ISO 14040)

7.1.1. Definición de los objetivos del estudio

La finalidad de este estudio es analizar la viabilidad del uso de armaduras corrugadas de acero inoxidable en elementos de hormigón en comparación con la alternativa más habitual: los elementos de hormigón armado con acero al carbono.

7.1.2. Elección de la unidad funcional

La unidad funcional elegida como punto de partida del estudio es un depósito en superficie contenedor de aguas residuales altamente agresivas con las características siguientes:

Altura de la lámina de agua: 5m

Densidad del líquido: 9,81 KN/m³

Clase de exposición interior: IV

Clase exposición exterior: IIb

Ancho máximo de fisura: 0,2mm

Canto útil del muro: 40 cm

Canto útil de la solera: 20 cm

Resistencia armaduras: $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$ (tanto acero inoxidable como acero al carbono)

La altura de la lámina de agua se establece de 5m por considerarse una medida habitual. El ancho de fisura se impone de 0,2mm por motivos de estanqueidad del depósito a pesar de que el hormigón armado con acero inoxidable podría aceptar anchos de fisura de 0,30 mm [Highways Agency; 2002] ó 0,35 mm [Gedge, G.; 2000].

No se elige un corrugado de acero inoxidable de resistencia superior a los 500N/mm² porque los límites de ancho máximo de fisura determinarán el cálculo del armado y la resistencia de la armadura no será determinante para establecer la cuantía necesaria. De este modo tenemos dos tipos de acero con resistencias equivalentes.

La resistencia del hormigón se ve afectada por el tipo de acero del armado. El uso de acero inoxidable permite relajar las exigencias por durabilidad con lo que se puede disminuir el contenido mínimo de cemento. Considerando un contenido mínimo de

cemento de 250 Kg/m^3 la resistencia del hormigón resultante podría ser de unos 25 N/mm^2 . En el caso de un hormigón armado con acero al carbono y sometido a una clase de exposición IV sería necesario un contenido mínimo de cemento 325 Kg/m^3 . Esta cantidad de cemento podría dar lugar a un hormigón de resistencia 30 N/mm^2 . Así pues:

Resistencia hormigón depósito inox: 25 N/mm^2
 Resistencia hormigón depósito carbono: 30 N/mm^2

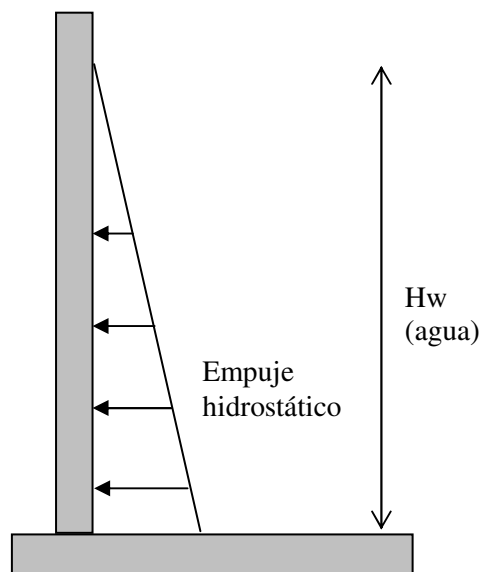
Los recubrimientos de las armaduras en los depósitos también vendrán influenciados por el tipo de armado. El corrugado de acero inoxidable hace posible rebajar el recubrimiento mínimo que correspondería a una clase de exposición agresiva hasta equiparlo al correspondiente a una clase de exposición normal. Así pues, un depósito armado con acero inoxidable sólo necesitará un recubrimiento mínimo de 2cm mientras que otro armado con acero al carbono debe cumplir con los 3,5cm de recubrimiento mínimo que exige la norma EHE para estas situaciones. Considerando un nivel de ejecución normal en ambas tipologías de depósito, se obtienen unos recubrimientos nominales de 3cm para el depósito armado con acero inoxidable y de 4,5cm para el depósito de acero al carbono valor que, ajustando a la precisión exigible en ejecución, se fija en 5cm.

Si a los cantos útiles fijados en ambos casos les añadimos los recubrimientos correspondientes obtenemos:

Canto muro HA acero carbono: 50 cm
 Canto muro HA acero inoxidable: 45cm (serían 46 pero se redondea a 45 por precisión de ejecución)
 Canto solera HA acero carbono: 30cm
 Canto solera HA acero inoxidable: 25cm (serían 26 pero se redondea a 25 por precisión de ejecución)

Los cálculos estructurales correspondientes a estos depósitos se recogen en el anejo de cálculo.

Figura 7.1. Esquema de fuerzas sobre el muro del depósito.



El estudio de esta unidad funcional se divide en dos partes: muro y solera, con la finalidad de hacerlo extensible a cualquier dimensión en planta. El muro se trabaja con unidades de metro lineal mientras que la solera se estudia con unidades de metro cuadrado. Vista la inexistencia en la práctica de la corrosión galvánica en las armaduras embebidas en el hormigón y en caso de resultar ventajoso, podría incluso plantearse la posibilidad de armar el muro con acero inoxidable y la solera con acero al carbono, o viceversa.

El depósito se supone lo suficientemente largo y ancho como para considerar puntuales los efectos esquina.

7.1.3. Determinación de los límites del sistema a considerar

Las etapas que se incluyen dentro del sistema estudiado porque se prevé que serán significativas quedan reflejadas en el árbol del ciclo de vida (ver figura 7.2).

7.1.4. Requisitos de calidad de los datos

Los datos de trabajo empleados tienen como máximo una antigüedad de 10 años y su origen se sitúa en la Unión Europea.

Las fuentes de estos datos serán las más científicas disponibles y serán contrastadas en la medida de lo posible con otras fuentes distintas.

El método de trabajo debe resultar claro, de forma que cualquier otra persona pueda reproducirlo con la finalidad de verificarlo.

Aún y cumpliendo estos requisitos hay que reconocer la limitación de la validez de los valores tomados. Estos valores proceden de diferentes fuentes, de varios países y contemplan diversos procesos. Aún más, la temática de cada artículo o estudio de los que se extrajeron estos datos no se centraba en la comparación del ACV de cada material. Hay muchos factores pues, que alteran estos valores, distancias de transporte, unidades funcionales, combustible utilizado, eficiencias energéticas, cantidad de reciclado dentro y fuera del proceso, composición y pureza de las materias primas utilizadas, para nombrar sólo algunos de estos factores. Las diferencias introducidas por estos factores se pueden observar en los ejemplos de eficiencia en el transporte de acero y en las centrales eléctricas en función del tipo de obtención de energía (ver tablas 7.1 y 7.2 respectivamente).

Tabla 7.1. Comparación de energía requerida en el transporte de acero entre Canadá y el Reino Unido [Lawson, B.; 1996].

Forma de Transporte	Consumo de energía (MJ/ton.km)	
	Canadá	Reino Unido
Carretera	1.18	4.50
Tren	0.49	0.60
Barco	0.12	0.25

Tabla 7.2. Eficiencia de la central eléctrica en función del tipo de fuente de energía [Caspersen, N.; 1996]

Tipo de fuente de energía	% Eficiencia en la Central Eléctrica
Energía Hidroeléctrica	90.0
Energía Nuclear	33.0
Combustibles Convencionales (fósiles) (EU)	37.8
Combustibles Convencionales (fósiles) (mundial)	31.9

La tabla 7.1 compara el consumo total de energía según tipos diferentes de transporte de acero para dos países diferentes. Las implicaciones son las siguientes: si se contempla una distancia a cubrir de 100km significa que el acero de Canadá transportado en carretera sólo consume 118MJ/tonelada comparado con los 450MJ/tonelada que supondría la misma forma de transporte de acero en el Reino Unido. Si se pasa a una base en MJ/kg para el estudio presente, sugiere que este cambio no es significativo (0.12 MJ/kg contra 0.45MJ/kg), cuando los materiales estudiados se contemplen en escalas de miles de toneladas puede ser significativo.

Similares implicaciones se derivan de las diferencias de la tabla 7.2. El acero producido con una fuente de energía hidroeléctrica consumirá significativamente menos energía y recursos que el producido con combustibles convencionales.

7.2. Análisis de inventario del ciclo de vida (ISO 14041)

La fase de inventario consiste en una recopilación de datos para cuantificar las entradas y salidas de materia y energía del sistema estudiado.

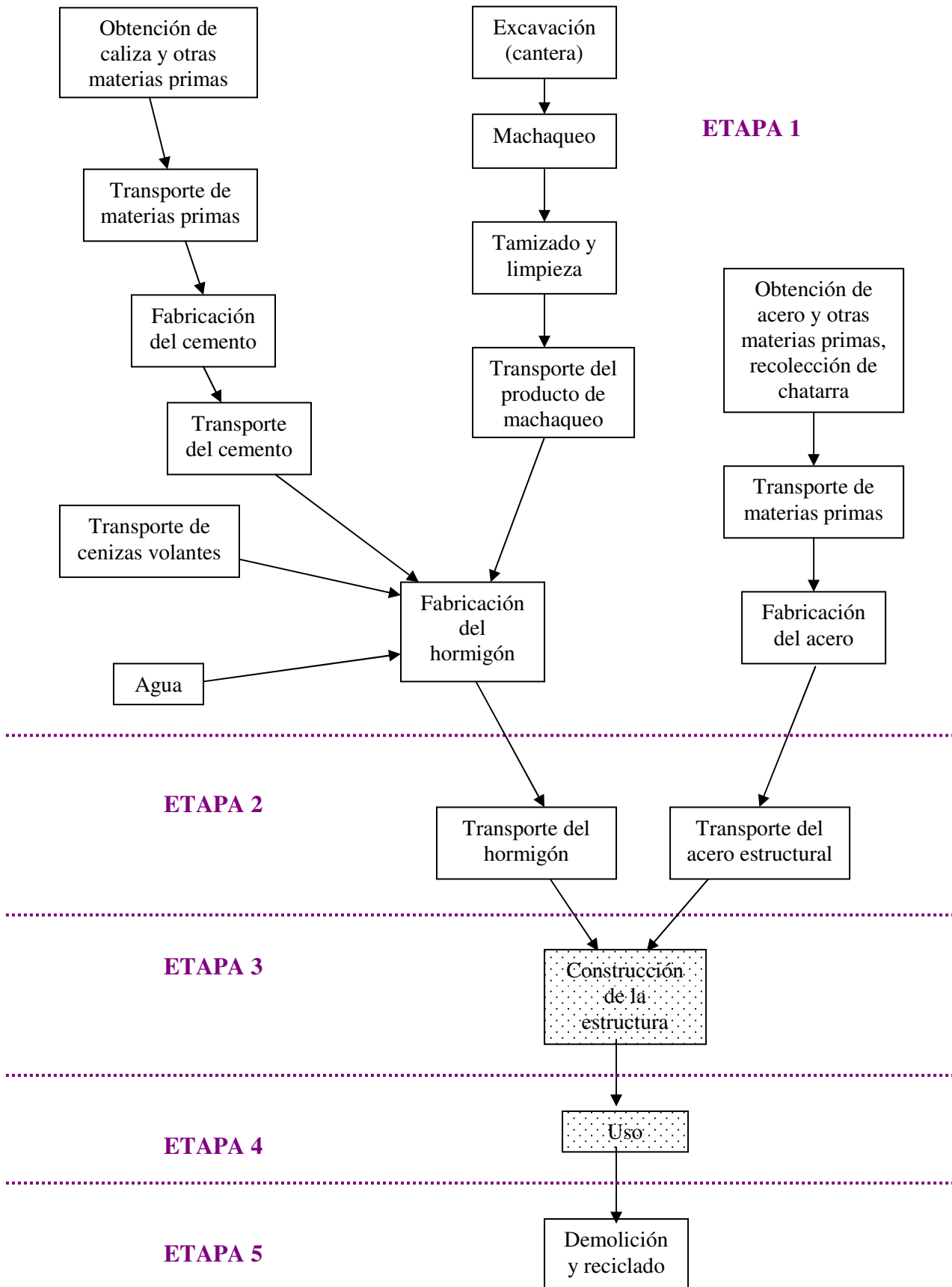
El análisis de inventario empieza definiendo el sistema a estudiar. A continuación divide este sistema en diferentes etapas para organizar el estudio y finalmente establece los flujos materiales y energéticos que implica cada etapa.

7.2.1. El sistema: construcción del árbol del ciclo vital

Para la construcción del árbol del ciclo vital de cualquier elemento o proceso se deben tener en cuenta todas las etapas implicadas en la existencia de dicho elemento o proceso, es decir desde la extracción de las primeras materias que harán posible su creación hasta los residuos que generará su destrucción. Por esta razón se suele decir que un análisis de ciclo de vida implica un estudio “de la cuna a la tumba”.

El sistema de la estructura de hormigón armado que sometemos a estudio se refleja en el árbol de ciclo vital de la figura 7.2.

Figura 7.2. Árbol de ciclo de vida de una estructura de hormigón armado.



7.2.2. Recolección de datos (Fuentes)

Las fuentes utilizadas en la realización del análisis irán siendo citadas en el decurso del mismo.

7.2.3. Identificación de la contribución de flujos a las diferentes etapas del ciclo de vida, e identificación de las etapas más representativas.

Las descripciones actuales del ciclo de vida de una estructura distinguen en él distintas etapas:

- El análisis detallado de los efectos de la adquisición y fabricación de los materiales necesarios para la producción de materiales constructivos, componentes y materiales de montaje.
- El transporte de dichos materiales constructivos.
- El uso de recursos y los efectos ambientales incurridos a lo largo de la construcción de la estructura.
- El uso de recursos y los efectos ambientales incurridos a lo largo de la vida efectiva de la estructura.
- La deposición de la estructura al final de su vida útil.

Así pues, para organizar el estudio, dividiremos el ciclo de vida del depósito de hormigón armado en 5 etapas:

- Etapas 1 --- Fabricación de hormigón y acero
- Etapas 2 --- Transporte de hormigón y acero
- Etapas 3 --- Construcción de la estructura
- Etapas 4 --- Uso de la estructura
- Etapas 5 --- Demolición y reciclado

Etapas 1 --- Fabricación de hormigón y acero

En primer lugar es necesario calcular la cantidad de material necesaria para cada tipo de depósito tal y como queda definido en el apartado 7.1.2, el armado con acero al carbono y el armado con acero inoxidable. La tabla 7.3 recoge los resultados de este cálculo recogido en el anejo de cálculo.

Tabla 7.3. Material necesario según la tipología de depósito

Material	Depósito acero carbono		Depósito acero inoxidable	
	Muros	Solera	Muros	Solera
Peso de hormigón	5,88 t / m	0,71 t / m ²	5,29 t / m	0,59 t / m ²
Peso de acero /m	249,40 kg acero /m	9,48 Kg/m ²	239,45 kg acero /m	7,90 Kg/m ²

El siguiente paso consiste en calcular las emisiones totales generadas por la fabricación de todo el hormigón y el acero necesarios para la construcción de la estructura. Para ello se recurre a los datos de emisiones unitarias tanto gaseosas como sólidas y líquidas recogidos en las tablas 5.2 y 6.3 y se multiplican por las cantidades totales de material utilizado. Los resultados de las emisiones totales se presentan en las tablas 7.4 y 7.5.

Tabla 7.4 Emisiones totales debidas a la fabricación de hormigón y acero por metro lineal de muro.

Elemento	HA-25/II (Depósito acero inox)		HA-30/IV/ (Depósito acero carbono)		Acero Inox		Acero Carbono	
	Emisión por unidad de peso	Emisión /m	Emisión por unidad de peso	Emisión /m	Emisión por unidad de peso	Emisión /m	Emisión por unidad de peso	Emisión /m
Volumen necesario	2,25	m3/m	2,50	m3/m				
Peso necesario	5,29	t/m	5,88	t/m	239,45	Kg/m	249,40	Kg/m
Energia	MJ/Kg	MJ	MJ/Kg	MJ	MJ/Kg	MJ	MJ/Kg	MJ
Fuel fósil + electricidad	1,16	6133,50	1,36	7990,00	19,00	4549,47	19,00	4738,56
Materias primas	Kg/ton	Kg	Kg/ton	Kg	g/Kg	g	g/Kg	g
Caliza	170,00	898,88	170,00	998,75	225,00	53875,36	225,00	56114,48
Otros productos minerales	850,00	4494,38	850,00	4993,75				
Agua	80,00	423,00	80,00	470,00				
Ganga de hierro					1500,00	359169,06	1500,00	374096,51
Carbón (en forma de coque)					750,00	179584,53	750,00	187048,25
Emisiones	Kg / t	Kg	Kg / t	Kg	g/Kg	Kg	g/Kg	Kg
Dióxido de carbono (CO ₂)	128,00	676,80	166,00	975,25	1950,00	466,92	1950,00	486,33
Óxido de nitrógeno (NO _x)	0,580	3,07	0,640	3,76	3,000	718,34	3,000	0,75
Óxido de sulfuroso (SO ₂)	0,140	0,74	0,140	0,82	4,000	957,78	4,000	1,00
Metano (CH ₄)	0,130	0,69	0,130	0,76	0,626	149,89	0,626	0,16
Componentes orgánicos volátiles (COV _{tot})	0,180	0,95	0,180	1,06	0,234	56,03	0,234	0,06
Polvo	0,023	0,12	0,023	0,14				
Metales pesados (Cr,As,Cd,Hg,Tl,Pb) (<i>grs</i>)	0,021	0,11	0,024	0,14	37,000	8859,50	37,000	9,23
Escoria granulada					145,00	34719,68	145,00	36,16
Escoria					230,00	55072,59	230,00	57,36
Agua residual (litros/kg)					150,00	35916,91	150,00	37,41

Tabla 7.5 Emisiones totales debidas a la fabricación de hormigón y acero por metro cuadrado de solera

Elemento	HA-25/I/ (Depósito acero inox)		HA-30/IV/ (Depósito acero carbono)		Acero Inox Armadura mínima en ambos casos		Acero	
	Emisión por unidad de peso	Emisión /m2	Emisión por unidad de peso	Emisión /m2	Emisión por unidad de peso	Emisión /m2	Emisión por unidad de peso	Emisión /m2
Volumen necesario	0,25	m3/m2	0,30	m3/m2				
Peso necesario	0,59	t /m2	0,71	t /m2	7,90	Kg/m2	9,48	Kg/m2
Energía	MJ/Kg	MJ	MJ/Kg	MJ	MJ/Kg	MJ	MJ/Kg	MJ
Fuel fósil + electricidad	1,16	681,50	1,36	958,80	19,00	150,10	19,00	180,12
Materias primas	Kg/ton	Kg	Kg/ton	Kg	g/Kg	g	g/Kg	g
Caliza	170,00	99,88	170,00	119,85	225,00	1777,50	225,00	2133,00
Otros productos minerales	850,00	499,38	850,00	599,25				
Agua	80,00	47,00	80,00	56,40				
Ganga de hierro					1500,00	11850,00	1500,00	14220,00
Carbón (en forma de coque)					750,00	5925,00	750,00	7110,00
Emisiones	Kg / t	Kg	Kg / t	Kg	g/Kg	Kg	g/Kg	Kg
Dióxido de carbono (CO ₂)	128,00	75,20	166,00	117,03	1950,00	15,41	1950,00	18,49
Óxido de nitrógeno (NO _x)	0,58	0,34	0,64	0,45	3,00	23,70	3,00	0,03
Óxido de sulfuroso (SO ₂)	0,14	0,08	0,14	0,10	4,00	31,60	4,00	0,04
Metano (CH ₄)	0,13	0,08	0,13	0,09	0,63	4,95	0,63	0,01
Componentes orgánicos volátiles (COV _{tot})	0,18	0,11	0,18	0,13	0,23	1,85	0,23	0,00
Polvo	0,02	0,01	0,02	0,02	?		?	
Metales pesados (Cr,As,Cd,Hg,Tl,Pb) (grs)	0,02	0,01	0,02	0,02	37,00	292,30	37,00	0,35
Escoria granulada					145,00	1145,50	145,00	1,37
Escoria					230,00	1817,00	230,00	2,18
Agua residual (litros/kg)					150,00	1185,00	150,00	1,42

Etapa2 --- Transporte de hormigón y acero

El hormigón se distribuye habitualmente al lugar de construcción desde la planta de fabricación usando camiones hormigonera que mantienen el hormigón fluido durante su transporte. Las distancias de transporte están limitadas por el tiempo que el hormigón aguanta con la consistencia deseada dentro de la hormigonera. Este tiempo máximo suele ser de dos horas a no ser que se le añada algún agente retardador.

El acero suele ser transportado del lugar de fabricación a la obra mediante camiones diesel. Ha sido asumido que todos los materiales se transportan en vehículos diesel, típicamente de capacidades entre las 5 y las 40 toneladas.

Las cargas ambientales producidas por el transporte dependen de la cantidad de material transportado (en peso) y del recorrido (en Km.).

La distancia de acarreo al lugar de la construcción, depende de la proximidad de dicho lugar al centro de distribución o proveedor de materiales. La distancia variará considerablemente con el tamaño del área urbana, de un proyecto a otro en una misma ciudad y de un material a otro.

Según los suministradores, las distancias medias de acarreo, ida y vuelta, se encuentran entre los 30 y los 50 km. Con estos datos se hacen las siguientes suposiciones:

- La distancia de acarreo media del hormigón fresco y del acero es de 40 km ida y vuelta.
- El consumo de fuel está promediado entre un viaje de ida a plena carga y un viaje de vuelta en vacío. Se asume que ambas mitades del viaje suponen la misma distancia. Dicho consumo se establece a 33 litros/100Km [Medi Ambient i Habitatge, Gencat; 2005]. Un litro de combustible diesel equivale a un consumo medio de energía de 40 MJ. Por lo tanto, el consumo energético en el transporte será de 1320MJ/100Km.

El cálculo del consumo de energía total debido al transporte requiere saber cuanto material llena un camión y, en consecuencia, cuantos camiones son necesarios.

La tabla 7.6 resume las condiciones de transporte de los diferentes materiales de construcción necesarios para la construcción del depósito.

Tabla 7.6. Condiciones del transporte de materiales

Material	Distancia (Km.)	Tipo de transporte
Hormigón	40	Hormigonera diesel 26 t
Acero carbono	40	Camión diesel 40 t
Acero inoxidable	40	Camión diesel 40 t

La tabla 7.7 recoge la energía consumida y las emisiones generadas por vehículo y kilómetro requeridos para transportar los materiales desde la planta de fabricación hasta el lugar de ejecución de la obra.

Tabla 7.7. Emisiones por transporte [Medi Ambient i Habitatge, Gencat; 2005]

	Camión carretera (/veh/km)
Energía	13,2 MJ
CO	8 g CO
NO_x	17,5 g NO _x
COV	2,8 g COV eq
CO2	1158,0 g CO2 eq
SO2	1,58 g SO2 eq

A partir de los datos de emisiones contenidos en la tabla 7.7 y conociendo la distancia media y las capacidades de cada vehículo a considerar se obtienen los resultados de emisiones totales debidas al transporte de hormigón y acero que se reflejan en la tabla 7.8.

Tabla 7.8. Emisiones totales debidas al transporte de hormigón y acero para los **muros**

	Depósito acero carbono		Depósito acero inoxidable	
	Transporte hormigón	Transporte acero	Transporte hormigón	Transporte acero inoxidable
Energía	110,79	4,70	99,71	4,52
CO (g/m)	67,14	2,85	60,43	2,74
NO_x(g/m)	146,88	6,23	132,19	5,99
COV(g/m)	13,26	0,56	11,93	0,54
CO2(g/m)	9718,93	412,58	8747,04	396,11
SO2(g/m)	23,50	1,00	21,15	0,96

Tabla 7.9. Emisiones totales debidas al transporte de hormigón y acero para la **solera**

	Depósito acero carbono		Depósito acero inoxidable	
	Transporte hormigón	Transporte acero	Transporte hormigón	Transporte acero inoxidable
Energía (MJ/m2)	13,29	0,18	11,08	0,15
CO (g/m2)	8,06	0,11	6,71	0,09
NO_x(g/m2)	17,63	0,24	14,69	0,20
COV(g/m2)	1,59	0,02	1,33	0,02
CO2(g/m2)	1166,27	15,68	971,89	13,07
SO2(g/m2)	2,82	0,04	2,35	0,03

Etapa3 --- Construcción de la estructura

Podemos considerar que la construcción de la estructura tiene básicamente los mismos costes ambientales en las dos tipologías consideradas.

Figura 7.1. Depósito de hormigón armado de una EDAR en construcción

Etapa4 --- Uso

Se establece como hipótesis de trabajo que el uso de la estructura tiene los mismos costes para las dos tipologías consideradas.

Etapa5 --- Demolición y reciclado

Una vez finalizada la vida útil de la estructura se procederá a su demolición y al posible reciclado de los residuos de demolición.

Las cantidades en peso de residuos de demolición serian las siguientes:

muro depósito carbono	= 6,12 t residuo / m lineal
muro depósito inox	= 5,53 t residuo / m lineal
solera depósito carbono	= 0,714 t residuo / m ²
solera depósito inox	= 0,595 t residuo / m ²

Para esta etapa siguen en vigencia las suposiciones contempladas anteriormente:

- La distancia de acarreo media del hormigón fresco y del acero al lugar de deposición del residuo de la demolición es de 40 km ida y vuelta.
- El consumo de fuel está promediado entre un viaje de ida a plena carga y un viaje de vuelta en vacío. Se asume que ambas mitades del viaje suponen la misma distancia.

La realidad del reciclaje de los residuos de la construcción en España pese a su gran potencial es meramente testimonial (un 10%). Por esta razón, no se le descuenta a la extracción de materias primas. Tan sólo se tienen en cuenta las emisiones generadas durante el transporte al lugar de deposición del residuo procedente de la demolición (ver tabla 7.10).

Tabla 7.10. Emisiones totales debidas al transporte de los residuos de demolición de hormigón y acero

	Depósito acero carbono		Depósito acero inoxidable	
	Muro (/m lineal)	Solera (/m ²)	Muro (/m lineal)	Solera (/m ²)
Energía (MJ)	80,84	9,43	72,96	7,86
CO (g)	49,00	5,72	44,22	4,76
NO _x (g)	107,18	12,50	96,72	10,42
COV (g)	9,68	1,13	8,73	0,94
CO ₂ (g)	7092,05	827,37	6400,20	689,47
SO ₂ (g)	17,15	2,00	15,48	1,67

7.2.4. Procedimientos de cálculo

Los procedimientos de cálculo quedan recogidos en el anejo de cálculo.

7.3. Evaluación del impacto del ciclo de vida (ISO 14042)

7.3.1. Selección de las categorías impacto y asignación de los datos del inventario.

Cada material puede tener un número diferente de impactos ambientales asociados a su ciclo de vida, y mientras algunos de estos impactos pueden ser iguales para hormigón y acero, hay también otros impactos que sólo son significativos para uno de los dos materiales. Es pues necesario hallar una base común desde la que el estudio pueda ser conducido, que se extienda a través de todo el ciclo vital de cada material y que nos facilite la comparación.

Para este caso se contemplan las categorías de impacto siguientes: efecto invernadero, lluvia ácida, eutrofización, niebla fotoquímica, energía consumida, generación de residuos sólidos y líquidos y emisión de metales pesados.

Se desestima estudiar la disminución del ozono estratosférico puesto que no hay emisiones de CFC en todo el ciclo de vida de la estructura. Por otro lado, no se recogen los impactos de agotamiento de recursos ni de toxicidad debido a la dificultad que supone su cálculo. El valor que se usará para el cómputo global del impacto, es decir, el Eco-indicador 95 tampoco contempla estas dos últimas categorías de impacto por la misma razón.

7.3.2. Determinación de los flujos que se contemplan en este análisis de impacto y determinación de su contribución a dicho impacto.

En este apartado se procederá a recoger los flujos que afectan a cada categoría de impacto en cada etapa y se cuantificarán dichos impactos.

Efecto invernadero: El cálculo del valor asociado a esta categoría de impacto se realiza tomando los potenciales de calentamiento global publicados en 2001 por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) en su tercer informe analítico (ver tabla 4.1.). Estos potenciales se usan para la conversión de las emisiones que contribuyen al efecto invernadero a unidades equivalentes, en este caso a Kg de CO₂ equivalentes. Los gases que se emiten durante el ciclo de vida útil de la estructura de hormigón armado y contribuyen al efecto invernadero son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y los óxidos de nitrógeno (NO_x).

A continuación, la tabla 7.11 refleja la contribución potencial al calentamiento por etapas del ciclo de vida y el valor total del efecto invernadero. Es necesario recalcar que las magnitudes de esta categoría se expresan en Kg. a diferencia de las tres categorías siguientes que se expresan en gramos.

Tabla 7.11. Potencial de calentamiento global

Etapa	Potencial de calentamiento global			
	Depósito acero carbono		Depósito acero inoxidable	
	Kg. CO2-eq/m Muro	Kg. CO2-eq/m ² Solera	Kg. CO2-eq/m Muro	Kg. CO2-eq/m ² Solera
Fabricación (hormigón+acero)	2.817,16	279,73	2.283,36	200,35
Transporte	10,13	1,18	9,14	0,98
Demolición	7,09	0,83	6,40	0,69
TOTAL	2.834,38	281,74	2.298,90	202,02

Según los resultados obtenidos, el uso de acero inoxidable permite disminuir en un 20% las emisiones de CO2 causantes del efecto invernadero.

Lluvia ácida: Para el cálculo se toman los factores de equivalencia derivados del Eco-indicador 95 (Ver tabla 4.3). Los gases que se emiten durante el ciclo de vida útil de la estructura de hormigón armado y contribuyen a la acidificación de la lluvia son el óxido sulfuroso (SO2) y los óxidos de nitrógeno (NOx)

A continuación, la tabla 7.12 refleja la contribución a la acidificación por etapas del ciclo de vida y el valor total del potencial de acidificación.

Tabla 7.12. Potencial de acidificación

Etapa	Potencial de acidificación			
	Depósito acero carbono		Depósito acero inoxidable	
	g. SO2-eq/m Muro	g. SO2-eq/m ² Solera	g. SO2-eq/m Muro	g. SO2-eq/m ² Solera
Fabricación	4.976,00	472,40	4.348,00	369,00
Transporte	121,00	14,12	109,20	11,76
Demolición	84,70	9,88	76,44	8,23
TOTAL	5.181,70	496,40	4.533,64	388,99

Los resultados obtenidos indican que el uso de acero inoxidable permite disminuir la contribución a la acidificación en un 13% por metro lineal de muro y en un 20% por metro cuadrado de solera.

Eutrofización: En el cálculo del potencial de esta categoría de impacto ambiental se toman los factores de equivalencia, respecto al fosfato, derivados del Eco-indicador 95 (Ver tabla 4.4). Las sustancias que se generan durante el ciclo de vida útil de la estructura de hormigón armado y contribuyen a la eutrofización de las aguas son los óxidos de nitrógeno (NOx).

A continuación, la tabla 7.13 refleja la contribución a la eutrofización por etapas del ciclo de vida y el valor total del potencial de eutrofización.

Tabla 7.13. Potencial de eutrofización

Etapa	Potencial de eutrofización (g. PO4-eq)			
	Depósito acero carbono		Depósito acero inoxidable	
	g. PO4-eq/m Muro	g. PO4-eq/m ² Solera	g. PO4-eq/m Muro	g. PO4-eq/m ² Solera
Fabricación	586,10	62,40	492,10	47,40
Transporte	19,90	2,32	17,96	1,94
Demolición	13,93	1,62	12,57	1,35
TOTAL	619,93	66,34	522,63	50,69

Según los resultados alcanzados, el uso de acero inoxidable permite reducir la acidificación en un 16% por metro lineal de muro y en un 24% por metro cuadrado de solera con respecto a los efectos causados en caso de armar el depósito con acero al carbono.

Niebla fotoquímica (Smog): Para el obtener la magnitud del impacto de la niebla fotoquímica se toman los factores de equivalencia derivados del Eco-indicador 95 (Ver tabla 4.5) para calcular en equivalentes de etileno (C2H4). Las emisiones que se generan durante el ciclo de vida útil de la estructura de hormigón armado e influyen en esta categoría de impacto de las aguas son el metano (CH4) y los componentes orgánicos volátiles (COV).

A continuación, la tabla 7.14 refleja la contribución a la niebla fotoquímica por etapas del ciclo de vida y el valor total del potencial de niebla fotoquímica.

Tabla 7.14. Potencial de niebla fotoquímica

Etapa	Potencial de niebla fotoquímica			
	Depósito acero carbono		Depósito acero inoxidable	
	g. C2H4-eq/m Muro	g. C2H4-eq/m ² Solera	g. C2H4-eq/m Muro	g. C2H4-eq/m ² Solera
Fabricación	450,60	52,10	407,00	43,40
Transporte	9,75	1,14	8,80	0,95
Demolición	6,83	0,80	6,16	0,66
TOTAL	467,18	54,04	421,96	45,01

Los resultados obtenidos indican que el uso de acero inoxidable permite disminuir la contribución a la niebla fotoquímica en un 10% por metro lineal de muro y en un 17% por metro cuadrado de solera.

Energía consumida: Para el cálculo de la energía consumida se toman directamente los valores implicados en cada etapa del ciclo de vida y se suman para cada tipología de depósito. La tabla 7.15 muestra la energía consumida durante el ciclo de vida de cada depósito por metro lineal de muro y por metro cuadrado de solera.

Tabla 7.15. Energía consumida

Etapa	Depósito acero carbono (MJ)		Depósito acero inoxidable (MJ)	
	MJ /m Muro	MJ /m ² Solera	MJ /m Muro	MJ /m ² Solera
Fabricación	12.728,56	1.138,92	10.682,97	831,60
Transporte	115,49	13,47	104,23	11,23
Demolición	80,84	9,43	72,96	7,86
TOTAL	12.924,89	1.161,82	10.859,19	850,69

Según los resultados alcanzados, el uso de acero inoxidable permite reducir la energía consumida en un 16% por metro lineal de muro y en un 27% por metro cuadrado de solera con respecto a los efectos causados en caso de armar el depósito con acero al carbono.

Generación de residuos sólidos y líquidos: Para el cálculo de los residuos generados se toman directamente los valores implicados en cada etapa del ciclo de vida y se suman para cada tipología de depósito.

Tabla 7.16. Residuos generados durante el ciclo de vida del muro

Etapa	Depósito acero carbono		Depósito acero inoxidable	
	Residuos sólidos (Kg/ m muro)	Residuos líquidos (litros/m muro)	Residuos sólidos (Kg/ m muro)	Residuos líquidos (litros/ m muro)
Fabricación	93,52	37.409,65	89,79	35.916,91
Transporte				
Demolición	6.120,00		5.530,00	
TOTAL	6.213,52	37.409,65	5.619,79	35.916,91

Tabla 7.17. Residuos generados durante el ciclo de vida de la solera

Etapa	Depósito acero carbono		Depósito acero inoxidable	
	Residuos sólidos (Kg/m ² solera)	Residuos líquidos (litros/m ² solera)	Residuos sólidos (Kg/m ² solera)	Residuos líquidos (litros/m ² solera)
Fabricación	3,55	1.422,00	2,97	1.185,00
Transporte				
Demolición	714,00		595,00	
TOTAL	717,55	1.422,00	597,97	1.185,00

Los resultados mostrados en las tablas 7.16 y 7.17 indican que el uso de acero inoxidable permite disminuir la cantidad de residuos sólidos en un 10% por metro lineal de muro y en un 16% por metro cuadrado de solera mientras que la reducción en residuos líquidos es de un 4% por metro lineal de muro y de un 17% por metro cuadrado de solera.

Emisiones de metales pesados: Para el cálculo de las emisiones de metales pesados se toman directamente los valores implicados en cada etapa del ciclo de vida y se suman para cada tipología de depósito. Las emisiones que se generan durante el ciclo de vida útil de la estructura de hormigón armado e influyen en esta categoría de impacto son, por ejemplo, cromo (Cr), arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg), talio (Tl) o plomo (Pb).

Tabla 7.18. Metales pesados emitidos durante el ciclo de vida del muro

Etapa	Emisiones metales pesados (grs.)	
	Depósito acero carbono	Depósito acero inoxidable
Fabricación hormigón	0,15	0,11
Fabricación acero	9227,71	8859,50
Transporte		
Demolición		
TOTAL	9227,86	8859,61

Tabla 7.19. Metales pesados emitidos durante el ciclo de vida de la solera

Etapa	Emisiones metales pesados (grs.)	
	Depósito acero carbono	Depósito acero inoxidable
Fabricación hormigón	0,02	0,01
Fabricación acero	350,76	292,30
Transporte		
Demolición		
TOTAL	350,78	292,31

Según los resultados que muestran las tablas 7.18 y 7.19, el uso de acero inoxidable permite reducir la emisión de metales pesados en un 4% por metro lineal de muro y en un 17% por metro cuadrado de solera.

7.3.3. Cómputo del impacto

Para calcular el impacto ambiental global se utilizan los potenciales de contribución al impacto ambiental por unidad funcional derivados del Eco-indicador 95 (ver tabla 4.6). Esto permite poder contrastar a través de un solo valor el impacto ambiental que provoca cada elemento en comparación.

En primer lugar las tablas 7.20 y 7.21 comparan por metro lineal de muro.

Tabla 7.20. Cálculo del impacto por metro lineal de muro de depósito armado con acero al carbono.

Categoría de impacto ambiental	Emisiones por unidad equivalente	Valor por unidad equivalente	Contribución al impacto ambiental
Efecto invernadero (Kg CO2-eq)	2.834,38	2,5	7085,95
Lluvia ácida (Kg SO2-eq)	5,182	10,0	51,82
Eutrofización (Kg PO4-eq)	0,620	5,0	3,10
Niebla fotoquímica (Kg C2H4-eq)	0,467	2,5	1,17
Emisión de metales pesados (Kg)	9,23	5,0	46,15
Eco-Indicador 95			7188,19

Tabla 7.21. Cálculo del impacto por metro lineal de **muro** de depósito armado con acero inoxidable.

Categoría de impacto ambiental	Emisiones por unidad equivalente	Valor por unidad equivalente	Contribución al impacto ambiental
Efecto invernadero (Kg CO ₂ -eq)	2.298,90	2,5	5747,25
Lluvia ácida (Kg SO ₂ -eq)	4,534	10,0	45,34
Eutrofización (Kg PO ₄ -eq)	0,523	5,0	2,615
Niebla fotoquímica (Kg C ₂ H ₄ -eq)	0,422	2,5	1,055
Emisión de metales pesados (Kg)	8,86	5,0	44,3
Eco-Indicador 95			5840,56

Según los cálculos del Eco-Indicador 95, el uso de acero inoxidable permite reducir el impacto ambiental global en un 19% por metro lineal de muro con respecto a los efectos ambientales infligidos a la naturaleza en caso de armar el depósito con acero al carbono.

Tabla 7.22. Cálculo del impacto por m² de **solera** de depósito armado con acero al carbono.

Categoría de impacto ambiental	Emisiones por unidad equivalente	Valor por unidad equivalente	Contribución al impacto ambiental
Efecto invernadero (Kg CO ₂ -eq)	281,74	2,5	704,35
Lluvia ácida (Kg SO ₂ -eq)	0,496	10,0	4,96
Eutrofización (Kg PO ₄ -eq)	0,066	5,0	0,33
Niebla fotoquímica (Kg C ₂ H ₄ -eq)	0,054	2,5	0,135
Emisión de metales pesados (Kg)	0,35	5,0	1,75
Eco-Indicador 95			711,525

Tabla 7.23. Cálculo del impacto por m² de **solera** de depósito armado con acero inoxidable.

Categoría de impacto ambiental	Emisiones por unidad equivalente	Valor por unidad equivalente	Contribución al impacto ambiental
Efecto invernadero (Kg CO ₂ -eq)	202,02	2,5	505,05
Lluvia ácida (Kg SO ₂ -eq)	0,389	10,0	3,89
Eutrofización (Kg PO ₄ -eq)	0,051	5,0	0,26
Niebla fotoquímica (Kg C ₂ H ₄ -eq)	0,045	2,5	0,11
Emisión de metales pesados (Kg)	0,29	5,0	1,45
Eco-Indicador 95			510,76

Tal y como indican las tablas 7.22 y 7.23, los daños causados a la naturaleza son un 28% mayores por metro cuadrado de solera en el caso del depósito armado con corrugado de acero al carbono en comparación con los daños provocados en el caso de armar el depósito con acero inoxidable.

7.3.4. Identificación de los principales flujos que contribuyen al impacto

La categoría de impacto que se ve más afectada durante el ciclo de vida del depósito, tanto del armado con acero al carbono como del armado con acero inoxidable, es el efecto invernadero. Más del 98% del impacto total es debido a la contribución a este efecto que supone el calentamiento global.

La fase del ciclo de vida del depósito que más contribuye al efecto invernadero, a la formación de la lluvia ácida, a la eutrofización de las aguas, a la aparición de la niebla fotoquímica, al consumo de energía y a la emisión de residuos líquidos es, con diferencia, la fabricación de hormigón y acero, y en especial la fabricación de hormigón.

La etapa que más repercute sobre la emisión de metales pesados es la fabricación del acero y la demolición es la etapa que más residuos sólidos genera.

7.4. Interpretación de los resultados (ISO 14043)

7.4.1. Identificación de los puntos débiles de los casos estudiados

El depósito de hormigón armado con corrugado de acero al carbono, debido a las exigencias por durabilidad que impone la normativa de hormigón estructural, necesita más hormigón y algo más de armadura que el depósito de hormigón armado con corrugado de acero inoxidable. Como indicaba el sub-aparato anterior, la fabricación del hormigón y el acero es la etapa que más contribuye al impacto ambiental. Esto le supone un valor más elevado del Eco-Indicador 95 lo que significa que armar un depósito con barras corrugadas de acero al carbono provoca un mayor impacto ambiental que armándolo con acero inoxidable.

El primero de los puntos débiles del depósito armado con corrugado de acero inoxidable reside en el precio del acero inoxidable que multiplica por tres el del acero al carbono. El análisis económico se trata específicamente en el apartado 8. El segundo punto débil viene definido por la necesidad de lograr la estanqueidad dentro del depósito. Este requerimiento no permite aligerar las condiciones de durabilidad con respecto al ancho de fisura y hace necesario exigir un ancho de fisura máximo de 0,20mm en lugar de ampliar el límite hasta los 0,40mm que serían permitidos en un ambiente I. A causa de esta exigencia el cálculo de estructuras del depósito viene limitado por el ancho máximo de fisura y por ello, el depósito armado con acero inoxidable requiere más acero inoxidable del que sería necesario si la estanqueidad no fuese condición necesaria y no se puede sacar rendimiento a la mayor resistencia a tracción que pueden ofrecer las armaduras de acero inoxidable.

Otro de los puntos débiles del armado con acero inoxidable es el no tener en cuenta las operaciones de mantenimiento durante la vida útil de la estructura. La razón de esta medida se encuentra en la negación por parte de los constructores de depósitos de aguas residuales de la necesidad de estas operaciones. Este coste seguro que es inexistente con la elección del corrugado de acero inoxidable pero, según conversaciones mantenidas, parece ser también inexistente en los depósitos tradicionales si no existe ningún fallo de ejecución. Aún así estos errores de ejecución suceden y tienen su coste pero no se han tenido en cuenta en este estudio por la aleatoriedad con que se presentan. Tampoco se ha tenido en cuenta que a pesar de que la normativa exija 0,20mm para clases de exposición agresivas, los depósitos contenedores de aguas residuales se dimensionan normalmente para un ancho máximo de fisura de 0,10mm. Esto aún aumentaría más la diferencia en el impacto ambiental de la fabricación del hormigón y del acero inoxidable puesto que el depósito armado con acero al carbono necesitaría aún más acero por metro lineal de muro en comparación con el depósito armado con acero inoxidable.

7.4.2. Identificación de los puntos fuertes de los casos estudiados

Al ser un análisis comparativo, los puntos débiles de un tipo de depósito se convierten en los puntos fuertes del otro.

El depósito armado con corrugado de acero al carbono cuenta con una mayor tradición en el mundo de la construcción frente a la novedad, y con ello el desconocimiento, que supone el uso del acero inoxidable como armadura. Si a esto se le añade que el coste de fábrica del corrugado de acero inoxidable es tres veces superior al coste del corrugado de acero al carbono se convierte en una gran fortaleza del depósito de acero al carbono frente al de acero inoxidable.

Pese a esto, el análisis de ciclo de vida demuestra que el depósito armado con acero inoxidable permite cumplir las funciones del depósito armado con acero al carbono infligiendo un daño entre un 19 y un 28% menor al medio ambiente.