ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMO HERRAMIENTA PARA LA OBTENCIÓN DE HORMIGONES SUSTENTABLES

M.C. MONTERO^{1*}, N.F. ORTEGA²

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Bahía Blanca, Universidad Tecnológica Nacional, C.P. 11 de abril 461, 8000 - Bahía Blanca, Argentina.

² Instituto de Ingeniería, Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Av. Alem 1253, 8000 - Bahía Blanca, Argentina.

RESUMEN

Para realizar una gestión sustentable de las obras, resulta imprescindible analizar los impactos que genera el empleo del hormigón. El mismo contiene cemento (cuya fabricación tiene importantes emisiones de CO₂), con agregados de diferentes procedencias. En este trabajo se presenta un estudio comparativo realizando un Análisis de Ciclo de Vida del tablero del puente, analizando sus componentes y métodos de fabricación, utilizados en Argentina. Se introdujeron como variables el agregado grueso (origen natural y trituración) y su reemplazo parcial por agregado reciclado. Se estudió un puente de una ruta, de tamaño intermedio, con dos posibles tipologías. Con estas variables se establecen las soluciones más sustentables, encontrándose restricciones vinculadas con la distancia de transporte para el uso de agregados reciclados.

Palabras clave: Análisis de Ciclo de Vida, Hormigón, Gestión Ambiental.

ABSTRACT

To perform a sustainable management of the works, it is essential to analyze the impacts generated by the use of concrete. It contains cement (whose manufacture has significant CO₂ emissions), with aggregates from different origins. In this paper, a comparative study is presented, performing a Life Cycle Analysis of the bridge deck, analyzing its components and manufacturing methods, used in Argentina. They were introduced as variables of coarse aggregate (natural origin and crushing) and partial replacement by recycled aggregate. A route bridge, of intermediate size, was studied with two possible typologies. With these variables, the most sustainable solutions are established, found restrictions related to the transport distance for the use of recycled aggregates.

Keywords: Life Cycle Analysis, Concrete, Environmental Management.

RESUMO

Para realizar uma gestão sustentável das obras, é essencial analisar os impactos gerados pelo uso do concreto. Contém cimento (cuja fabricação possui emissões significativas de CO₂), com agregados de diferentes origens. Neste trabalho, é apresentado um estudo comparativo, realizando uma Análise do Ciclo de Vida do convés da ponte, analisando seus componentes e métodos de fabricação, utilizados na Argentina. Eles foram introduzidos como variáveis de agregado graúdo (origem natural e esmagamento) e substituição parcial por agregado reciclado. Uma ponte de uma rota, de tamanho intermediário, foi estudada com duas tipologias possíveis. Com estas variáveis, as soluções mais sustentáveis, encontraram restrições relacionadas à distância de transporte para o uso de agregados reciclados.

Palavras chave: Análise do Ciclo de Vida, Concreto, Gestão Ambiental.

1. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción tiene relevancia en la obtención de un desarrollo sustentable de nuestra sociedad. Las actividades de construcción, uso, reparación, mantenimiento y demolición consumen, mayoritariamente, recursos no renovables y generan residuos. Según un informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y de la SBCI (Sustainable Building and Construction Initiative) la industria de la construcción consume entre el 25 % y el 40 % del consumo global de energía, genera entre el 30 % y 40 % de los residuos sólidos, el 20 % de los residuos líquidos y emite entre el 30 % y 40 % de los gases efecto invernadero. (Alconpat Brasil, 2013) Por ello, esta industria debe mejorar su sustentabilidad, superando desafíos importantes, en cuanto al ahorro de energía, disminución de emisiones al ambiente, manteniendo una provisión adecuada de materia prima en calidad y cantidad. (Alconpat Brasil, 2013) (Schneider et al, 2011)

Por otro lado, la producción mundial de cemento, material esencial en la fabricación del hormigón genera, aproximadamente, el 7 % de la carga total de dióxido de carbono en la atmósfera de origen antropogénico. (Naik and Moriconi, 2005) Según el World Business Council for Sustainable Development la industria del cemento ha alcanzado en los últimos años un desacople importante entre el crecimiento del volumen de producción y las emisiones de CO₂ (CIRSOC, 2005). La producción de 1 ton de clinker de cemento portland requiere unos 4 GJ de energía, y su fabricación libera a la atmósfera, aproximadamente, 1t de CO₂ y otros gases de efecto invernadero (GEI).

Por estos motivos, y considerando que en un futuro cercano será muy difícil que pueda ser reemplazado, resulta imprescindible que se estudien las formas de prevenir y reducir impactos ambientales que generan las construcciones realizadas con este material.

Además, el hormigón está compuesto por áridos gruesos y finos, cemento, aditivos y agua, es fabricado en cada región geográfica con los agregados disponibles y, habitualmente, de diferentes procedencias, calidades y tipos de extracciones que condicionan sus características finales. La diferencia radica fundamentalmente en que unos se extraen en canteras y directamente son utilizados, llamados agregados naturales, mientras que otros poseen procesos de trituración y el producto final permite obtener hormigones de mayores resistencias.

Aunque es el reglamento Argentino CIRSOC 201 (CIRSOC, 2005), no contempla el uso de agregados naturales como el canto rodado, pero en la práctica de la región de influencia de Bahía Blanca, Argentina, al igual que en otras regiones de América Latina, se utilizan en la elaboración del hormigón, ya que muchas plantas hormigoneras poseen canteras propias, donde separan las diferentes granulometrías de agregados gruesos y finos.

En este trabajo se presenta un estudio comparativo del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de estructuras de hormigón armado y pretensado, analizando sus materiales componentes y métodos de fabricación, utilizados en Argentina. Se introdujeron como variables del agregado grueso, de origen natural y de trituración, y en una etapa posterior se analizó el reemplazo parcial del agregado grueso por agregado reciclado (Moro et al., 2016) (Moro et al. 2017), con diferentes distancias de transporte. Se estudió todas las etapas, desde las canteras (donde se extrae la materia prima), al lugar de consumo de los materiales, componentes del hormigón, analizándose los impactos de las armaduras (activas y pasivas), en cada tipología de puente.

El estudio se realiza sobre un puente de una ruta, de tamaño intermedio, pero no se consideraron los impactos del resto de las obras (pilas, fundaciones, estribos, losas de acceso, etc.), por ser prácticamente iguales en las dos tipologías de puentes estudiadas. Con distintas variables se establecieron los hormigones más sustentables. Cabe acotar que el ACV se podría haber realizado con distintos tipos de estructuras de hormigón, no obstante, se eligió en puente carretero, realizado un hormigón tipo H25 (CIRSOC 201) (resistencia característica a compresión 25 MPa) que es la resistencia mínima que pide la normativa argentina, para estructuras de hormigón pretensado, ubicadas en un ambiente rural, con bajas precipitaciones y libre de cloruros, en virtud que, en la medida que se incrementa la resistencia

del hormigón, el canto rodado deja de ser una opción razonable y, actualmente, la mayoría de las estructuras que se realizan en Argentina, están realizadas con H25 o menos.

2. METODOLOGÍA

2.1 Tipologías de las estructuras analizadas

Se determinaron dos tipologías base de estructuras de puentes promedio de la provincia de Buenos Aires, Argentina, de 25 m de luz. Tal como se presentan en las Figuras 1 y 2. No se analizan los impactos de las obras complementarias (pavimento, estribos, lozas de acceso, terraplenes, etc.) de cada uno de los puentes, debido a que serían prácticamente iguales, en los casos analizados.

Figura 1. Esquema sección transversal de Puente Viga.

Figura 2. Esquema sección transversal Puente Losa.

Se estableció el volumen de hormigón y las superficies expuestas para cada estructura, completa y por metro de longitud, ya que este último valor será útil en el Análisis de Ciclo de Vida (Tabla 1).

Con relación a las armaduras se consideraron para la tipología de Puentes Viga una cuantía total (armaduras activas y pasivas) de 113 kg/m³ de hormigón y para la tipología de Puente Losas (armaduras activas y pasivas) 152 kg/m³ de hormigón. (Pavani Bañados, 2008)

Tabla 1. Características de los Puentes.

Características	Unidad	por m	Total por Puente
Puente Viga			
Volumen hormigón	m ³	4,34	108,45
Superficie total	m ²	39,10	977,54
Armaduras	kg	19	477,40
Puente Losa			
Volumen hormigón	m ³	6,45	161,36
Superficie total	m ²	28,86	721,53
Armaduras	kg	40	999,75

2.2 Análisis de Ciclo de Vida

El ACV es una metodología que sirve para medir el impacto ambiental de un producto, un proceso o un sistema desde que se obtienen las materias primas hasta su fin de vida. Se basa en la recopilación y análisis de las entradas y salidas del sistema para obtener unos resultados que muestren sus potenciales impactos ambientales, con el objetivo de determinar estrategias para la reducción de los mismos. (Departamento de Medio Ambiente, 2009)

La manera y forma en la que se recopilan estas entradas/salidas se conoce como Inventario de Ciclo de Vida (ICV), y es la fase del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) que implica la recopilación y la cuantificación de entradas/salidas de un sistema durante su Ciclo de Vida.

El ACV de un producto debe incluir todas las entradas/salidas de los procesos que participan a lo largo de su ciclo de vida: la extracción de materias primas y el procesamiento de los materiales necesarios para la manufactura de componentes, el uso del producto y finalmente su reciclaje y/o la gestión final. El transporte, almacenaje, distribución y otras actividades intermedias entre las fases del ciclo de vida también se incluyen cuando tienen la relevancia suficiente. A este tipo de ciclo de vida se le denomina comúnmente “de la cuna a la tumba”.

Se ha establecido, por parte de la Organización Internacional de Normalización, un marco para la estandarización de la metodología de ACV, según la familia de normas ISO 14040/44 Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia y Requisitos y directrices. (ISO, 2006)

De acuerdo con la estandarización realizada, se distinguen cuatro fases en un estudio de ACV (Ihobe, 2009):

- *Definición de Objetivos y Alcance*: Define el objetivo y el uso previsto del estudio, así como el alcance de acuerdo con los límites del sistema, la unidad funcional y los flujos dentro del ciclo de vida, la calidad exigida a los datos, y los parámetros tecnológicos y de evaluación.
- *Desarrollo del Inventario de Ciclo de Vida (ICV)*: Es la fase en la que se recogen los datos correspondientes a las entradas y salidas, para todos los procesos del sistema de producto.
- *Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV)*: Es la etapa en la que el inventario de entradas y salidas es traspasado a indicadores de potenciales impactos ambientales al medio ambiente, a la salud humana y a la disponibilidad de recursos naturales.
- *Interpretación*: Es la fase en la que los resultados del ICV y el EICV son interpretados de acuerdo al objetivo y alcance marcados inicialmente. En esta fase se realiza un análisis de los resultados y se marcan las conclusiones.

2.2.1 Objetivos y Alcance

En este trabajo se pretende comparar el impacto producido por dos tipologías estructurales de puentes viales, utilizados comúnmente en la Argentina, cuya forma es similar a los empleados en otros países de Latinoamérica, considerando los impactos generados en la elaboración y los producidos por el transporte de las materias primas utilizadas.

El objetivo es evaluar, cuantificar y comparar los impactos ambientales mediante un Análisis del Ciclo de Vida de puentes de hormigón, para la toma de decisiones respecto a la elección de una tipología estructural y del tipo de agregado grueso a utilizar, considerando las distancias de transporte de sus componentes que, además, podrían extrapolarse a otras estructuras de menor importancia, pero que representan un volumen de hormigón muy importante.

Sistema de Producto: como se ha descrito anteriormente, se presentan los ACV para los siguientes sistemas:

- Puente Losa: Hormigón fabricado con agregado grueso Piedra Partida.
- Puente Viga: Hormigón fabricado con agregado grueso Piedra Partida.
- Puente Losa: Hormigón fabricado con agregado grueso Canto Rodado.
- Puente Viga: Hormigón fabricado con agregado grueso Canto Rodado.

Hormigón: Se obtiene por un proceso de mezcla y amasado del agua, agregados grueso y fino, cemento y aditivos, obteniéndose un hormigón, en este caso tipo H25 (tensión característica a compresión: 25 MPa). En el estudio no se incluye la consideración de los aditivos por tener un volumen muy bajo, respecto de los demás componentes, por ello, no se consideraron relevantes.

Producción de Áridos: Se trabaja con los siguientes tipos:

- Agregado fino: Comprende su extracción en canteras a cielo abierto y su separación se realiza en diferentes tamaños.
- Agregado Grueso Piedra Partida (PP): Comprende la extracción de material pétreo de distintos tamaños, su proceso de trituración y selección de tamaños.
- Agregado Grueso Canto Rodado (CR): Comprende la extracción de material pétreo de distintos tamaños y selección de tamaños.

Cabe acotar que, dependiendo de las canteras, estos agregados pueden ser necesario lavarlos, esto no se consideró en este trabajo, debido a que en las canteras de la zona no se hace. El transporte de los agregados desde la cantera se realiza mediante caminos con bateas cuyo volumen total es de 24 m³.

Producción de Cemento: Comprende la extracción de materias primas, homogeneización de materiales y dosificación, producción del clinker a través del proceso de calcinación en horno, molienda del clinker y adición final de yeso. De esta manera se obtiene el Cemento Portland Normal (CPN), en los últimos años se reemplaza un porcentaje de este clinker por residuos industriales o ciertas arcillas (filler), generándose el Cemento Portland Compuesto (CPC), que genera menores impactos ambientales. El trabajo se realizó con CPC, para que las conclusiones fuesen más generales y no dependientes de la importante diversidad de CPC que hay en el mercado. Cabe acotar que, es esperable que la mayoría de estos CPC generen menores impactos ambientales.

En todos los materiales se consideró la distancia de transporte que se debe recorrer desde la fuente de producción hasta la localidad de Bahía Blanca, Argentina, que es el lugar donde estaría la obra.

En los análisis, se considera una vida útil de 50 años, que es el mínimo establecido por la normativa CIRSOC 201 (2015), no se incluye en esta evaluación las etapas de uso y mantenimiento.

2.2.1.1 Límites del sistema

Dentro de los límites del sistema se tienen en cuenta las etapas de extracción de la materia prima para la producción del hormigón, la fabricación de este y sus armaduras, en lo que se llama “Ciclo de Vida de la cuna a la puerta”.

Se tendrán en cuenta cómo las entradas a evaluar las materias primas en la fabricación de los elementos constituyentes del hormigón (cemento, agregados, agua y acero), considerando la energía utilizada en estos procesos y asumiendo como salidas del sistema las emisiones gaseosas y líquidas y genera residuos sólidos.

Además, se considera el transporte de los materiales, debido a su elevado consumo de combustible, considerando la distancia recorridas y las cargas transportadas (t x km).

2.2.1.2 Tipo de Impactos por evaluar

Para la mayoría de los estudios de ACV se seleccionan categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización existentes. En este trabajo se utilizó la metodología Eco-Indicator 99, desarrollado por la Consultora PRé para el Ministerio de Vivienda, Planeamiento Urbanístico y Medio Ambiente de Holanda. Este método introduce el concepto de categoría de daño no incluido en la norma ISO, así como factores de daño. Como categorías de daño se pueden considerar los daños a la salud humana, a la calidad de los ecosistemas o el agotamiento de recursos. (Eco-indicator 99, 2000)

2.2.2. Desarrollo del Inventario de Ciclo de Vida (ICV)

2.2.2.1. Fuentes

Los materiales empleados tienen la siguiente procedencia:

- Agregado fino: Localidad de Villalonga, provincia de Buenos Aires, Argentina.
- Agregado grueso: Piedra Partida: Piro Ruiz - Cerros Colorados. Localidad de San Martín de Tours, provincia de Buenos Aires, Argentina.
Canto Rodado: se considera que el yacimiento se encuentra a la misma distancia que el de piedra partida, para validar la comparación.
- Cemento: Cementera Loma Negra, provincia de Buenos Aires, Argentina.
- Agua: Proveniente de la red domiciliaria de Bahía Blanca, proveedor ABSA SA, provincia de Buenos Aires, Argentina.
- Acero: Planta Acindar, San Nicolás, provincia de Buenos Aires, Argentina

Los datos primarios se obtuvieron a través de la información proporcionada a partir de entrevistas y cuestionarios realizados a las empresas proveedoras de los materiales, en todos los casos fueron de la zona de influencia de Bahía Blanca, Argentina.

Por otra parte, los datos secundarios: son aquellos que provienen de:

- bases de datos internacionales, (Ecoinvent, 2019)
- fuentes bibliográficas tales como tesis de postgrado y publicaciones relacionadas con la temática, (EELA, 2015) (González Maza, 2012)
- otros estudios de inventarios, (Ihobe, 2009) y
- normativas o legislación vigente. (CIRSOC 205, 2015, IRAM, etc.)

2.2.2.2. Flujo de referencia

El flujo de referencia se calcula a partir de la dosificación para producir el hormigón necesario para 1 ml de las dos tipologías estructurales de puentes carreteros, según la Norma CIRSOC 201 (CIRSOC, 2005). Como ya se indicó el hormigón es tipo H25, dato a partir del cual se realizan las respectivas dosificaciones, teniendo en cuenta las características del material disponible. En la Tabla 2 se presentan los flujos de referencia para los puentes anteriormente descriptos.

Tabla 2. Flujos de referencia para las alternativas de los puentes analizados.

Dosificación por tipología		para 1 m ³ de hormigón				para 1 m de puente			
Materiales	Unidad	Puente Viga		Puente Losa		Puente Viga		Puente Losa	
		CR	PP	CR	PP	CR	PP	CR	PP
Cemento	Kg	350	330	350	330	1519	1432	2258	2129
Agua	Kg	175	165	175	165	760	716	1129	1064
Agregado fino	Kg	895	940	895	940	3884	4080	5773	6061
Agregado grueso	Kg	930	928	930	928	4036	4028	5999	5987

Para poder apreciar las diferentes entradas y salidas de cada sistema de producto, en los diferentes procesos unitarios intervinientes se presenta un diagrama de flujo

Figura 3. Diagrama de Flujo del Hormigón.

2.2.2.3. Inventario del Ciclo de Vida (ICV)

A continuación, se presenta el inventario en la fabricación del hormigón de las dos tipologías de puentes estudiados, con las variantes en el agregado grueso (Tablas 3 a 6). En la última columna de estas tablas se presenta en producto del peso transportado por la distancia (t x km) de los materiales, desde donde se producen hasta la planta elaboradora de hormigón, que está a 5 km de la obra y el medio para llevar el hormigón son camiones mezcladores con una capacidad de 7 m³.

Tabla 3. Puente Viga - Inventario para fabricación de materiales, hormigón con Piedra Partida.

Materiales	Unidad	Cantidad por m	Transporte		
			Tipo	Dist. (km)	t x km
Cemento CPN 40	Kg	1432	Camión a granel	300	430
Agua	Kg	716	Red domiciliaria	0	0
Agregado fino	Kg	4080	Camión 24 m ³	110	449
Piedra Partida	Kg	4028	Camión 24 m ³	110	443
Acero (activo y pasivo)	Kg	19	Camión 24 m ³	700	13

Tabla 4. Puente Losa - Inventario para fabricación de materiales, hormigón con Piedra Partida.

Materiales	Unidad	Cantidad por m	Transporte		
			Tipo	Dist. (km)	t x km
Cemento CPN 40	Kg	2129	Camión a granel	300	639
Agua	Kg	1064	Red domiciliaria	0	0
Agregado fino	Kg	6061	Camión 24 m ³	110	667
Piedra Partida	Kg	5987	Camión 24 m ³	110	658
Acero (activo y pasivo)	Kg	40	Camión 24 m ³	700	28

Tabla 5. Puente Viga - Inventario para fabricación de materiales, hormigón con Canto Rodado.

Materiales	Unidad	Cantidad por m	Transporte		
			Tipo	Dist. (km)	t x km
Cemento CPN 40	Kg	1519	Camión a granel	300	456
Agua	Kg	760	Red domiciliaria	0	0
Agregado fino	Kg	3884	Camión 24 m ³	110	427
Canto Rodado	Kg	4036	Camión 24 m ³	110	444
Acero (activo y pasivo)	Kg	19	Camión 24 m ³	700	13

Tabla 6. Puente Losa - Inventario para fabricación de materiales, hormigón con Canto Rodado.

Materiales	Unidad	Cantidad por m	Transporte		
			Tipo	Dist. (km)	t x km
Cemento CPN 40	Kg	2258	Camión a granel	300	677
Agua	Kg	1129	Red domiciliaria	0	0
Agregado fino	Kg	5772	Camión 24 m ³	110	635
Canto Rodado	Kg	5999	Camión 24 m ³	110	660
Acero (activo y pasivo)	Kg	40	Camión 24 m ³	700	28

Los volúmenes de materiales fueron calculados con los pesos específicos sueltos de cada material, para considerar así los volúmenes a ser transportados, en el inventario de emisiones realizado mediante el ACV.

2.2.3 Evaluación de los impactos del Ciclo de Vida (EICV)

La Evaluación de Impactos ambientales determinados con el Ciclo de Vida es la fase dirigida a conocer y evaluar la magnitud y la relevancia de los impactos ambientales potenciales de un sistema. Es la fase del ACV que caracteriza el resultado final del mismo y una de las que mayor controversia causa, ya que no existe acuerdo común en la comunidad científica internacional, para el establecimiento de un modelo único de evaluación de impactos ambientales. (Ihobe, 2009)

La selección de categorías de impacto debe reflejar un conjunto exhaustivo de aspectos ambientales, justificando las categorías seleccionadas, los indicadores de categoría y los modelos de caracterización. Tal como se ha descrito anteriormente en la asignación de cargas ambientales, tipo de impacto a evaluar y metodología de evaluación e interpretación, de los métodos existentes para el desarrollo de un ACV y en concreto para la evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV), se tomó la metodología Ecoindicador 99 (Eco-indicator 99, 2000), que evalúa los daños ambientales mediante la determinación del ACV. El objetivo de este método es comparar las diferencias relativas entre los sistemas y sus componentes, determinando un solo valor que indica el impacto ambiental total basado en los efectos calculados.

Ecoindicador 99 (Eco-indicator 99, 2000) evalúa los daños ambientales de impacto de punto final de categoría, definiendo así a los atributos o aspectos del entorno natural, la salud humana o los recursos, que identifican un asunto ambiental de interés. (Tabla 7) El objetivo de este método es comparar las diferencias relativas entre los sistemas y sus componentes, determinando un solo valor que indica el impacto ambiental total, basado en los efectos calculados del inventario de Ciclo de Vida (ICV).

Tabla 7. Clasificación de las categorías de daño, en función de los impactos.
(Eco-indicator 99, 2000)

Impactos ambientales	Categorías de daño
Carcinogénesis	Salud Humana
Efectos respiratorios orgánicos	
Efectos respiratorios inorgánicos	
Cambio climático Radiación	
Agotamiento de la capa de ozono	
Eco toxicidad	Ecosistema
Acidificación / Eutrofización	
Uso de suelo	
Consumo de minerales	Recursos Naturales
Daños a los recursos naturales	

Dentro de esta metodología, los sistemas de ponderación, utilizados para las distintas categorías de daño, varían de acuerdo con tres perspectivas en el plazo que quiera considerarse. (Tabla 8).

La valuación de impactos del Ciclo de Vida por medio de la metodología del Ecoindicador 99 (Eco-indicator 99, 2000) se lleva a cabo mediante una perspectiva jerárquica, debido a que realiza consideraciones de corto y largo plazo que proporcionan una apreciación general de los distintos sistemas de acuerdo con el objetivo y alcance inicial (punto 2.2.1.).

Tabla 8. Perspectivas de los impactos ambientales. (Eco-indicator 99, 2000)

Perspectiva	Percepción de tiempo	Nivel de evidencia
Individualista (I)	A corto plazo	Solo efectos probados
Jerárquica (H)	Balance a largo y corto plazo	Inclusión basada en consensos
Igualitaria (E)	Muy largo plazo	Todos los efectos posibles

3. RESULTADOS E INTERPRETACION

Para este trabajo se ha utilizado del software SimaPro 7.2 (PRé Consultants, 2004) aplicando, como se mencionó anteriormente, la metodología del Ecoindicador 99. (Eco-indicator 99, 2000)

Dentro de este análisis se contempla además de los inventarios de cada producto, la distancia de transporte desde la planta elaboradora de hormigón hasta la obra, en camión mezclador o mixer de 7 m³ de capacidad.

3.1. Análisis de ACV para las tipologías de puentes fabricados con diferentes agregados

Se presenta el estudio del comportamiento ambiental global, de 1m de largo de puente Viga y Losa, de hormigón H25 fabricados con Piedra Partida y Canto Rodado, como agregado grueso, estando los puentes analizados en la Ciudad de Bahía Blanca. Esta comparativa evalúa todos los datos incluidos en el inventario y calculados por el software SimaPro 7.2 (PRé Consultants, 2004). En la Tabla 9 se presentan los resultados de la comparativa de los ACV ponderados en puntos, que son emisiones medidas en equivalentes a las de CO₂.

Tabla 9. Comportamiento ambiental de los puentes fabricados con Piedra Partida y Canto Rodado

Categoría de daño	Unidad	Puente Losa		Puente Viga	
		CR	PP	CR	PP
Salud Humana	puntos	77	74	50	48
Ecosistema	puntos	6	6	4	4
Recursos Naturales	puntos	30	29	20	19
Total	puntos	114	110	74	71

Como puede observarse en la Tabla 9, la diferencia es de casi un 4 %, a favor del uso del agregado Canto Rodado, lo que indica una diferencia baja. Aunque para producir el Canto Rodado no se debe realizar la trituration del material, con lo que se genera un menor impacto, pero para obtener la misma resistencia del hormigón que con el uso de piedra partida, por la menor adherencia del Canto rodado al mortero requiere el uso de un 6% más de cemento, debido a que este componente genera muy importantes impactos ambientales, en su fabricación, la diferencia obtenida por la no trituration disminuye significativamente. En la medida que los cementos reduzcan sus impactos ambientales, el uso del Canto Rodado tendrá una diferencia más notoria a su favor.

Por otra parte, se puede ver que los mayores daños son a la salud humana, provenientes de las emisiones al ambiente y en segundo lugar está el consumo de los recursos naturales.

Con respecto a la tipología de puente la más sustentable es la del Puente Viga, ya que su impacto ha resultado ser un 35% menor que el Puente Losa. Este resultado era previsible, debido a que el Puente Viga posee un menor volumen de hormigón. No obstante, estos resultados no son extrapolables fácilmente a cualquier otro ambiente donde estuviese la obra. Por ejemplo, si estos puentes estuviesen en un ambiente costero, con presencia de cloruros, hay que tener en cuenta que el Puente Viga posee un 35% más de superficie que el Puente Losa (Tabla 1), por lo que tiene mayores posibilidades de presentar problemas por el ataque de cloruros y carbonatación. Por ello, habría que tener en cuenta aspectos relacionados con la durabilidad, calidad de la mano de obra disponible y el hormigón debería tener una resistencia mayor, Tipo H40, con lo que sería muy difícil llegar a esta calidad de hormigón con Canto Rodado.

3.2. Incorporación de agregados reciclados

Teniendo en cuenta que el objetivo de estas investigaciones es mejorar la sustentabilidad de los puentes, a continuación, se desarrolla la alternativa de reemplazar parcialmente al Agregado Grueso (en función de los resultados anteriores, Piedra Partida) por un Agregado Reciclado, proveniente de la trituration de hormigones de demolición. Para ello, se plantea el reemplazo de un 25 % y 50 %, respectivamente, manteniendo un hormigón resultante tipo H25. El primero de los porcentajes de reciclado se origina en las indicaciones de algunas normas que permiten el reemplazo de este porcentaje o muy similares (Comisión Permanente del Hormigón, 2008) sin la necesidad de realizar estudios complementarios. A similares conclusiones han arribado otros autores (Gómez et al., 2001) (Limbachiya et al., 2000) (Moro et al., 2017) y el 50% se lo adoptó considerándolo como una meta razonable de llegar a emplear en el mediano plazo, sin tener afectaciones importantes en la resistencia (Gonçalves et al., 2004). En las Tablas 10 y 11 se presentan los respectivos inventarios para el Puente Viga y el Puente Losa, donde las dosificaciones son las que se emplearon en otros trabajos. (Moro et al., 2016) (Moro et al., 2017)

En esta parte del trabajo, hay que considerar estos análisis. Considera solo en el caso de Puente Viga, ya que su impacto ha resultado ser un 35% menor que el Puente Losa.

Se presenta el fujo de referencia para 1m³ de hormigón H25 y una longitud de 1 m de Puente Viga, para las tres dosificaciones adoptados.

Tabla 10. Flujos de referencia para Puente Viga fabricado con piedra partida y con reemplazos del 25% y 50% de Agregado Reciclado.

Dosificación		para 1 m ³ de hormigón			para 1m de puente		
Materiales	Unidad	PP	25%AR	50%AR	PP	25%AR	50%AR
Cemento	Kg	330	330	330	1432	1432	1432
Agua	Kg	165	165	165	716	716	716
Agregado Fino	Kg	940	940	940	4080	4080	4080
Piedra Partida	Kg	928	696	464	4028	3022	2014
Agregado Reciclado	Kg	0	232	464	0	1066	2014

3.2.1. Inventario de Ciclo de Vida (ICV)

A continuación, se presenta el inventario en la fabricación del hormigón de la tipología de puente Viga, con las variantes en el agregado grueso (Tablas 11 y 12). En la última columna de estas tablas se presenta el producto del peso transportado por la distancia (t x km).

Se plantean dos alternativas de distancias de transporte, para el agregado reciclado, 110 km que es la misma distancia que la de los otros agregados y 20 km que se toma considerando que la planta procesadora del reciclado está relativamente cerca de la planta productora de hormigón, con el fin de analizar el peso relativo del transporte del reciclado.

Cabe acotar que en esta última distancia de transporte se supone el traslado del hormigón desde el lugar donde se realizó la demolición y desde la planta trituradora hasta la planta elaboradora, y por separado, se considera una distancia de transporte desde la planta elaboradora del hormigón hasta la obra (5 km) en un camión mezclador o mixer de 7 m³ de capacidad, que fue lo empleado con los agregados tradicionales.

Tabla 11. Puente Viga - Inventario para la fabricación de hormigón con Piedra Partida y un 25% Agregado Reciclado.

Materiales	Unidad	Cantidad por m	Transporte		
			Tipo	Dist. (km)	t x km
Cemento CPN 40	Kg	1432	Camión a granel	300	430
Agua	Kg	716	Red domiciliaria	0	0
Agregado fino	Kg	4080	Camión 24 m ³	110	449
Piedra Partida	Kg	3022	Camión 24 m ³	110	332
Agregado Reciclado	Kg	1006	Camión 24 m ³	110	111
			Camión 10 m ³	20	20
Acero (activo y pasivo)	Kg	19	Camión 24 m ³	700	14

Tabla 12. Puente Viga - Inventario para la fabricación de hormigón con Piedra Partida y un 50% Agregado Reciclado.

Materiales	Unidad	Cantidad por m	Transporte		
			Tipo	Dist. (km)	t x km
Cemento CPN 40	Kg	1432	Camión a granel	300	430
Agua	Kg	716	Red domiciliaria	0	0
Agregado fino	Kg	4080	Camión 24 m ³	110	449
Piedra Partida	Kg	2014	Camión 24 m ³	110	222
Agregado Reciclado	Kg	2014	Camión 24 m ³	110	222
			Camión 10 m ³	20	40
Acero (activo y pasivo)	Kg	19	Camión 24 m ³	700	14

A partir de los inventarios presentados en las Tablas 11 y 12 se realiza el ACV con el software SimaPro 7.2 (PRé Consultants, 2004), de 1 m de largo de Puente Viga de hormigón H25, fabricados con Piedra Partida y realizando dos remplazos parciales por Agregado Reciclado, en las mismas condiciones que todos los análisis anteriores. En la Tabla 13 se presentan los resultados de esta comparativa de los ACV ponderados en puntos, que son emisiones medidas en equivalentes a las de CO₂.

Tabla 13. Comportamiento ambiental de Puentes Viga, fabricados con Piedra Partida y un reemplazo parcial por Agregado Reciclado (medido en puntos).

Categoría de daño	Patrón	Distancia transporte 110 km		Distancia transporte 20 km	
		PP + 25%AR	PP + 50%AR	PP + 25%AR	PP + 50%AR
Salud Humana	48	48	47	47	46
Ecosistema	4	4	4	4	4
Recursos Naturales	19	19	19	19	17
Total	71	71	70	69	67

Analizando la Tabla 13 se aprecia que, para la construcción del Puente Viga, el realizar un reemplazo parcial del agregado grueso por reciclado, si se mantienen las mismas distancias de transporte que para los agregados tradicionales, prácticamente, las mejoras ambientales son despreciables, por la gran carga ambiental que posee el transporte. Distinta es la situación si los agregados reciclados se los procesa a una distancia mucho menor, donde se tiene una disminución del equivalente en emisiones de CO₂ de un 3%, para el reemplazo por un 25% de Agregado Reciclado y de un 6 % cuando el reemplazo es del 50%. En primera instancia, se puede pensar que estas mejoras ambientales por el uso de reciclado no son muy significativas, pero si se considera que se realizó el ACV con cemento CPN, que es el que más impactos ambientales genera y que la tendencia es a que los CPC tengan cada vez menores impactos en su fabricación y que el segundo elemento de mayor peso es el transporte, donde se empleó en el estudio el transporte en camión, que es el más ineficiente y que más afecta al ambiente, si el transporte se realizara en tren, seguramente los porcentajes de disminución de las emisiones de CO₂ o sus equivalentes, serían muy superiores a las aquí presentadas, no obstante, en este trabajo se prefirió analizar la situación actual de la fabricación del hormigón en Argentina y en otros lugares de América Latina.

En lo referente a las categorías de daño que genera esta actividad, se aprecia una situación similar a la observada en la Tabla 9, donde los mayores daños son a la salud humana, provenientes de las emisiones al ambiente y, en segundo lugar, está el consumo de los recursos naturales, que en el caso del uso de un 50% de Agregado Reciclado es menor que los demás y en el del 25%, no es significativo.

4. CONCLUSIONES

Analizando los resultados obtenidos, a través del Análisis de Ciclo de Vida de los componentes de cada tipo de hormigón, se arriba a las siguientes conclusiones:

- El mayor impacto proviene de la fabricación de cemento, donde se concentran los mayores porcentajes de incidencia ambiental.
- En cuanto a los transportes de cemento y agregados tienen mucha importancia, obteniéndose valores más elevados para el transporte del cemento, debido a que, en el caso estudiado, posee una la mayor distancia de transporte.
- Los impactos generados por el proceso de fabricación del hormigón con Canto Rodado son algo menores a los del proceso con Piedra Partida. En estos procesos, la extracción del Canto Rodado es una tarea más simple y sin un consumo importante de energía, y por el contrario la Piedra Partida

genera mayores emisiones al ambiente en su fabricación, siendo la trituration el proceso que más impacta, pero para obtener la misma resistencia mecánica, el consumo de cemento debe ser algo mayor cuando se usa Canto Rodado, con lo cual se compensa la mayoría del ahorro generado por no tener que realizar la trituration del material extraído.

- Con el uso de agregados reciclados se pueden reducir los impactos ambientales, pero es fundamental que estos agregados deban recorrer una distancia de transporte lo más reducida posible.
- Como ya se expresó anteriormente, el cemento y el transporte, son los dos elementos que más impactan al ambiente, pero como la tendencia mundial es a realizar cementos con adiciones activas y el uso de transportes cada vez más eficientes, es indudable que considerando esto el peso relativo en las emisiones ambientales que tendrá el uso de agregados reciclados crecerá significativamente.

Con respecto a las tipologías de puentes estudiadas y para las condiciones analizadas, la tipología que genera menores impactos ambientales es la del Puente Viga.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los aportes realizados para la materialización de este trabajo a Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca, a la Secretaría General de Ciencia y Tecnología y al Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur y a la Comisión de Investigaciones Científica de la Provincia de Buenos Aires.

6. REFERENCIAS

- ALCONPAT Brasil (2013). “*Boletín Técnico N° 7: Sostenibilidad en la construcción*”. [http://alconpat.org.br/wp-content/uploads/2012/09/B7-Sustentabilidade na-Constru%C3%A7%C3%A3o.pdf](http://alconpat.org.br/wp-content/uploads/2012/09/B7-Sustentabilidade-na-Constru%C3%A7%C3%A3o.pdf), último acceso: 15/07/19.
- CIRSOC 201 (2005) “*Estructuras de Hormigón*”, Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles Reglamento. <https://static.cpau.org/biblioteca/normativa/inti-cirsoc.pdf>, último acceso: 15/07/19.
- Comisión Permanente del Hormigón (2008) “*Instrucción de Hormigón Estructural (EHE 08)*”, Ministerio de Fomento de España, 620 p.
- Departamento de Medio Ambiente (2009). “*Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono*”. Ithobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental, Bilbao, 36 pp.
- EELA (2015) “*Estudio de análisis de ciclo de vida de ladrillos y bloques de concreto*”, Programa de Eficiencia Energética en Ladrilleras Artesanales de América Latina para mitigar el Cambio Climático, Pontificia Universidad de Perú, San Jerónimo, Cusco, 50.
- Ecoinvent (2019) The Ecoinvent Database, Version 5.5, <https://www.ecoinvent.org/database/database.html>, último acceso: 15/07/19.
- Eco-indicator 99 (2000) “*Eco-indicator 99, Manual of Designer*”, Spatial Planning and the Environment, Ministry of Housing, The Hague, Nederland, 47 p.
- Gonçalves A., Esteves A., Vieira M. (2004) Influence of recycled concrete aggregates on concrete durability, *International RILEM Conference: The use of recycled materials in building and structures*, Barcelona, Ed. Vázquez E., Hendriks Ch.F. y Janssen G.M.T., RILEM, pp 554-562.
- Gómez J.M., Agulló L., Vázquez E. (2001) Cualidades físicas y mecánicas de los agregados reciclados de concreto. *Construcción y Tecnología*, 13, 157, pp 10-20.
- González Maza G. (2012) “*Análisis del ciclo de vida de materiales de construcción convencionales y alternativos*” Tesis de grado. Universidad Autónoma de San Luis de Potosí, 276.
- Ithobe S.A. (2009) “*Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono. Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto*”. Sociedad Pública de Gestión Ambiental. Bilbao, País Vasco, pp 6-22.

- Limbachiya M.C., Leelawat T., Dhir R.K. (2000) Use of Recycled Concrete Aggregate in High-Strength Concrete. *Materials and Structures*, 33, 233, 574-580.
- Moro J.M., Meneses R., Señas L., Priano C., Ortega N.F. (2016). “*Hormigones Sustentables, Tratamientos sobre Agregados Reciclados*”, I Encuentro Nacional sobre Ciudad, Arquitectura y Construcción Sustentable, La Plata, Argentina, 12 pp.
- Moro J.M., Meneses R., Ortega N.F. (2017). *Chapter 1: “Variants in Recycled Concrete Elaboration to Improve their Durability”*, Concrete and Concrete Structures. A Review and Directions for Research; Editors: Dorian T. and Pascual V.; Nova Publishers, New York, 1-42.
- Naik T.R., Moriconi G. (2005). “*Environmental-friendly durable concrete made with recycled materials for sustainable concrete construction*”. UWM Center for By-Products Utilization, University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, USA, 38.
- Organización Internacional de Normalización, (2006), *UNE EN ISO 14.040:2006*. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en>, último acceso: 15/07/19.
- Pavani Bañados E.A. (2008). “*Comparación técnica económica de puente de losa versus puente de vigas*”. Tesis de grado. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile, pp 21-29. http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2008/pavani_eb/html/index.html, último acceso: 15/07/19.
- Schneider M., Romer M., Tschudin M., Bolio H. (2011), Sustainable cement production - present and future. *Cement and Concrete Research*, 41, pp 642-650.
- PRé Consultants (2004) “*Introducción a LCA (Life Cycle Assessment - Análisis de Ciclo de Vida) con SimaPro. s.l.*”, PRé Consultants, 85 p.
- IRAM (2019). <http://www.iram.org.ar/index.php?id=Catalogo-de-normas>, Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, último acceso: 15/07/2019.