

Hacia el Cero Neto en el diseño de estructuras

Towards Net Zero in Structural Design

Fernando Madrazo Aguirre^{a,b}

^a Dr Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. COWI, Londres, Reino Unido. Asociado. femz@cowi.com

^b Visiting Design Fellow, Imperial College London. fma@imperial.ac.uk

RESUMEN

Este artículo presenta una metodología sencilla para medir y clasificar la huella de carbono de puentes. Comienza con una breve introducción al problema del cambio climático que sufre la Tierra, y de los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero al que estamos obligados. Se expone la gran importancia que tanto la industria de la construcción como los diseñadores y los constructores de puentes tienen en las emisiones de carbono. A continuación, se presenta una metodología para el cálculo de la huella de carbono de los puentes, y se sugiere que se empiece a utilizar una clasificación SCORBS para cuantificar la eficiencia de cada puente. Esto se complementa con un ejemplo de un puente reciente en Reino Unido.

ABSTRACT

This article presents a simple methodology to measure and classify the carbon footprint of bridges. The article begins with a brief introduction to the climate emergency and to the carbon reduction objectives that all countries and industries need to achieve. The great impact that both the construction industry and the bridge designers and contractors have on global carbon emissions is presented. A methodology to measure embodied carbon is explained, and the SCORBS carbon classification is presented to measure the carbon efficiency of bridges. The article finishes with a case study for a recently designed bridge in the United Kingdom.

PALABRAS CLAVE: cero neto, sostenibilidad, descarbonización, estructuras, puentes, hormigón, acero

KEYWORDS: Net Zero, sustainability, decarbonisation, structures, bridges, concrete, steel

1. Introducción

El artículo propone una metodología para medir y clasificar las emisiones de CO₂ derivadas de la construcción y uso de puentes. Es evidente que las actividades humanas, derivadas principalmente de las emisiones de gases de efecto invernadero (incluidos el CO₂, CH₄ y N₂O, entre otros) a la atmósfera, están elevando las temperaturas medias de la Tierra de manera muy rápida en términos históricos.

Ya no sólo es este aumento de temperatura media, sino que el impacto que este parámetro tiene en los equilibrios de la tierra está poniendo en riesgo la supervivencia del ser humano en el medio-largo plazo. Mientras tanto, ya estamos viendo algunas de las consecuencias en la actualidad: sequías, catástrofes naturales, movimientos migratorios

masivos, aumento de los precios de los alimentos, etc. [1, 2].

En vista de esto, las economías y gobiernos del mundo llevan años debatiendo qué medidas se deben adoptar para frenar este aumento incontrolado de la temperatura media de la Tierra. A pesar de muchas reuniones y acuerdos que no han proliferado, el Acuerdo de París de 2015 establece un marco que va a marcar qué rumbo deberán seguir nuestras economías y sociedades para controlar las consecuencias devastadoras del cambio climático. Este Acuerdo es el resultado de la Conferencia de Cambio Climático de Naciones Unidas (COP21) a la que se adhirieron 195 naciones [3]. El acuerdo establece que se debe alcanzar el Cero Neto (término que se describe en el siguiente párrafo) en el año 2050. Además del objetivo final en el año 2050, también se establece el camino que se debe seguir para alcanzar ese punto: el pico máximo de emisiones se alcanzaría antes del 2025 y en el año 2035 las emisiones se rebajarían en un 43% respecto a dicho pico.

El término Cero Neto hace referencia al concepto de que las emisiones de CO₂ de origen humano sean cero [4]. Debido a que eliminar todas las emisiones de CO₂ es prácticamente imposible de lograr, se están desarrollando tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (*Carbon Capture and Storage*, CCS por sus siglas en inglés) para compensar dichas emisiones, y por tanto alcanzar el Cero Neto.

En este artículo se utiliza el término carbono para hacer referencia al equivalente de dióxido de carbono (CO₂e), término que engloba todos los gases de efecto invernadero. Los gases de efecto invernadero son aquellos que atrapan el calor en la atmósfera, y aunque más del 80% se debe al CO₂, existen muchos otros gases con los mismos efectos.

Estos objetivos del Cero Neto también quedan englobados dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) definidos por las

Naciones Unidas también en el año 2015 [3]. Los ODS hacen referencia a 17 ámbitos, entre los que se encuentran los siguientes que hacen referencia el Cero Neto: ‘Energía Asequible y No Contaminante’ (#7), ‘Producción y Consumo Responsables’ (#12) y ‘Acción por el Clima’ (#13).

2. Impacto del diseño y construcción de estructuras

Se estima que el 40% de las emisiones globales provienen del entorno construido, que la industria de la Construcción contribuye en un 17% a todas las emisiones globales, y que la industria del Transporte es responsable del 21% de dichas emisiones [2,5]. Por lo tanto, es evidente que el impacto que los diseñadores y constructores de puentes y estructuras tenemos, puede ser significativo.

En los últimos años, se ha generado un amplio debate sobre las decisiones personales que contribuyen, en mayor o menor medida, a las emisiones de CO₂. Sin pretender restar importancia a dichas medidas, se presentan a continuación tres ejemplos que ilustran cómo el impacto que un profesional tiene en su día a día supera, en varios órdenes de magnitud, el de estas acciones individuales [6]:

- Las emisiones generadas por un vuelo de ida y vuelta desde Madrid a Nueva York en clase turista ascienden a aproximadamente 1,000 kgCO₂e por pasajero.
- Las emisiones que se podrían ahorrar al adoptar una dieta vegana equivaldrían a unos 2,000 kgCO₂e por persona al año.
- Un paso superior típico de 60m de longitud, con un tablero de 12.5m de anchura, podría generar hasta 1.8 millones de kgCO₂e. Una reducción de la huella de un 10%, ya sea a través de la optimización de las cuantías o mediante una especificación adecuada de los

materiales, supondría una reducción de 180,000 kgCO₂e.

De hecho, un estudio reciente realizado en el Reino Unido concluyó que el trabajo realizado por un ingeniero de estructuras tiene una huella de 1,000 toneladas de CO₂e de media al año [5].

El origen principal de nuestras emisiones de carbono son el uso de los materiales tradicionales de construcción: el hormigón y el acero. Por un lado, la fabricación del hormigón representa el 8% de todas las emisiones globales, de los cuales el 90% proviene de la producción del clínker de cemento. Estas emisiones se deben tanto a la energía necesaria para calentar el carbonato de calcio y el sílice, como por la propia reacción química de calcinación para producir clínker. Por otro lado, la industria del acero también representa en torno al 8% de todas las emisiones globales. Éstas se deben a la energía necesaria para la producción de acero, aunque el proceso de horno de arco eléctrico y el reciclado de acero están ayudando a controlar y reducir las emisiones correspondientes a este material.

3. Medición de la huella de carbono

El primer paso para poder empezar a reducir las emisiones es medir cuál es el nivel actual de la huella de carbono de nuestras estructuras. Como dice una frase que se atribuye a W. E. Deming y a P. Drucker: “aquello que no se puede medir no se puede gestionar o controlar”.

Por un lado, este artículo quiere animar a que todos empecemos a estimar las emisiones de nuestros puentes. Esta estimación será más precisa según el proyecto esté más definido. Pero se quiere recalcar la importancia que tiene que estas estimaciones se realicen en las fases iniciales o conceptuales de cada proyecto, porque es entonces cuando nuestro impacto

puede ser superior (ver Figura 1). Para ello se presenta una metodología sencilla de cálculo como de clasificación de la huella. Además, el proceso de ir estimando la huella de carbono según se va diseñando la estructura ayuda a identificar los aspectos del diseño en el que se debe hacer mayor hincapié en optimizar. De hecho, ya existe normativa internacional de gestión del carbono que promulgan precisamente esta medición de las emisiones (ejemplo, PAS 2080 [7]).

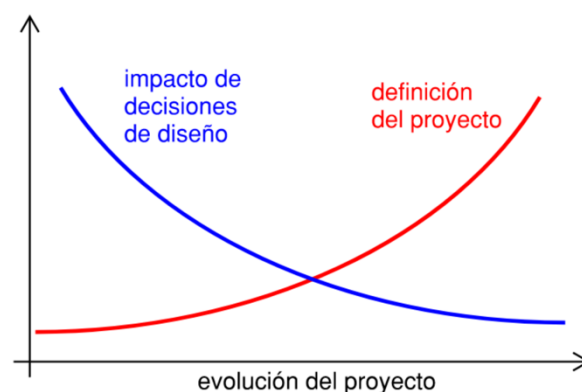


Figura 1. Impacto de las decisiones según el grado de definición del proyecto

Por otro lado, el artículo quiere promover la comunicación de dichas estimaciones y mediciones tanto en conferencias y artículos científicos, como en notas de cálculo, planos o mediciones, del mismo modo que se facilitan otras mediciones. Finalmente, se quiere promover la creación de una base de datos que contenga el mayor número de proyectos de puentes posibles. Esta base de datos contendría tanto información general del puente (luces, tipología, material, etc.) como las emisiones de carbono, y podría ser una referencia vital para que sus conclusiones se puedan tener en cuenta la hora de proyectar cualquier nuevo puente.

3.1 Ciclos de vida

Antes de medir la huella de carbono, conviene definir los módulos del ciclo de vida de una

estructura, que son comúnmente utilizados a nivel internacional [8,9]; ver Figura 2.

Los módulos A1 a A3 se conocen como los de producto, y engloban la extracción de las materias primas, su transporte al centro manufacturero, y la propia manufactura para obtener el producto deseado. Estos tres módulos son los responsables de una mayor huella de carbono en el mundo de la construcción. Los módulos A4 y A5 hacen referencia a la fase de construcción e incluyen el

transporte del producto a obra, y el proceso constructivo hasta conseguir la obra terminada, incluyendo todos los medios auxiliares empleados. Estos dos módulos normalmente tienen menor huella que los módulos A1-A3, pero dependiendo del origen de los materiales y de la complejidad de la estructura, pueden contribuir notablemente a la huella total. Estos cinco módulos son lo que componen el término conocido como carbono incorporado (*embodied carbon* en inglés).

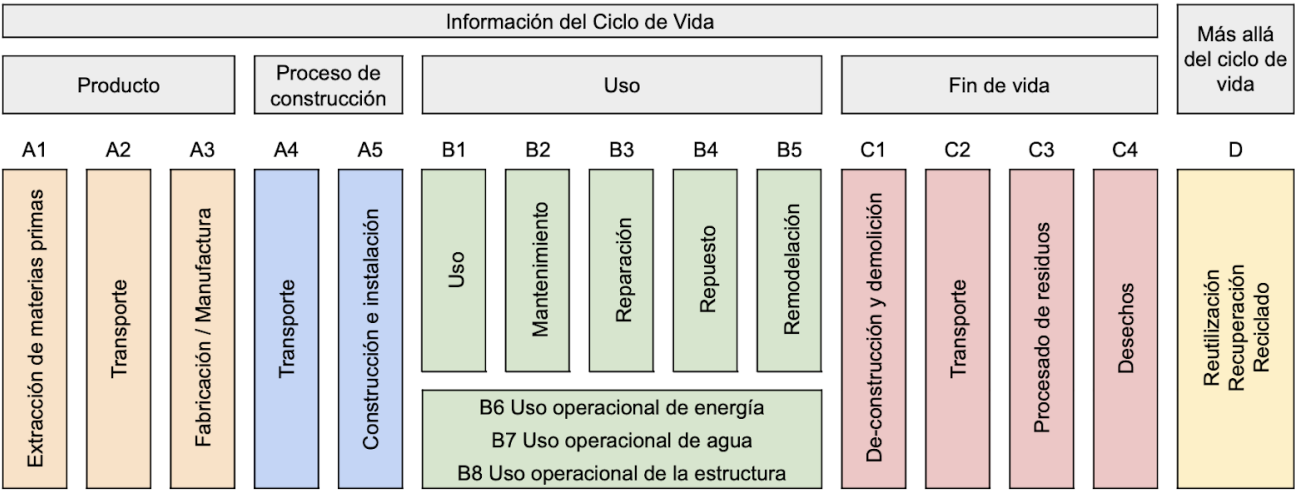


Figura 2. Ciclo de vida y correspondientes módulos de una estructura.

Los módulos B1 a B8 son del uso de la estructura, y hacen referencia al propio uso (por ejemplo la apertura y cierre en puentes móviles, o la que emiten los usuarios) y mantenimiento, así como de las actuaciones de reparación, remodelaciones y reemplazos que se ejecuten a lo largo de la vida útil de la estructura. En el caso de puentes, las emisiones debidas al tráfico que circula sobre ellos se engloban dentro del módulo B8. En el caso de los puentes de carretera, este módulo por sí solo suele superar a los módulos A1-A5 combinados [10].

Finalmente, los módulos de C1 a C4 son los que engloban la fase de desmantelamiento. Todos estos módulos desde la A hasta la C, son lo que se conoce como ciclo de vida de la estructura. También se podría hablar del módulo que va más allá del ciclo de vida, como por ejemplo cuando se reutilizan o

reciclan componentes o partes de las estructuras; este es el módulo que se conoce como D.

3.2 Cálculo de la huella de carbono

El cálculo de la huella de carbono consiste en sumar los productos de cuantía de cada material empleado en la construcción por su correspondiente factor de carbono. Dichos factores se suelen definir para cada módulo, y en la siguiente sección se describe cómo se obtienen.

3.3 Factores de carbono

Es importante matizar que los factores de carbono pueden variar ostensiblemente para un mismo material. Lo ideal es contar con información precisa y exacta de cada material,

que debería ser calculada por los suministradores de los materiales en función de parámetros como: origen de las materias primas, condiciones de transporte, energía y emisiones correspondientes a la manufactura de los materiales, el transporte a obra, el porcentaje de material sobrante y residuos, medios auxiliares para la instalación del material, etc. Es evidente que la definición exacta de estos factores no es una tarea fácil, aunque cada vez existe un mayor número de productos y suministradores que aportan dicha información, en forma de declaraciones medioambientales.

En cualquier caso, es importante conocer a qué se deben las variaciones de los factores de carbono, para así poder influir en una mejor selección de productos, e incluso de suministradores. Por ejemplo, los factores de carbono para barras de armar pueden ser hasta tres veces superiores en un país que en otro, en función del contenido de acero reciclado o las emisiones asociadas al consumo de energía en la planta de fabricación. Del mismo modo, los hormigones también pueden tener variaciones similares en función de la cantidad de cemento o de sustitutos que se utilicen. Por lo tanto, es de vital importancia contar con una base de datos fidedigna, que refleje las huellas de carbono de cada material que se utiliza.

Es evidente que esta información no siempre está disponible, especialmente en las fases tempranas del proyecto. En estos casos, se recomienda el uso de valores medios de factores de carbono que existen disponibles en publicaciones como [2,11-13]; todas ellas públicas y de acceso gratuito.

En adelante, se usarán únicamente los módulos A1-A5 (conjunto conocido como carbono incorporado; *Embodied Carbon* en inglés) para las mediciones, ya que tanto el diseño como la construcción impactan sobre todo a estos módulos. Cabe recalcar que el diseño también puede afectar a las emisiones de los usuarios como puede ser el caso de los puentes móviles, o el impacto que las

pendientes del puente pueden tener en el consumo de combustible; pero a no ser de que otros ciclos de vida sean relevantes, nos centraremos únicamente en los módulos A1-A5 por simplicidad.

4. Metodología SCORBS

Aunque la huella total de carbono debería ser la cifra que realmente importa en la toma de decisiones en esta sección se propone normalizar dicha huella mediante la superficie funcional del puente [14]. La superficie funcional no es más que el producto de la longitud total y del ancho eficaz del puente, que es aquella anchura que aporta la función para la que se va a construir dicho puente (ver Figura 3).

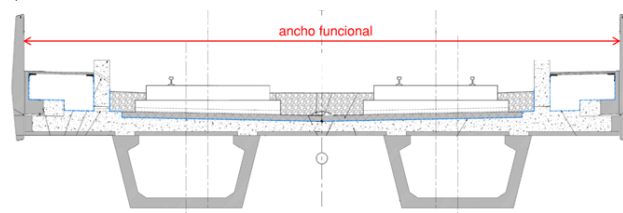


Figura 3. Definición del ancho funcional de un puente

Esta huella normalizada (se recuerda que se usarán los módulos A1 a A5) da información sobre lo eficiente que es un puente desde el punto de vista del carbono. El gran valor de este número es el poder comparar distintas tipologías o materiales de manera muy simple. Además, dicho carbono normalizado se podría usar para comparar puentes con otras alternativas de construcción, como puede ser un terraplén o un túnel.

Una manera de comparar la eficiencia de cada puente es mediante el método SCORBS [14], por sus siglas en inglés (*Structural Carbon Rating Scheme for Bridges*). Este método propone clasificar la huella de carbono normalizada de cada puente en una escala que se ha obtenido mediante un estudio estadístico de decenas de puentes diseñados por una empresa en

particular¹. Esta escala es similar a las pegatinas usadas para comunicar la eficiencia energética de los electrodomésticos; ver Figura 4.

Dicha propuesta hay que contextualizarla en la fecha de publicación de [14] (2021), y del hecho de que provienen de una única oficina de diseño; aunque otros autores proponen valores similares [15]. Según avancen las tecnologías de los materiales, de los métodos de construcción y en general la eficiencia de carbono de toda la cadena de suministro, esta escala SCORBS se debería actualizar, de manera que las exigencias de sostenibilidad son superiores. Del mismo modo, se debería realizar un estudio estadístico similar en cada país, a partir de los puentes diseñados y construidos por distintas compañías, para poder reflejar la realidad de dicho país.

La escala propone clasificaciones que van desde la G (la menos eficiente con huellas de carbono superiores a los 3,500 kgCO₂e/m²), hasta la A (los más eficientes con huellas por debajo de los 1,000 kgCO₂e/m²). Se incluyen también dos categorías especiales A+ y A++ para puentes muy eficientes. La media actual de los puentes es de alrededor de los 2,500 kgCO₂e/m² (correspondiente a una clasificación en el límite de E y D), que también ha sido confirmado por otros autores [15]. Según las reducciones de carbono que se deberían llevar a cabo para cumplir con los objetivos del Acuerdo de París, la clasificación media de los puentes debería ser B para el año 2030, mientras que ésta debería ser A++ para el año 2050—el Cero Neto se alcanzará con huellas de carbono muy bajas y la contribución correspondiente de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono.

Una manera útil de obtener estas huellas de carbono normalizadas es obteniendo la contribución de las distintas partes o componentes del puente. Se podrían obtener las contribuciones de por ejemplo la

subestructura y la superestructura o de cada material utilizado en el puente. De esta manera, es más fácil identificar en qué aspectos se debe trabajar para reducir la huella de carbono del puente en su conjunto.

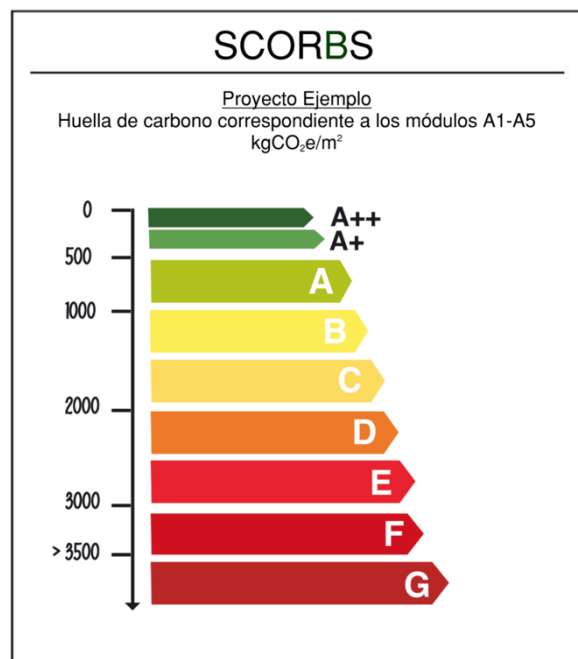


Figura 4. Clasificación SCORBS para puentes.

5. Ejemplo: *Thame Valley Viaduct*

Se incluye a continuación un ejemplo reciente en el que el autor ha estado involucrado para medir la huella de carbono y la correspondiente clasificación SCORBS. Se trata de *Thame Valley Viaduct*, un puente para la nueva línea de Alta Velocidad del Reino Unido (*High Speed Two*, HS2). El viaducto tiene una anchura de 12.25 m y una longitud de 880 m distribuidos en vanos típicos de 25 m. El tablero consiste en dos vigas artesas sobre las que se hormigona una losa “in-situ” de hormigón armado. Las pilas se componen de dos fustes, y se apoyan en encepados con tres pilotes de 40-45 m de longitud [16].

Para el cálculo del carbono embebido, se dividieron todos los materiales del proyecto en un total de 42 grupos, en función de: el propio material (hormigón, acero, etc.), su resistencia, su ubicación en la estructura (cimentaciones,

¹ COWI

subestructura, superestructura) y el método constructivo a emplear. Para cada grupo, se obtuvieron las emisiones debidas a los siguientes módulos: A1-A3, según la base de datos del ICE [12]; A4, estimando el modo de transporte y las distancias a recorrer [13]; y A5, teniendo en cuenta los métodos constructivos que se iban a emplear, así como un porcentaje de desperdicio [13].



Figura 5. Fotomontaje del Viaducto Thame Valley.

Debido a que el cálculo pormenorizado de todos y cada uno de estos materiales ocuparía mucho espacio en este artículo, se han escogido dos de estos materiales para explicar cómo se haría el cálculo para el resto. En concreto, se escoge el hormigón de los pilotes, y los torones de pretensado de las vigas.

5.1 Hormigón de los pilotes

Las cimentaciones profundas del puente consisten en pilotes “in situ” de hormigón armado. Existen en total: (1) dos estribos con seis pilotes cada uno de diámetro 1.5 m y longitud 45 m; (2) una pila fija con nueve pilotes de 1.8 m de diámetro y 32 m de longitud; (3) 21 pilas libres con tres pilotes de 1.5 m de diámetro y 40 m de longitud; y (4) pilas libres con tres pilotes de 1.5 m de diámetro y 41 m de longitud. Así, se obtiene un volumen total de hormigón de 8,966.0 m³.

El hormigón proyectado es C40/50 en el que el 25% del cemento se sustituye por escoria granulada para mejorar la huella de carbono; el factor de carbono para los módulos A1-A3 se estima en 0.138 kgCO₂e/kg_{hormigón}.

Asumiendo una densidad del hormigón de 2,400 kg/m³, se obtienen unas emisiones para A1-A3 de 2,969.5 tCO₂e.

Para el módulo A4 de transporte, se sabe que existe una planta cercana a la obra, por lo que estima una distancia de 50 km de trayecto en camión, con un factor de $2.27 \cdot 10^{-4}$ kgCO₂e/(kg_{hormigón}·km). Por lo tanto, el módulo A4 emite 244.2 tCO₂e.

Finalmente, se calculan las emisiones del módulo A5, consistentes en: (1) porcentaje de desperdicio del 5.0% del volumen proyectado al tratarse de hormigón “in situ”, lo que equivale a 148.5 tCO₂e; (2) la operación de barrenado, que se estima en un 4.2% de las emisiones A1-A3, que corresponde a 124.7 tCO₂e; y (3) el propio hormigonado, con un factor de 7.63 kgCO₂e/m³_{hormigón}, lo que equivale a 68.4 tCO₂e. Es decir, en total, el módulo A5 contribuye en 341.6 tCO₂e.

Por lo tanto, el carbono embebido del hormigón (excluyendo la armadura) de todos los pilotes, asciende a 3,555.3 tCO₂e.

5.2 Torones de pretensado

Las vigas prefabricadas se pretensan mediante torones de siete alambres, con una superficie de 150 mm² y de acero Y1860. El número de torones por viga son: (1) 56 para los dos vanos laterales de 20 m; (2) 48 para los otros dos vanos de 20 m; (3) 80 para los 30 vanos típicos de 25 m; y (4) 92 para los dos vanos de 25 m próximos al punto fijo. Sabiendo que existen dos vigas por vano, y que cada torón pesa 1.17 kg/m, se calcula un total de 166.8 t de torones.

Las emisiones de los módulos A1-A3 se pueden estimar en 2.27 kgCO₂e/kg_{acero}; es decir, un total de 378.6 tCO₂e.

En este caso, se estima que este acero deberá traerse desde otro país europeo, y posiblemente en camión, así que se utiliza una distancia de 1.500 km, y el mismo factor de carbono anterior de $2.27 \cdot 10^{-4}$ kgCO₂e/(kg_{acero}·km). En total, se estima que el módulo A4 contribuye en 56.8 tCO₂e.

Para el módulo A5, se consideran las siguientes contribuciones: (1) porcentaje de desperdicio del 2.0%, al tratarse de una planta de prefabricación en el que los procesos están mejor controlados; lo que representa 7.6 tCO₂e; y (2) la instalación y el tesado de los torones, que se estima en 0.3 kgCO₂e/kg_{acero}, resultando en 50.0 tCO₂e. Por lo tanto, el módulo A5 asciende a 57.6 tCO₂e. Cabe destacar que las operaciones de transporte e izado de las vigas se incluyen en las emisiones del hormigón de las vigas, a pesar de que existiría una parte proporcional que se podría asignar al acero de pretensar.

5.3 Resto del viaducto

Se puede continuar del mismo modo con el cálculo de las emisiones de los restantes 40 materiales, que asciende aproximadamente a los 15,100 tCO₂e. Dichas emisiones embebidas divididas por la superficie funcional del viaducto conducen a 1,400.7 kgCO₂e/m², lo que equivale a una clasificación B en la escala SCORBS (ver Figura 4).

Cabe señalar que en el caso de la armadura, se utiliza el valor medio que define el CARES (instituto de certificación de materiales de construcción del Reino Unido), y para el hormigón se supone que el 25% del cemento se sustituye por escoria granulada para mejorar la huella de carbono. Se sabe que únicamente existe escoria para poder reemplazar el 10% del cemento que se utiliza a nivel global, por lo que porcentajes superiores sólo implican que habrá otros proyectos en los que ese porcentaje tendrá que ser inferior.

Una vez se tienen los cálculos de las emisiones de cada material, resulta fácil identificar aquellos elementos que más contribuyen a las emisiones, y así dedicar mayor esfuerzo a optimizar (ya sea por reducción de cuantías o por especificar materiales más sostenibles) aquellas partidas que tienen mayor impacto. En este ejemplo, se incluye la Figura 6 donde se dan las contribuciones de los distintos módulos del ciclo de vida, por los materiales empleados y por cada sistema del puente.

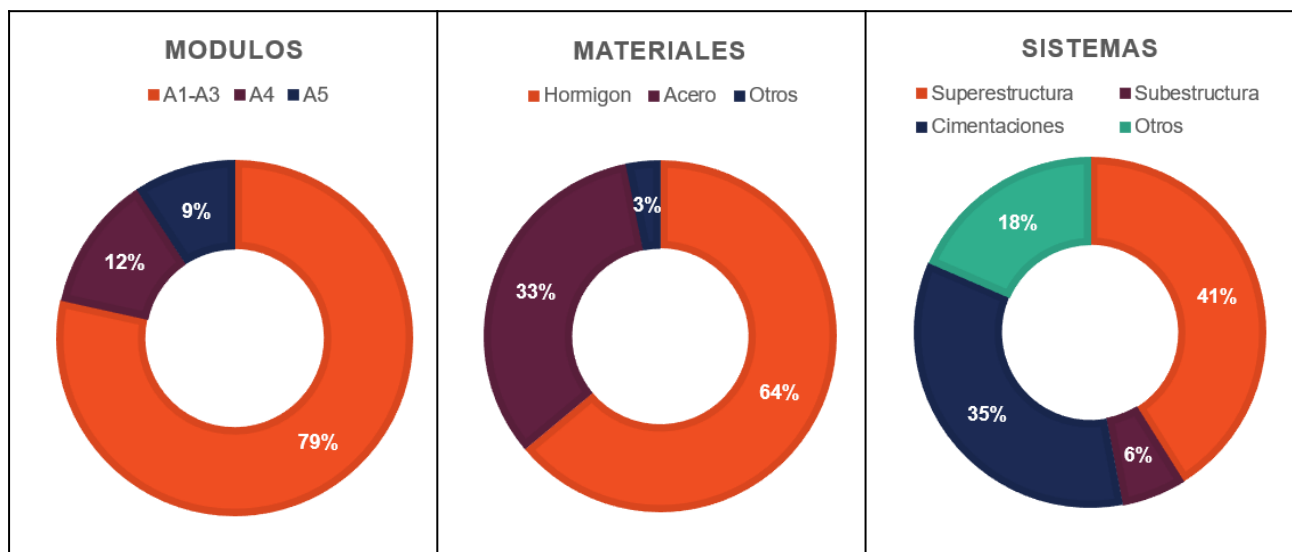


Figura 6. Distribución de las emisiones totales del viaducto por módulos del ciclo de vida, por materiales y por el sistema del puente (la superestructura incluye elementos estructurales ubicados sobre los aparatos de apoyo; la subestructura incluye solo fustes de pilas, así como el alzado de los estribos; las cimentaciones incluyen pilotes y encepados; finalmente, “otros” incluye elementos como los parapetos, el drenaje, etc.).

6. Conclusiones

En este artículo se ha presentado una metodología para el cálculo de la huella de carbono de puentes. Algunas de las conclusiones más relevantes son:

- Debido al impacto de las emisiones de los gases de efecto invernadero en el cambio climático, absolutamente todas las industrias tienen que empezar a reducir la huella de carbono. El mundo de la construcción en general, y el diseño y construcción de puentes en particular, también deberán seguir los objetivos de Cero Neto.
- El primer paso para empezar a reducir el carbono embebido es medir cuáles son las mediciones actuales. Sólo entonces podremos entender dónde nos encontramos actualmente, para entender hacia dónde tenemos que dirigirnos.
- Además, el hecho de medir también nos ayudará a entender mejor de dónde proviene la mayor parte de la huella de nuestros puentes y cómo se podría reducir la misma.
- El impacto que tenemos como diseñadores y constructores de puentes es muy superior al del ciudadano medio. Por lo tanto, debemos ser más conscientes del poder que tenemos en ahorrar emisiones de carbono.
- El artículo introduce una metodología sencilla de cálculo de huella de carbono, consistente en el uso de factores de carbono medios disponibles en publicaciones de acceso gratuito.
- Además, se propone la clasificación de la huella de carbono al normalizar dicha

huella por la superficie funcional de cada puente. Esta medida se puede expresar en una escala SCORBS para medir la eficiencia de cada estructura, desde el punto de vista de la sostenibilidad.

- Este método SCORBS es un método que está cogiendo mucha fuerza a nivel internacional, y es una herramienta eficaz para definir con un sólo número la eficiencia energética de distintas alternativas; ya sean estructuras, como otras construcciones.
- El objetivo principal del artículo es animar a que se empiece a medir la huella, aún sabiendo que los cálculos no son totalmente precisos si no se dispone de información detallada de los materiales de construcción que se emplean.
- Finalmente, también se insta a que estas mediciones se comuniquen y a la creación de una base de datos pública que contenga tanto información de la huella de los distintos materiales de construcción que se emplean en España y Latinoamérica, como de la clasificación SCORBS de distintos proyectos de puentes. Esta información colectiva podría ser un gran catalizador para acercarnos al Cero Neto.

Referencias

- [1] V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.), Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C

- above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, Cambridge University Press, Cambridge, UK y New York, NY, USA, 2018.
- [2] F. Madrazo-Aguirre, Hacia un diseño más sostenible de puentes, Hormigón y Acero (manuscrito en revisión).
- [3] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), The Paris Agreement, <https://unfccc.int/documents/184656>, 2016 (consultada el 10.12.24).
- [4] J.J. Orr, T.J. Ibell, C. Smith, N. Watson, Design for Zero, London, The Institution of Structural Engineers, 2021.
- [5] R. Thorniley-Walker, Climate emergency: civil engineers need to start taking a more proactive role, Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Civil Engineering, 173(1) (2020): 10.
- [6] W. Arnold, The structural engineer's responsibility in this climate emergency, The Structural Engineer. 98(6) (2020): 10–11.
- [7] The British Standards Institution (BSI), PAS 2080 - Carbon Management in Infrastructure, London, 2023.
- [8] The European Committee for Standardization (CEN), EN 15978 Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Requirements and guidance, Bruselas, 2011.
- [9] The European Committee for Standardization (CEN), EN 1584 Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Core rules for the product category of construction products, Bruselas, 2011.
- [10] T. Chapman, I. Firth, Low-carbon outcomes in the built environment, The Structural Engineer. 99(5) (2021): 16–17.
- [11] The Institution of Civil Engineers (ICE), The Inventory of Carbon and Energy (ICE Database), V3.0, Londres, 2019.
- [12] O.P. Gibbons, J.J. Orr, C. Archer-Jones, W. Arnold, D. Green, How to calculate embodied carbon, second ed., London, The Institution of Structural Engineers, 2022.
- [13] Net Zero Bridges Group. Carbon Calculation Guide for Bridges (DRAFT), <http://www.netzerobridges.org>, 2023.
- [14] C. Archer-Jones, D. Green, Carbon targets for bridges: a proposed SCORS-style rating scheme, The Structural Engineer. 99(10) (2021): 14–18.
- [15] D. Collings, S. Murthy, An update on bridge carbon dioxide footprint data, Proceedings of the Institution of Civil Engineerings – Bridge Engineering, 2024.
- [16] Madrazo-Aguirre, F, Thame Valley Viaduct: carbon efficient DfMA viaduct for HS2, IABSE Symposium Manchester 2024 - Construction's Role for a World in Emergency. 2024: 478–85.