

## Reporte Final

# Perspectivas para promover la sustentabilidad de la industria de la construcción con un enfoque al concreto.

Renee Mors



**WOMEN4CLIMATE**  
MEXICO CITY



**CDMX**

# Perspectivas para promover la sustentabilidad de la industria de la construcción con un enfoque al concreto

El objetivo de este informe es generar una visión introductoria y amplia de las estrategias disponibles en la actualidad y en un futuro cercano, que puedan limitar el impacto de las construcciones de concreto.

Está dirigido principalmente para ser aplicado en la Ciudad de México e inspirado por las acciones actuales en los Países Bajos. Asimismo, comprende una variedad de posibilidades disponibles en el mercado de dichas estrategias que pueden someterse a una reevaluación.

## Índice

1. Influencia del concreto en el sector de la construcción. ....	2
1.1 Situación actual en México .....	3
2. Incluyendo la sustentabilidad en la toma de decisiones. ....	4
2.1 De lo lineal a lo circular .....	5
2.2 Monetización del impacto.....	6
2.3 Implementación en procesos de licitación .....	7
3. Estrategias basadas en tecnología .....	8
3.1 Ajuste del diseño estructural del concreto – Rechazar / repensar, reducir.....	8
3.2 Concentración de la corriente residual del cemento – Reducir.....	12
3.3 Sustitución del cemento por productos secundarios – Reducir, reutilizar .....	12
3.3.1 Reemplazo completo de cemento.....	14
3.3.2 Aplicabilidad a México .....	15
3.4 Mejorar la resistencia estructural al deterioro – Reparar, renovar.....	16
3.5 Minería urbana – Remanufacturar, reutilizar, reciclar y recuperar .....	17
4. Discusión y recomendación .....	19
4.1 Factores habilitantes .....	19
4.2 Discusión general.....	19
4.3 Aplicabilidad a México.....	20
4.4 Recomendación .....	23
AGRADECIMIENTOS .....	24
CONFLICTOS DE INTERÉS.....	24
DESCARGO DE RESPONSABILIDAD.....	24
ABREVIACIONES .....	24
REFERENCIAS .....	25
Sección 1 .....	25
Sección 2.....	26
Sección 3.....	29
Sección 4.....	33

## 1. Influencia del concreto en el sector de la construcción

Según un estudio realizado por el gobierno del Reino Unido (UK), la industria de la construcción en ese país influye en más del 47% del total de las emisiones de CO<sub>2</sub> antropogénicas, que son aproximadamente 300 millones de toneladas (UK 2010). No debe confundirse con las emisiones de CO<sub>2</sub> de las que la industria de la construcción es directamente responsable y que se espera sean menores, estas emisiones se producen en distintas etapas de la vida de una construcción, las cuales son: el diseño, la fabricación, la distribución, el montaje, el uso y final de vida útil (remodelación o demolición).

Alrededor del 83% de emisiones se obtienen durante la etapa de uso, principalmente al alterar las necesidades de los usuarios con métodos de calefacción, uso de aparatos eléctricos e iluminación, esto es aplicable para la construcción residencial e industrial, por lo que se considera una influencia indirecta. El resto se ve afectado directamente por el proceso durante la construcción. Aproximadamente 15% del efecto sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> se refiere a la etapa de fabricación del material, el cual más de un cuarto es contribuido por la producción de cemento y de concreto (BIS 2010). Se espera que la industria del concreto en el Reino Unido pueda afectar al 1,8% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> en ese país.

La influencia del sector de la construcción no solo está relacionada con las emisiones de CO<sub>2</sub>, los datos de los Países Bajos muestran que este sector consume aproximadamente el 50% de todas las materias primas, el 40% del uso total de energía y el 30% del uso total de agua (Transitieagenda Bouw 2018), la contribución directa se estimó en un 35% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub>.

En los Países Bajos, la industria del concreto demostró ser el principal factor de influencia en la construcción por sus efectos directos. En 2010, la producción de polvo fino (PM<sub>10</sub> eq), resultado del concreto, se estimó en alrededor del 13% de la producción total, causada principalmente por la producción de este material y su transporte. Con respecto al uso de energía, este sector consumió el 1,1% del uso total de energía, de los cuales solo el 5% provino de fuentes renovables (Bijleveld et al. 2013). Aproximadamente el 1,7% del total anual de 220 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> eq (RIVM 2017) provino de la industria del concreto, similar a la cantidad que podría ser influenciada por el sector de concreto según lo estimado en el Reino Unido (BIS 2010). Si bien el transporte en la construcción causó aproximadamente el 20% de las emisiones de CO<sub>2</sub>, el uso del concreto como material causó el impacto principal con una contribución de más del 50%, incluso teniendo en cuenta una reutilización parcial del concreto al final de su vida útil (Figura 1).

El cemento contribuyó en un 95% al impacto del concreto. El uso de acero no mostró un impacto significativo en el CO<sub>2</sub> eq, debido a que este es reutilizado más del 70%; sin embargo, debe tenerse en cuenta que la producción de refuerzos en la estructura contribuye a la formación de polvo fino. El reciclaje de concreto al final de su vida útil se estima en un 90% en los Países Bajos (VROM 2001); no obstante, actualmente se trata de granular los residuos de demolición y el uso de granulados de baja calidad como base para la construcción de carreteras, lo que se considera downcycling (ABN AMRO 2014), esto provoca una contribución relativamente baja a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> eq (Figura 1).

Sobre la base de estos datos, se recomienda estudiar la reducción del uso de materiales en general, la limitación del uso de cemento y la recuperación de componentes de concreto o componentes de los residuos de demolición.

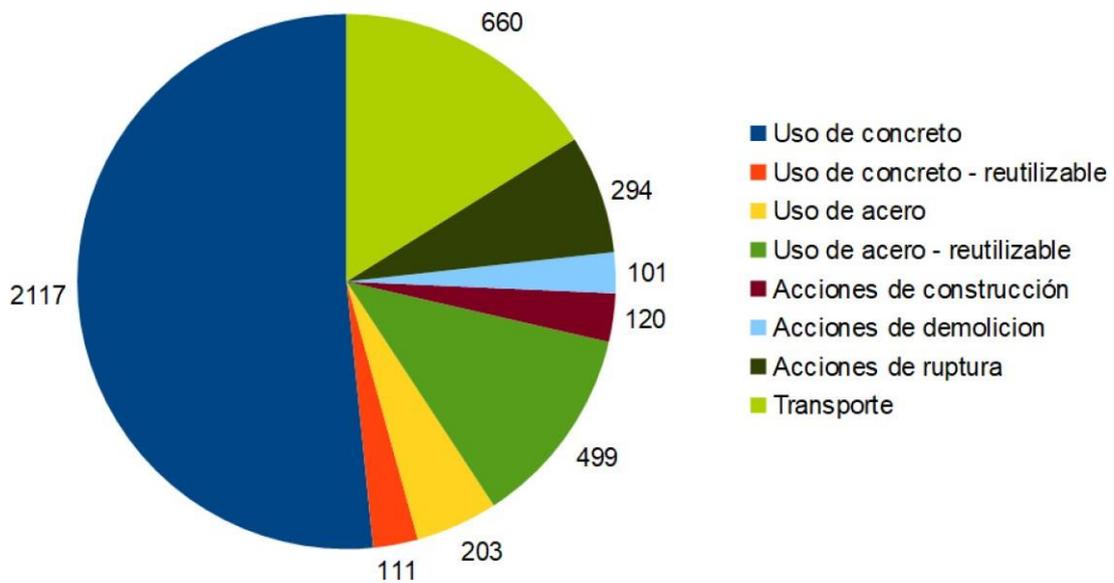


Figura 1: Distribución de las emisiones de CO<sub>2</sub> eq en el sector de la construcción con concreto en los Países Bajos (Bijleveld et al. 2013)

### 1.1 Situación actual en México

En México, la producción anual de cemento se estima en 41 millones de toneladas, con un consumo de cemento de aproximadamente 325 kg por habitante por año (CANACEM 2018) y un valor de cemento de aproximadamente 1,5 MXN por kg. El cemento Portland cubre el 80% de la producción de cemento, que es un cemento que consiste casi totalmente en clínker y no reemplazos de cemento. Las obras de infraestructura gubernamental generan el consumo del 30-40% del cemento (Vásquez & Corrales 2017).

La producción de cemento en este país genera más del 4% de las emisiones totales de equivalentes de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub> eq) (INECC & SEMARNAT 2012), similar al promedio mundial (Worrell et al. 2001). En 2013, la producción de cemento en México liberó aproximadamente 20 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, mientras que el uso de energía agregó 9 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> eq más (INECC & SEMARNAT 2015).

La industria de la construcción produjo aproximadamente 6 millones de toneladas de residuos en promedio entre 2006 y 2012 (SEMARNAT 2013). Del concreto, el 80% se depositó sin reutilización, del cual el 30% llegó a través de un centro de transferencia (CMIC 2012). En la Ciudad de México en 2010, la cantidad de residuos de construcción se estimó en 7 mil toneladas diarias, de las cuales el 1% se reciclaron y el 80% se vertieron en vertederos (Gaceta Oficial del Distrito Federal 2010). En 2015, la Secretaría de Obras y Servicios de la Ciudad de México (SOBSE) recibió y procesó diariamente 33 toneladas de residuos de construcción y demolición, y 459 toneladas diarias en el Departamento de Mantenimiento e Infraestructura Urbana (DMIU) que se encuentra ubicado en cada delegación. En general, los residuos contenían un 70% de materiales inertes de origen mineral, como el concreto (SEDEMA 2015), similar a las estadísticas de los Países Bajos (ABN AMRO 2014).

## 2. Incluyendo la sustentabilidad en la toma de decisiones

Para alcanzar el desarrollo sustentable, las actividades para cubrir las necesidades no deben afectar negativamente a las generaciones futuras y su capacidad para cubrir sus necesidades (UN 1987). Se debe tomar en cuenta a las personas, el planeta y las ganancias como los principales sujetos interrelacionados en la toma responsable de las decisiones. Para el planeta, por ejemplo, se evalúa el agotamiento de los recursos finitos junto con la emisión de compuestos nocivos, para las personas, las oportunidades de empleo con el bienestar y para las ganancias, los salarios justos con la compensación económica de los daños. La ayuda para incluir responsabilidad social y la definición de prioridades se puede encontrar en la Guía para la Adquisición Sustentable (NEN-ISO 20400, 2017).

Puede requerirse una manera adicional de medir el éxito de una empresa o país, incluyendo el factor de sustentabilidad en el cálculo, para obtener acciones que tengan un impacto local y global neto menor. Actualmente, el enfoque está en el éxito económico a través de las ganancias y el producto interno bruto (PIB), que generalmente están relacionados con el agotamiento de los recursos (Dittrich et al. 2012). Algunos países de altos ingresos muestran una disminución en el consumo de material y un crecimiento económico creciente, como Canadá, Japón y el Reino Unido. Esto puede indicar que es posible disminuir el consumo de materiales al mismo tiempo que fomentar el crecimiento económico, aunque puede ser causado por la subcontratación de procesos intensivos de materiales en otros países. Esto último puede aumentar el consumo de materiales locales en los países de bajos ingresos en comparación con su crecimiento económico local. Para analizar si el crecimiento económico y la disminución de la presión ambiental podrían ocurrir simultáneamente, es importante medir el consumo de material global promedio en comparación con el desarrollo económico. Además, puede ser justo que los cálculos asignen el impacto de los productos o procesos en el país de consumo, en lugar del país de producción, esto permitiría elegir la alternativa que tenga el menor impacto a nivel local y global. Las iniciativas para evaluar el efecto local y global de las acciones se pueden encontrar, por ejemplo, en el enfoque en un planeta (One Planet Approach, OPA, Metabolic 2017). Adicionalmente a la medición de la ganancia económica o el PIB, se puede utilizar un cálculo integrado para el éxito, teniendo en cuenta la contaminación y el agotamiento de los recursos, tal como se propone con un indicador de progreso real (genuine progress indicator, GPI, Kubiszewski et al. 2013).

Tanto la naturaleza como las actividades humanas tienen un impacto en el medio ambiente. La diferencia del impacto natural es que existe un equilibrio global, por ejemplo, por absorción natural de CO<sub>2</sub>, como en bosques y agua. Sin embargo, el impacto humano se ha mantenido desequilibrado en su mayor parte, lo que agrega estrés al medio ambiente y cambia el equilibrio histórico. Al monetizar la carga ambiental de la actividad humana, el costo ambiental anual no compensado se estimó en un equivalente al 11% del PIB mundial, de los cuales un tercio se debió a las 3000 empresas más grandes que cotizan en bolsa (PRI & UNEP 2011). La monetización de los servicios que nos brinda la naturaleza, como la regulación de los recursos y la contaminación, estimó un valor impago total de alrededor de 33 billones de dólares por año (Costanza et al. 1997), aproximadamente el doble del Producto Nacional Bruto (PNB) del mundo.

Equilibrar el impacto del consumo humano y sus actividades es una de las estrategias actualmente evaluadas en materia de sustentabilidad. Por ejemplo, intentar cerrar el ciclo de las edificaciones en el caso de la industria de la construcción, alcanzando un impacto

neto nulo o incluso con compensación. Además, existen iniciativas que asignan un valor económico al impacto y los beneficios ambientales, para ponerle precio al impacto o al valor agregado de los productos y servicios, para que la compensación pueda incluirse en la economía. También en los procesos de licitación se está llevando a cabo la implementación de estrategias de sustentabilidad, como la inclusión del impacto ambiental en términos monetarios y la circularidad en los criterios de selección. Estas estrategias se discuten por separado en las siguientes secciones.

## 2.1 *De lo lineal a lo circular*

La construcción generalmente utiliza un régimen de consumo lineal, que comienza con la excavación de la materia prima, a partir de la cual se producen y ensamblan los elementos, que luego se usan, se demuelen y se depositan en vertederos. En ciertos lugares del mundo, esto ya genera una gran presión sobre la disponibilidad local de los recursos naturales necesarios para la construcción, como el cemento y la grava (UNEP 2014). Se puede lograr alguna mejora haciendo hincapié en el mantenimiento durante la fase de uso, como en los Países Bajos y el Reino Unido, lo que permite un uso relativamente bajo de la materia prima (Dittrich et al. 2012). Sin embargo, con retraso, la tendencia es todavía hacia el agotamiento de los recursos.

Contrariamente a un consumo lineal, la naturaleza utiliza un enfoque circular, que suministra nutrientes a los organismos que permiten el crecimiento que al final de la vida se reciclan y vuelven a ingresar como nutrientes para continuar el ciclo. También se puede lograr un ciclo de construcción haciendo que los residuos de la construcción y la demolición sean un recurso (Circular Economy 2016). El objetivo es minimizar la pérdida neta y maximizar el número de ciclos, ya que se espera la reducción de la calidad, las emisiones y el uso de energía durante el procesamiento o transporte involucrado para el reciclaje. Para evaluar la idoneidad de un material para ingresar en un ciclo siguiente después del procesamiento, los materiales al final de su vida útil deben evaluarse por separado para determinar su impacto ambiental (SBK 2017). A medida que el material continúa ingresando en los siguientes ciclos y puede perder algunas propiedades, se puede proponer que no se base el enfoque del uso del material en un círculo, sino en una espiral.

Se puede dar una indicación de circularidad revisando la contribución a los siguientes enfoques: rechazar / repensar, reducir, reutilizar, reparar, renovar, remanufacturar, reutilizar, reciclar, recuperar, también conocido como 9R (REbus 2017). El orden de los términos indica la jerarquía de prioridad, para lo cual el primero conduce a la mayor circularidad y el último a la menor circularidad, o la mayor linealidad. Incluso en la última etapa, la recuperación, la calidad se debe maximizar, con la recolección de energía y las cenizas en la incineración como el último proceso.

Se pueden incluir varios indicadores de sustentabilidad en la evaluación de la circularidad. Por ejemplo, a nivel material, el ciclo puede incluir una reforestación del mismo nivel que los árboles cortados para el uso de madera en la construcción o salarios justos, como la certificación del Forest Stewardship Council (FSC, Washburn & Miller 2003). Además, se pueden incluir elementos que permiten un impacto neto positivo, como en el campo de la ingeniería ecológica (Mitsch & Jørgensen 2003). Ejemplos en la construcción, las iniciativas incluyen la jardinería en techos y el almacenamiento y filtrado de agua integrados. Para esto puede ocurrir una conexión dentro del ciclo de la edificación, como la reducción de la calefacción, pero también entre varios ciclos, como el de la gestión del agua y la recreación. Principalmente para entornos urbanos, la integración estructural de

las funciones del ecosistema es crucial para obtener sustentabilidad (Stache et al. 2019).

Preferiblemente, tanto el ciclo local como el global deberían obtener una reducción neta de la carga ambiental y social, compensando parte del impacto humano acumulado. Interesantemente, en los ciclos existe la dependencia entre elementos individuales. La obtención de un impacto positivo neto requiere de la sinergia en lugar de la competencia, en la que los beneficios individuales juntos constituyen un resultado aún más beneficioso. Esto puede requerir formas alternativas para que las corporaciones funcionen.

La proveeduría circular se puede utilizar como un instrumento para tomar en cuenta los beneficios financieros, sociales y estratégicos a nivel de producto, proveedor y sistema en varias etapas (EU 2017, MVO Nederland 2018).

## 2.2 Monetización del impacto

Los impactos de los productos o procesos en las personas, el planeta y las ganancias pueden medirse de maneras distintas. El impacto ambiental, por ejemplo, es generalmente conocido por el potencial de calentamiento global (Global Warming Potential, GWP). Para ello, la producción antropogénica de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub> y CFC) se recalcula en función de su impacto relativo y se demuestra en kg equivalentes de CO<sub>2</sub>. Por ejemplo, un kg de CH<sub>4</sub> genera 21 kg de equivalentes de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, el impacto ambiental implica más categorías, como toxicidad, acidificación, eutrofización, competencia en la tierra, uso del agua y obstáculos (por ejemplo, ruido y luz). El impacto por categoría se demuestra en su propia unidad (por ejemplo, en kg, ethene, SO<sub>2</sub>, (PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub><sup>-</sup>, m<sup>2</sup>, m<sup>3</sup> y dB), lo que dificulta la comparación y visualización del impacto combinado. Además, la cuantificación del impacto ambiental se puede realizar calculando la carga económica por categoría de impacto y posteriormente agregando los impactos de interés (CE 2018). Al monetizar el impacto ambiental, se puede indicar el costo adicional para la sociedad. Alternativamente, la cantidad del costo ambiental se puede calcular en el precio del producto. De esta manera, el contaminador paga el precio de la carga ambiental. Esta parte debe entonces gastarse en la prevención o compensación del impacto ambiental.

Una de las formas actualmente implementadas es la determinación de un indicador de costo ambiental (ECI). Un valor único en euros, también conocido como "costos ocultos", se determina a partir de la carga evaluada de once categorías de impacto principales relacionadas de acuerdo al impacto de la extracción de materias primas y de sus emisiones (SBRCURnet 2015). Sin embargo, se debe tener cuidado al analizar qué se ha incluido específicamente para calcular el costo final del impacto y qué valores de conversión se eligieron. Además, el impacto puede cambiar según el nivel aplicado, como el producto, el elemento del trabajo de construcción completo y si se tiene en cuenta el reciclaje (BZK 2014). Por lo tanto, la monetización solo se puede recomendar como una adición al análisis de impacto original, que preferiblemente sigue un procedimiento estándar internacional tal como en una evaluación del ciclo de vida (Life Cycle Assessment, LCA) (NEN-ISO 14040, 2006).

Cuando las cuantificaciones, como la ECI, pueden servir para incluir el impacto ambiental en el proceso de licitación, es posible que aún deban incluirse y cuantificarse otros tipos de costos sociales (por ejemplo, mediante monetización). Los primeros pasos para incluir los impactos sociales (por ejemplo, la creación de empleos, el bienestar y la relevancia social) se están llevando a cabo en un LCA social (UNEP 2009) o en la toma de decisiones del gobierno (RWS 2015), pero aún requiere una estandarización.

### 2.3 Implementación en procesos de licitación

Los procesos de licitación en Europa siguen diversas regulaciones (EU 2014), combinando la mejor relación calidad / precio con la oferta económicamente más ventajosa. En este caso, los costos a lo largo del ciclo completo de vida de una construcción deben ser más bajos, incluidos todos los trabajos, suministros o servicios, por ejemplo, indicados por un contrato de diseño, construcción, financiamiento, mantenimiento y operación (DBFMO) (Government Buildings Agency 2012). Esto requiere una colaboración entre las partes involucradas, formando consorcios para participar en la licitación. En la construcción, normalmente se establecen requisitos basados en el rendimiento durante la operación (IISD 2014). Con la necesidad de que los consorcios minimicen los costos de un proyecto para ganar una licitación, la atención se centrará en cumplir con los requisitos mínimos, lo que puede limitar la oferta de una solución que sea la más óptima. Además, la carga ambiental puede incluirse en el proceso de licitación, dado que pueden ser monetizados y monitoreados, como la indicación de la contaminación por el material.

Los procesos de licitación en los Países Bajos actualmente adoptan el enfoque del Mejor Valor de Compra, con el objetivo de obtener la mejor oferta al costo más bajo al solicitar requisitos funcionales, lo que permite variedad en las ofertas (RWS 2017). Desde 2012, el costo de la carga ambiental por las emisiones involucradas de compuestos nocivos y la utilización de recursos finitos deben indicarse durante la fase de licitación para obras de construcción civil (SBK 2014) y edificios de más de 100 m<sup>2</sup> (Bouwbesluit 2018). Para ello, se utiliza una base de datos nacional denominada Declaraciones de Productos Ambientales (EPD) ampliadas, que tienen relación con los estándares europeos. Para los edificios planificados desde el 1 de enero de 2018, existe incluso un impacto ambiental máximo permitido indicado con el cual la oferta debe cumplir. Para las estructuras civiles se espera una carga ambiental máxima tolerada en los próximos años (RWS 2018). Para los cálculos obligatorios, la monetización del impacto ambiental se ejecuta utilizando el ECI. Las categorías de impacto adicionales determinadas deben informarse en su propia unidad, por ejemplo, el uso de la tierra y el agua (en m<sup>3</sup>), los residuos (no) peligrosos (en kg) y la energía total (no) renovable (en MJ). La construcción más óptima puede evaluarse basándose en la funcionalidad, los costos económicos y la carga ambiental. Se recomienda la verificación de la propuesta para alcanzar la carga ambiental indicada. Las ofertas incluyen la solicitud de costos del ciclo de vida o la evaluación del costo total al propietario. Además, es típico que la reducción del uso de energía se exija en el contrato en las distintas etapas de la construcción, junto con el uso obligatorio de madera certificada y tecnología de iluminación LED. Además, los límites de CO<sub>2</sub> propuestos por la compañía otorgan puntos para aumentar la posibilidad de ser elegido. En el proceso de inclusión de la planificación a largo plazo y la minimización del costo total, se producen cambios en el sector de la construcción. En el sector que está desarrollando, todas las partes involucradas, públicas y privadas, deben trabajar juntas para obtener el resultado social más óptimo (Taskforce Bouwagenda 2017).

Los ajustes en el proceso de licitación se utilizan como ayuda para minimizar el impacto total de las construcciones. Las metas del Ministerio de Infraestructura y Gestión del Agua de Holanda pretenden alcanzar un 30% menos de emisiones de CO<sub>2</sub> en 2030 para la cadena de valor del concreto en comparación con 1990 (RWS 2018). El gobierno solicitó recomendaciones de la industria sobre los métodos para alcanzar estas metas. Las propuestas de la industria fueron, por ejemplo, imponer un impacto ambiental máximo permisible en la licitación. Las metas adicionales en la industria de concreto en Holanda intentan reducir la carga ambiental del concreto en un 20% para 2020 y en un 50% para

2030 (Rijksoverheid et al. 2017). Además, la circularidad debería aumentar del 3% al 20% para 2020 a través de la incorporación de los residuos de alto valor de la construcción y demolición en el concreto nuevo. Del concreto que se retira o demuele, se debe usar el 100%. A diferencia del reciclado actual del concreto, la aplicación debe estar dirigida a maximizar el valor que se puede obtener de los residuos.

La circularidad se ha aplicado en varios procesos de licitación de prueba en la industria de la construcción, con el fin de generar experiencia para un mayor desarrollo de políticas públicas y tecnología. Además, la circularidad está ganando mayor interés en las ciudades, no solo desde el punto de vista ambiental, sino también debido a la creación de empleo y valor (Gemeente Amsterdam 2016). El municipio de Amsterdam publicó ejemplos sobre un proceso de licitación circular y criterios de selección cuantitativos y cualitativos dentro de los temas de materiales, adaptabilidad, resiliencia, agua, energía y ecología (Gemeente Amsterdam 2017).

### **3. Estrategias basadas en tecnología**

Con el fin de aportar mayores beneficios a la sociedad en general con respecto a los costos, el medio ambiente y los efectos sociales adversos, la ingeniería y la industria de la construcción se están transformando. Una de las áreas más importantes para la transformación se identificó para la adopción de nuevos materiales, herramientas y tecnologías para las cuales se necesita colaboración (WEF 2014). La probabilidad de generar un impacto se presenta a través de las tecnologías de impresión 3D, materiales autorreparables y componentes de construcción prefabricados. En esta sección se combinan bajo el tema de métodos alternativos de diseño. Algunas de las tendencias globales indicadas para tener una gran importancia y generar un alto impacto son la resiliencia, la escasez de recursos, los requisitos de sustentabilidad y el envejecimiento de la infraestructura. Para ello, se seleccionaron algunas de las categorías priorizadas, que se identificaron para obtener prácticas sustentables en la industria del concreto en Holanda (CE Delft 2016). La selección discute el cambio de la composición del cemento (cemento de sustitución por productos secundarios), el uso de componentes reciclados (minería urbana), la extensión de la vida útil de la construcción (mejora la resistencia estructural al deterioro) y la captura de carbono (concentración de residuos del cemento).

Las estrategias seleccionadas se ordenaron en función de la jerarquía de prioridad para la economía circular, el 9R: rechazar / repensar, reducir, reutilizar, reparar, restaurar, remanufacturar, reutilizar, reciclar y recuperar (REbus 2017).

#### *3.1 Ajuste del diseño estructural del concreto – Rechazar / repensar, reducir*

En cuanto al diseño de estructuras, la inspiración puede ser tomada de la naturaleza, permitiendo un uso eficiente de los recursos. No solo desde el punto de vista de la materia prima o el ciclo del agua para inspirar una economía circular, sino también desde el punto de vista de la gestión de daños por resistencia estructural o reparación automática.

La limitación del uso del material se puede encontrar en la naturaleza, lo que permite una respuesta funcional mientras se mantiene ligero, como en los huesos. Para aplicaciones estructurales, esto podría obtenerse imprimiendoy colocando el material solo donde se requiere (Salet et al. 2018). Además, se podría considerar una combinación de varios materiales, creando una estructura híbrida, con material de propiedades e interacciones específicas donde sea necesario. El uso de materiales existentes, residuales o renovables

puede mejorar aún más los beneficios del uso limitado de materiales.

Un ejemplo de integración de la resistencia estructural en la construcción se puede ver en Japón. Los componentes de sacrificio que están fuera de los Compuestos de Cemento para Endurecimiento por Deformación (Strain Hardening Cementitious Composite, SHCC) se colocan en estructuras para generar capacidad de deformación. Por ejemplo, en caso de un terremoto, el movimiento se absorbe, al tiempo que conserva la integridad estructural. Después de una actividad sísmica importante, las partes hechas de SHCC necesitarán ser reemplazadas, mientras que el resto de la estructura no se verá afectada. Esto último significa que la estructura puede diseñarse para el uso diario, lo que permite un diseño más delgado, mientras que solo se incluye una pequeña parte para resistir los impactos ocasionales (RILEM 2013). Alternativamente, se puede usar una capa de SHCC para cubrir partes de estructuras de mampostería en lugar de yeso ordinario, lo que permite conservar la integridad estructural en caso de deformaciones (por ejemplo, hundimiento o evento sísmico), generando resiliencia.

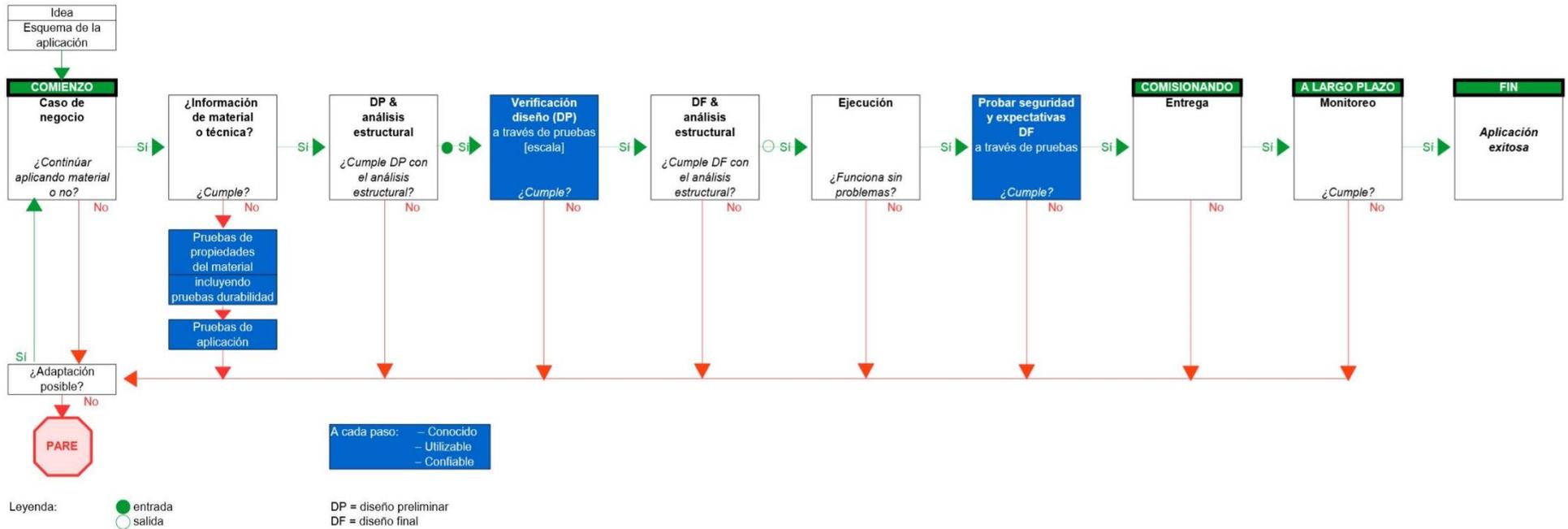
Otro ejemplo de cambio del diseño es la restauración automática de las propiedades funcionales de una estructura de concreto. Esto tiene una función paralela a la función natural de curación, por ejemplo de heridas o fracturas óseas, donde el material recién formado puede no ser el mismo que el original (p. Ej., Tejido cicatricial), pero cumple su función (p. Ej., Sellar la piel o carga de apoyo). Uno de los ejemplos en el concreto es el bloqueo automático de fugas por un mecanismo incorporado en el material. Este llamado "concreto autorreparable" permite recuperar la estanqueidad sin intervención humana, minimizando así las reparaciones durante la fase de uso (Gardner et al. 2018). La inversión inicial y el impacto pueden ser mayores debido a la incorporación de un componente adicional al concreto, pero esto limita el ancho de las grietas en el concreto reduciendo los efectos negativos en el acero. Además, puede reducirse la reparación y el mantenimiento, la pérdida de recursos como el agua, el costo y el impacto del bombeo de agua durante la operación y el tiempo de inactividad de la estructura.

Otros ejemplos de funcionalidad adicional por diseño se pueden ver en la integración de funciones naturales en el diseño estructural, lo que permite la reducción de impactos en otros campos. Por ejemplo, en el caso de fachadas verdes en edificios, se asigna un impacto adicional para la construcción, a medida que se usan más componentes. Sin embargo, debido a una temperatura más equilibrada, la limitación del enfriamiento por aire acondicionado puede equilibrar este impacto, dependiendo del sistema utilizado y la ubicación (Ottelé et al. 2011). Además, la calidad del aire puede mejorar, debido a la captura natural de partículas finas por parte de las plantas, la biodiversidad puede aumentar y el efecto de isla de calor urbano se reduce. La integración de sistemas de retención de agua en las obras de construcción puede minimizar los problemas de inundación y maximizar la disponibilidad de agua, especialmente en entornos urbanos (De Urbanisten & Deltares 2016). Las ventajas de la gestión del agua se pueden combinar con la vegetación para un efecto acoplado.

Otra estrategia es el uso de bloques de construcción modulares que se pueden desarmar y reconstruir, permitiendo la adaptabilidad para nuevos escenarios, la transportabilidad a otro sitio con una necesidad similar y la capacidad de intercambio para formar aplicaciones alternativas. Por ejemplo, en el caso de una planta de tratamiento de aguas residuales a gran escala, que se puede cambiar de tamaño o reubicar en función de la demanda futura. Se construyó un piloto de planta de tratamiento a partir de módulos de concreto que pueden transportarse por la carretera. Con respecto a los costos, la evaluación de una planta de demostración mostró los beneficios esperados ya durante la construcción inicial, debido a la reducción significativa en el tiempo de construcción. La

propiedad inherente de la flexibilidad en el dimensionamiento en una etapa posterior aún no se ha probado (WBL 2012).

El diseño de estructuras de concreto debe cumplir con los estándares establecidos, como las normas y regulaciones, que han sido desarrollados para los métodos y materiales de construcción tradicionales. Para los nuevos materiales ciertas normas están en desarrollo. En el caso del uso de soluciones innovadoras que no están suficientemente cubiertas por los modelos existentes, la Norma Europea (NEN-EN 1990:2002) ofrece la posibilidad de diseñar con la asistencia de pruebas. Para facilitar la toma de decisiones para una gran empresa constructora que construía un puente de concreto 3D y un contenedor de agua usando concreto autocurativo, Kleiss (2017) propuso un protocolo basado en el diseño asistido por pruebas, el cual se presenta en el diagrama de flujo en la Figura 2.



Leyenda: ● entrada  
○ salida

A cada paso: - Conocido  
- Utilizable  
- Confiable

DP = diseño preliminar  
DF = diseño final

Puntos de atención: - Dirigido a personas con conocimiento sobre materiales o tecnología, conocimiento sobre el proceso de proyectos y conocimiento de innovación y su aplicación.  
- Comunicación  
- Utilice las regulaciones cuando estén presentes y siempre se aplica el Eurocódigo 0 (NEN-EN 1990) (por ejemplo, casos de carga y factores de seguridad)

Figura 2 Árbol de decisión aplicación innovaciones (Kleiss 2017)

### 3.2 *Concentración de la corriente residual del cemento – Reducir*

Otra estrategia es limitar la producción actual de cemento. El principal flujo de residuos en la producción de cemento es el CO<sub>2</sub>, liberado durante el proceso para llegar desde la piedra caliza y la arcilla al clínker (cemento Portland ordinario). El 80% de la emisión de CO<sub>2</sub> ocurre durante la etapa de calcinación, en la que el carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) se transforma en óxido de calcio (CaO). Sólo el 20% del 80% se debe al uso de combustible de calcinador. Como más del 60% de la liberación de CO<sub>2</sub> de la producción de cemento se debe a la reacción química que se produce, la prevención de esta liberación no es posible. Sin embargo, los ajustes en el proceso de fabricación de cemento pueden permitir la extracción de ese CO<sub>2</sub> como químicamente suficientemente puro para almacenarse y servir a otras industrias (Dean et al. 2011). El cambio propuesto se basa en la separación de la descarbonización de piedra caliza y la mezcla con arcilla. A un costo estimado de 19 USD por tonelada de CO<sub>2</sub>, esto es significativamente más bajo que las medidas alternativas actuales para concentrar los flujos de residuos en 50 USD por tonelada de CO<sub>2</sub> (Dean et al. 2011, Brinckerhoff 2011). En 2011, el precio de mercado del CO<sub>2</sub> fue de alrededor de 15 USD por tonelada (Brinckerhoff 2011), lo que casi compensaría el costo de producción. En caso de que se aplique una penalización a las emisiones de carbono, aumentarán los beneficios de la incorporación directa del dióxido de carbono producido.

En 2011, el tamaño del mercado de CO<sub>2</sub> se estimó en al menos 80 millones de toneladas por año, con el uso principal en la recuperación mejorada de petróleo (Enhanced Oil Recovery, EOR) y en la industria de alimentos y bebidas, para lo cual se requiere una pureza de 95 y > 99,8%, respectivamente. Se espera que la demanda global aumente a 0,14 mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, al menos 0,5 mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub> concentrado pueden estar disponibles, sin tomar en cuenta la disponibilidad potencial de CO<sub>2</sub> que puede llegar a los 20 mil millones de toneladas, incluyendo la producción de cemento. Por lo tanto, el potencial para la comercialización de CO<sub>2</sub> puede sólo existir en aplicaciones locales, implementando directamente el flujo residual.

El CO<sub>2</sub> producido en el proceso de cemento también puede usarse para la producción de nuevos materiales de construcción, a fin de mantener los recursos dentro del ciclo de la construcción. Las investigaciones actuales se centran en obtener carbonatos o silicatos, que sirvan como almacenamiento permanente. Esto también puede servir como un aglutinante, como en los ladrillos de arena y cal. Este material consiste hasta en un 95% de arena, parte de la cual se unirá a la reacción (NIST 1917). Con el fin de formar el aglutinante, el material que se requiere aparte del CO<sub>2</sub> también se podría originar a partir de una corriente de residuos dentro del ciclo de construcción. Esto podría ser, por ejemplo, escoria de la producción de acero (Huijgen et al. 2005). Para la producción se requerirán la disponibilidad de materiales de construcción y procesamientos adicionales, por lo tanto, se deben evaluar los potenciales beneficios.

### 3.3 *Sustitución del cemento por productos secundarios – Reducir, reutilizar*

La producción mundial de cemento fue de 4,2 mil millones de toneladas en 2014, con una capacidad combinada de producir hasta 5,7 mil millones de toneladas (CENNET 2013). Este número se relaciona con la cantidad de clínker producido, el ingrediente base del cemento. Sin embargo, es posible usar subproductos residuales de la industria que son reactivos en un ambiente alcalino para reemplazar parte del clínker en el cemento, conocido como materiales cementosos suplementarios (Supplementary Cementitious

Materials, SCM). Actualmente, los reemplazos bien conocidos de clínker se encuentran en forma de escoria de la producción de acero, cenizas volantes de la producción de electricidad a base de carbón y cenizas de cáscara de la producción de arroz (Zhang y Malhotra 1996). Además, se realizan investigaciones para utilizar cenizas de la incineración de residuos municipales (Lam et al. 2010). El análisis del potencial actual de reemplazo de cemento se basó en la disponibilidad total de cenizas o materias primas para generar tales cenizas. En el caso de cenizas de incineración de residuos municipales, la estimación se basó en la producción global de residuos urbanos y el potencial de producción de cenizas en caso de incineración total. Normalmente, queda un 25% de cenizas después de la incineración, de las cuales alrededor del 90% son cenizas de fondo (Tchobanoglous y Kreith 2002). Combinado con la producción mundial anual de 1,3 mil millones de toneladas de residuos municipales (Banco Mundial 2012), el potencial anual de cenizas que se obtendría es de 0,4 mil millones de toneladas. En total, se indicó un potencial global máximo de reemplazo en torno al 40% del clínker (Tabla 1).

Por lo general, las regulaciones para la industria del cemento ya cubren una sustitución del clínker del 40%, tal como para CEM II / B-S y V (NEN-EN 197-1:2011). Las cenizas y escorias deben cumplir con ciertos criterios para poder incorporarse al cemento y, por lo tanto, deben procesarse. Esto puede disminuir el reemplazo de cemento disponible. Además, la tendencia general para la sustentabilidad es que hay menos combustión con carbón, menos producción de acero y menos producción de residuos municipales con un alto índice de reutilización. Esto debería disminuir la cantidad esperada de ceniza y escoria en el futuro.

Como los SCM se obtienen como residuos del proceso de otros productos, generalmente se consideran una opción rentable y beneficiosa para el medio ambiente. La escoria, por ejemplo, se vende a un precio de 20 USD por tonelada, mientras que el cemento tiene un precio de 100 USD por tonelada (USGS 2018). El impacto ambiental de los residuos está relacionado con el procesamiento y transporte adicionales necesarios para permitir el uso en el concreto. Típicamente, el análisis del impacto excluye la producción, ya que esto se cuenta en el impacto del producto principal del proceso, como el acero en el caso de la escoria o energía en el caso de la incineración de residuos municipales. Esto hace que la sustitución del clínker sea un enfoque interesante para limitar el impacto ambiental del cemento. Para un análisis del 20% de la sustitución de cenizas volantes y de vidrio, por ejemplo, se encontró una reducción del 16-17% de la energía y la emisión de CO<sub>2</sub> (Hossain et al. 2017). Sin embargo, se debe tener cuidado en el análisis ambiental. Cuando el producto principal del proceso se convierte en SCM, por ejemplo, debido a la gran dependencia de la disponibilidad del SCM, la producción debe tenerse en cuenta al determinar el impacto ambiental del cemento que contiene el reemplazo del clínker. En este último caso, el impacto ambiental de la producción se podría despreciar para el subproducto residual en la producción del SCM. En el caso de la combustión de carbón, por ejemplo, la producción de cenizas volantes conduce a un impacto ambiental total, mientras que el subproducto residual es energía, para lo cual se puede reducir el impacto ambiental.

Tabla 1 Potencial global de varios tipos de SCM para reemplazo de cemento

	Disponibilidad global [miles de millones de toneladas por año]	Reemplazo potencial de cemento	Referencia
Escoria de alto horno (acero y hierro)	0,5	12 %	(USGS 2018)
Ceniza voladora	0,8	19 %	(Heidrich et al. 2013)
Ceniza de cáscara de arroz*	0,06	01 %	(Zhang & Malhotra 1996)
Cenizas de incineración municipal*	0,4	10 %	(Lam et al. 2010)
SCM total	1,8		<i>suma de arriba</i>
Cemento total	4,2		(CENNET 2013)
Reemplazo máximo alcanzable		42%	<i>suma de arriba</i>

\* *Potencial total anual, estimado a partir de la disponibilidad mundial del material de origen*

### 3.3.1 Reemplazo completo de cemento

En la actualidad, la investigación también se centra en la sustitución total del cemento. Normalmente, las escorias, las cenizas o las puzolanas naturales se activan con hidróxido de calcio, un producto de la hidratación del componente clínker en el cemento. Sin embargo, tras la sustitución total del cemento, el material precursor de silicato de aluminio se activa mediante fuentes alternativas de álcalis. Los activadores usados son típicamente soluciones que consisten en hidróxido de sodio y silicato de sodio altamente concentrados. Se debe abordar la disponibilidad local de recursos, como los subproductos industriales que no están aprobados para su uso en concreto o la disponibilidad de subproductos compatibles con clínker en un área sin producción de cemento. Dada la tendencia a la disponibilidad global limitada de subproductos residuales (Tabla 1), se podría dar un geopolímero de metacaolín como un ejemplo típico de un material activado con álcali.

El metacaolín se forma a partir de la calcinación del caolín, que es una puzolana de origen natural. Las reservas mundiales de minas de caolín son grandes. Aunque la producción global anual de la minería de caolín es de alrededor del 1% del cemento (USGS 2018). Actualmente, la minería de caolín cuesta aproximadamente 160 USD por tonelada, excluyendo las obras y el procesamiento adicional al metacaolín. Esto es más caro que el precio al que se vende el cemento, alrededor de 100 USD por tonelada. Sin embargo, la ampliación puede tener un impacto en el precio, al igual que otras fuentes de arcilla alternativas como la fuente de aluminio-silicato.

Así como se libera CO<sub>2</sub> en la producción de cemento, se libera H<sub>2</sub>O (agua) en la producción de metacaolín. La prevención de la liberación de CO<sub>2</sub> durante la producción del precursor de aglutinante es uno de los principales incentivos mencionados para el uso de geopolímeros distintos de los materiales a base de cemento. La diferencia en el costo de metacaolín con cemento puede compensarse en caso de que un precio se fije en emisiones de carbono. Sin embargo, en caso de que el razonamiento ambiental sea el principal incentivo para elegir geopolímeros sobre materiales a base de cemento, se deben realizar análisis de LCA bien desarrollados, ya que los ingredientes del

geopolímero pueden tener un impacto en otras categorías ambientales.

En caso de que deba abordarse un mercado similar como en el cemento, una cantidad significativa de materiales aún se obtiene de la minería y, por lo tanto, causa el agotamiento de la materia prima. Con respecto a la circularidad, la estrategia al final de la vida útil debe evaluarse para permitir que los materiales entren en ciclos de construcción adicionales. Además, aparte del posible efecto sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>, la producción de geopolímeros debe relacionarse con la liberación de componentes asociados con otras categorías de impacto, como las toxicidades. Esto último hace que la mayoría de los materiales activados por álcali en desarrollo no se consideren actualmente como un reemplazo beneficioso para el medio ambiente para los materiales a base de cemento con reemplazos de clínker (Ouellet-Plamondon & Habert 2015), especialmente para aplicaciones de resistencia ordinaria. El concreto activado con álcali generalmente no reduce la emisión de CO<sub>2</sub> eq en más del 25% en comparación con un concreto basado en clínker, incluso teniendo en cuenta el uso casi total de los subproductos residuales. De acuerdo con los estudios de la literatura, el activador alcalino causa un gran impacto en el impacto ambiental. Tras la optimización de estas mezclas, la implementación de métodos de producción alternativos o la creación de un material híbrido con clínker, los geopolímeros pueden ser de interés como reemplazo del cemento desde un punto de vista ambiental.

Dependiendo de la aplicación y la disponibilidad de recursos locales, puede ser de mayor interés económico y ambiental evaluar los beneficios y la aplicabilidad de los geopolímeros y otros materiales activados por álcalis en función de las propiedades de sus materiales inherentes. La aplicación puede estar en cualquier sector. En el caso de la aplicación en la industria de la construcción y en comparación con el concreto a base de cemento, pueden surgir beneficios debido a su resistencia a los ácidos y resistencia a altas temperaturas.

### 3.3.2 Aplicabilidad a México

Se puede hacer un análisis para el posible reemplazo de clínker con SCM a partir de los datos en México. La producción de carbón se estimó en 33,3 millones de toneladas en 2013, de los cuales el 39% se utilizó para la producción de energía (SE 2014). Suponiendo una producción del 30% de cenizas a partir de la combustión de carbón, aproximadamente 4 millones de toneladas de cenizas se producen anualmente. Con respecto a la producción de datos de escoria de 2017, se observó una producción en México de 0,8 millones de toneladas (CANACERO 2017). Dado un consumo anual de cemento en México estimado a 40 millones de toneladas (CANACEM 2016), la industria de la combustión de carbón y del acero podría servir para una sustitución del cemento de alrededor del 10%.

En México, los residuos municipales se estiman diariamente en aproximadamente 0,1 millones de toneladas (SEMARNAT 2017), de los cuales el 80% se dispuso en vertederos. Asumiendo la incineración total de residuos y contando con un contenido no orgánico del 60%, los residuos sólidos tienen el potencial de generar anualmente aproximadamente 5 millones de toneladas de cenizas. Esto podría utilizarse para un 12% adicional de reemplazo potencial de cemento, similar al promedio mundial que se puede obtener (Tabla 1).

Un estudio sobre la composición de los residuos municipales en la Ciudad de México mostró un estimado de 12,5 mil toneladas diarias de producción de residuos con un 13%

de cenizas potenciales (Durán Moreno et al. 2013). Suponiendo que el consumo federal promedio de cemento de 325 kg por habitante (CANACEM 2016) y, por lo tanto, 3 millones de toneladas de cemento consumido en la Ciudad de México, se podría obtener un reemplazo local de clínker del 20% tras la incineración total. Sin embargo, se inician incentivos para aumentar el reciclaje en la Ciudad de México (C40 2016). En caso de restar la fracción de materiales que pueden ser reciclados o que requieren un procesamiento específico, queda el 5% de la masa. Tras la incineración, este último puede llevar a una producción potencial de cenizas de 6 mil toneladas en la Ciudad de México anualmente. Esto lleva a un potencial reemplazo de cemento de 0,2%. Puede ser interesante estudiar el uso alternativo de materiales cementosos suplementarios para los cuales se dispone de una cantidad significativa, como las puzolanas de ceniza volcánica y el (meta) caolín. Sin embargo, esto último requeriría la minería, plantas de producción de SCM dedicadas en los sitios de recolección, procesamiento y transporte apropiados, con el impacto correspondiente.

Respecto al caolín (meta), en México un ejemplo de reserva de caolín se encuentra en San Luis Potosí y mide 260 x 14 km (Vásquez et al. 2009). En 2017, la producción en México fue de aproximadamente 320 mil toneladas métricas de caolín (USGS 2018). Actualmente el caolín se utiliza principalmente en la industria del papel y la cerámica. Se espera un interés adicional por su uso en materiales de construcción, como una forma activada de metacaolín. El metacaolín se puede activar mediante carbonato de sodio o sus productos procesados (por ejemplo, hidróxido de sodio y silicato de sodio con cuarzo), con un precio de alrededor de 150 USD por tonelada. Grandes depósitos de sesquicarbonato de sodio están presentes en México, sumando un potencial disponible de 0,2 billones de toneladas de carbonato de sodio (USGS 2013). Suponiendo una necesidad de 10% de carbonato de sodio para formar el aglomerante como en la investigación publicada, esto lleva a un potencial para reaccionar a un total de 2 mil millones de toneladas de polvo precursor. En caso de que esto tuviera que cubrir el consumo total para producir cemento (40 millones de toneladas anuales), este uso puede agotar el recurso en aproximadamente 50 años.

### *3.4 Mejorar la resistencia estructural al deterioro – Reparar, renovar*

Debido a su larga vida útil, la infraestructura de concreto regularmente requiere mantenimiento y reparaciones, lo que causa interrupciones y pérdidas de ingresos. Normalmente, el 30-50% del presupuesto anual del gobierno inglés se utiliza en reparaciones y mantenimiento (UK 2018, Tilly & Jacobs 2007). De las reparaciones, alrededor del 20% fallan dentro de 5 años y el 55% dentro de 10 años, lo que indica una vida útil limitada para las reparaciones y la expectativa de volver a aplicar una reparación necesaria en el mismo lugar (Visser & van Zon 2012). Especialmente en el caso de recurrencia frecuente de la misma reparación, por ejemplo, en el caso de grietas con fugas activas y altos costos para una estructura fuera de servicio, las innovaciones podrían tener su primera aplicación, como la autorreparación (Gardner et al. 2018) .

Otro ejemplo en el que pueden servir los materiales de reparación alternativos es en los sistemas de drenaje de agua, donde se pueden obtener beneficios cuando se agrega resistencia a los ácidos en la construcción existente. Debido a su naturaleza alcalina, el concreto a base de clínker es intrínsecamente susceptible de deteriorarse al entrar en contacto con ácidos, aunque el final de la vida útil puede retrasarse por la densificación de la matriz cementosa y el uso de cementos alternativos. Uno de los campos en los que el ataque con ácido representa un gran desafío y una gran carga es el transporte de aguas

residuales, donde la formación de ácido bacteriano puede causar graves daños (Wu et al. 2018). La prevención de las reparaciones es beneficiosa ya que el sistema puede continuar funcionando. La aplicación de materiales alternativos en forma de materiales activados por álcali pueden ofrecer una alternativa a este problema (Drugă et al. 2018). Los materiales activados alcalinos son conocidos por su resistencia a los ácidos. Además, se puede lograr un balance efectivo rápido, limitando el tiempo de inactividad del sistema.

Con respecto a la aplicabilidad, los materiales activados por álcali se consideran una alternativa al concreto, para lo cual el cemento es reemplazado por precursores alternativos y el agua por un activador alcalino. A diferencia del cemento con reemplazos de hasta el 95% (CEM III/C, NEN-EN 197-1:2011), la normalización de materiales activados por álcalis se encuentra en desarrollo (Provis 2017). La adaptación de los estándares puede ser menos desafiante para el uso de mezclas híbridas que combinan materiales activados con álcali y cemento. Además, se debe tener cuidado al procesar el material, debido al uso de soluciones alcalinas corrosivas. Por lo tanto, los materiales activados por álcali pueden ser de mayor interés para la producción controlada de elementos prefabricados. Alternativamente, se están desarrollando materiales activados por álcalis de un componente, a los que se debe agregar agua, que puede ser más apropiado para el uso in-situ.

### 3.5 Minería urbana – Remanufacturar, reutilizar, reciclar y recuperar

El potencial para la “minería urbana” de los residuos de construcción y demolición se puede basar en un ejemplo con datos de los Países Bajos. En 1999, los residuos de construcción y demolición en los Países Bajos sumaron un total de 18 millones de toneladas, de las cuales más del 90% se reutilizaron (VROM 2001), más que el 70% requerido por la legislación europea (EU 2008). Esta alta proporción de aplicación de material residual fue causada por una serie de incentivos. A partir de 1993, se estableció una nueva legislación para mejorar la reutilización de los residuos de construcción y demolición, principalmente fomentando la separación de residuos desde el origen, incrementando las posibilidades de aplicación, incluyendo la carga financiera del relleno del suelo y prohibiendo el vertido de material reciclable. Sin embargo, actualmente la reutilización de los residuos de la construcción y la demolición se encuentra principalmente como sustrato para la infraestructura vial, que se considera downcycling. El uso de concreto residual triturado como agregado también puede inhibir la aplicación del grado más alto que se pueda obtener y no reduce significativamente la carga ambiental (Kleijer et al. 2017). Por lo tanto, se están analizando aplicaciones alternativas, como la recuperación de cemento y otros componentes individuales a partir de residuos de concreto (UL & TU Delft 2015). En este último sistema, el cemento se separa de la grava y la arena debido a la fuerza que se aplica para la rotura. El polvo de piedra de cemento que queda se puede dividir en cemento no-reaccionado y reaccionado debido a una diferencia de densidad.

Con el concreto representa el 40% de los residuos de construcción y demolición (VROM 2001), y un contenido típico de cemento de 325 kg por 2400 kg de concreto (C&CB 2014), en los Países Bajos anualmente se tendría disponible una cantidad aproximada de 975 mil toneladas de cemento en los residuos de construcción y demolición. Junto con el agua, este cemento formó el aglomerante de cemento. Teniendo en cuenta una proporción típica de agua a cemento de 0,5, se obtendría un total de aproximadamente 1,5 millones de toneladas de pasta de cemento hidratada anualmente a partir de los residuos de construcción y demolición. La recuperación de la pasta de cemento hidratada del concreto

de la construcción y la demolición podría funcionar como un material de cemento suplementario (SCM) y reemplazar el 30% del consumo anual de cemento en los Países Bajos, que es de aproximadamente 5 millones de toneladas (C&CB 2018). Al recuperar la fracción de cemento en sí, sin el agua incluida, el reemplazo esperado del consumo de cemento actual sería de hasta el 20%. Un tema de investigación es recuperar la funcionalidad como cemento virgen a partir de cemento hidratado en residuos de construcción y demolición.

Una de las formas de obtener cemento virgen a partir de residuos de construcción y demolición es recuperar la fracción de cemento sin reaccionar. Alternativamente, se pueden recuperar los diversos productos de hidratación de la reacción del cemento con agua, como el hidróxido de calcio (CH) y el hidrato de silicato de calcio (CSH). Cuanto menor sea la relación de agua a cemento (w/c) en el concreto, se espera que permanezca más cemento sin reaccionar (Cook & Hover 1999). Taylor (2010) mostró que para el concreto de clinker de 20 años con un w/c de 0,4, se formó un 28% de hidróxido de calcio (CH) y se mantuvo un 4% de clinker sin reaccionar (cemento Portland). En el caso de México, dado que la mayoría del concreto se produce con un mayor w/c (CEMEX 2018), también se espera que la cantidad de clinker no hidratado que se puede recolectar de los residuos de la construcción con concreto sea baja, pero podría determinarse en la construcción y residuos de demolición para evaluar el potencial de recuperación. Se espera que el CH exista en cantidades similares al 28% encontrado por Taylor (2010), ya que se espera que el grado de hidratación sea máximo para un w/c de 0,4 y no aumente con un w/c más alto. El CH recuperado ("cal apagada") podría servir a mercados alternativos o usarse en la construcción, por ejemplo como activador alcalino, como óxido de calcio ("cal viva") por conversión térmica o convertido en piedra caliza por reacción con CO<sub>2</sub>. La proporción restante de la pasta de cemento hidratada, que constituye el componente principal, es el hidrato de silicato de calcio (CSH). Investigaciones muestran la degradación térmica de la CSH en silicatos de calcio, entre los cuales se encuentran los compuestos utilizados en el cemento, como el silicato de alfa-L-dicalcium (belite, Rodriguez et al. 2017). Será interesante seguir el avance del CSH como insumo para la remanufactura de componentes cementosos o para usos alternativos.

Además de la recuperación de los ingredientes originales de los residuos de concreto, es interesante que también se puedan obtener otras materias primas utilizadas para la fabricación, como los agregados (arena y grava). Aunque el cemento es visto como el ingrediente más valioso y costoso del concreto, la arena para usarse como agregado para el sector de la construcción también es cada vez más escasa a nivel mundial (UNEP 2014).

Se debe tener en cuenta que para obtener residuos de demolición de alta calidad, las construcciones deben desmantelarse por completo, para evitar la heterogeneidad en los residuos, lo que dificulta su reutilización. Se pueden presentar algunos desafíos, ya que originalmente las construcciones de concreto no se construyeron teniendo en cuenta la recuperación de sus componentes en los residuos y al final de su vida. Uno de los desafíos es que las construcciones no suelen construirse de manera modular, mientras que la recuperación de módulos completos para su reutilización podría ser lo más óptimo (ABN AMRO 2014). Además, la composición del material puede ser no conocida, lo que afecta el procesamiento y su posible contribución al mercado de concreto. Con el fin de facilitar la recuperación de los componentes de los residuos de construcción y demolición, se debe motivar la disponibilidad de información detallada sobre los materiales utilizados en la construcción y la forma de recuperarlos, por ejemplo, a través de un pasaporte de material que incluya información sobre cómo reutilizarse y reciclarse. La reutilización de

elementos y materiales requiere de proveedurías integradas y de la colaboración múltiple disciplinaria, lo que puede fomentarse con la creciente implementación del Modelado de Información de Construcción (Building Information Modelling, BIM) en la industria de la construcción.

## **4. Discusión y recomendación**

### *4.1 Factores habilitantes*

Los grandes trabajos de construcción son generalmente aprobados a través de un proceso de licitación. Tradicionalmente, esto se basa en la selección del proyecto más rentable. Normalmente, el costo económico es más alto para proyectos que disminuyen el impacto o aumentan la circularidad, especialmente cuando se consideran nuevos métodos o productos. Sin embargo, los proyectos sustentables ya se pueden motivar teniendo en cuenta más categorías en el proceso de licitación. Por ejemplo, los costos durante el ciclo de vida del proyecto pueden ser solicitados (Life Cycle Costing, LCC), incluidos los costos durante la fase de diseño, construcción, financiamiento, mantenimiento, operación y final de vida. Con una vida útil general de una estructura civil de 50 a 100 años, esto requerirá una planificación a largo plazo. También puede solicitarse la evaluación del costo total de propiedad (Total Cost of Ownership, TCO), por ejemplo, para una infraestructura de propiedad del gobierno. Los impactos ambientales y sociales pueden generar una carga económica asignada a sus indicadores, como el costo del CO<sub>2</sub> equivalente o el relleno sanitario, de modo que los costos totales y sus subdivisiones se puedan comparar entre proyectos en el proceso de licitación (CE 2018).

El precio en general será un tema interesante cuando se avance hacia una economía circular, centrándose más en lo que valen los productos o servicios. Especialmente cuando las mismas materias primas pueden servir en múltiples campos de aplicación, de los cuales algunos pueden tener prioridad sobre otros. Es posible que existan modelos de negocios alternativos para mejorar la sustentabilidad e ir hacia una economía circular, por ejemplo, mediante contratos de arrendamiento o servicios a largo plazo (ABN AMRO 2014).

Debido a una interacción compleja en la industria de la construcción y la importancia de la seguridad estructural, los riesgos deben ser mitigados. La industria de la construcción se basa en gran medida en las regulaciones, por ejemplo, en las certificaciones y normas. Muchas de las regulaciones se basan en los productos y métodos existentes. Sin embargo, muchos de los enfoques para limitar el impacto y mejorar la circularidad en la construcción son relativamente nuevos y no están incluidos en las categorías de las regulaciones actuales. Para motivar a la industria de la construcción a que implemente estrategias y productos innovadores para sus trabajos, se puede recomendar establecer un árbol de decisiones bajo el cual se pueda aprobar un proyecto (Figura 2).

### *4.2 Discusión general*

Una de las necesidades identificadas para permitir el desarrollo sustentable es reducir el consumo actual y optimizar el uso de los recursos, conduciendo preferiblemente a un ciclo local con un impacto neto nulo o reductor. Para la toma de decisiones, es crucial identificar las necesidades para asegurar la calidad de vida de las generaciones futuras. Las prioridades para la circularidad deben dirigirse hacia una disponibilidad local sostenida de necesidades básicas y seguras, como agua, aire, comida y refugio. Además,

el sistema previsto debe ser resiliente en caso de sucesos no planeados, como sequías, inundaciones o terremotos. Para esto, se requiere un análisis del estado actual del sistema local completo y la disponibilidad de factores habilitadores, teniendo en cuenta la cultura, los recursos, las políticas y las tecnologías (en el futuro cercano).

En el caso de entornos altamente urbanizados, donde existe una disponibilidad limitada de la naturaleza para equilibrar el impacto humano, se requiere el uso multifuncional de la tierra. La integración de las funciones del ecosistema en el entorno urbano juega un papel esencial. De ser posible, el diseño debe estar orientado a deshacer el daño hecho. Además, debido a la disponibilidad limitada de recursos locales y la alta demanda, se recomienda poner énfasis en la circularidad.

En general, se recomienda un enfoque circular, y por lo tanto la independencia local, para el suministro de las necesidades básicas. Preferiblemente, incluyendo los servicios básicos como gestión de residuos, movilidad y energía. Como mínimo, las categorías de sustentabilidad cuantificables deben incluirse en la licitación como un criterio de selección.

A nivel global, la reducción principal del impacto del concreto puede obtenerse de la reducción de su uso en la construcción. El potencial actual para el reemplazo del cemento podría ser de hasta un 40% de los residuos de otras industrias luego de la utilización completa y un 30% adicional a partir del cemento hidratado recuperado de la minería de los residuos de construcción y demolición. Sin embargo, en caso de una mayor reutilización de residuos, se espera que estos porcentajes disminuyan. Para el resto de la producción de cemento, el proceso puede ajustarse para producir CO<sub>2</sub> puro, que se puede usar en otras industrias, por ejemplo, para generar materiales de construcción alternativos, como los ladrillos de cal y arena basados en subproductos industriales. Usar los ladrillos como materiales similares a “Lego” puede permitir la reutilización de los elementos al final de su vida útil. Se pueden encontrar estrategias alternativas, por ejemplo, en la carbonatación de silicatos naturales de calcio o magnesio o la activación alcalina de aluminosilicatos. El activador podría provenir del hidróxido de calcio obtenido de la minería urbana de la fracción hidratada del cemento Portland. Debido a los potenciales impactos de la minería a gran escala, los pasos de procesamiento adicional requerido y la dificultad para el reciclaje, se debe evaluar la disponibilidad y el impacto del material. La disponibilidad local de recursos puede determinar la elección de estrategias específicas o usos alternativos del material. Los materiales de construcción que se consideran subproductos de otras industrias también pueden tener otras aplicaciones, para las cuales se debe evaluar el uso más beneficioso. El monitoreo continuo y la evaluación de las alternativas y necesidades disponibles deben convertirse en estándares.

Al intentar alcanzar el impacto cero y la circularidad, se espera que ocurran muchas interacciones dentro del sector de la construcción y con otros campos de aplicación. Parece necesario generar simbiosis y no competencia interna. Es importante tener en cuenta el impacto total (económico, ambiental y social) en el ciclo de vida y la contribución a la circularidad.

### *4.3 Aplicabilidad a México*

A diferencia de algunos otros países, existe una alta disponibilidad de recursos naturales en México, lo que permite el suministro estable de las necesidades básicas. Sin embargo, los recursos deben ser gestionados. Una de ellas es el agua limpia (CONAGUA 2010). Especialmente en la Ciudad de México existe una exportación neta de agua, mientras que depende de las importaciones de agua desde fuera de los límites de la ciudad. Además, la

ciudad aborda simultáneamente la escasez de agua y los problemas de inundación (De Urbanisten & Deltares 2016). Especialmente en entornos urbanos, las estrategias de gestión del agua pueden integrarse en las construcciones. Además, la gestión del agua ("blue management") se puede combinar con las áreas urbanas verdes funcionales, para reducir el calor y aumentar la calidad del aire (Zupancic et al. 2015). Según las estadísticas (PAOT 2010), la Ciudad de México contiene un promedio de 10 m<sup>2</sup> de espacio verde por habitante. Sin embargo, la distribución en toda la ciudad es heterogénea, con más de un tercio de las delegaciones contando con 3-6 m<sup>2</sup> de espacio verde por habitante. Para la integración de los servicios de los ecosistemas en el entorno urbano, se necesita la integración permanente y continua de la vegetación (Stache et al. 2019). La gestión combinada de verde y azul ("green management" y "blue management") puede estar entre los puntos críticos a tener en cuenta en la toma de decisiones en el diseño urbano.

Normalmente, el espacio es limitado en grandes metrópolis, lo que reduce las opciones o las medidas a gran escala. Sin embargo, en el caso de la Ciudad de México, en un futuro próximo pueden estar disponibles dos áreas de tierra, que representan más del 0,5% del área de la ciudad. Además, las áreas están ubicadas en dos lados opuestos de la ciudad. Uno es un antiguo terreno militar en el oeste de la ciudad, cerca de Chapultepec, el otro es la superficie del actual aeropuerto internacional en el este de la ciudad. Dada la zona altamente urbanizada y los desafíos generales en el suministro de necesidades básicas, como un suministro constante de agua limpia, parece de importancia analizar críticamente el re-destino de las dos parcelas de tierra en la Ciudad de México. Cualquier alternativa propuesta debe cuantificarse preferiblemente para el efecto en la ciudad, no solo combinando el impacto económico y ambiental, sino también con respecto a los indicadores sociales y la circularidad. Con el nuevo destino, las necesidades locales deben ser atendidas, tanto en la situación actual como en el futuro previsto. Con respecto a la exploración de posibilidades, con relación a la gestión del agua en estas dos áreas, se puede recomendar inspirarse en el informe sobre las diversas áreas de la Ciudad de México por De Urbanisten & Deltares (2016), con opciones para combinar con las áreas verdes urbanas. La inclusión de consorcios del sector privado para presentar ideas puede ser posible mediante la solicitud proactiva de propuestas siguiendo el procedimiento para "propuestas no solicitadas" (Deloitte 2017), por lo que la idea en caso de ser adoptada, puede recibir un premio como una asignación de gastos de desarrollo, pero no necesariamente gana la licitación.

La inclusión de más factores, adicionales al precio económico, en la determinación de la idoneidad de los proyectos se encuentra disponible en México. La ley ambiental de protección de la tierra en la Ciudad de México, por ejemplo, requiere obtener una autorización con respecto al impacto ambiental previsto y las medidas para su limitación y compensación durante las etapas de la construcción (LAPTFD 2017). Sin embargo, tener en cuenta la sustentabilidad al presentar los planes del proyecto en el proceso de licitación puede permitir la inclusión del impacto ambiental en la toma de decisiones, por ejemplo, mediante la monetización. Además, esto permitiría que las autorizaciones se preparen por adelantado, para evitar poner en espera un proyecto en ejecución. Se podrían incluir numerosas normas existentes, por ejemplo, para prevenir la liberación de polvo fino o indicar una liberación máxima de gases, humo y ruido.

Además, se iniciaron múltiples iniciativas voluntarias para incluir la sustentabilidad en las prácticas de construcción (NMX-AA-164-SCFI-2013), que también incluyen la responsabilidad social. Ofrecer beneficios por la implementación de buenas prácticas puede estimular la ejecución de iniciativas voluntarias sustentables.

Con respecto a los residuos de construcción, cada proyecto debe tener un plan de manejo de residuos, exigido por la ley de residuos sólidos de la Ciudad de México (LRSDF 2017), la norma federal NOM-161-SEMARNAT-2011 y la norma local NADF-007-RNAT-2013. La intención es optimizar el reciclaje local de materiales, minimizando la formación total de residuos, la separación del resto en la fuente y la deposición en las áreas designadas. El concreto, por ejemplo, debe depositarse preferiblemente en una planta de reciclaje de concreto. Se exige el depósito adecuado de los residuos de la construcción en las áreas designadas, con sanciones oficialmente establecidas al no cumplir con este requisito. Para utilizar los diversos residuos, se debe crear un mercado. Actualmente existen iniciativas en la Ciudad de México para crear valor a partir de desechos municipales y utilizarlos en el comercio (C40 2016), cuyas lecciones aprendidas podrían ampliarse a la industria de la construcción.

Dadas las detalladas secciones administrativas requeridas por las regulaciones mencionadas, una gran base de datos debería estar disponible para su análisis. Los datos sobre la disponibilidad y la composición de los residuos de concreto, por ejemplo, pueden indicar la capacidad para la minería urbana de cemento y otros componentes del concreto, como la grava. El análisis de los datos registrados sobre los efectos ambientales puede indicar el impacto total generado por la construcción por categoría e identificar la causa principal.

También se espera que esté disponible información detallada sobre la presencia de materiales en las construcciones, debido a la naturaleza definida del proyecto en el proceso de licitación (p.ej. NAICM 2017). Esta información puede servir directamente para la asignación de pasaportes de materiales para proyectos específicos. Agregar recomendaciones para la deconstrucción o la demolición al final de la vida puede ayudar a su uso futuro en una economía circular. Además, un paso para alcanzar una economía circular se encuentra en fomentar la prestación de servicios, un sector que en México cubre aproximadamente el 61% del empleo (INEGI 2018).

Sin embargo, la promoción de industrias sustentables y circulares generalmente requiere una perspectiva a largo plazo. La falta general de planificación a largo plazo en México fue vista como uno de los principales desafíos para el desarrollo de infraestructura (CMIC 2013). Los presupuestos gubernamentales para infraestructura parecen funcionar con un plan operativo anual (POA), asignado anualmente con un requisito de gasto, que puede limitar la acumulación de reservas para financiar la construcción durante un período de tiempo más prolongado. Por lo tanto, esto limita las estrategias que requieren mayores inversiones gubernamentales para generar beneficios a largo plazo. También para el desarrollo de una industria sustentable, se necesitan perspectivas a largo plazo con una planificación inicial durante el ciclo de vida de los proyectos (Gemeente Amsterdam 2016).

Para el entorno actual, la provisión de alternativas sustentables a las soluciones actuales puede ser posible, por ejemplo, con materiales de reparación. El enfoque en el mantenimiento para prolongar la vida útil de la infraestructura existente generalmente sirve para reducir el uso de materias primas (Dittrich et al. 2012). El objetivo inicial podría ser proporcionar alternativas sustentables para las reparaciones necesarias en la infraestructura regulada por el gobierno. En caso de que las reparaciones tradicionales muestren típicamente una vida útil corta, la alternativa sustentable puede demostrar su valor y beneficios económicos dentro de un período de gobierno. Especialmente para la Ciudad de México, dada la ubicación de la ciudad en un antiguo lago, problemas con fugas en la red de distribución de agua y el suelo saturado e inundaciones durante la temporada de lluvias, la aplicación podría orientarse a problemas típicos observados en la infraestructura en contacto con agua, por ejemplo, para incrementar la resistencia del

drenaje contra el ácido o mejorar las reparaciones de sitios con fugas activas (Gardner et al. 2018).

#### 4.4 Recomendación

Para analizar el potencial de las políticas y tecnologías actuales y futuras que buscan reducir el impacto general de la construcción, es importante hacer un mapa del estado actual e indicar los posibles campos interrelacionados. Por ejemplo, conectando diagramas de Sankey específicos del sector sobre emisiones de CO<sub>2</sub>, uso de materiales y flujos de residuos. Los mapas de la Ciudad de México se pueden comparar con el nivel federal y global. Se pueden asignar prioridades a la implementación de políticas o tecnologías, iniciando con estrategias que pueden alcanzar la mayoría de los beneficios con la menor cantidad de acciones requeridas. La primera implementación puede ser en proyectos gubernamentales, para generar ejemplos y adquirir experiencia para otros proyectos necesarios.

El mapeo de los flujos de los impactos de la industria de la construcción y el concreto puede indicar impactos evitables y estrategias para el desarrollo de políticas y tecnologías. Se recomienda consultar Cullen & Allwood (2010) para ver un ejemplo en el sector energético.

El mapeo del flujo de la materia prima, energía y residuos en el sector de la construcción también permite indicar los beneficios esperados al incluir la circularidad en las diversas fases de la vida de la infraestructura y así como para los actores involucrados. Se recomienda consultar ABN AMRO (2014) para ver un ejemplo del sector de la construcción en los Países Bajos.

El mapeo del flujo económico directo e indirecto en la construcción en las distintas etapas puede indicar los costos evitables, la vida útil durante la cual se esperan los beneficios, las prioridades para la reducción de costos y las oportunidades para la creación de valor. Además, los mapas sobre el impacto y el uso de los recursos podrían monetizarse, para indicar precios desbalanceados o los valores no utilizados.

Modelar y cuantificar el impacto de los cambios en las políticas y tecnologías existentes y planeadas en los mapas de impacto, materiales y económicos puede ayudar a identificar las acciones que tienen más prioridad. La evaluación y el análisis de otras políticas internacionales pueden ayudar localmente cuando todavía no existe una política nacional. Además, se pueden indicar los efectos en conflicto entre las políticas y la formación de efectos secundarios inesperados, como la reducción del impacto en la escala del material y el aumento del impacto en la escala del ciclo.

Las entradas en la base de datos actualmente disponible de los procesos administrativos en la Ciudad de México sobre el impacto ambiental o la gestión de residuos también pueden ser útiles en la evaluación. El análisis de los datos existentes puede indicar los principales aspectos que necesitan prioridad y las posibilidades para el uso efectivo de los residuos. Por ejemplo, se espera que la información detallada de los materiales esté disponible para grandes construcciones, dados los requisitos detallados establecidos en los procesos de licitación. Con la descripción general de los materiales incorporados actualmente en las construcciones y el tiempo de vida restante esperado, se puede mapear la minería urbana, lo que permite investigar y planear el futuro reciclaje de la

infraestructura actual. En combinación con las construcciones planeadas, se puede determinar la oferta y demanda local de materiales. Además, incentivos adicionales pueden ayudar el desarrollo hacia un uso circular de los materiales. Por ejemplo, al vincular la descripción detallada del material disponible en el proceso de licitación, como un pasaporte de material, al proyecto construido, que indique las recomendaciones de tratamiento al final de su vida útil.

Además, se recomienda la cuantificación, medición y reevaluación de los mapas, las posibilidades y los beneficios esperados al considerar las tecnologías y políticas planteadas.

A través de proyectos de demostración con participación de organismos públicos y privados se puede obtener experiencia, por ejemplo, con procesos de licitación alternativos que seleccionan el costo mínimo, calculado a lo largo de la vida del proyecto, incorporando los impactos como un valor monetizado. La implementación de lecciones aprendidas en ensayos sucesivos permite el desarrollo gradual de políticas.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo fue producido voluntariamente dentro de un proyecto de mentoría gestionado por la iniciativa de C40 “Mujeres por el Clima CDMX”, en colaboración con la Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). A través de este programa fue posible aprender de muchas personas, entre las cuales se encuentran: Lic. Lilia Haua, Sharon Fastlicht (Fideicomiso Pro Bosque de Chapultepec), Laura Puig y sus colegas (Elementia), Ing. Mauricio Hernández (SACMEX), Lourdes Salinas (Three), Ing. Ruben Lazos (DGRA), Dr. José Campos (UAM), Lic. Ernesto Gutiérrez y sus colegas (AGU), Ing. Alfonso Chávez y Lic. Daniela Mares (CMIC), cuyas contribuciones fueron muy apreciadas. Gracias adicionales a José Norambuena, Jeannette van den Bos, Kari Kleiss y muchos más que tuvieron una influencia inspiradora (in)directa.

## **CONFLICTOS DE INTERÉS**

La autora está afiliada a Delft University of Technology y Green-Basilisk B.V., Delft, Países Bajos. Sin embargo, este trabajo se ha realizado de manera voluntaria y, por lo tanto, no se esperan conflictos de interés. La iniciativa de C40 Mujeres por el Clima CDMX y la Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA) no tuvieron ninguna decisión en el contenido del manuscrito, ni la decisión de publicar los resultados.

## **DESCARGO DE RESPONSABILIDAD**

La información en este informe es proporcionada de manera independiente y voluntaria por la autora y se basa en documentos publicados de terceros. Los puntos de vista expresados en este informe no necesariamente reflejan los de la SEDEMA, C40 o cualquiera de las partes involucradas. El uso de cualquiera de los contenidos es responsabilidad del lector.

## **ABREVIACIONES**

CANACEM = Cámara Nacional del Cemento  
CANACERO = Cámara Nacional de la Industria del Hierro y Acero  
CMIC = Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción  
DMIU = Dirección de Mantenimiento e Infraestructura Urbana  
INECC = Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático  
INEGI = Instituto Nacional de Estadística y Geografía  
PGIRS = Programa de Gestión Integral de los Residuos Sólidos

SEMARNAT = Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales  
SOBSE = Secretaría de Obras y Servicios

## REFERENCIAS

### Sección 1

UK (2010). Low Carbon Construction Innovation & Growth Team. URN 10/1266. Her Majesty's Government. noviembre de 2010. *En inglés*  
[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/31773/10-1266-low-carbon-construction-IGT-final-report.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/31773/10-1266-low-carbon-construction-IGT-final-report.pdf)

BIS (2010). Estimating the Amount of CO2 Emissions that the Construction Industry can Influence. Supporting material for the Low Carbon Construction IGT Report. Department of Business and Innovation. The Government of the United Kingdom. otoño 2010. *En inglés*  
[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/31737/10-1316-estimating-co2-emissions-supporting-low-carbon-igt-report.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/31737/10-1316-estimating-co2-emissions-supporting-low-carbon-igt-report.pdf)

Bijleveld, M. M., Bergsma, G., & Lieshout, M. (2013). Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw: status quo en toetsing van verbeteropties. CE Delft. *En holandés*  
[https://mvonederland.nl/system/files/media/ce\\_delft\\_2828\\_milieu-impact\\_van\\_betongebruik\\_nl\\_bouw\\_def.pdf](https://mvonederland.nl/system/files/media/ce_delft_2828_milieu-impact_van_betongebruik_nl_bouw_def.pdf)

RIVM (2017). Greenhouse Gas Emissions in the Netherlands, 1990-2015, National Inventory Report 2017. RIVM Report 2017-0033. National Institute for Public Health and the Environment, Ministry of Health, Welfare and Sport, The Netherlands. *En inglés*  
<https://www.rivm.nl/dsresource?objectid=c032f2b8-6101-42f3-bc52-82b3239293d8&type=pdf&disposition=inline>

Transitieagenda Bouw (2010). Circulaire bouweconomie. Transitieagenda Circulaire Economie 2018. *En holandés*  
<https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/rapporten/2018/01/15/bijlage-4-transitieagenda-bouw/bijlage-4-transitieagenda-bouw.pdf>

ABN AMRO (2014). Circular construction. The foundation under a renewed sector. Circle Economy for ABN AMRO. Amsterdam. *En inglés*  
Part as report: [https://www.circle-economy.com/wp-content/uploads/2016/06/Circle-Economy\\_2015\\_002\\_Rapport\\_Circulair-Construction\\_1-21.pdf](https://www.circle-economy.com/wp-content/uploads/2016/06/Circle-Economy_2015_002_Rapport_Circulair-Construction_1-21.pdf)

Vásquez, B., & Corrales, S. (2017). Industria del cemento en México: análisis de sus determinantes. Problemas del desarrollo, 48(188), 113-138. *En español*  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301703617300068>  
[http://www.probdes.iiec.unam.mx/numeroenpdf/188\\_V48/05artVasquez.pdf](http://www.probdes.iiec.unam.mx/numeroenpdf/188_V48/05artVasquez.pdf)

Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. (2001). Carbon dioxide emissions from the global cement industry. Annual review of energy and the environment, 26(1), 303-329. *En inglés*  
[https://www.researchgate.net/publication/228756550\\_Carbon\\_Dioxide\\_Emission\\_from\\_the\\_Global\\_Cement\\_Industry](https://www.researchgate.net/publication/228756550_Carbon_Dioxide_Emission_from_the_Global_Cement_Industry)

CMIC (2012). Plan de Manejo de Residuos de la Construcción y la Demolición. CMIC, México. *En español*  
<http://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Flayer/PM%20RCD%20Completo.pdf>

Semarnat (2013). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. Edición 2012. México. *En español*  
[http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_12/pdf/Informe\\_2012.pdf](http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Informe_2012.pdf)

INECC y Semarnat (2015). Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. INECC/Semarnat, México. *En español*  
<https://unfccc.int/resource/docs/natc/mexbur1.pdf>  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/314955/2015\\_bur\\_mexico.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/314955/2015_bur_mexico.pdf)

INECC y SEMARNAT (2012). Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, INECC/Semarnat, México. *En español*  
<http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/CD001322.pdf>  
<https://unfccc.int/resource/docs/natc/mexnc5s.pdf>

INEGI (2013). Estadísticas a propósito de la Industria del cemento, INEGI, México. *En español*  
[http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/estudios/economico/a\\_proposi\\_de/Cemento.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/estudios/economico/a_proposi_de/Cemento.pdf)

Gaceta Oficial del Distrito Federal (2010). Programa de Gestión Integral de los Residuos Sólidos (PGIRS) para el Distrito Federal. México, 13 de septiembre de 2010. *En español*  
<http://cgsservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/3528.pdf>

CENACEM (2018, agosto 07). Cemento Producción y Consumo. *En español*, adquirido de  
<http://canacem.org.mx/cemento/produccion-y-consumo/>

SEDEMA (2015). Inventario de Residuos Sólidos Ciudad de México. México. *En español*.  
<http://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/IRS-2015-14-dic-2016.compressed.pdf>

## Sección 2

UN 1987. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. Brundtland Report. 21 de mayo de 1987. *En inglés*  
<http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>  
[https://en.wikisource.org/wiki/Brundtland\\_Report?linklisted=2812](https://en.wikisource.org/wiki/Brundtland_Report?linklisted=2812)

NEN-ISO 20400 (2017). Sustainable procurement — Guidance. NEN, Delft, The Netherlands. *En inglés*  
<https://www.nen.nl/NEN-Shop-2/Standard/NENISO-204002017-en.htm>

Dittrich, M., Giljum, S., Lutter, S. & Polzin, C. (2012). Green economies around the world? Implications of resource use for development and the environment. Austria: Vienna. *En inglés*  
[https://www.boell.de/sites/default/files/201207\\_green\\_economies\\_around\\_the\\_world.pdf](https://www.boell.de/sites/default/files/201207_green_economies_around_the_world.pdf)

Metabolic (2017). One Planet Approaches, Methodology Mapping and Pathways Forward. abril de 2017. *En inglés*  
<https://www.metabolic.nl/wp-content/uploads/2018/08/One-Planet-Approaches.pdf>

Kubiszewski, I., Costanza, R., Franco, C., Lawn, P., Talberth, J., Jackson, T., & Aylmer, C. (2013). Beyond GDP: Measuring and achieving global genuine progress. *Ecological Economics*, 93, 57-68. *En inglés*  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800913001584>

PRI & UNEP (2011). Universal Ownership, why environmental externalities matter to institutional investors. Principles for Responsible Investment Association and United Nations Environment Programme Finance Initiative. *En inglés*  
[http://www.unepfi.org/fileadmin/documents/universal\\_ownership\\_full.pdf](http://www.unepfi.org/fileadmin/documents/universal_ownership_full.pdf)

Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., ... & Raskin, R. G. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253. *En inglés*  
<https://www.nature.com/articles/387253a0>

UNEP (2014). Global Environmental Alert Service: Sand, rarer than one thinks. Thematic focus: Ecosystem management, Environmental governance, Resource efficiency. United Nations Environment Programme, marzo de 2014. *En inglés*  
[https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8665/GEAS\\_Mar2014\\_Sand\\_Mining.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8665/GEAS_Mar2014_Sand_Mining.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

Dittrich, M., Giljum, S., Lutter, S. & Polzin, C. (2012). Green economies around the world? Implications of resource use for development and the environment. Austria: Vienna. *En inglés*  
[https://www.boell.de/sites/default/files/201207\\_green\\_economies\\_around\\_the\\_world.pdf](https://www.boell.de/sites/default/files/201207_green_economies_around_the_world.pdf)

Circular Economy (2016). A Circular Economy in the Netherlands by 2050, Government-wide Programme for a Circular Economy. Published by The Ministry of Infrastructure and the Environment and the Ministry of Economic Affairs, also on behalf of the Ministry of Foreign Affairs and the Ministry of the Interior and Kingdom Relations. The Netherlands, septiembre de 2016. *En inglés*  
[https://www.government.nl/binaries/government/documents/policy-notes/2016/09/14/a-circular-economy-in-the-netherlands-by-2050/17037+Circulaire+Economie\\_EN.PDF](https://www.government.nl/binaries/government/documents/policy-notes/2016/09/14/a-circular-economy-in-the-netherlands-by-2050/17037+Circulaire+Economie_EN.PDF)

SBK (2017). Grondstoffenefficiëntie, ontwikkelen van een prestatiebepaling op basis van de bepalingsmethode milieuprestatie gebouwen en GWW-werken. End report including field test. SGS Search and LBP|SIGHT commissioned by the Foundation of Construction Quality. The Netherlands, 8 de noviembre de 2017. *En holandés*  
<https://www.milieudatabase.nl/imgcms//Eindrapportage%20implementatie%20grondstoffenefficiency.pdf>

REBus (2017). REBus Construction Lessons report. Developing Resource Efficient Business Models – REBus. LIFE12 ENV/UK/000608. Sustainable Global Resources Ltd, Rijkswaterstaat & PHI Factory for Rijkswaterstaat, Ministry of Infrastructure and Water Management. The Netherlands, 10 de septiembre de 2017. *En inglés*  
<http://www.rebus.eu.com/wp-content/uploads/2017/12/REBus-Construction-Lessons-report.pdf>

Washburn, M. P., & Miller, K. J. (2003). FSC: forest stewardship council certification. *Journal of Forestry*, 101(8), 8. *En inglés*  
<https://academic.oup.com/jof/article/101/8/8/4613104>

Mitsch, W. J., & Jørgensen, S. E. (2003). Ecological engineering: a field whose time has come. *Ecological engineering*, 20(5), 363-377. *En inglés*  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857403000600>

Stache E., Jonkers H., Ottelé M. (2019) Integration of Ecosystem Services in the Structure of the City is Essential for Urban Sustainability. In: Achal V., Mukherjee A. (eds) *Ecological Wisdom Inspired Restoration Engineering. EcoWISE (Innovative Approaches to Socio-Ecological Sustainability)*. Springer, Singapore. *En inglés*  
[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-0149-0\\_8](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-0149-0_8)

EU (2017). Public Procurement for a Circular Economy, Good Practice and Guidance. ENV.B.1/SER/2016/0049. European Commission. *En inglés*  
[http://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/cp\\_european\\_commission\\_brochure\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/cp_european_commission_brochure_en.pdf)  
*En español:* [http://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/cp\\_european\\_commission\\_brochure\\_es.pdf](http://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/cp_european_commission_brochure_es.pdf)

MVO (2018, septiembre 21). Circular Procurement Guide. *En inglés*, adquirido de  
<https://mvonederland.nl/circular-procurement-guide>

CE (2018). Environmental Prices Handbook 2017 Methods and numbers for valuation of environmental impacts. CE Delft, The Netherlands, mayo de 2018. *En inglés*  
<https://www.ce.nl/en/publications/download/2544>

SBRCURnet (2015). Assessment of the Environmental Performance of Constructions and Civil

Engineering Works. Brochure. Commissioned by Ministry of Internal Affairs. The Netherlands, Delft, enero/febrero de 2015. *En inglés*

[https://www.milieudatabase.nl/imgcms/Brochure\\_Assessment\\_Method\\_Environmental\\_Performance\\_TIC\\_versie.pdf](https://www.milieudatabase.nl/imgcms/Brochure_Assessment_Method_Environmental_Performance_TIC_versie.pdf)

BZK (2014). A PEFCR for construction works, benchmarking the environmental performance of construction works and products. SPLNL14366. ECOFYS for the Ministry of the Interior and Kingdom Relations. The Netherlands, 4 de abril de 2014. *En inglés*

<https://www.milieudatabase.nl/imgcms/ecofys-pefcr-140404-def.pdf>

NEN-ISO 14040 (2006). Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. NEN, Delft, The Netherlands. *En inglés*

<https://www.nen.nl/NEN-Shop-2/Standard/NENENISO-140402006-en.htm>

UNEP (2009). Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products. United Nations Environment Programme. Druk in de weer, Belgium. *En inglés*

[http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/dtix1164xpa-guidelines\\_slca.pdf](http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/dtix1164xpa-guidelines_slca.pdf)

RWS (2015). Handleiding Omgevingswijzer Duurzaamheid op basis van people, planet en profit. Ministry of Infrastructure and Water Management. The Netherlands, septiembre de 2015. *En holandés*

[https://www.omgevingswijzer.org/publish/pages/109871/handleiding\\_omgevingswijzer\\_versie\\_september\\_2015.pdf](https://www.omgevingswijzer.org/publish/pages/109871/handleiding_omgevingswijzer_versie_september_2015.pdf)

EU (2014). Directive 2014/24/EU of the European Parliament and of the Council on public procurement and repealing Directive 2004/18/EC. 26 de febrero de 2014. *En inglés*

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0024&from=EN>

Government Buildings Agency (2012). Model DBFMO agreement. Government Buildings Agency (Rijksgebouwendienst). Ministry of the Interior and Kingdom Relations. The Netherlands, 19 de marzo de 2012. *En inglés*

<https://www.government.nl/binaries/government/documents/directives/2012/03/19/model-dbfmo-agreement-government-building-agency-2012/model-dbfmo-agreement-government-building-agency-2012.pdf>

IISD (2014). Performance-based Specification, Exploring when they work and why. The International Institute for Sustainable Development. octubre de 2014. *En inglés*

<https://www.iisd.org/sites/default/files/publications/performance-based-speculations-exploring-when-they-work-and-why.pdf>

RWS (2017). Handleiding BPKV 2017, sturend aanbesteden via gunnen op meerwaarde.

Rijkswaterstaat, Ministry of Infrastructure and Water Management. The Netherlands, junio de 2017. *En holandés*

<http://publicaties.minienm.nl/documenten/beste-prijs-kwaliteit-verhouding-bpkv>

SBK (2014). Bepalingsmethode Milieuprestatie Gebouwen en GWW-werken. Stichting Bouwkwiteit, noviembre de 2014. *En holandés*

[https://www.milieudatabase.nl/imgcms/20141125\\_SBK\\_Bepalingsmethode\\_versie\\_2\\_0\\_definitief.pdf](https://www.milieudatabase.nl/imgcms/20141125_SBK_Bepalingsmethode_versie_2_0_definitief.pdf)

Bouwbesluit (2018). Bouwbesluit 2012. Ministry of the Interior and Kingdom Relations. The Netherlands, 1 de julio de 2018. *En holandés*

<https://rijksoverheid.bouwbesluit.com/Inhoud/docs/wet/bb2012>

Rijkswaterstaat (2018, septiembre 17). Duurzaamheidsverslag 2017: Duurzaam inkopen GWW. *En holandés*, adquirido de

<https://magazines.rijksoverheid.nl/ienw/duurzaamheidsverslag/2018/01/duurzaam-inkopen-gww>

Taskforce Bouwagenda (2017). De Bouwagenda, bouwen aan de kwaliteit van leven. The Netherlands,

28 de marzo de 2017. *En holandés*

<http://debouwagenda.com/actueel/downloads+en+brochures/HandlerDownloadFiles.ashx?idnv=913677>

Rijksoverheid et al. (2017). C-209 Green Deal Duurzaam GWW 2.0. The Netherlands, Rotterdam, 17 de enero de 2017. *En holandés*

<https://www.uvw.nl/wp-content/uploads/2017/01/Green-Deal-Duurzaam-GWW-2.0-2017.pdf>

Gemeente Amsterdam (2016). Circular Amsterdam, a vision and action agenda for the city and metropolitan area. Circle Economy, TNO, Fabric for the Municipality of Amsterdam. The Netherlands, abril de 2016. *En inglés*

<https://www.circle-economy.com/wp-content/uploads/2016/04/Circular-Amsterdam-EN-small-210316.pdf>

Gemeente Amsterdam (2017). Roadmap Circulaire Gronduitgifte, een introductie in circulaire bouwprojecten. Metabolic and SGS|Search for the Municipality of Amsterdam. The Netherlands, 1 de junio de 2017. *En holandés*

[https://assets.amsterdam.nl/publish/pages/851937/roadmap\\_circulaire\\_gronduitgifte\\_def\\_compressed.pdf](https://assets.amsterdam.nl/publish/pages/851937/roadmap_circulaire_gronduitgifte_def_compressed.pdf)

### Sección 3

WEF (2016). Shaping the Future of Construction A Breakthrough in Mindset and Technology. Industry Agenda. World Economic Forum with The Boston Consulting Group. mayo de 2016. *En inglés*

[http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Shaping\\_the\\_Future\\_of\\_Construction\\_full\\_report\\_.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_Shaping_the_Future_of_Construction_full_report_.pdf)

CE Delft (2016). Prioritizing action perspectives for greening the concrete chain, update 2016, CO2 abatement potential and CO2 abatement costs of 17 greening options for concrete, Summary. The Netherlands, noviembre de 2016. *En inglés*

<https://www.ce.nl/publicaties/download/2192>

REBus (2017). REBus Construction Lessons report. Developing Resource Efficient Business Models – REBus. LIFE12 ENV/UK/000608. Sustainable Global Resources Ltd, Rijkswaterstaat & PHI Factory for Rijkswaterstaat, Ministry of Infrastructure and Water Management. The Netherlands, 10 de septiembre de 2017. *En inglés*

<http://www.rebus.eu.com/wp-content/uploads/2017/12/REBus-Construction-Lessons-report.pdf>

Salet, T. A. M., Ahmed, Z. Y., Bos, F. P. & Laagland, H. L. M. (2018) Design of a 3D printed concrete bridge by testing, Virtual and Physical Prototyping, 13:3, 222-236, *En inglés* DOI: 10.1080/17452759.2018.1476064

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17452759.2018.1476064>

RILEM (2013). Strain Hardening Cement Composites, Structural Design and Performance. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 208-HFC, SC3. Kanakubo, T., Kabele, P., Fukuyama, H., Uchida, Y., Suwada, H. & Slowik, V.. Rokugo, K. & Kanda, T. (eds.). The Netherlands: Springer. *En inglés*

[https://www.rilem.net/global/gene/link.php?doc\\_id=3657&fg=1](https://www.rilem.net/global/gene/link.php?doc_id=3657&fg=1)

Gardner, D., Lark, R., Jefferson, T., & Davies, R. (2018). A survey on problems encountered in current concrete construction and the potential benefits of self-healing cementitious materials. Case studies in construction materials, 8, 238-247. *En inglés*

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509517302206>

Ottelé, M., Perini, K., Fraaij, A. L. A., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2011). Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems. Energy and Buildings, 43(12), 3419-3429. *En inglés*

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811003987>

- De Urbanisten & Deltares (2016). Towards a water sensitive Mexico City, Public space as a rain management strategy. De Urbanisten and Deltares with Autoridad del Espacio Público. The Netherlands, Rotterdam, 29 de junio de 2016. *En inglés*  
[https://www.deltares.nl/app/uploads/2018/01/20160629\\_WS-CDMX\\_final-version-report-smsize.pdf](https://www.deltares.nl/app/uploads/2018/01/20160629_WS-CDMX_final-version-report-smsize.pdf)
- WBL (2012). Modular Sustainable Sewage Treatment Plant, The New Standard. Waterschap Limburg. The Netherlands, 26 de abril de 2012. *En inglés*  
<https://www.eip-water.eu/sites/default/files/Modular%20Sustainable%20Sewage%20Treatment%20Plant.pdf>
- NEN-EN 1990 (2002). Eurocode - Basis of structural design. NEN, Delft, The Netherlands. *En inglés*  
<https://www.nen.nl/NEN-Shop-2/Standard/NENEN-19902002-en.htm>
- Kleiss, K. (2017). Het toepassen van innovatieve materialen, wanneer regelgeving (nog) ontbreekt. BEng. The Hague University of Applied Sciences. 23 de octubre de 2017. *En holandés*  
[https://hbo-kennisbank.nl/details/sharekit\\_hh:oai:surfsharekit.nl:52c71755-708a-44c6-b3b5-413a81a58097](https://hbo-kennisbank.nl/details/sharekit_hh:oai:surfsharekit.nl:52c71755-708a-44c6-b3b5-413a81a58097)
- Dean, C. C., Blamey, J., Florin, N. H., Al-Jeboori, M. J., & Fennell, P. S. (2011). The calcium looping cycle for CO<sub>2</sub> capture from power generation, cement manufacture and hydrogen production. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(6), 836-855. *En inglés*  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263876210003047>
- Brinckerhoff, P. (2011). Accelerating the uptake of CCS: industrial use of captured carbon dioxide. Global CCS Institute, 260p. *En inglés*  
<http://hub.globalccsinstitute.com/sites/default/files/publications/14026/accelerating-uptake-ccs-industrial-use-captured-carbon-dioxide.pdf>
- NIST (1917). Manufacture and properties of sand-lime brick. Technologic papers of The Bureau of Standards No. 85, Department of Commerce. United States of America, Washington Government Printing Office, 22 de marzo de 1917. *En inglés*  
<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/nbstechnologic/nbstechnologicpaperT85.pdf>
- Huijgen, W. J. J., Witkamp, G-J. & Comans, R. N. J. (2005). Mineral CO<sub>2</sub> Sequestration by Steel Slag Carbonation. *Environ. Sci. Technol.* 39, 9676-9682. *En inglés*  
<https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es050795f>
- CENNET (2013). International Cement Review. "The Global Cement Report 10th Edition. (Mar 2013)". *En inglés*  
<https://www.cemnet.com/content/publications/Global-Cement-11/Global-Cement-Report-World-Overview.pdf>
- Zhang, M. H., & Malhotra, V. M. (1996). High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material. *ACI Materials Journal*, 93, 629-636. *En inglés*  
[https://www.researchgate.net/publication/250613575\\_High\\_Performance\\_Concrete\\_Incorporating\\_Rice\\_Husk\\_Ash\\_as\\_a\\_Supplementary\\_Cementing\\_Material](https://www.researchgate.net/publication/250613575_High_Performance_Concrete_Incorporating_Rice_Husk_Ash_as_a_Supplementary_Cementing_Material)
- Lam, C. H., Ip, A. W., Barford, J. P., & McKay, G. (2010). Use of incineration MSW ash: a review. *Sustainability*, 2(7), 1943-1968. *En inglés*  
<http://www.mdpi.com/2071-1050/2/7/1943/pdf>
- Tchobanoglous, G. & Kreith, F. (2002). Handbook of solid waste management. United States of America: The McGraw-Hill Companies, Inc. *En inglés*  
<https://sanitarac.pro/wp-content/uploads/2017/07/Solid-Waste-Management.pdf>
- World Bank (2012). What a Waste, A Global Review of Solid Waste Management. Urban Development Series, knowledge papers. Urban Development & Local Government Unit World Bank. United States of

America, Washington DC. *En inglés*

[https://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/What\\_a\\_Waste2012\\_Final.pdf](https://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/What_a_Waste2012_Final.pdf)

NEN-EN 197-1 (2011). Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. NEN, Delft, The Netherlands. *En inglés*  
<https://www.nen.nl/NEN-Shop-2/Standard/NENEN-19712011-en.htm>

USGS (2018). Mineral commodity summaries 2018: U.S. Geological Survey, 200 p. *En inglés*,  
<https://doi.org/10.3133/70194932>  
<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2018/mcs2018.pdf>

Hossain, M. U., Poon, C. S., Lo, I. M., & Cheng, J. C. (2017). Comparative LCA on using waste materials in the cement industry: A Hong Kong case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 120, 199-208. *En inglés*  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344916303883>

Heidrich, C., Feuerborn, H. J., & Weir, A. (2013). Coal combustion products: a global perspective. In *World of Coal Ash Conference* (pp. 22-25). abril de 2013. *En inglés*  
<http://www.flyash.info/2013/171-heidrich-plenary-2013.pdf>

Ouellet-Plamondon, C., & Habert, G. (2015). Life cycle assessment (LCA) of alkali-activated cements and concretes. In *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes* (pp. 663-686). *En inglés*  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782422761500253>

SE (2014). Perfil de Mercado del Carbón. Coordinación General de Minería. Dirección General de Desarrollo Minero. Secretaría de Economía. diciembre de 2014. *En español*  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/5564/pm\\_carbon\\_2014.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/5564/pm_carbon_2014.pdf)

CANACERO (2017). Siderurgia y Desarrollo Sustentable. Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero, México, 2017. *En español*  
[http://www.canacero.org.mx/Es/assets/folleto\\_siderurgia\\_y-desarrollo\\_sustentable\\_web\\_2017.pdf](http://www.canacero.org.mx/Es/assets/folleto_siderurgia_y-desarrollo_sustentable_web_2017.pdf)

CENACEM (2018, August 07). Cemento Producción y Consumo. *En español*, adquirido de  
<http://canacem.org.mx/cemento/produccion-y-consumo/>

SEMARNAT (2017). Información sobre residuos sólidos urbanos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Published 10 de enero de 2017. *En español*  
<https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-solidos-urbanos-rsu>

Durán Moreno, A., Garcés Rodrigo, M., Velasco, A. R., Marín Enriquez, J. C., Gutiérrez Lara, R., Moreno Gutiérrez, A. & Delgadillo Hernández, N. A. (2013). Mexico City's Municipal Solid Waste Characteristics and Composition Analysis. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 29(1) 39-46. *En inglés*  
<http://www.redalyc.org/html/370/37025634004/>

C40 (2016). Good Practice Guide – Sustainable Solid Waste Systems. C40 Cities Climate Leadership Group. febrero de 2016. *En inglés*  
[http://c40-production-images.s3.amazonaws.com/good\\_practice\\_briefings/images/9\\_C40\\_GPG\\_SSWS.original.pdf?1456789082](http://c40-production-images.s3.amazonaws.com/good_practice_briefings/images/9_C40_GPG_SSWS.original.pdf?1456789082)

Vázquez, F., Torres, L. M., Garza, L. L., Martínez, A., & López, W. (2009). Caracterización por XANES, análisis mineralógico y aplicación industrial de un depósito de caolín de México. *Materiales de construcción*, (294), 113-121. *En español*  
<http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/138/179>

USGS (2013). Mineral commodity summaries 2013: U.S. Geological Survey, 198 p. *En inglés*  
<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2013/mcs2013.pdf>

UK (2018). A wide range of statistics and analysis on the construction industry in Great Britain in 2017. Construction statistics: Number 19, 2018 edition. Office for National Statistics. United Kingdom, 22 de agosto de 2018. *En inglés*  
<https://www.ons.gov.uk/businessindustryandtrade/constructionindustry/articles/constructionstatistics/number192018edition>

Tilly, G. P., & Jacobs, J. (2007). Concrete repairs: Performance in service and current practice. IHS BRE Press. *En inglés*  
<https://www.crcpress.com/Concrete-Repairs-Performance-in-Service-and-Current-Practice-EP-79/Tilly/p/book/9781860819742>

Visser, J. H. M., & van Zon, Q. F. (2012). Performance and service life of repairs of concrete structures in The Netherlands. In Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III: 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR-3, 3-5 de septiembre de 2012, Cape Town, South Africa (p. 317). CRC Press. *En inglés*  
<https://www.crcpress.com/Concrete-Repair-Rehabilitation-and-Retrofitting-III-3rd-International/Alexander-Beushausen-Dehn-Moyo/p/book/9780415899529>

Gardner, D., Lark, R., Jefferson, T., & Davies, R. (2018). A survey on problems encountered in current concrete construction and the potential benefits of self-healing cementitious materials. Case studies in construction materials, 8, 238-247. *En inglés*  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509517302206>

Wu, L., Hu, C., & Liu, W. V. (2018). The Sustainability of Concrete in Sewer Tunnel—A Narrative Review of Acid Corrosion in the City of Edmonton, Canada. Sustainability, 10(2), 517. *En inglés*  
<http://www.mdpi.com/2071-1050/10/2/517/pdf>

Drugă, B. Ukraincyk, N., Weise, K, Koenders, E. & Lackner, S (2018). Interaction between wastewater microorganisms and geopolymer or cementitious materials: Biofilm characterization and deterioration characteristics of mortars. International Biodeterioration & Biodegradation, Volume 134, de octubre de 2018, Pages 58-67. *En inglés*, <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.08.005>  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964830518305882>

NEN-EN 197-1 (2011). Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. NEN, Delft, The Netherlands. *En inglés*  
<https://www.nen.nl/NEN-Shop-2/Standard/NENEN-19712011-en.htm>

Provis, J. L. (2017). Alkali-activated materials. Cem. Concr. Res. (2017). *En inglés*,  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884616307700?via%3Dihub>

VROM (2001). Bouw- en sloopafval. Informatieblad. Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM). The Netherlands, junio de 2001. *En holandés*  
<http://www.passiefhuis.info/bouwen/nederland/vrom/bouw%20en%20sloopafval.pdf>

EU (2008). Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council on waste and repealing certain Directives. 19 de noviembre de 2008. *En inglés*  
<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj>

Kleijer, A. L., Lasvaux, S., Citherlet, S., & Viviani, M. (2017). Product-specific life cycle assessment of ready mix concrete: comparison between a recycled and an ordinary concrete. Resources, Conservation and Recycling, 122, 210-218. *En inglés*  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917300393>

UL & TU Delft (2015). Closed-loop Economy: Case of Concrete in the Netherlands. 4413INTPGY Interdisciplinary Project Groups. Leiden University and Delft University of Technology. The Netherlands, 4 de febrero de 2015. *En inglés*  
[https://www.slimbreker.nl/downloads/IPG-concrete-final-report\(1\).pdf](https://www.slimbreker.nl/downloads/IPG-concrete-final-report(1).pdf)

C&CB (2014). Trends in betonmortel, 25 jaar onderzoek naar eindverbruik van cement en betonmortel. Cement & BetonCentrum. The Netherlands, octubre de 2014. *En holandés*  
<http://www.cementenbeton.nl/c-bc/nieuws/nieuwsarchief/cementgehalte-betonmortel-toegenomen-door-daling-woning-en-utiliteitsbouw/website-betonmortelonderzoek-2014>

C&CB (2018, agosto 11). Cementmarkt. Cement and BetonCentrum *En holandés*, adquirido de <http://www.cementenbeton.nl/marktinformatie/cementmarkt>

Cook, R. A., & Hover, K. C. (1999). Mercury porosimetry of hardened cement pastes. *Cement and Concrete research*, 29(6), 933-943. *En inglés*  
<ftp://ftp.ecn.purdue.edu/olek/PTanikela/To%20Prof.%20Olek/Data/MIP/Mercury%20porosity%20of%20hardened%20cement%20pastes.pdf>

Taylor, R., Richardson, I. G., & Brydson, R. M. D. (2010). Composition and microstructure of 20-year-old ordinary Portland cement–ground granulated blast-furnace slag blends containing 0 to 100% slag. *Cement and Concrete Research*, 40(7), 971-983. *En inglés*  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884610000517>

CEMEX (2018, octubre 07). Manual del constructor. CEMEX concretos. *En español*, adquirido de <https://www.cemexmexico.com/documents/27057941/45587277/aplicaciones-manual-construccion-general.pdf/772d227d-d168-efc4-a2e3-86ba78c80cb4>

Rodriguez, E. T., Garbev, K., Merz, D., Black, L., & Richardson, I. G. (2017). Thermal stability of CSH phases and applicability of Richardson and Groves' and Richardson C-(A)-SH (I) models to synthetic CSH. *Cement and Concrete Research*, 93, 45-56. *En inglés*  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884616306937>

UNEP (2014). Global Environmental Alert Service: Sand, rarer than one thinks. Thematic focus: Ecosystem management, Environmental governance, Resource efficiency. United Nations Environment Programme, marzo de 2014. *En inglés*  
[https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8665/GEAS\\_Mar2014\\_Sand\\_Mining.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8665/GEAS_Mar2014_Sand_Mining.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

ABN AMRO (2014). Circular construction. The foundation under a renewed sector. Circle Economy for ABN AMRO. The Netherlands: Amsterdam. *En inglés*  
Report version: [https://www.circle-economy.com/wp-content/uploads/2016/06/Circle-Economy\\_2015\\_002\\_Rapport\\_Circulair-Construction\\_1-21.pdf](https://www.circle-economy.com/wp-content/uploads/2016/06/Circle-Economy_2015_002_Rapport_Circulair-Construction_1-21.pdf)

#### Sección 4

CE (2018). Environmental Prices Handbook 2017 Methods and numbers for valuation of environmental impacts. CE Delft, The Netherlands, mayo de 2018. *En inglés*  
<https://www.ce.nl/en/publications/download/2544>

ABN AMRO (2014). Circular construction. The foundation under a renewed sector. Circle Economy for ABN AMRO. The Netherlands: Amsterdam. *En inglés*  
Report version: [https://www.circle-economy.com/wp-content/uploads/2016/06/Circle-Economy\\_2015\\_002\\_Rapport\\_Circulair-Construction\\_1-21.pdf](https://www.circle-economy.com/wp-content/uploads/2016/06/Circle-Economy_2015_002_Rapport_Circulair-Construction_1-21.pdf)

CONAGUA (2010). Statistics on Water in Mexico, 2010 edition. National Water Commission of Mexico. Mexico, junio de 2010. *En inglés*

<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-6-10-EAM2010Ingles.pdf>

De Urbanisten & Deltares (2016). Towards a water sensitive Mexico City, Public space as a rain management strategy. De Urbanisten and Deltares with Autoridad del Espacio Público. The Netherlands, Rotterdam, 29 de junio de 2016. *En inglés*

[https://www.deltares.nl/app/uploads/2018/01/20160629\\_WS-CDMX\\_final-version-report-smsize.pdf](https://www.deltares.nl/app/uploads/2018/01/20160629_WS-CDMX_final-version-report-smsize.pdf)

Zupancic, T., Westmacott, C., & Bulthuis, M. (2015). The impact of green space on heat and air pollution in urban communities: A meta-narrative systematic review (p. 67). Vancouver, BC, Canada: David Suzuki Foundation. marzo de 2015. *En inglés*

<https://davidsuzuki.org/wp-content/uploads/2017/09/impact-green-space-heat-air-pollution-urban-communities.pdf>

PAOT (2010). Presente y Futuro de las Áreas Verdes y del Arbolado de la Ciudad de México. Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial. Mexico, diciembre de 2010. *En español*

[http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/libro\\_areas\\_verdes.pdf](http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/libro_areas_verdes.pdf)

Stache E., Jonkers H., Ottelé M. (2019) Integration of Ecosystem Services in the Structure of the City is Essential for Urban Sustainability. In: Achal V., Mukherjee A. (eds) Ecological Wisdom Inspired Restoration Engineering. EcoWISE (Innovative Approaches to Socio-Ecological Sustainability). Springer, Singapore. *En inglés*

[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-0149-0\\_8](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-0149-0_8)

Deloitte (2017). México, tendencias, retos y oportunidades en proyectos de infraestructura. Galaz, Yamazaki, Ruiz Urquiza, S.C. *En español*

<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/mx/Documents/Infraestructura/2017/Tendencias-Infraestructura-entrev.pdf>

LAPTFD (2017). Ley Ambiental de Protección a la Tierra en el Distrito Federal. Ley publicada en la Gaceta Oficial del Distrito Federal, el 13 de enero de 2000. Última reforma publicada en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México, el 08 de septiembre de 2017. *En español*

[http://www.paot.org.mx/centro/leyes/df/pdf/2017/LEY\\_AMBIENTAL\\_PROTECCION\\_TIERRA\\_08\\_09\\_2017.pdf](http://www.paot.org.mx/centro/leyes/df/pdf/2017/LEY_AMBIENTAL_PROTECCION_TIERRA_08_09_2017.pdf)

NMX-AA-164-SCFI (2013). Norma Mexicana, Edificación Sustentable – Criterios y Requerimientos Ambientales Mínimos, Sustainable Building – Criteria and Minimal Environmental Requirements. Estados Unidos Mexicanos, Secretaría de Economía. *En español*

<http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/DO3156.pdf>

LRSDF (2017). Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal. Ley publicada en la Gaceta Oficial del Distrito Federal el 22 de abril de 2003. Última reforma publicada en la Gaceta Oficial del Distrito Federal, el 02 de noviembre de 2017. *En español*

[http://www.paot.org.mx/centro/leyes/df/pdf/2017/LEY\\_RESIDUOS\\_SOLIDOS\\_02\\_11\\_2017.pdf](http://www.paot.org.mx/centro/leyes/df/pdf/2017/LEY_RESIDUOS_SOLIDOS_02_11_2017.pdf)

NOM-161-SEMARNAT (2011). Norma Oficial Mexicana, Que establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo. Mexico, D. F. : Semarnat, 2013. *En español*

NADF-007-RNAT (2013). Norma Ambiental para el Distrito Federal, que Establece la Clasificación y Especificaciones de Manejo para Residuos de la Construcción y Demolición, en el Distrito Federal. Mexico: Gaceta Oficial del Distrito Federal, 26 de febrero de 2015. *En español*

[http://www.cmec.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/PROY-NADF-007-RNAT-2013/Gaceta\\_DF\\_NADF-007-RNAT-2013.pdf](http://www.cmec.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/PROY-NADF-007-RNAT-2013/Gaceta_DF_NADF-007-RNAT-2013.pdf)

C40 (2016). Good Practice Guide – Sustainable Solid Waste Systems. C40 Cities Climate Leadership

Group. febrero de 2016. *En inglés*

[http://c40-production-images.s3.amazonaws.com/good\\_practice\\_briefings/images/9\\_C40\\_GPG\\_SSWS.original.pdf?1456789082](http://c40-production-images.s3.amazonaws.com/good_practice_briefings/images/9_C40_GPG_SSWS.original.pdf?1456789082)

NAICM (2017). Ficha técnica “Construcción de subcomandancia de policía y estación de bomberos en nueva Santa Rosa”, Municipio de San Salvador Atenco, Estado de México. Programa de estudios, proyectos y construcciones 2017. El Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Mexico, Agosto 2017. *En español*

[http://gacmda.gacm.mx:8880/files/opensd/18003-LPN-OP-DCAGI-SC-003-18/4.-%20TR/4.1.pdf](http://gacmda.gacm.mx:8880/files/.opendata/opensd/18003-LPN-OP-DCAGI-SC-003-18/4.-%20TR/4.1.pdf)

INEGI (2018). Resultados de la Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo, Cifras Durante El Cuarto Trimestre de 2017. Comunicado de prensa núm. 70/18. 13 de febrero de 2018. *En español*

[http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/boletines/2018/enoe\\_ie/enoe\\_ie2018\\_02.pdf](http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/boletines/2018/enoe_ie/enoe_ie2018_02.pdf)

CMIC (2013). Los Retos de la Infraestructura en México 2013-2018. marzo de 2013. *En español*

<http://www.cmic.org.mx/cmhc/ceesco/2013/Retos.pdf>

Gemeente Amsterdam (2016). Circular Amsterdam, a vision and action agenda for the city and metropolitan area. Circle Economy, TNO, Fabric for the Municipality of Amsterdam. The Netherlands, abril de 2016. *En inglés*

<https://www.circle-economy.com/wp-content/uploads/2016/04/Circular-Amsterdam-EN-small-210316.pdf>

Dittrich, M., Giljum, S., Lutter, S. & Polzin, C. (2012). Green economies around the world? Implications of resource use for development and the environment. Austria: Vienna. *En inglés*

[https://www.boell.de/sites/default/files/201207\\_green\\_economies\\_around\\_the\\_world.pdf](https://www.boell.de/sites/default/files/201207_green_economies_around_the_world.pdf)

Gardner, D., Lark, R., Jefferson, T., & Davies, R. (2018). A survey on problems encountered in current concrete construction and the potential benefits of self-healing cementitious materials. Case studies in construction materials, 8, 238-247. *En inglés*

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509517302206>

Cullen, J. M., & Allwood, J. M. (2010). The efficient use of energy: Tracing the global flow of energy from fuel to service. Energy Policy, 38(1), 75-81. *En inglés*

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421509006429>

ABN AMRO (2014). Circular construction. The foundation under a renewed sector. Circle Economy for ABN AMRO. The Netherlands: Amsterdam. *En inglés*

Report version: [https://www.circle-economy.com/wp-content/uploads/2016/06/Circle-Economy\\_2015\\_002\\_Rapport\\_Circulair-Construction\\_1-21.pdf](https://www.circle-economy.com/wp-content/uploads/2016/06/Circle-Economy_2015_002_Rapport_Circulair-Construction_1-21.pdf)