

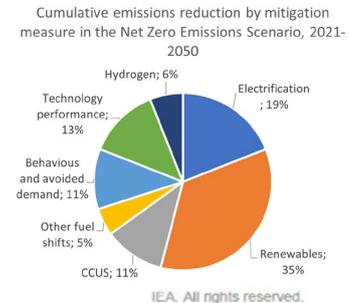
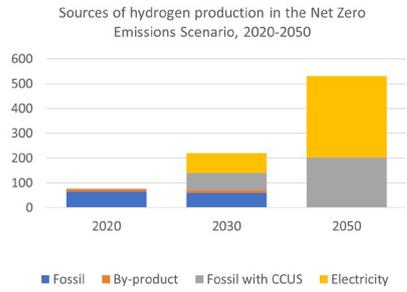
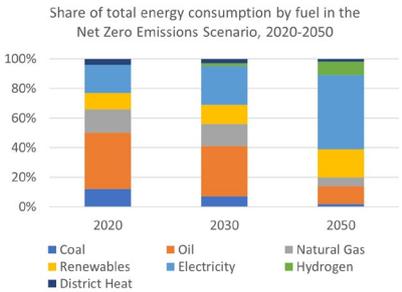
*Joel Maia. Gerente general de la unidad de negocio. FCT Combustion Europa y África.
Renato Greco. Jefe de Tecnología. FCT Combustion Europa y África.*

¿Es el hidrógeno la respuesta para reducir las emisiones de CO₂ en la producción de clínker?

Sin duda que el tema en el que pone el foco este artículo es muy amplio y requiere ser discutido con más detalle. A continuación se evalúan los factores involucrados en esta industria de rápido desarrollo, considerada por muchos como la solución definitiva para la mitigación de las emisiones de CO₂. Obviamente, el hidrógeno no contiene carbono pero, ¿es así de sencillo?

La necesidad de realizar la transición hacia una economía de bajo carbono es un concepto ampliamente aceptado con el objetivo de mejorar las posibilidades de supervivencia de la raza humana en el futuro. No obstante, la descarbonización de la actividad económica humana es un asunto complejo que sólo puede evaluarse y llevarse a cabo de manera responsable al considerar la multitud de diferencias en las condiciones sociales y económicas de los países, así como su posición en la jerarquía de necesidades.

En ese contexto, se ha señalado el uso del hidrógeno a gran escala en la industria como uno de los caminos para reducir las emisiones de dióxido de carbono, pero aun así, “es solo una pieza del rompecabezas”, como lo destaca correctamente la Agencia Internacional de Energía (International Energy Agency, IEA) en su Informe Global de Hidrógeno 2021 (“Global Hydrogen Review 2021 Report”).



Notes: NZE = Net zero Emissions Scenario. TFC = total final energy consumption. CCUS = carbon capture, utilisation and storage. "Behaviour" refers to energy service demand changes linked to user decisions (e.g. heating temperature changes). "Avoided demand" refers to energy service demand changes from technology developments (e.g. digitalisation). "Other fuel shifts" refers to switching from coal and oil to natural gas, nuclear, hydropower, geothermal, concentrating solar power or marine energy. "Hydrogen" includes hydrogen and hydrogen-based fuels.
Source: IEA (2021). Net zero by 2050.

En este artículo, intentaremos arrojar luz sobre el potencial papel de la utilización de hidrógeno en la industria del cemento, desglosando el enfoque en tres categorías principales: huella ambiental, aspectos económicos y desafíos específicos en la producción de clínker.

Huella ambiental del hidrogeno

El primer mito que abordar es que el hidrógeno es un combustible limpio *per se*. Aunque la combustión directa

del hidrógeno no genera dióxido de carbono, la mayor parte del hidrógeno producido en el mundo genera una cantidad considerable de gases de efecto invernadero. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), la producción de hidrógeno contribuye a la formación de 830 millones de toneladas de CO₂ al año (con la matriz de producción actual de H₂, 1 kg de H₂ producido genera alrededor de 10 kg de CO₂).

Existe una importante diferenciación que debe hacerse según el proceso de producción. A menudo se utilizan colores para indicar qué tan limpia es la producción de hidrógeno: ‘Gris’ (o ‘marrón’, o ‘negro’), ‘azul’ y ‘verde’, en una gradación entre los procesos menos a más amistosos con el medio ambiente:

en una gradación entre los procesos menos a más amistosos con el medio ambiente:

Hidrógeno 'gris' ('marrón' o 'negro')

El hidrógeno se produce a partir de combustibles fósiles basados en hidrocarburos, mayoritariamente gas natural (hidrógeno 'gris') o carbón (hidrógeno 'marrón' o 'negro'). Los componentes de los combustibles fósiles se descomponen en hidrógeno y dióxido de carbono, entre otros componentes menores. Este método, llamado proceso de reformado con vapor, libera la misma cantidad o una cantidad mayor de CO₂ por unidad de energía en comparación con el uso directo del combustible original (como el gas natural o el carbón, por ejemplo). La razón de esto es que, para este proceso, se requiere una fuente adicional de energía para descomponer el combustible fósil en hidrógeno y CO₂, y generalmente esta fuente adicional de energía proviene de los propios combustibles fósiles.

Hidrógeno 'azul'

El proceso de producción es similar al del hidrógeno 'gris', con la diferencia de que la mayoría (80-90%) del CO₂ producido por el proceso de hidrógeno azul se captura y almacena a través de una unidad de CCUS (siglas en inglés para captura, uso y almacenamiento de carbono).

Hidrógeno 'verde'

El hidrógeno se produce mediante la electrólisis del agua alimentada por energía renovable, como la solar o la eólica. Como consecuencia, se libera oxígeno a la atmósfera (o se utiliza para otros procesos) como subproducto. De esta lista, es la única fuente de hidrógeno verdaderamente neutra en carbono (sin considerar el CO₂ generado para producir los equipos solares o eólicos).

Existen otros 'colores' de hidrógeno, dependiendo de los procesos o de la fuente de energía utilizada para generarlo. Hasta el momento, estos representan un porcentaje bastante pequeño en el entorno de producción de hidrógeno y, por lo tanto, no se discutirán.

Significa, en un contexto más amplio, que la combustión de hidrógeno 'gris' tiene una huella de CO₂ más grande por unidad de energía liberada que el gas natural y el fueloil (Figura 3) y una huella de CO₂ similar a la combustión del carbón. Por lo tanto, el uso de hidrógeno 'gris' como combustible en sustitución directa del gas natural o fueloil en realidad es perjudicial para el medio ambiente, mientras que en sustitución directa del carbón apenas es ambientalmente favorable.

De hecho, más del 99% del hidrógeno producido en el mundo aún se encuentra en la categoría 'gris'. El hidrógeno azul/verde representa menos del 1% de la producción total.



Demanda en 2020 (90 millones de t de H₂)

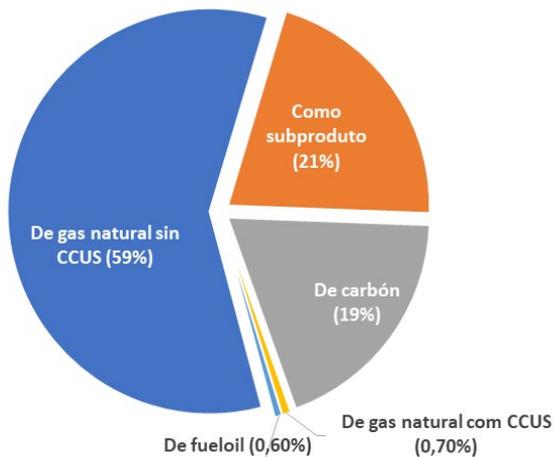


Figura 1. Demanda de hidrógeno por origen en el año 2020. (Fuente: IEA).

Emisión CO₂ (kg CO₂/GJ)

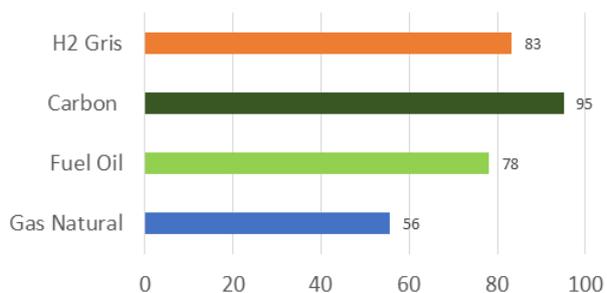


Figura 2. Emisión de CO₂ (kg CO₂/GJ LHV de calor liberado).

Aspectos económicos

Costos de producción

La producción de hidrógeno ‘azul’/‘verde’ no es barata (Figura 3). Aún existe una brecha de precios significativa entre el gas natural y el hidrógeno.

Precio estimado H₂ x gas natural (€/GJ LHV)

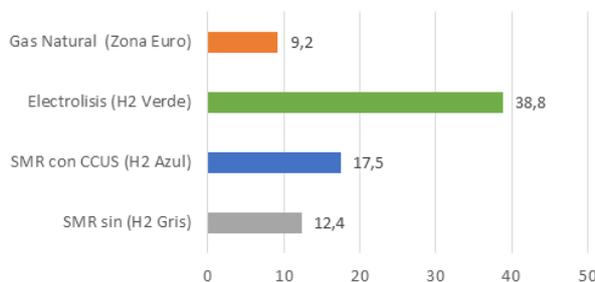


Figura 3. Estimación del coste de la producción de hidrógeno y precio del gas natural.

El consumo eléctrico y la inversión de capital de las unidades electrolíticas varían según la tecnología (membrana de intercambio de protones, alcalina, membrana de intercambio de aniones u óxido sólido), la configuración de la unidad y el proveedor. Sin embargo, la producción de hidrógeno utilizando energía eléctrica sigue siendo intensiva en energía (Figura 4).

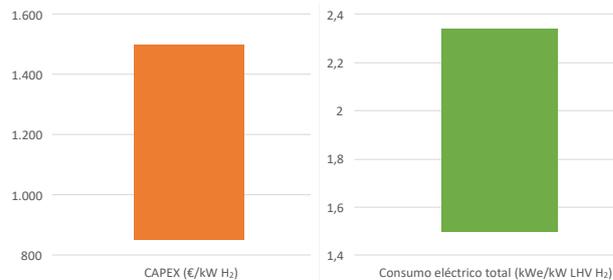


Figura 4. CAPEX y consumo eléctrico de sistemas de electrolisis.

Según la Figura 4, se puede concluir que el proceso de producción de hidrógeno verde todavía es bastante ineficiente. Para cada kW de ‘energía química’ en H₂, se requieren entre 1,50 y 2,35 kW de energía eléctrica, lo que significa una eficiencia entre el 42% y el 66%.

Si lo combinamos con la eficiencia de conversión de las fuentes de energía renovable (15-20% y 20-50% para paneles solares y aerogeneradores, respectivamente), obtenemos una eficiencia general escasa de entre el 6% y el 33%.

Escalabilidad

Las instalaciones de producción de hidrógeno verde son bastante pequeñas. Aunque este es un campo en rápido desarrollo, se cree que la planta de hidrógeno verde más grande del mundo en 2020 producía hidrógeno equivalente a 20 MW, y en realidad era una combinación de unidades más pequeñas. Información más reciente indica el desarrollo de nuevas plantas con una capacidad mayor en 2022.

Asimismo, la producción total de hidrógeno verde en 2021 fue de alrededor de 300 MW. Si la totalidad de esto se utilizara para la producción de clínker, sería posible operar solamente 2 hornos de 4.000 toneladas por día y 775 kcal/kg utilizando un 100% de hidrógeno durante ese año.

¹ Se utilizó como referencia el precio del gas natural de 33€/MWh PCI entregado en el punto de consumo en el año 2020 para evitar el efecto de la volatilidad reciente en el mercado energético. El precio del gas natural para grandes consumidores no residenciales, incluyendo el IVA, impuestos y cargos. Electrólisis asumiendo un precio de energía renovable de 70€/MWh.

Infraestructura

No existe una infraestructura o red a gran escala para distribuir hidrógeno a instalaciones industriales. Las tuberías de gas natural, los compresores y los accesorios existentes no están totalmente adaptados para transportar hidrógeno al 100% por varias razones, entre otras:

- 1) El hidrógeno transporta aproximadamente un 67% menos de energía por metro cúbico (los equipos de distribución y las tuberías dependen principalmente del flujo volumétrico en lugar del flujo de masa) en comparación con el gas natural.
- 2) El hidrógeno a altas presiones puede penetrar en la estructura del acero y causar fragilización del metal.

Por lo tanto, la implementación de redes de distribución requerirá una inversión importante de capital.

En este punto, está claro que el único tipo de hidrógeno ambientalmente viable es el hidrógeno verde. Se están llevando a cabo investigaciones exhaustivas y se están otorgando grandes incentivos para reducir la brecha de precios entre la producción de hidrógeno verde y otros tipos de combustibles, mejorar la eficiencia de su proceso de producción y hacerlo disponible para los 'consumidores intensivos'. Aunque todavía queda un largo camino por recorrer, existe un optimismo general de que estas brechas se reducirán o eliminarán en el futuro.

Producción de cemento

Suponiendo que se aborden todos los demás aspectos, es decir, que el hidrógeno verde esté disponible fácilmente en la plataforma del horno a un costo razonable, debemos abordar el propio proceso de fabricación de cemento. La combustión de hidrógeno en los hornos de clínker requiere atención especial a algunos puntos:

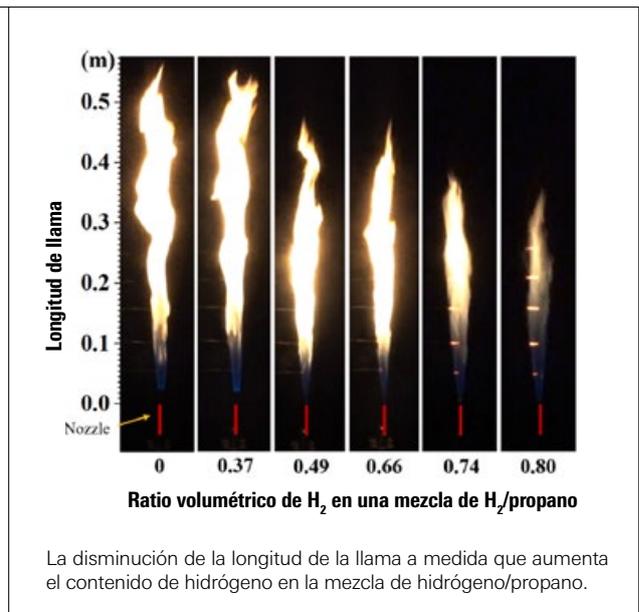
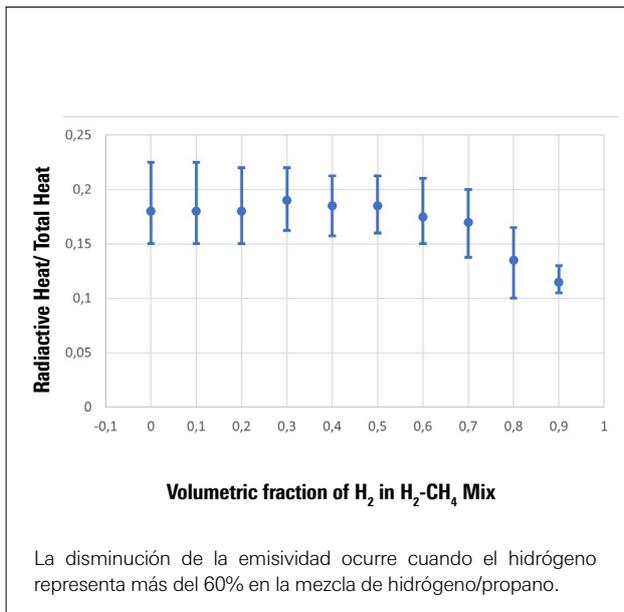
Transferencia de calor

Las llamas de hidrógeno puro son no luminosas y tienen una baja capacidad de radiación debido a que no generan hollín y no contienen partículas como en las llamas de combustibles sólidos.

Prevedemos la cocombustión como una solución factible para mejorar las propiedades radiantes de la llama. Aunque ninguno de ellos ha sido probado en unidades de combustión a gran escala, FCT tiene la confianza de que existe suficiente evidencia para respaldar esas alternativas.

Estudios recientes sugieren que una mezcla de hasta un 25% de hidrógeno y un 75% de gas natural (en volumen) no tiene un impacto significativo en la emisividad general de la llama, en comparación con el gas natural al 100%.

Otros experimentos con mezclas de propano e hidrógeno han demostrado que la transferencia de calor por radiación disminuye drásticamente cuando el hidrógeno representa más del 60% de la mezcla.



(Fuente: "Experimental study on the flame radiation fraction of hydrogen and propane gas mixture". Yuke Gao et al. School of Automotive and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China b School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China).



Llama de un quemador en un horno de clínker usando un 100% de gas natural.



Llama de un quemador en un horno de clínker usando gas natural y coque de petróleo.

(Fuente: FCT).

La inyección de combustible pulverizado es otra alternativa para abordar el problema de la emisividad y la transferencia de calor ya que su presencia aumenta

significativamente la emisividad y, por lo tanto, la transferencia de calor de una llama de combustible gaseoso.

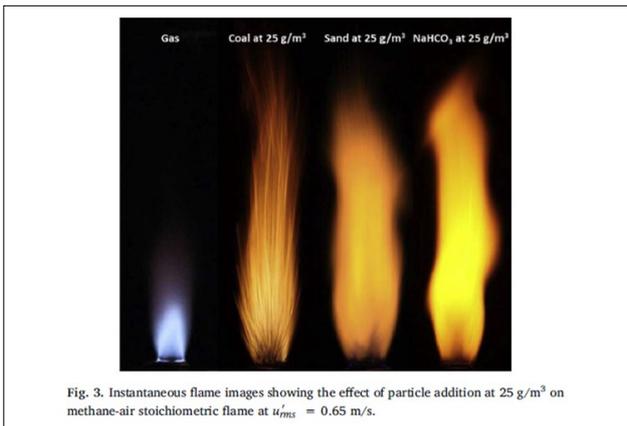


Fig. 3. Instantaneous flame images showing the effect of particle addition at 25 g/m³ on methane-air stoichiometric flame at $u'_{rms} = 0.65$ m/s.

Table 1. Average radiative fraction from different pre-mixture conditions.

Fuel-Air Mix	Methane-Air	Methane-Air-25g/m ³ Coal	Methane-Air-25g/m ³ Sand	Methane-Air-25g/m ³ NaHCO ₃
Radiative Heat / Total Heat	2,7 - 6,0%	10,5 - 17,5	11,5 - 27,0	12,7 - 27,0

(Fuente: "Radiative fraction of dust entrained turbulent premixed flames". Sreenivasan Ranganathana, Scott R. Rockwellb, David Petrowa, Robert Zaloshya y Ali S. Rangwalaa).

Obviamente, la adición de materiales sin valor calórico aumenta el consumo de combustible ya que parte de la energía se utilizará para calentar esas partículas. Sin embargo, se cree que los beneficios de una mayor emisividad y una mejor transferencia de calor de la llama superan el aumento del consumo de combustible en un horno típico de clínker.

Una forma más sencilla y disponible hoy en día para superar la reducida emisividad de la combustión de hidrógeno sería utilizarlo en calcinadores, donde la radiación de la llama no es la principal fuente de energía.

NOx: el hidrógeno genera una temperatura de llama más alta

Una investigación realizada en Australia señala que la mezcla de hasta un 10% de hidrógeno en gas natural (en volumen)

es manejable en términos de emisiones de NOx, sin que se haya detectado un impacto significativo. Sin embargo, se ha observado que una mezcla de hasta un 25% de hidrógeno ha causado un aumento significativo en la formación de NOx.

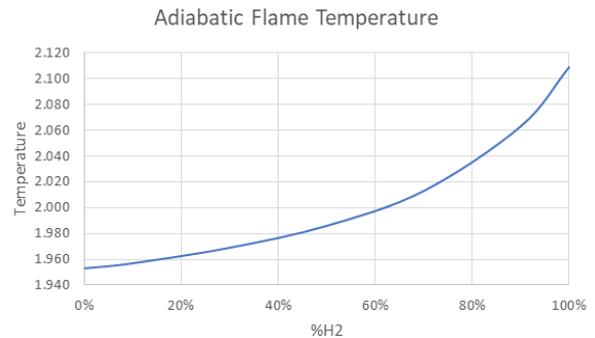


Figure 5. Temperatura adiabática de la llama con una mezcla H₂/CH₄ (estequiométrica, aire no precalentado).

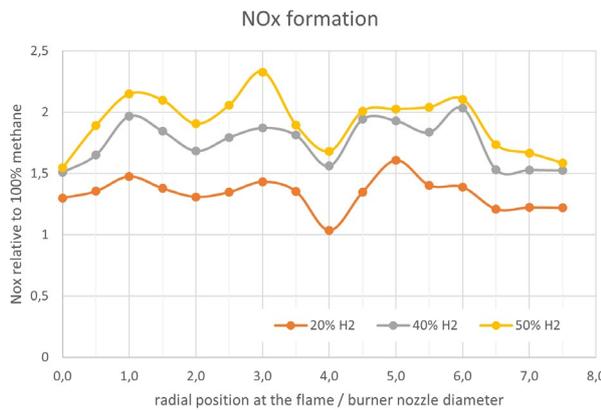


Figura 6. Perfiles de concentraciones radiales de NO para distintos % de fracciones volumétricas de H2 en una mezcla híbrida en tres ubicaciones: (i), cerca al quemador; (ii), media llama; y (iii), lejos del quemador. (Fuente: "Combustion characteristics of natural gas-hydrogen hybridfuel turbulent diffusion flame". S.A.A. El-Ghafour*, A.H.E. El-dein, A.A.R. Aref. Mechanical Power Engineering Department, Faculty of Engineering, Suez Canal University, Port-Said, Egipto).

La investigación a escala de laboratorio apunta en la misma dirección: a mayor concentración de hidrógeno, mayor es la formación de NOx. Debemos tener en cuenta que el efecto combinado de una menor transferencia de calor radiante y una mayor

temperatura máxima de la llama potencializa la cinética de las reacciones de generación de NOx.

Conclusión

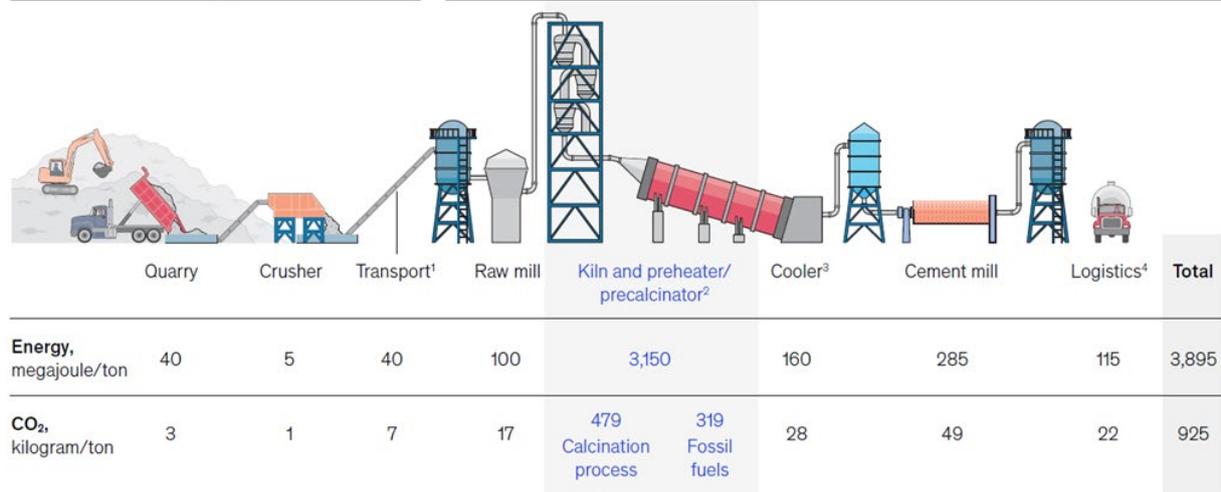
A pesar de que la producción de cemento sea un proceso intensivo en energía, la combustión representa solamente alrededor del 35% de las emisiones totales de CO₂ de la cadena de producción de cemento (desde la cantera hasta el consumidor final). Cualquier reducción potencial en las emisiones de CO₂ en esta área tiene un impacto en aproximadamente un tercio del CO₂ total generado. La gran mayoría de las emisiones de CO₂ provienen de la calcinación de la piedra caliza, así, sustituir la caliza por otro mineral base sin CO₂ en su composición abre importantes posibilidades, siendo un campo en el que también se están realizando avances para reducir las emisiones de CO₂. Este tema será abordado en un futuro artículo.

Por el momento, el hidrógeno sigue siendo un combustible poco disponible, costoso de producir a gran escala y de manera sostenible, con desafíos para su uso eficiente en hornos para la producción de clínker. Sin embargo, estos retos están siendo abordados intensivamente tanto por la academia como por la industria, lo que nos hace creer que se producirán avances en un corto-mediano plazo.

Proceso de fabricación del cemento

Materias primas, energía y recursos

Producción de clínker y cemento



¹ Assumed with 1kWh/t/100m.

² Assumed global average, data from the Global Cement and Concrete Association, Getting the Numbers Right 2017.

³ Assumed reciprocating grate cooler with 5kWh/t clinker.

⁴ Assumed lorry transportation for average 200km.