

# LA “TRANSMUTACIÓN” SOSTENIBLE DE LOS RESIDUOS PARA NUEVAS MATERIAS PRIMAS EN EL ÁMBITO DEL CONCRETO.

JORDI PAYÁ

*Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH), Universitat Politècnica de València. jjpaya@cst.upv.es*

**RESUMEN:** En este artículo se recopilan diferentes opciones para la reutilización sostenible de residuos en la fabricación de concreto. Se detallan las diferentes opciones para residuos industriales, residuos agrícolas y residuos de construcción y demolición. Se enfatiza en la importancia de tratamientos como la molienda, clasificación por aire y sonicación, así como en la fabricación de conglomerantes activados alcalinamente.

**PALABRAS CLAVE:** sostenibilidad, residuos, concreto, concreto verde.

**ABSTRACT:** This article collects various options for sustainable reuse of waste in the manufacture of concrete. It details the various options for industrial waste, agricultural waste and construction and demolition waste. The importance of treatments such as milling, air classification and sonication, and preparation of binders in the manufacture of alkali activated systems is emphasized.

**KEYWORDS:** sustainability, wastes, concrete, green concrete.

## 1. INTRODUCCIÓN

El término “transmutación” se refería tradicionalmente a la transformación de un elemento químico en otro. En esencia, se pretendía combinar diferentes condiciones y materiales (elementos químicos) para conseguir otros de mayor valor (fundamentalmente oro a partir de plomo o hierro, con la adición de otras sustancias/elementos y transformaciones diversas como calor, agua y fuego). Hoy en día sabemos que no es posible conseguirlo a nivel químico, solamente a través de las reacciones que afectan al núcleo de los átomos (transformaciones nucleares).

Todos los materiales de construcción convencionales, entre ellos el concreto, está formado por agrupaciones de átomos comunes (oxígeno, carbono, calcio, silicio, aluminio, azufre,...) y la elaboración de dichos materiales no supone ninguna transmutación. Sin embargo, cada día es más evidente el interés sobre la reutilización de diversos tipos de residuos en el ámbito de la construcción, dado que esta actividad supone un importante “sumidero de átomos”. Uno de los retos es reutilizar residuos convirtiéndolos en materias primas para aplicaciones concretas: esto es, convertir materiales de menos valor en otros de mucho más valor (o lo que, utilizando términos alquimistas, vendría a ser una “transmutación”, la conversión de plomo en oro). Y es un reto para los químicos, ingenieros químicos, ingenieros de materiales y otros profesionales que trabajan en el ámbito químico y físico-químico de los

materiales de construcción, encontrar las claves (la piedra filosofal) para llevar a cabo esa transformación.

Adicionalmente, en los tiempos en los que vivimos, debemos acotar la dimensión de la transformación a un entorno sostenible en donde podamos satisfacer nuestras necesidades sin comprometer gravemente las de las futuras generaciones (Informe Brundlandt, 1987 [1]). En ese entorno sostenible, están involucradas, fundamentalmente, las reducciones en el uso de materias primas naturales, y en la emisión a la atmósfera de gases nocivos, en especial aquellos que suponen una contribución al incremento del efecto invernadero (gases de efecto invernadero, GEI).

Existen tres conjuntos generales de residuos, sobre los que se puede y se debe evaluar las posibilidades de reutilización sostenible en la fabricación de concreto. Para ellos habrá que considerar no solamente los beneficios en la reducción de uso de materias primas de forma directa, sino también de forma indirecta, esto es, explotando al máximo las características que minimicen el uso de materias primas naturales. Estos conjuntos son: residuos industriales, residuos agrícolas y agropecuarios, y residuos procedentes de las actividades de construcción y demolición de obras públicas y edificaciones.

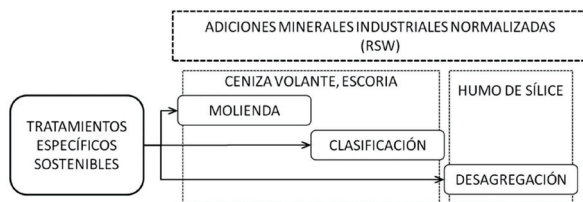
## 2. RESIDUOS INDUSTRIALES.

Dentro de los residuos industriales, es bien conocido el uso de subproductos que hoy en día se consideran materias

primas para la fabricación de cementos y concreto: el humo de sílice, las cenizas volantes y las escorias de alto horno. Estos materiales los englobaríamos en el conjunto que podemos denominar adiciones minerales industriales normalizadas (recognized standard wastes, RSW), dado que suelen tratarse en numerosas normativas e instrucciones en el ámbito de la construcción. En el otro lado, tendremos los residuos que se consideran dentro del ámbito de la investigación, y que podemos denominar residuos minerales industriales fuera de norma (off-standard wastes, OSW): aquí podemos encontrar infinidad de residuos, desde aquellos procedentes de los procesos siderúrgicos y extractivos de metales, hasta los residuos procedentes de la depuración de aguas.

## 2.1. Adiciones minerales industriales normalizadas (RSW).

En estos casos, la “transmutación” sostenible consistiría fundamentalmente en incrementar su potencialidad cementante, a través de procesos de activación relacionados con su granulometría (Figura 1). Es evidente que, dado que estamos tratando con materiales de carácter esencialmente amorfo, el incremento de su reactividad pasa por aumentar su superficie específica, por medio de la clasificación de las partículas por tamaños, por molienda enérgica o por desagregación a través de métodos ultrasónicos.



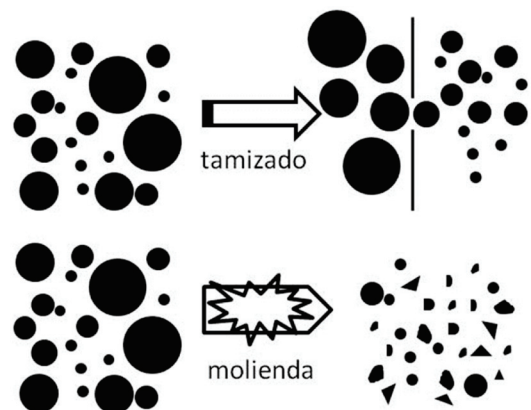
**Figura 1.** Vías de transmutación para adiciones minerales normalizadas.

**2.1.1. Las cenizas volantes:** estos residuos se vienen utilizando desde hace varias décadas en fabricación de cementos con adiciones, cementos puzolánicos y en concretos [2]. En principio, y dadas las tendencias en cuanto a consumo de combustibles fósiles [3,4], parece que el consumo de carbón disminuirá en ciertas zonas en beneficio del gas natural, bio-fuel y otras fuentes renovables (eólicas, fotovoltaicas, geotérmicas, etc.). En cualquier caso, en algunos países emergentes, como China [5], el uso del carbón está creciendo en los últimos años, y por otra parte, existen depósitos de cenizas que no se han explotado comercialmente y que

podrían servir de materia prima futura.

El aumento de la finura puede llevarse a cabo de forma sencilla por métodos de clasificación o por métodos de molienda (Figura 2). En el primer caso, usando tamices o corrientes de aire [6-9], se consigue mantener la morfología esférica de las partículas, de modo que se puede aprovechar el efecto lubricante de las partículas de ceniza volante. En este proceso se generan subproductos de mayor granulometría, generalmente más ricos en inquemados, que lógicamente habrá que gestionar de forma sostenible en alguna aplicación (o bien utilizando el método de la molienda). En el segundo caso [10-13], la molienda, se altera sustancialmente la morfología, de modo que gran parte de las partículas, las más grandes, dan lugar a partículas más pequeñas irregulares [14], si bien algunas, las más pequeñas, mantienen su morfología.

La aplicación de estos métodos permite obtener cenizas volantes que muestran reactividades más altas, de modo que suponen un incremento no solamente en las resistencias mecánicas de las mezclas con cemento, sino también un incremento en la tasa de ganancia de resistencia mecánica [15] y un incremento en la durabilidad, por reducción del diámetro medio de poro y del volumen relativo de la porosidad capilar.



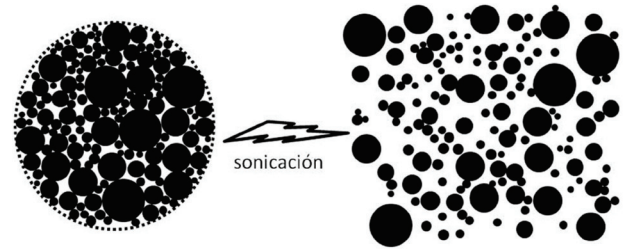
**Figura 2.** Tratamiento sostenible de cenizas volantes

**2.1.2. Las escorias del horno alto:** la aplicación de estos residuos en mezclas con cementos portland tiene más de un siglo de historia, y se ha demostrado que es posible fabricar cemento de características especiales [16] como es la durabilidad frente a sulfatos (cementos hidráulicos con escorias). La producción de este tipo de escorias está viéndose limitada por el hecho de que la industria del reciclado del acero (hornos de arco eléctrico) está

potenciada en países desarrollados, haciendo más sostenible la producción de nuevo acero [17]. Sin embargo, en muchos casos, la potencial reactividad de las escorias de arco eléctrico (Electric arc furnace EAF slag) y otros procesos de conversión, no se puede aprovechar por el elevado grado de cristalinidad de dichas escorias [18, 19]. Se han propuesto alternativas [20] basadas en la fusión y quenching para obtener materiales reactivos, pero debido a las elevadas temperaturas necesarias, no podría considerarse como una transmutación sostenible. De todos modos, la producción de escorias de horno alto en otros países está creciendo, y, de forma análoga a lo comentado para las cenizas volantes, podemos potenciar de forma sostenible su reactividad, por medio de la molienda. En este caso, todas las partículas acaban siendo irregulares, y la demanda de agua en mezclas con cemento suele incrementarse. La eficacia cementante se potencia, y las ganancias en resistencias mecánicas son considerables, de modo que es posible obtener hormigones equivalentes reduciendo la cantidad de cemento desde 350 a menos de 100 Kg/m<sup>3</sup> [21].

**2.1.3. Humo de sílice:** Este residuo se ha convertido, en el devenir del tiempo, en una materia prima para la elaboración de concreto de alto desempeño [22]. El efecto positivo sobre el concreto reside en una elevada reactividad puzolánica (se trata de un material con más de 90% de sílice amorfa) y una finura muy superior al cemento portland. Sin embargo, para facilitar el transporte y su embalaje, se procede a una densificación en la que se aglomeran las partículas micrométricas y submicrométricas en macroagregados, que en ocasiones superan las 100 micras de diámetro.

Se puede “transmutar” este material de una manera sostenible por medio de la desagregación (Figura 3) por ultrasonidos [23]. Ese proceso permite obtener una suspensión (slurry), en la que el diámetro medio real del humo de sílice está por debajo de 10 micras, y en el que más del 50% del volumen de la puzolana está formado por partículas submicrométricas. La conversión de este material permite [24], por una parte, reducir la demanda de aditivos plastificantes en los hormigones, y por otra parte, incrementar la velocidad y grado de extensión de la reacción puzolánica, con el consecuente incremento en resistencias mecánicas y en durabilidad.



**Figura 3.** Tratamiento sostenible de humo de sílice densificado.

## 2.2. Residuos minerales industriales fuera de norma (OSW).

Son muchas y muy variadas las actividades industriales que se llevan a cabo en los diferentes ámbitos, y gran parte de ellas generan residuos en cantidades apreciables. Podemos identificar un conjunto seleccionado de residuos con potencialidad para su uso en la fabricación de concreto, como por ejemplo las escorias procedentes de actividades metalúrgicas (cobre, cinc, plomo, acero, aluminio etc...); residuos sulfatados (yesos) de las plantas de fabricación de fosfatos, boro y flúor; residuos procedentes del ámbito petroquímico (catalizadores, coke de petróleo); y un largo etcétera.

De entre todos estos se han seleccionado como ejemplo los residuos procedentes de las plantas de depuración de aguas (potables o residuales), y el residuo de catalizador de craqueo catalítico FCC.

La depuración de aguas genera unos lodos cuya gestión es complicada, por el gran volumen, por su estado pastoso y porque su composición química puede ser muy variable en función del lugar y del tipo de tratamiento de depuración al que se somete el agua. En estos lodos, además del agua, que es el componente más importante, la materia orgánica supone más del 80% del contenido de sólidos, lo cual puede aprovecharse desde el punto de vista energético. La transmutación sostenible de dichos lodos de depuradora consistirá en el aprovechamiento de esta biomasa, por combustión o por digestión anaerobia (generación de metano).

Por una parte, el lodo, en estado seco, se puede aprovechar como materia prima en la clinkerización para obtención de cemento portland u otros cementos de menor temperatura de cocción [25,26]. Y por otra parte, las cenizas procedentes de la propia incineración de los lodos son susceptibles de ser adicionadas en concreto [27].

Dichas cenizas de lodos de depuradora (CLD) poseen un cierto grado de reactividad puzolánica y pueden ser incorporadas al cemento portland en 10-30% en peso.

El catalizador usado procedente del craqueo catalítico en lecho fluido (Fluid catalytic cracking, FCC) para obtención de naftas, es un material cuya “transmutación” ha permitido desarrollar materiales cementantes de elevadas prestaciones. El proceso ha consistido simplemente en aumentar de forma drástica [28, 29] la finura del residuo, pasando de 70-80 micras de diámetro medio, a 15-20 micras. Con ello, su reactividad y su compatibilidad con el cemento portland se ha incrementado de forma exponencial, de modo que se han obtenido notables mejoras en aspectos mecánicos y reológicos [30-35], y de durabilidad [36,37] de morteros y concretos.

Finalmente, otra de las líneas de especial futuro para todo este tipo de residuos es su aplicación en la fabricación de materiales cementantes activados alcalinamente [38,39]. Se han descrito interesantes ejemplos de diversos tipos de residuos en los que la adición de activadores hidróxido/silicato sódico o potásico ha permitido obtener productos cementantes de buenas prestaciones mecánicas y de durabilidad. Uno de esos ejemplos es la activación de vidrio procedente del tratamiento de residuos de polución atmosférica [40]. Otro ejemplo es la preparación de conglomerantes activados a partir de residuos de catalizador FCC [41], que permite obtener mejores prestaciones que la activación de metakaolín (uno de los materiales que se propuso inicialmente, pero que tiene una componentes negativa en cuanto a emisiones y sostenibilidad, dado que se requieren temperatura altas para la descomposición del caolín y supone el consumo de recursos naturales no renovables).

### 3. RESIDUOS AGRÍCOLAS

La cascararilla de arroz [42] y otros materiales de desecho derivados de la agricultura y el procesamiento de alimentos (agroindustria), tales como los de caña de azúcar [43], el aceite de palma [44], el trigo [45], maíz [46], residuos de aceituna [47] o de la industria agroforestal (por ejemplo, eucalipto [48], o residuos de bambú [49]) se puede transformar en materias primas para la fabricación de cemento y concreto. Estos residuos, con alto contenido de materia orgánica, pueden ser “transmutados” en cenizas, aprovechando su potencia calorífica en procesos de secado y de

calentamiento, como ocurre en el secado del arroz-cáscara o bien la evaporación de agua en la industria azucarera. Las cenizas resultantes contienen un alto contenido de óxidos ácidos, principalmente de dióxido de silicio, que pueden presentar propiedades puzolánicas. La reactividad puzolánica depende en gran medida del área superficial específica, tamaño de partícula y las características mineralógicas de la ceniza.

Los residuos agro-industriales podrían ser, por tanto, valorizados a través de la recuperación de energía, aunque en algunos casos también se puede valorizar desde otros puntos de vista: los nuevos materiales (fibras, partículas ligeras) y los ámbitos agronómicos (compost, abonos) y pecuarios (camas en avicultura). La recuperación de energía de este tipo de residuos se puede considerar una “transmutación” sostenible porque el CO<sub>2</sub> de la combustión es de procedencia natural (no fósil); además, genera otro tipo de residuos (cenizas), que pueden tener también una segunda valorización. Esta segunda etapa puede conducir a la obtención de materiales con alto valor añadido: materiales puzolánicos para la fabricación de cemento y concreto (Figura 4). Para optimizar este proceso, es necesario considerar el análisis de las propiedades relevantes [50].

#### 3.1. Desde el punto de vista químico.

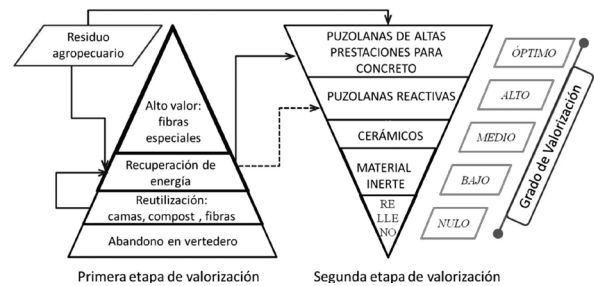


Figura 4. Pirámides de valorización para residuos agrícolas y agropecuarios

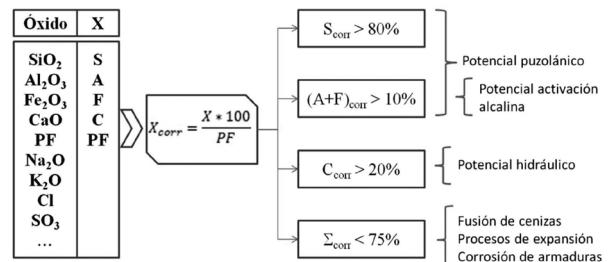


Figura 5. Aspectos químicos relevantes para la evaluación de cenizas de residuos agrícolas

El principal componente inorgánico de ceniza de cáscara de arroz es el dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), que se encuentra comúnmente en porcentajes cercanos o superiores a 90% [51,52]. La composición química puede orientarnos de forma definitiva para evaluar las posibilidades de valorización (Figura 5). Para evaluar el contenido de  $\text{SiO}_2$  real ( $S_{\text{corr}}$ ) se debe corregir usando el porcentaje de pérdida al fuego o por ignición (PF). El valor de  $S_{\text{corr}}$  nos muestra el potencial puzolánico. Análogamente, el valor corregido de  $\text{CaO}$  ( $C_{\text{corr}}$ ) nos muestra el potencial hidráulico.

Otras cenizas tienen composiciones diferentes, con valores de  $S_{\text{corr}}$  que están por debajo de 80%. Los valores de la cantidad corregida de óxidos de aluminio y hierro,  $(A+F)_{\text{corr}}$ , son muy diferentes para cada muestra. Para las cenizas con valores de  $(A+F)_{\text{corr}}$  por encima del 10%, la activación alcalina puede ser una interesante opción. Por último, la suma de los valores corregidos de los óxidos de silicio, aluminio, hierro y calcio ( $\Sigma_{\text{corr}}$ ) también ofrece información importante: en algunos casos, este parámetro es muy bajo, lo cual es indicativo de que otros componentes (como el potasio, azufre y fósforo) son parte de la composición. Todo ello debe tenerse en cuenta: en primer lugar, porque promueve la fusión de las cenizas; en segundo lugar, porque pueden interactuar negativamente (procesos de expansión) con cemento Pórtland y agregados (formación de etringita, reacción álcali-agregado); y en tercer lugar, porque pueden existir sustancias que favorezcan la corrosión de las armaduras (cloruros).

### 3.2. Desde el punto de vista físico.

La reacción puzolánica es un fenómeno que implica reacciones superficiales entre la portlandita y la puzolana. Por consiguiente, es un fenómeno de superficie y, obviamente, las influencias del tamaño de partícula sobre la reactividad puzolánica final son importantes. Cuando se quema la cáscara de arroz a baja temperatura (inferior a  $700^\circ\text{C}$ ), se forma un esqueleto de material inorgánico, que reproduce la estructura celular original. Esta estructura es muy porosa y la superficie específica medida por adsorción de nitrógeno normalmente supera  $20 \text{ m}^2/\text{g}$ . Sin embargo, la alta superficie específica no es suficiente para asegurar una buena reactividad en la mezcla de cemento portland: siempre se recomienda moler muestras para la obtención de un diámetro medio de partícula inferior

a 20 micras, que es lo que podemos considerar otra transmutación sostenible.

### 3.3. Desde el punto de vista mineralógico.

Es bien sabido que la reactividad puzolánica de la fracción ácida de la puzolana se atribuye a la presencia de material amorfo. Este material amorfo tiene una energía residual que le permite combinar con la portlandita. Pero por otro lado, debido a la inestabilidad de material amorfo, dependiendo de condiciones de combustión, se puede activar durante este proceso la parcial o completa cristalización del material amorfo. El aumento de la temperatura de combustión no sólo reduce la superficie específica, sino que también reduce la fracción amorfa. Ese fenómeno se ha estudiado en profundidad para la ceniza de cáscara de arroz [53]. Con respecto a otros residuos agroindustriales, debemos señalar, en primer lugar, que se ha detectado contaminaciones de suelo [54], o, en segundo lugar, que las cenizas se han obtenido en procesos de co-combustión (mezclas de biomasa y carbón): en esos casos, es mucho más difícil valorar los contenidos de material reactivo en las cenizas, y por ello deben extremarse las precauciones a la hora de identificar procesos de cristalización solamente por medio de las caracterizaciones mineralógicas [55].

## 4. RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)

La actividad de la construcción/demolición y toda la industria asociada de cerámicos y prefabricados de concreto es la que mayor volumen de residuos genera, por lo que es muy adecuado hacer un tratamiento específico, diferenciado de los residuos industriales.

En la actualidad, el concreto es el material artificial más usado a nivel mundial, por encima de acero, plásticos, etc... Por ello, la generación de residuos relativos al concreto es de primer nivel en cuanto a cantidad, si bien no suelen llevar aparejados problemas medioambientales de toxicidad. Asimismo, y dado que la construcción con concreto es una práctica habitual desde hace decenas de años, se ha incrementado una actividad productiva de residuos como consecuencia de las rehabilitaciones y demoliciones de edificios que han superado o cambiado su función o bien que se han deteriorado con el paso del tiempo [56-58].

El residuo de concreto está probablemente en la escala más baja en cuanto a posibilidades de elevada valorización, puesto que requiere de la “deconstrucción” de la estructura del composite, recuperando la fracción de árido y la matriz cementante. Dicha matriz cementante tiene limitadas expectativas de valorización, puesto que el cemento y las posibles adiciones minerales presentes han desarrollado la mayor parte de su potencialidad hidráulica y/o puzolánica.

En cuanto la fracción de árido, se han desarrollado procedimientos sostenibles [56] para su recuperación, en especial de los áridos de mayor tamaño (por encima de los 4mm de diámetro). Se ha investigado todavía poco sobre la fracción más fina, más rica en mortero (áridos finos y cemento hidratado) pero que supone una proporción muy significativa en el conjunto.

El lavado de los áridos procedentes del machaqueo de residuos de construcción permite mejorar las propiedades de dichos áridos. El proceso genera un residuo de tipo limo, el cual se puede aprovechar [59] para la fabricación de geopolímeros de prestaciones muy aceptables. Esa nueva valorización significa una mayor proporción de reutilización de los RCD. En otros casos [60] se han obtenido excelentes resultados con mezclas al 50% de residuos de concreto y cenizas volantes.

En ese sentido, es interesante la activación alcalina de las fases hidratadas del cemento. Una de las propuestas más recientes y que supone una transmutación que implica la fijación de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es la reportada por Payá et al [61]. En ese caso, se estudia las posibilidades de uso del cemento hidratado (y por tanto, que forma parte de los RCD) que ha sido sometido a carbonatación. En dicha carbonatación, se usa  $\text{CO}_2$  para transformar los diferentes hidratos:

La cantidad de carbonato cálcico producida reveló que una parte importante de los hidratos CSH y CAH se han transformado, liberando gel amorfo de sílice y de alúmina.

El material “transmutado”, de forma sostenible, con una consecuente fijación de  $\text{CO}_2$ , se puede usar como materia prima para fabricación de conglomerantes de activación alcalina, por medio de la adición de silicato/hidróxido sódico en disolución. De esa forma se han

obtenido morteros con resistencias mecánicas del orden de 14MPa, por medio de curados a 65°C durante 3 días. Se trataría de un conglomerante con  $\text{CO}_2$  negativo ( $\text{CO}_2$ -negative binder).

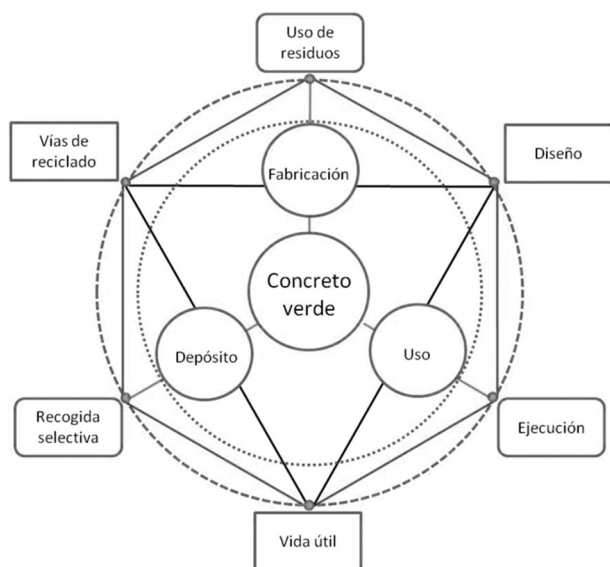
Uno de los aspectos que se está valorando en el análisis del ciclo de vida (LCA) del concreto, incluyendo no solamente la primera etapa de vida (fabricación y servicio), sino también la segunda (demolición y almacenamiento), es precisamente la capacidad del cemento hidratado en carbonatarse [62]. Dicha carbonatación contribuye escasamente durante la vida útil de la estructura, pero puede ser muy significativa en la etapa de gestión y reutilización del concreto de demolición.

De forma paralela, debemos considerar aquellos RCD ricos en cerámicos (ladrillos, tejas, bovedillas, porcelánicos sanitarios, gres, etc...) que también se pueden valorizar después de un acondicionamiento de molienda previa. Con esta transformación, sencilla y de bajo impacto, se pueden elaborar materiales susceptibles de ser adicionados a cemento portland [63,64] o para la clinkerización [65]. Sin embargo, parece que el mayor interés, por su rendimiento, está orientado hacia la fabricación de conglomerantes activados alcalinamente [66,67], en donde se han alcanzado resistencias mecánicas a compresión superiores a 40 MPa usando residuos de ladrillo cocido a baja temperatura y de gres porcelánico de alta temperatura.

## CONCLUSIONES

Se han desarrollado muchas opciones para que, de una forma sostenible, con bajo impacto y consumo de energía y materias primas, se puedan aplicar diversos tipos de residuos en la fabricación de concreto. En todos estos procesos, la mejora, la “transmutación”, está basada en el incremento en reactividad (aumento de superficie específica y de fracción amorfa) o bien en el diseño de nuevos conglomerantes (conglomerantes activados alcalinamente). El desarrollo e implementación de estos procesos permitirá ofrecer al mercado alternativas al cemento portland convencional, en las que la contribución a las emisiones de  $\text{CO}_2$  sea verdaderamente reducida. Todo ello formaría una parte importante del ámbito del “Concreto Verde” (Green Concrete) [68].

La consecución de un concreto más verde supone trabajar en los tres puntos básicos que son la fabricación, el uso y, por supuesto, el depósito final (Figura 6). En la fabricación, interviene de forma decisiva la reutilización de residuos, parte de ellos valorizados de forma sostenible a través de diversas vías de reciclado. Asimismo, existen otros aspectos a tener en cuenta, como son el uso y el depósito final, en los que intervienen el diseño, la ejecución de la obra, la vida útil y la recogida selectiva.



**Figura 6.** El Concreto Verde: puntos básicos y relaciones.

## REFERENCIAS

- [1] Brundlandt, G. H., *Our Common Future*, World Commission on Environment and Development. Oxford University Press, 1987.
- [2] Wesche, K., *Fly ash in concrete: properties and performance*. Report of Technical Committee 67-FAB Use of Fly Ash in Building, RILEM Report 7. Chapman & Hall, London, 1990.
- [3] Boden, T. A., G. Marland, G., Andres, R. J. *Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO<sub>2</sub> Emissions*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. 2010. doi 10.3334/CDIAC/00001\_V2010
- [4] Quadrelli, R., Peterson, S., *The energy-climate challenge: Recent trends in CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion*. *Energy Policy* 35, pp. 5938–5952, 2007.
- [5] Dhakal, S., *Urban energy use and carbon emissions from cities in China and policy implications*. *Energy Policy*, 37, pp. 4208–4219, 2009.
- [6] Payá, J., Monzó, J., Peris Mora, E., Borrachero, M. V., Pinillos, C., Tercero, R., *Early-Strength Development of Portland Cement Mortars Containing Air-Classified Fly Ashes*. *Cement and Concrete Research*, 25, pp. 449-456, 1995.
- [7] Peris Mora, E., Payá, J., Monzó, J., *Influence of Different Sized Fractions of a Fly Ash on Workability of Mortars*. *Cement and Concrete Research*, 23, pp. 917-924, 1993.
- [8] Obla, K. H., Hill, R. L. Thomas, M. D. A., Shashiprakash, S.G., Perebatova, O., *Properties of concrete containing ultra-fine fly ash*. *ACI Materials Journal*, 100, pp. 426-433, 2003.
- [9] Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S., SIRIVIVATNANON, V. *Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar*. *Cement and Concrete Research*, 34, pp. 1087-1092, 2004.
- [10] Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M.V., PERIS-MORA, E.. *Mechanical Treatment of Fly Ashes. Part I: Physico-Chemical Characterization of Ground Fly Ashes*. *Cement and Concrete Research*, 25, pp.1469-1479, 1995.
- [11] Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M. V., Peris-Mora, E., Amahjour, F., *Mechanical Treatment of Fly ashes. Part IV: Strength development of ground fly ash (GFA)-cement mortars cured at different temperatures..* *Cement and Concrete Research*, 30, pp. 543-552, 2000.
- [12] Felekoglu, B., Turkel, S., Kalyoncu, H., *Optimization of fineness to maximize the strength activity of high-calcium ground fly ash - Portland cement composites*. *Construction and Building Materials*, 23, pp. 2053-2061, 2009.
- [13] Fu, X., Li, Q., Zhai, J., Sheng, G., Li, F. *The physical-chemical characterization of mechanically-treated CFBC fly ash*. *Cement and Concrete Composites*, 30, pp. 220-226, 2008.
- [14] Sinsiri, T., Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., *Influence of fly ash fineness and shape on the porosity and permeability of blended cement pastes*. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 17, 683-690, 2010.
- [15]. Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M.V., Peris-Mora, E., González-López, E., *Mechanical Treatment of Fly Ashes. Part III: Studies on Strength Development of Ground Fly Ashes (GFA)-Cement Mortars*. *Cement and Concrete Research*, 27, pp. 1365-1377, 1997.

- [16] Siddique, R., Khan, M.J., Supplementary cementing materials. Springer Verlag, Berlin, 2011.
- [17] Geiseler, J., Use of steelworks slag in Europe. *Waste Management*, 16, pp. 59–63, 1996.
- [18] Manso, J.M., Polanco, J. A., Losañez, M., Javier, J., González, J. J., Durability of concrete made with EAF slag as aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 28, pp. 528–534, 2006.
- [19] Frías, M., Sánchez De Rojas, M. I., Chemical assessment of the electric arc furnace slag as construction material: Expansive compounds. *Cement and Concrete Research*, 34, pp. 1881–1888, 2004.
- [20] Luckman, L., Vitta, S., Venkateswaran, D., Cementitious and pozzolanic behavior of electric arc furnace steel slags. *Cement and Concrete Research*, 39, pp. 102–109, 2009.
- [21] Ordóñez, L. M., Aliques, J., García-Sanfélix, S., Actividad hidráulica de escoria granulada de altos hornos ultrafina para el desarrollo de materiales de construcción de bajo impacto medioambiental. II Simposio Aprovechamiento de residuos agro-industriales como fuente sostenible de materiales de construcción, Valencia (Spain), 2010.
- [22] D. D. L. Chung. Review: Improving cement-based materials by using silica fume *Journal of Materials Science*, 37, pp. 673-682, 2002.
- [23] Martínez, D., Payá, J., Monzó, J., BORRACHERO, M. V., Granulometric activation of densified silica fume (CSF) by sonication. *Advances in Cement Research*, 20, pp. 129-135, 2008.
- [24] D. Martínez-Velandia, D., Payá, J., Monzó, J., M. Borrachero, M.V., Effect of sonication on the reactivity of silica fume in Portland cement mortars. *Advances in Cement Research*, 23, pp. 23-31, 2011.
- [25] Husillos, N., Granados, R.J., Blanco-Varela, M.T., Cortina, J. L., Martínez-Ramírez, S., ET AL. Evaluation of a lime-mediated sewage sludge stabilisation process. Product characterisation and technological validation for its use in the cement industry. *Waste Management*, 32, 550-560, 2012.
- [26] Husillos, N., Valorización de residuos de estaciones de tratamiento de agua potable y residual en la industria del cemento [PhD Thesis]. Universidad Autónoma de Madrid (Spain) 2012.
- [27] Garcés, P., Pérez-Carrión, M., García-Alcofel, E., Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M.V., Mechanical and physical properties of cement blended with sewage sludge ash. *Waste Management*, 28, pp. 2495-2502, 2008.
- [28] Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M. V., Fluid Catalytic Cracking Catalyst residue (FC3R): an excellent mineral by-product for improving early-strength development of cement mixtures. *Cement and Concrete Research*, 29, pp. 1773-1779, 1999.
- [29] Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M. V., Velázquez, S., Evaluation of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R). Thermogravimetric analysis studies on FC3R- Portland cement pastes *Cement and Concrete Research*, 33, pp. 603-609, 2003.
- [30] Chen, H., Tseng, Y., Hsu, K., Spent FCC catalyst as a pozzolanic material for high-performance mortars. *Cement and Concrete Composites*, 26, pp. 657-664, 2004.
- [31] García De Lomas, M., Sánchez De Rojas, M. I., Frías, M., Pozzolanic reaction of a spent fluid catalytic cracking catalyst in FCC-cement mortars. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 90, pp. 443-447, 2007.
- [32] Torres, J., Arley, E., Silva, A., Evaluación de la actividad puzolánica de un residuo de la industria del petróleo. *Dyna*, 76, pp. 49-53, 2009.
- [33] Barbara Pacewska, B., Wilińska, I., Bukowska, M., Calorimetric investigations of the influence of waste aluminosilicate on the hydration of different cements. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 97, pp. 61-66, 2009.
- [34] Payá, J., Borrachero, M. V., Monzó, J., Soriano, L., Estudio del comportamiento de diversos residuos de catalizadores de craqueo catalítico (FCC) en cemento Portland. *Materiales de Construcción*, 59, pp. 39-54, 2009.
- [35] Zornoza, E., Garcés, P., Monzó, J., Borrachero, M. V., Payá, J., Compatibility of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) with various types of cements. *Advances in Cement Research*, 19, pp. 117-124, 2007.
- [36] Zornoza, E., Garcés, P., Payá, J., Corrosion rate of steel embedded in blended Portland and fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) cement mortars. *Materiales de Construcción*, 58, pp. 27-43, 2008.
- [37] Zornoza, E., Garcés, P., Payá, J., Climent, M. A., Improvement of the chloride ingress resistance of OPC mortars by using spent cracking catalyst. *Cement and Concrete Research*, 39, pp. 126-139, 2009.



- [38] Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., Jalali, S., Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture. *Construction and Building Materials*, 22, pp. 1315-1322, 2008.
- [39] Juenger, M.C.G., Winnefeld, F., Provis, J. L., IDEKER, J. H. Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, 41, pp. 1232-1243, 2011.
- [40] Kourtis, I., Amurtha Rani, D., Boccaccini, A.R., Cheeseman, C.R., Production of geopolymers using glass produced from DC plasma treatment of air pollution control (APC) residues. *Journal of Hazardous Materials*, 176, 704-709, 2010.
- [41] Tashima, M. M., Akasaki, J. L., Castaldelli, V. N., Soriano, L., Monzó, J., Payá, J., Borrachero, M. V., New geopolymeric binder based on fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC). *Materials Letters*, 80, pp. 50-52, 2012.
- [42] Cordeiro, G. C., Toledo, R. D., FAIRBAIRN, E. M. R.. Use of ultrafine rice husk ash with high-carbon content as pozzolan in high performance concrete. *Materials and Structures* 42, pp. 983-992, 2009.
- [43] Morales, E. V., Villar-Cociña, E., Frías, M., Santos, S. F., Savastano, JR. H., Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane waste ashes (SCWA): Influence in the pozzolanic activation. *Cement and Concrete Composites*, 31, pp. 22-28, 2009.
- [44] Tangchirapat, W., Saeting, T., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A., Use of waste ash from palm oil industry in concrete. *Waste Management*, 27, pp. 81-88, 2007.
- [45] Al-Akhras, N.M., Abu-Alfoul, B.A., Effect of wheat straw ash on mechanical properties of autoclaved mortar. *Cement and Concrete Research*, 32, pp. 859-863, 2002.
- [46] Adesanya, D.A., Raheem, A.A. Development of corn cob ash blended cement. *Construction and Building Materials*, 23, pp. 347-352, 2009.
- [47] Al-Akhras, N.M., Al-Akhras, K. M., Attom, M., Performance of olive waste ash concrete exposed to elevated temperatures F. *Fire Safety Journal*, 44, pp. 370-375, 2009.
- [48] Rajamma. R., Ball, R.J., Tarelho, L.A.C., Allen, G.C., Labrincha, J.A., Ferreira, V.M., Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials. *Journal of Hazardous Materials*, 172, pp. 1049-1060, 2009.
- [49] Singh, N.B., Das, S.S., Singh, N.P., Dwivedi, V.N., Hydration of bamboo leaf ash blended Portland cement. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 14, pp. 69-76, 2007.
- [50] Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M. V., Outstanding aspects on the use of rice husk ash and similar agrowastes in the preparation of binders. I Pro-Africa conference: Non conventional building materials based on agroindustrial wastes, Pirassununga, Sao Paulo, Brasil, 2010.
- [51] Ordoñez, L.M., Payá, J., Borrachero, M.V., Monzó, J., Valorización de la ceniza de cáscara de arroz como material de construcción: condiciones de incineración y molienda. II Jornadas de Investigación en Construcción, Madrid (Spain), 2008.
- [52] Tashima, M.M., Fioriti, C. F., Akasaki, J. L., Payá, J., Sousa, L. C., Pinheiro Melges, J. L., High reactive rice husk ash (RHA): production method and pozzolanic reactivity. *Ambiente Construído*, 12, pp. 151-163, 2012.
- [53] Ordoñez, L. M., Reutilización de la ceniza de cáscara de arroz como material de construcción: Valorización y optimización de sus propiedades puzolánicas [PhD Thesis] Universidad Politécnica de Valencia, 2007.
- [54] Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M.V., Díaz-Pinzón, L., Ordóñez, L. M., 2002. Sugar-cane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 77, pp. 321-325, 2002.
- [55] Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S., Jaturapitakkul, C., Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash. *Construction and Building Materials*, 21, pp. 1492-1499, 2007.
- [56] A review on the viable technology for construction waste recycling. Tam, V. W. Y., Tam, C. M. *Resources, Conservation and Recycling*, 47, 209-221, 2006.
- [57] Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., Barra, M., Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37, pp. 735-742, 2007.
- [58] Rao, A., Jha, K. N., Misra, S., Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 50, pp. 71-81, 2007.
- [59] Lampris, C., Lupo, R., Cheeseman, C.R., Geopolymerisation of silt generated from construction and

demolition waste washing plants. *Waste Management*, 29, pp. 368-373, 2009.

[60] Ahmari, S., Ren, X., Toufigh, V., Zhang, L., Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash. *Construction and Building Materials*, 35, pp. 718–729, 2012.

[61] Payá, J., Borrachero, M. V., Monzó, J., Soriano, L., Tashima, M. M., A new geopolymeric binder from hydrated-carbonated cement. *Materials Letters*, 74, pp. 223-225, 2012.

[62] Collins, F., Inclusion of carbonation during the life cycle of built and recycled concrete: influence on their carbon footprint. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 15, pp. 549–556, 2010.

[63] Pacheco-Torgal, F., Jalali, S., Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and Building Materials*, 24, pp. 832–838, 2010.

[64] Frías, M., Rodríguez, O., Vegas, I., Vigil, R., Properties of Calcined Clay Waste and its Influence on Blended Cement

Behavior. *Journal of the American Ceramic Society*, 91, pp. 1226-1230, 2008.

[65] Puertas, F., García-Díaz, I., Palacios, M., Gazulla, M. F., Gómez, M. P., Orduña, M., Clinkers and cements obtained from raw mix containing ceramic waste as a prime material. Characterization, hydration and leaching studies. *Cement and Concrete Composites*, 32, pp. 175-186, 2010.

[66] Puertas, F., Barba, A., Gazulla, M. F., Gómez, G. P., Palacios, M., Martínez-Ramírez, S., Residuos cerámicos para su posible uso como materia prima en la fabricación de clínker de cemento Portland: caracterización y activación alcalina. *Materiales de Construcción*, 56, pp. 73-84, 2006.

[67] Reig, L., Tashima, M. M., Borrachero, M. V., Monzó, J., Payá, J., Nuevas matrices cementantes generadas por activación alcalina de residuos cerámicos. II Simposio Aprovechamiento de Residuos Agro-industriales Como Fuente Sostenible de Materiales de Construcción, Valencia (Spain), 2010.

[68] Phair, J. W., Green chemistry for sustainable cement production and use. *Green Chemistry*, 8, pp. 763-780, 2006.