

El proceso siderúrgico como vía de reciclado de residuos plásticos

Steel making as a way of recycling plastic wastes

M.A. Diez*, R. Álvarez, S. Melendi

Instituto Nacional del Carbón, INCAR-CSIC, Apartado 73, 33080-Oviedo.

*E-mail autor: madiez@incarcsic.es

Abstract

The development of new recycling ways to allow the recovery of plastics from municipal wastes is of great interest in order to keep as many options open, especially when the co-processing with raw materials can be performed in consolidated industrial processes. In this context, integrated steel plants can be considered as an option for those wastes with technical limitations for conventional mechanical recycling. The combination of the blast furnace route and coke plant in the steel industry provide a way to expand feedstock recycling with several environmental benefits such as saving fossil fuels, reducing landfill of the wastes and reducing solid particles, SO₂ and CO₂ emissions. This paper is an attempt to compile some relevant advances in these recycling routes.

Resumen

El desarrollo de nuevas vías de reciclado que permitan la valorización de los plásticos procedentes de residuos urbanos es de gran importancia para buscar una utilización racional de los mismos y mantener el máximo número de opciones abiertas, sobre todo si la ruta de reciclado permite el co-procesado con las materias primas propias de un proceso industrial consolidado. En este sentido, las plantas siderúrgicas integrales pueden considerarse una opción para aquellos residuos plásticos que presentan limitaciones técnicas para su reciclado

por otras vías. La combinación de la ruta del horno alto y la planta de coque en la industria del acero proporciona una vía para incrementar el reciclado de este tipo de residuos que lleva asociados varios beneficios ambientales: un ahorro de combustibles fósiles, una reducción del volumen de plásticos en vertedero y una reducción de emisiones de partículas sólidas, SO₂ y CO₂ en la industria siderúrgica. En este artículo se expone el estado actual de estas dos vías de reciclado.

1. El binomio carbón-coque en la industria del hierro y del acero

El coque metalúrgico (siderúrgico y de fundición), obtenido por tratamiento térmico de carbones coquizables en ausencia de oxígeno a una temperatura entre 1000 y 1300°C, es el material de carbono utilizado en la producción de hierro fundido (arrabio) que, posteriormente, se transforma en distintos tipos de acero. Aproximadamente un 67 % de la producción mundial de acero está basada en la producción de arrabio, mayoritariamente en el horno alto, donde el coque es una materia prima imprescindible que no parece tener alternativa competitiva, ni en el presente ni en un futuro inmediato. Por tanto, su producción debe asegurarse a un coste efectivo, debe ser respetuosa con el medio ambiente y tener un futuro orientado. En la Figura 1 se presenta el consumo de carbón en los dos campos dominantes de utilización, la producción de energía a través de su combustión, contribuyendo

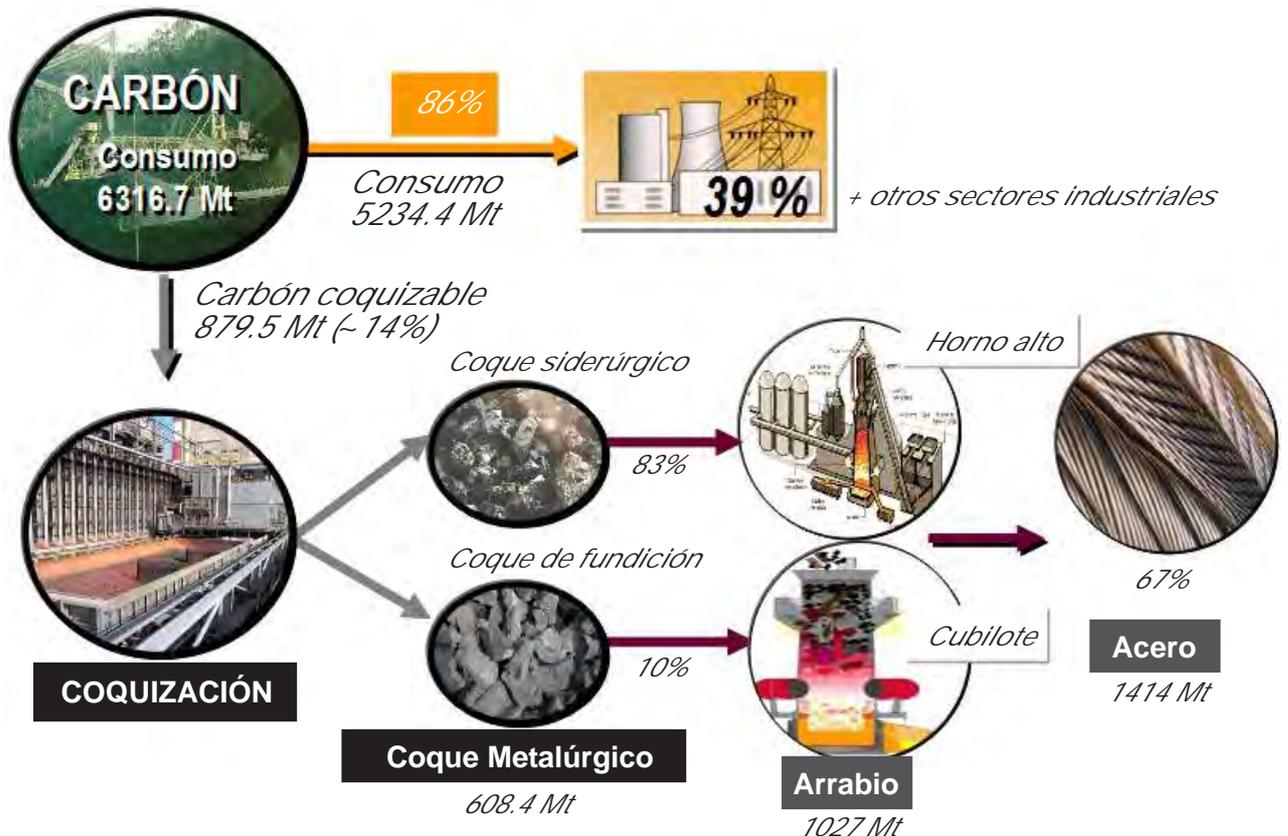


Figura 1. Consumo de carbón y producción de coque, arrabio y acero en 2010.
Figure 1. Coal consumption and production of coke, pig iron and crude steel in 2010.

al 39 % de energía eléctrica generada en el mundo, y la producción de coque destinado a la producción de hierro por las rutas del horno alto y del cubilote [1-3].

Las funciones de este material de carbono grafitizable y poroso utilizado en el horno alto (coque siderúrgico) son: combustible, agente reductor, soporte estructural y permeable de la carga del mineral de hierro y carburante del arrabio (Figura 2). En los últimos años, las dos primeras funciones del coque han ido perdiendo importancia con la inyección por las toberas de otras fuentes de carbono, como alquitrán, gas natural, aceite y, sobre todo, carbón pulverizado, que tienen la dualidad de actuar como combustibles y precursores de los gases reductores de los óxidos de hierro. A estas fuentes de carbono se han sumado, recientemente, los residuos plásticos [5-11] y la biomasa [10, 12].

La inyección de otros combustibles ha sido uno de los avances tecnológicos más importantes en el horno alto (HA) en la década de los 90. Esta tecnología consiste en soplar por las toberas junto con el viento caliente, una fuente de carbono e hidrógeno auxiliar, permitiendo disminuir la cantidad de coque que se necesita introducir por el tragante del horno, con el consiguiente aumento de la vida útil de las baterías de coque, ahorro en carbón coquizable y reducción de los costes de la producción de arrabio; ya que el coque supone casi un 70 % de los costes totales de las materias primas utilizadas en el horno alto. Pero, además de estos beneficios, la inyección implica una serie de ventajas operacionales, como permitir el ajuste de la temperatura de llama, aumentar el contenido de gases reductores en CO e hidrógeno y mejorar la regulación térmica. Para un horno alto convencional sin inyección, el consumo de coque es aproximadamente 450-470 kg por tonelada de arrabio producido. Con la implantación progresiva de la tecnología de inyección de carbón pulverizado (PCI), se pueden llegar a inyectar 190-220 kg de carbón pulverizado (junto con aire enriquecido en oxígeno para los niveles más altos), disminuyendo el consumo específico de coque en el HA hasta los 300 kg por tonelada de arrabio. De forma general, la sustitución coque:carbón se sitúa en 0.9:1 y, además, implica una disminución de consumo de carbón coquizable de 1.4 t por cada tonelada de carbón PCI utilizada.

Aunque el coque puede ser reemplazado parcialmente por otros combustibles y agentes reductores, como material de carbono es, hoy en día, imprescindible por razones físicas para el funcionamiento del horno alto, ya que es el único material en la parte baja del horno que puede soportar la carga sólida (mineral de hierro, pellets, sinter y coque) que en su descenso se van transformando y, al mismo tiempo, actúa como "separador" permeable facilitando la salida de la corriente de gases hacia la parte alta del horno y el colado del hierro en estado líquido hacia la zona del crisol (Figura 2). Por tanto, en un futuro a corto-medio plazo, el binomio carbón-coque como materia prima continuará siendo indispensable para la producción de acero, ya que la fabricación del mismo basada en la ruta del horno alto-convertidor con oxígeno no parece tener una alternativa competitiva. En esta situación, en la que menos cantidad de coque es cargada en el horno, es necesario que éste posea una resistencia mecánica alta en las condiciones extremas a las que estará expuesto por la acción continua de los gases oxidantes que se desprenden en la zona de reacción y que ascienden por el horno hasta salir por su parte superior. De todas sus propiedades, la reactividad en CO₂ a 1100 °C (CRI) y la resistencia mecánica después de la reacción con CO₂ (CSR) son los criterios de calidad más importantes a la hora de seleccionar un coque para un tamaño y unas condiciones de funcionamiento de un horno alto. Se requiere que el coque tenga una reactividad moderada y, a la vez, sea suficientemente resistente para llegar a las zonas inferiores con una degradación mínima en su tamaño.

El coque no se produce a partir de un único tipo de carbón, sino que la industria utiliza mezclas complejas que incluyen varios carbones coquizables (de 4 a 12 carbones) que, individualmente, dan coques con un amplio abanico de valores de CRI/CSR. Es por esta razón que el desarrollo de modelos de predicción de estos parámetros a partir de las características de los carbones que forman la mezcla es una prioridad en la preparación de mezclas industriales para garantizar la calidad del coque y la productividad del horno alto; así como la utilización de instalaciones específicas, como los hornos de pared móvil a escalas semipiloto y piloto, que simulan los cambios físicos y químicos que experimenta un carbón o mezcla de carbones en su transformación a coque

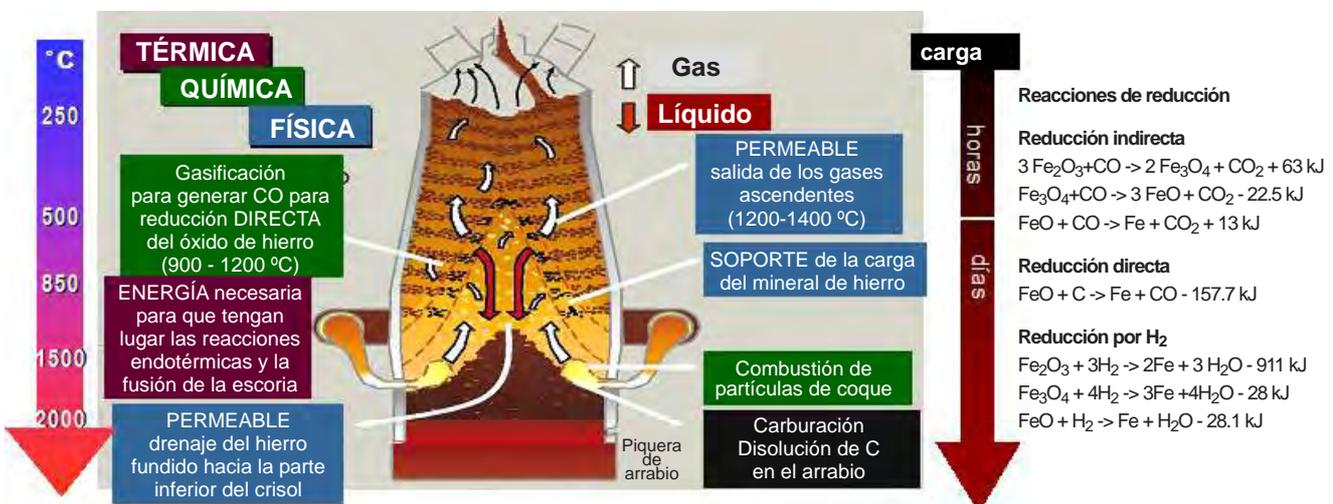


Figura 2. Funciones del coque siderúrgico en un horno alto (térmica, química y física). Adaptada de Lünge [4].
 Figure 2. Roles of the coke in a blast furnace (thermal, chemical and physical). Adapted from Lünge [4].

en las condiciones de un horno industrial, obteniendo suficiente cantidad de coque para evaluar su calidad por los métodos normalizados y utilizados por la industria del sector [13].

En los últimos años, la industria del acero ha adoptado modificaciones en el proceso siderúrgico para mejorar su eficacia y reducir las emisiones, principalmente, de los gases de efecto invernadero, situándola en una posición muy próxima a alcanzar el límite de desarrollo y de reducción de emisiones de CO₂, ya que el consumo de carbono con los niveles de PCI más altos están próximos al valor teórico para un horno alto "ideal" [4]. A corto-medio plazo, la industria siderúrgica continuará enfrentándose a nuevos retos en el aprovechamiento máximo de las materias primas, en el ahorro energético, en la minimización de residuos y productos secundarios y en la obtención de sus productos con menos impacto ambiental, principalmente, emisiones de CO₂. Algunas plantas todavía pueden ser capaces de reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero, pero reducciones significativas requieren la búsqueda de soluciones innovadoras, como las ya iniciadas: utilización de agentes reductores de C-neutro [10,12]; y nuevos conceptos de horno alto, *the Low-Temperature Compact Blast Furnace*, -opción investigada por la industria japonesa- [14], o en ausencia de nitrógeno -*the N₂-free Blast Furnace*, opción que la industria europea inicia en el proyecto Ultra-Low CO₂ Steelmaking ULCOS-, coordinado por Arcelor-Mittal [15]. En cualquiera de estas opciones se requerirá cambios en la calidad del coque, en los carbones utilizados en su producción, en los aditivos¹ que pueden incorporarse a las mezclas industriales de carbones; además de adaptarse a la disponibilidad de carbones coquizables en la situación actual del mercado internacional.

La línea de investigación desarrollada en el INCAR-CSIC está enfocada a la optimización de mezclas de carbón y de la calidad del coque siderúrgico y, en los últimos años, con un componente medioambiental dirigido hacia la utilización de residuos y subproductos como otras fuentes de carbono en la preparación de las mezclas industriales de carbones. Entre las fuentes de carbono a utilizar se pueden mencionar desde las más tradicionales, -carbones con propiedades no coquizantes (*de bajo y alto rango*), finos de coque, coque de petróleo, alquitrán- hasta las más innovadoras, como residuos de diferente naturaleza, origen y externos al proceso siderúrgico (*plásticos* procedentes de diferentes sectores -agricultura, doméstico, electrónico-, *neumáticos*,...), biomasa procedente de residuos forestales y carbón vegetal (*primeras fuentes energética y siderúrgica de la historia*), pasando por residuos de naturaleza orgánica generados en una planta siderúrgica integral, como por ejemplo, aceites de base petroquímica y sintética, lodos bituminosos generados en la planta de subproductos (separación del alquitrán y depuración del gas). Estos últimos añadidos al carbón de forma directa (sin preparación previa) o en forma de briquetas, pudiendo actuar de ligantes o rellenos en función de su estado físico.

Centrándonos en los residuos plásticos, en el sector siderúrgico es posible combinar la ruta de reciclado basada en la utilización de residuos plásticos como

aditivos en el proceso de coquización con la ruta del horno alto, que utiliza residuos plásticos como agentes reductores. Esta combinación permitiría un reciclado integrado (horno de coque-horno alto), con una reducción mayor de la dependencia de materias primas o combustibles de origen fósil junto con una reducción de emisiones de CO₂ a corto plazo, ya que su implantación industrial no requiere o requiere algunas modificaciones no sustanciales en las infraestructuras actuales.

2. Reciclado de residuos plásticos

El crecimiento progresivo que experimenta, tanto el consumo como la producción de plásticos (230 Mt en 2009), viene acompañado de un aumento importante en el volumen de residuos de este tipo de materiales, ya que en algún momento, todos alcanzan el final de su vida útil y es entonces cuando resulta necesario gestionar el final de su ciclo de vida. Los plásticos destinados a envases y embalajes, principalmente termoplásticos, son los que tienen una vida útil muy corta, y pasan a formar parte de los residuos municipales representando entre un 10 y un 12 % en peso y, debido a su baja densidad, más de un 20 % en volumen de los residuos urbanos. Este tipo de materiales son todavía de buena calidad, ya que no han sufrido una gran degradación durante su uso y, por tanto, conservan su estructura química y su potencial como materia prima y recurso energético. Por estos motivos, es necesario recuperar una parte del valor invertido en su proceso de elaboración. Del total de residuos plásticos en Europa, alrededor de 25 Mt son generados de un consumo de 48.5 Mt/año, y aproximadamente la mitad acaban en vertedero, el resto se recuperan por alguna de las tres opciones disponibles: reciclado mecánico (~20 %), valorización energética (~30 %) y reciclado químico, incluyendo el reciclado a materia prima (< 2 %) [16]. El reciclado mecánico se considera la mejor opción para los termoplásticos contenidos en residuos urbanos (polietileno de alta y baja densidad -HDPE y LDPE-, polipropileno -PP-, poliestireno -PS-, tereftalato de polietileno -PET- y cloruro de polivinilo -PVC-). Esta ruta de reciclado incluye la separación de cada tipo de plástico, lavado, troceado y extrusión para fabricar granza. Esta opción es válida para termoplásticos y las limitaciones están relacionadas con el grado de degradación, la presencia de contaminantes y el coste de una separación efectiva de cada uno de los termoplásticos.

Las tasas de reciclado varían de un país a otro y, se puede decir que los países del norte de Europa son los que tienen un porcentaje mayor de reciclado, mientras que los países del sur son los que tienen tasas más bajas, especialmente en la recuperación de energía. En España la cantidad de residuos plásticos es aproximadamente de 3 Mt y la tasa total de reciclado del 27 % (815 kt). En la última década, la cantidad de residuos plásticos destinados a su deposición en vertedero ha disminuido alrededor de un 2 % por año, mientras que rutas como el reciclado mecánico y la recuperación de energía han crecido en torno al 10 % [16]. Sin embargo, todavía se está lejos de alcanzar los objetivos fijados en diferentes Directivas Europeas. Es por esta razón que, además de la reducción del volumen de los residuos generados -primera acción en la jerarquía

¹ Se entiende por aditivo, los componentes diferentes al carbón coquizable que entran a formar parte de la mezcla industrial en cantidades < 10 %, con excepción de algunos coques de petróleo que pueden incorporarse en mayor proporción.

de la gestión de residuos- se intensifica la investigación en el desarrollo de nuevas vías para el reciclado de residuos plásticos, que permitan reducir el impacto ambiental y conseguir que el vertedero sea un destino temporal y nunca permanente. Entre las opciones de reciclado, las alternativas en las que estos residuos se pueden incorporar en procesos industriales consolidados (siderurgia, cemento) son las que han tenido una implantación más rápida e implican un co-procesado con las materias primas propias del proceso. Esta opción es muy adecuada para aquellos plásticos mezclados o con algún grado de impureza, en los que el reciclado mecánico está limitado. Los avances científicos y tecnológicos en el reciclado de residuos plásticos han sido recientemente recopilados por varios autores [17,18]. En la Figura 3 se resumen las diferentes opciones de reciclado para los plásticos procedentes de residuos urbanos, así como la más adecuada y las limitaciones en la composición referidas al contenido en PVC.

3. Reciclado de residuos plásticos en el proceso siderúrgico

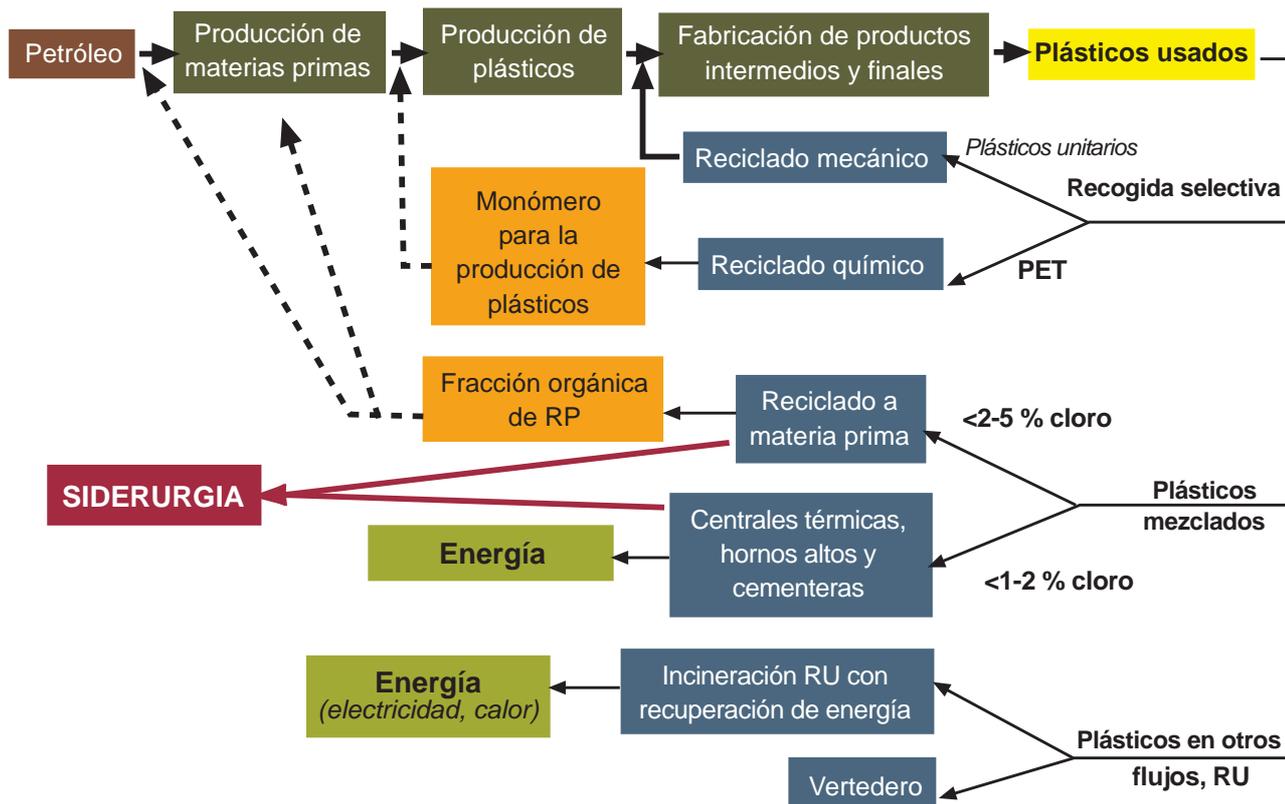
Las dos rutas de reciclado de residuos plásticos en el proceso siderúrgico enmarcadas en el reciclado a materia prima son: agente reductor en el horno alto para la obtención de arrabio y aditivo de mezclas industriales de carbones para la producción de coque. Es preciso destacar que aunque la ruta del horno alto se puede clasificar en la recuperación de energía, el papel de los plásticos como precursores de gases reductores prevalece para su clasificación como materia prima. Ambas rutas de reciclado en el proceso siderúrgico han sido implantadas a escala industrial. No es de extrañar que países como Japón con limitaciones de espacio físico para la construcción de vertederos y dependiente de la importación de

materias primas para la producción de hierro y acero, así como países europeos como Alemania y Austria con tasas muy altas de reciclado mecánico y recuperación de energía sean pioneros en la implantación de esta ruta complementaria de reciclado a materia prima.

3.1 Reciclado de residuos plásticos por la ruta del horno alto

La gasificación de los residuos plásticos en presencia del aire caliente conduce a la obtención de un gas de síntesis, aumentando la cantidad de gases reductores en el horno alto y alcanzando temperaturas superiores a los 2000 °C en esta zona de toberas. Dos son las posibilidades para llevar a cabo el proceso de gasificación de los plásticos: la inyección indirecta, llevando a cabo la gasificación en una etapa previa a la inyección por toberas y alimentando el gas de síntesis junto con una corriente hidrocarbonada; o la inyección directa, utilizando plásticos troceados, aglomerados o pellets con tamaños que pueden variar entre 3 y 10 mm. Los residuos utilizados son una mezcla de plásticos post-consumo que no son aptos para su reciclado mecánico y que precisan un tratamiento previo para ajustar su composición a la exigida por el horno alto, en lo que se refiere al contenido en metales pesados y en PVC, limitado a $\leq 2\%$. Actualmente, la cantidad de residuos plásticos reciclados en el horno alto es muy baja, $< 2\%$ de la cantidad de plásticos reciclados en Europa y $< 3\%$ en Japón.

La investigación sobre la posible utilización de residuos plásticos en la industria del acero se inició en los hornos altos de Stahlwerke Bremen (Alemania) en la década de los 90, sustituyendo parcialmente la inyección por toberas de aceite por residuos plásticos, y llegando a utilizar 70.000 t/año de residuos plásticos multicomponente y aglomerados



Adaptada de A. Tukker (2002), Plastics Waste-Feedstock recycling, chemical recycling and incineration, Rapra Review Report, 13 (4), 122 págs.

Figura 3. Esquema de las rutas potenciales de reciclado de los plásticos procedentes de los residuos urbanos. Adaptada de Tukker [17].
 Figure 3. Summary of the potencial recycling routes of the plastics from municipal wastes. Adapted from Tukker [17].

y con capacidad para aumentar esta tasa de reciclado [5]. La industria japonesa NKK (actualmente, JFE Steel) también inició esta ruta de reciclado y valorización de residuos plásticos en sus instalaciones [6,7,9], utilizando tanto plásticos troceados como granulados de tamaño ≤ 10 mm junto con carbón pulverizado. Las primeras etapas no estuvieron exentas de problemas de operación por el deterioro de la permeabilidad del horno alto, debido a la falta de la eficiencia en condiciones de combustión. Una vez salvadas las primeras dificultades, durante el periodo 2000-2007 la cantidad de plásticos inyectada fue de 480.000 toneladas (60.000 t/año de media). Posteriormente, otras empresas comenzaron con la inyección de residuos plásticos abandonando esta opción por problemas económicos o técnicos.

Recientemente, en Europa, la empresa siderúrgica Voestalpine en Austria comenzó a utilizar residuos plásticos en sus instalaciones, sustituyendo cerca de un 25% del aceite inyectado por residuos plásticos mezclados con mínima preparación [8,11]. Las primeras pruebas industriales fueron llevadas a cabo con 30.000 t de residuos plásticos en forma de pellets, aglomerados y granulados. Los resultados satisfactorios fueron la base para ampliar esta ruta de reciclado de residuos plásticos. Dependiendo de la calidad del arrabio y de las condiciones de operación, la producción de 1 t de arrabio necesita aproximadamente 370 kg de coque junto con 90 kg de aceite pesado, este aceite se puede sustituir parcialmente por unos 70 kg de residuos plásticos. Se estima que será viable sustituir anualmente 150.000 t de aceite pesado por 220.000 t de residuos plásticos.

Además de los beneficios asociados al reciclado de unos plásticos que acabarían en vertedero, el ahorro de fuentes energéticas (petróleo, aceite mineral, carbón), la reducción de emisiones de SO₂, CO₂ y partículas sólidas son algunos de los beneficios ambientales asociados a esta ruta [5-11]. Los avances realizados para esta ruta de reciclado han sido revisados recientemente en una monografía publicada por la Agencia Internacional de la Energía [19]. Paralelamente, a la implantación industrial de esta alternativa para los plásticos, la investigación se enfoca al comportamiento térmico de los diferentes termoplásticos contenidos en residuos urbanos, del automóvil y electrónico, al efecto del tamaño del aglomerado o del pellet y de su densidad, a la modelización en las condiciones de las toberas y a la interacción entre el carbón pulverizado y los residuos plásticos, requiriendo que esta investigación se intensifique en los efectos de las propiedades del carbón, en el comportamiento térmico de los plásticos en las condiciones de operación y en la preparación de los plásticos mezclados a un tamaño inferior para aumentar la eficiencia de combustión/gasificación.

3.2 Reciclado de residuos plásticos por la ruta del proceso de coquización

Esta ruta complementaria de reciclado ha sido implantada industrialmente en las instalaciones de Nippon Steel Corporation (NSC) en 2000, con una capacidad de utilización de residuos plásticos aglomerados de 80.000 t/año en las factorías de Nagoya y Kimitsu, y en 2002 se amplió a las plantas de Yawata y Muroran, con menor capacidad, incrementando el reciclado de residuos hasta 145.000 t/año [20,21]. La cantidad máxima de plásticos que NSC incorpora al carbón es de 1 %

en peso. El objetivo es incrementar esta cantidad, sin deteriorar la calidad del coque producido y sin poner en peligro los hornos de coque [22-24].

Una de las limitaciones en la composición de los residuos plásticos mezclados se refiere a la cantidad de PVC, limitándose a una cantidad máxima 1-2 %, la cual no es exclusiva de esta ruta de reciclado. Este es uno de los motivos, por lo que, en los últimos años, este plástico ha sido progresivamente sustituido en el sector de envases por PET y otros tipos de plásticos, reduciendo así su presencia en los plásticos de residuos urbanos.

Pero esta no es la única condición que se debe de imponer a la composición de los residuos plásticos para que éstos puedan ser adicionados a la mezcla de carbones. La estructura química y el comportamiento térmico de los plásticos son claves en el co-procesado con carbón coquizable, ya que se han observado efectos opuestos sobre el desarrollo de la fluidez del carbón, el empuje ejercido por la carga sobre las paredes del horno (presión de coquización) y la calidad del coque. Así, las poliolefinas -HDPE, LDPE y PP- disminuyen ligeramente la fluidez del carbón, mientras que PS y PET pueden llegar a inhibir esta propiedad de los carbones coquizables que es indispensable para la formación de coque, dando lugar a un carbonizado isótropo [26, 27]. Este efecto negativo para el proceso de coquización es positivo para el co-procesado de PET con carbón o brea en la preparación de carbones activos [28]. Estos dos grupos de plásticos también difieren en el efecto que tienen sobre la presión generada en el proceso. Mientras que las poliolefinas en cantidades del 1 y 2 % aumentan notablemente la presión de coquización, poniendo en peligro el refractario del horno y provocando problemas durante la operación de deshornado; los dos polímeros aromáticos, PET y PS, pueden ayudar a equilibrarla. Ensayos de coquización llevados a cabo en la planta semi-industrial del INCAR mostraron que la adición de un 1 % de LDPE y HDPE a una mezcla de carbones triplican la presión interna del gas (118 mbar vs. 390 mbar). Sin embargo, este tipo de plásticos mejora la calidad del coque, manteniendo la reactividad en CO₂ (CRI) y produciendo coques más resistentes mecánicamente después de la gasificación parcial (CSR) [23,25].

Con el fin de paliar este efecto negativo sobre la presión y poder aumentar la cantidad de plásticos se estudiaron diferentes opciones a las escalas semipiloto y piloto, utilizando hornos de pared móvil disponibles en el INCAR-CSIC, que permiten la medida de la fuerza ejercida sobre la pared del horno y obtener coques con similares características a los producidos industrialmente. Entre las diferentes opciones exploradas para mantener un nivel de adición del 2 % de plásticos, sin tener efectos negativos sobre el proceso y la calidad del coque, se pueden mencionar:

- Control de la densidad de carga. En la Figura 4a se puede observar claramente que una disminución de la densidad de carga disminuye la presión [23] y que al aumentar la cantidad de poliolefinas la presión comienza a disminuir hasta alcanzar valores similares al de la mezcla de carbones. Sin embargo, densidades de carga menores de 765 kg/m³ y cantidades mayores de un 3 % no son viables industrialmente, debido a la pérdida de rendimiento en coque.

- Adición de aceites residuales generados en el

proceso siderúrgico en diferentes partes del proceso. Entre los aceites estudiados, los de base petroquímica son los más efectivos, ya que al estar constituidos por hidrocarburos alifáticos, éstos son compatibles con los productos de descomposición de las poliolefinas y actúan como disolventes de estos polímeros fundidos y facilitan la salida del horno de los hidrocarburos pesados (ceras) formados en la degradación de la cadena polimérica [24].

- Control de la proporción relativa de los dos grupos de plásticos establecidos poliolefinas/polímeros aromáticos-, pudiendo establecer un valor máximo entre 65 y 70 % de poliolefinas para mantener la presión en valores seguros (Figura 4b) sin causar un deterioro significativo de los parámetros de calidad del coque CRI y CSR (Figura 5).

4. Evaluación de las emisiones de CO₂ en el proceso siderúrgico

Los beneficios ambientales en las emisiones de CO₂ en el proceso siderúrgico fueron evaluados para una adición del 2 % de residuos plásticos a las mezclas de carbón para la producción de coque y la inyección de residuos plásticos como combustible y precursores de gases reductores en el horno alto. La incorporación de plásticos como aditivos supone cerca de un 2 % de reducción de CO₂ y la utilización de los plásticos para la producción de gas de síntesis en el horno alto es de un 7 %, alcanzando una reducción global del 9 %, la cual está próxima al 10 % fijado como objetivo para un corto plazo [10].

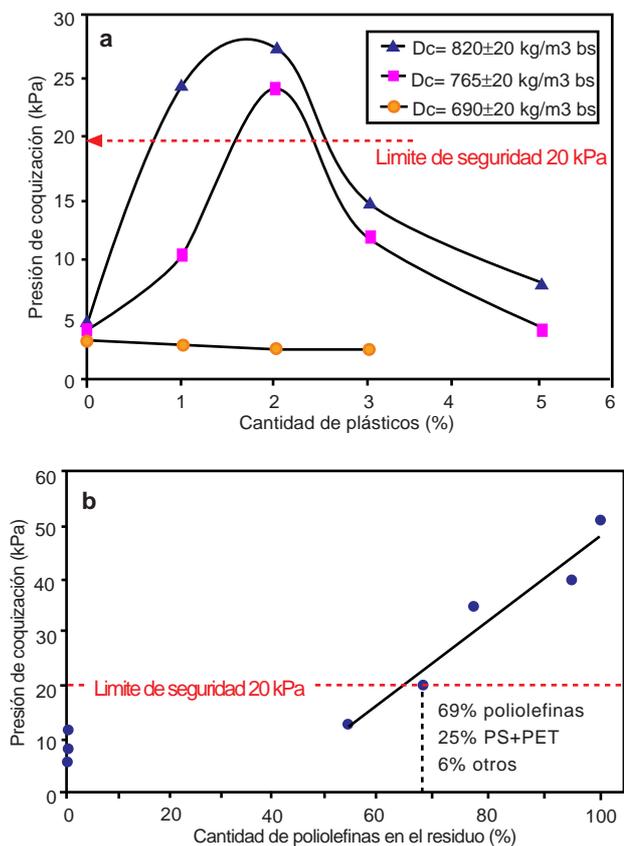


Figura 4. Variación de la presión de coquización con la cantidad de residuos plásticos. (a) coquizaciones a diferentes densidades de carga -Dc- con adiciones de un residuo que contiene 95 % poliolefinas [23]; (b) límite de cantidad de poliolefinas en el residuo para adiciones al 2 % [25].
Figure 4. Variation of the coking pressure with the amount of the polyolefin waste. (a) co-carbonizations at different bulk densities -Dc- and additions of a plastic waste containing 95 % polyolefins [23]; (b) límite de la proporción de poliolefinas en el residuo para blends containing 2 wt% of the waste [25].

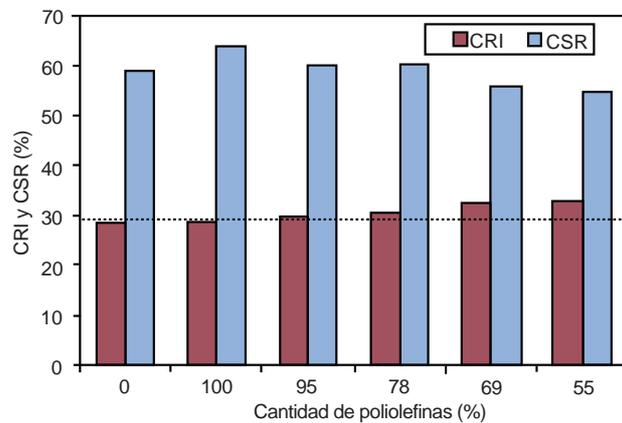


Figura 5. Variación de CRI y CSR con la cantidad de poliolefinas en el residuo para una adición del 2 %.
Figure 5. Variation of CRI and CSR with the amount of the polyolefins in the waste (addition rate of the waste: 2 wt%).

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación concedida para el desarrollo de esta línea de investigación del Ministerio de Ciencia e Innovación (PPQ2001-1877 y CTM2004-03254) y de la Comisión Europea -Programa RFCS- (RFSR-CT-2005-00001); así como el apoyo recibido de las empresas Abornasa, ArcelorMittal, Cicloplast y Repsol.

Referencias

- 1 Lungen HB, Reinke M. Conventional slot oven or "heat recovery" oven?. Typical applications. ECIC 2011, paper 334.
- 2 International Energy Agency (IEA). Coal Information 2011.
- 3 International Iron and Steel Institute (IISI), <http://www.worldsteel.org>.
- 4 Lungen HB. European coke requirements for blast furnaces, Eurocoke Summit 2005, Intertech (formato CD).
- 5 Janz J, Weiss W. Injection of waste plastics into the blast furnace of Stahlwerke Bremen, Proc. 3rd European Cokemaking Congress, CRM-VDEh, 1996; p. 114-119.
- 6 Asanuma M, Ariyama T, Sato M, Murai R, Nonaka T, Okochi I, Tsukiji H, Remoto K. Development of waste plastics injection process in blast furnace, ISIJ International 2000;40:244 251.
- 7 Wakimoto K. A feedstock recycling system of waste plastics in a blast furnace at NKK. Ironmaking Conference Proceedings, Iron and Steel Society, 2001;60:473 483.
- 8 Buchwalder J, Scheidig K, Schingnitz M, Schmöle P. Results and trends on the injection of plastics and ASR into the blast furnace, ISIJ International 2006;46(12):1767-1770.
- 9 Asanuma M, Kajioaka M, Kuwabara M, Fukumoto Y, Terada K. Establishment of advanced recycling technology for waste plastics in blast furnace. JFE Technical Report 2009;13:34-40.
- 10 Hanrot F, Sert D, Delinchant J, Pietruck R, Bürgler

T, Babich A, Fernández M, Álvarez R, Diez MA. CO₂ mitigation for steelmaking using charcoal and plastics wastes as reducing agents and secondary raw materials, RECI-MAT 2009; S05-4. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/18433>.

¹¹PlasticsEurope, Plastics convert iron ore to steel-Feedstock recycling in blast furnaces, 2011. Disponible en: <http://www.plasticseurope.org>.

¹²Buergler T, Schuster S, Nograthig H, Frestl A, Pillmair G, Schuster E. Portfolio of reducing agents to CO₂-lean ironmaking at Voestalpine, Proc. 6th European Coke and Ironmaking Congress, 2011.

¹³Diez MA, Álvarez R, Barriocanal C. Coal for metallurgical coke production predictions of coke quality and future requirements for cokemaking. Int. J. Coal Geology 2002;50:389-412.

¹⁴Nomura S, Ayukawa H, Kitaguchi H, Tahara T, Matsuzaki S, Koizumi S, Ogata Y, Nakayama T, Abe T. Improvement in blast furnace reaction efficiency through the use of highly reactive calcium rich coke, ISIJ International 2005;45:316-324.

¹⁵Birat JP. CO₂-lean steelmaking: ULCOS, other international programs and emerging concepts, Proc. 6th European Coke and Ironmaking Congress, 2011; 1-6.

¹⁶APME, 2010, Asociación Europea de Productores de Plásticos, Plastics-the Facts 2010. An analysis of European plastic production, demand and recovery for 2009. Disponible en: <http://www.plasticseurope.org>.

¹⁷Tukker A., 2002, Plastic waste-Feedstock recycling, chemical recycling and incineration, Rapra Review Reports, 2002;13(4):122 pags.

¹⁸Scheirs J, Kaminsky W (eds). Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics, John Wiley & Sons Ltd., Reino Unido, 785 pags.

¹⁹Carpenter AM. Injection of coal and waste plastics in blast furnaces, IEA Clean Coal Centre, Report CCC/166, 2010, 58 pags.

²⁰Nomura S, Kato K. Basic study on separate charge of coal and waste plastics in coke oven chamber. Fuel 2005;84:429-434.

²¹Nomura S, Kato K. The effect of plastic size on coke quality and coking pressure in the co carbonization of coal/plastic in coke oven. Fuel 2006;85:47-56.

²²Krisham SH, Sharm R, Dash PS, Haldar SK, Biswas B. Use of waste plastics in cokemaking at Tata Steel. Ironmaking and steelmaking 2006;33(4):200-292.

²³Diez MA, Alvarez R, Barriocanal C, Melendi S. Possibilities of the coking process for the recycling of plastic wastes. Eurocoke Summit 2007.

²⁴Diez MA, Alvarez R, Melendi S, Barriocanal C. Feedstock recycling of plastic wastes/oil mixtures in cokemaking. Fuel 2009;88:1937-1944.

²⁵Melendi S, Diez MA, Alvarez R, Barriocanal C. Relevance of the composition of municipal plastic wastes for metallurgical coke production, Fuel 2011;90:1431-1438.

²⁶Diez MA, Barriocanal C, Alvarez R. Plastics wastes as modifiers of the thermoplasticity of coal. Energy & Fuels 2005;19:2304-2316.

²⁷Vivero L, Barriocanal C, Alvarez R, Diez MA. Effects of plastic wastes on coal pyrolysis behaviour and the structure of semicokes. J. Anal. Appl. Pyrolysis 2005;74:327-336.

²⁸Lorenc-Grabowska E, Gryglewicz G, Machnikowski J, Diez MA, Barriocanal C. Activated carbons from coal/pitch and polyethylene terephthalate blends for the removal of phenols from aqueous solutions. Energy & Fuels 2009;23:2675-2683.