

# Tecnología de fabricación de arrabio con inyección de combustibles y otros materiales por toberas en el horno alto<sup>(\*)</sup>

## III parte. Inyección de mezclas combustibles y otros materiales no combustibles

L. García<sup>(\*)</sup>, A. Cores<sup>(\*\*)</sup>, A. Formoso<sup>(\*\*)</sup>, A. Babich<sup>(\*\*\*)</sup> y S. Yaroshevskii<sup>(\*\*\*)</sup>

**Resumen** Se analiza la inyección de materiales no combustibles (minerales de hierro, fundentes, escorias, arenas ilmeníticas), residuos siderúrgicos, plásticos y otros, tanto de forma individual como en mezcla con carbón pulverizado. Según las características de los materiales inyectados se pueden introducir variaciones en la operación del horno alto.

Palabras clave: **Fabricación de arrabio. Finos de óxidos de hierro. Inyección de carbón. Consumo de combustible. Reducción directa e indirecta. Calor específico de combustión.**

## Ironmaking technology with fuels and other materials injection in blast furnace tuyeres

### Part 3. Injection of fuels mixtures and other non fuel materials

**Abstract** The injection of non fuel materials (iron ores, fluxes, slags, ilmenite sands), siderurgical wastes, plastics, and others, both in single form and in mixture with pulverized coal, is analyzed. As the characteristics of the injected materials, variations in the operation of blast furnace can be introduced.

Keywords: **Ironmaking. Fine iron oxide. Coal injection. Combustion rate. Direct and indirect reduction. Specific combustion heat.**

## 1. INYECCIÓN POR TOBERAS DE MATERIALES COMBUSTIBLES Y NO COMBUSTIBLES

Existen y se desarrollan tecnologías de inyección por toberas al crisol del horno alto de combustibles auxiliares y materiales no combustibles, tanto individualmente como en mezclas. El objetivo de

estas inyecciones es diferente desde el punto de vista tecnológico.

La inyección de óxidos de hierro en forma de minerales, cascarillas y otros materiales féreos permite influir directamente en el régimen de temperaturas del crisol y reducir los contenidos de silicio y manganeso en el arrabio.

Las inyecciones de fundentes (caliza, cal, dolomía, escorias de la fabricación de tubos soldados) permite regular el proceso de formación de escoria y aumentar su capacidad desulfuradora, o sea mejorar la calidad del arrabio tomando como base la disminución de su contenido de azufre.

También es posible la inyección de diferentes residuos de la propia industria siderúrgica (fangos, lodos, aceites, polvo de tragante, cascarilla de laminación), así como lignina, plásticos, biomasa, neumáticos y otros desechos de goma de la industria automotriz.

(\*) La I y II partes de este trabajo se han publicado en *Rev. Metal. Madrid*, 34 (1) 1998 y 34 (3) 1998, respectivamente.

(\*) Unión de Empresas de Recuperación de Materias Primas. Av. Ira, 1604. 11300-Ciudad de La Habana (Cuba).

(\*\*) Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, CENIM (CSIC). Av. Gregorio del Amo, 8. 28040-Madrid (España).

(\*\*\*) Donetsk State University of Technology. Artyom str. 58. 340066-Donetsk (Ucrania).

Se considera racional la utilización de mezclas combustibles (carbón pulverizado + material no combustible). En este caso, además de los materiales antes mencionados, se utilizan sustancias químicas que actúan como activadores o catalizadores de la combustión del carbón.

A continuación se analizarán algunas de estas variantes tecnológicas.

## 2. INYECCIÓN DE MINERALES DE HIERRO

La inyección de finos de minerales de hierro, directamente al crisol del horno, es uno de los elementos que va a predeterminar la producción de arrabio en el siglo XXI. Esta tecnología es atractiva desde el punto de vista de economizar energía y mejorar la utilización de las materias primas. Sin embargo, con la inyección de finos de mineral por toberas no se produce la reducción del mineral en el *raceway* y, además, descienden al crisol partículas dispersas del mineral que no se han reducido completamente, lo que no favorece una disminución de la reacción endotérmica de reducción de la wustita.

Con este objetivo, en Kobe Steel se estudió en laboratorio la descomposición térmica y la reducción de minerales mediante un calentamiento rápido en corriente gaseosa (caudal de 0,01-0,02 Nm<sup>3</sup>/min). Los ensayos se realizaron en una instalación (Fig. 1) con un horno eléctrico, en cuyo interior se coloca un reactor de 1.000 mm de longitud con diámetro interno de 50 mm (1 y 2). El gas y el mineral pulverizado se dosifican por la parte superior. La velocidad de inyección es tal que se mantiene una relación mineral/gas de 0,1-0,2 kg/m<sup>3</sup>. Como gases se emplean mezclas de N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> y CO/CO<sub>2</sub>. La temperatura en el reactor es de 1.350-1.550 °C y el tiempo de retención de las partículas de mineral en el reactor varía de 0,3 a 1,8 s.

Se estableció que la velocidad de descomposición térmica del mineral disminuye al incrementar el contenido de O<sub>2</sub> en el gas. Al utilizar H<sub>2</sub> en la mezcla, la velocidad de reducción es dos veces superior que en el caso del CO, lo que permite llevar la reducción hasta FeO. El tamaño de las partículas y la temperatura ejercen una gran influencia sobre la velocidad de reducción. Además, en Kobe Steel, se realizó un estudio mediante modelización matemática (3), con ecuaciones que describen la descomposición térmica y velocidad de reducción de las partículas de mineral y también el intercambio de calor entre el gas y las partículas de mineral.

Kawasaki Steel propone ubicar toberas complementarias debajo del *raceway* y soplar por ellas solamente viento. En este caso, se produce la combustión bajo las toberas y la prerreducción del mineral ocurre en relación al CO. Los ensayos se realizan en un horno experimental (diámetro de

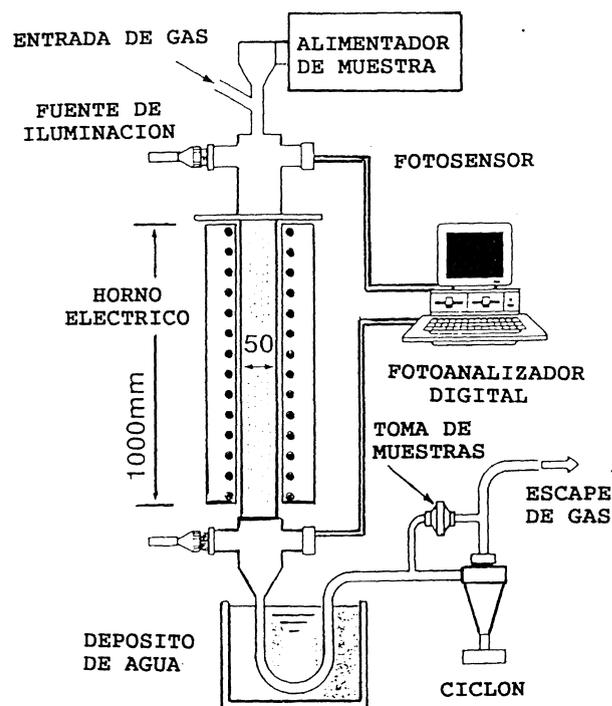


FIG. 1.— Representación esquemática del equipo experimental.

Fig. 1.— Schematic representation of experimental apparatus.

cuba = 1,2 m; volumen = 4,1 m<sup>3</sup>), que tiene una distancia de 0,5 m entre las toberas inferiores y superiores, con inyecciones de minerales de hierro o de cromo en caudales de 850 kg/h. Se estableció, que a temperaturas elevadas en la zona del *raceway* (más de 2.000 °C), el grado de reducción alcanza el 45%, pero cae al disminuir la temperatura e incrementarse el caudal de mineral inyectado. Los resultados de los ensayos y la modelización matemática se utilizan para elaborar la operación de los hornos altos, logrando un notable incremento en el caudal de mineral inyectado (4).

La inyección de finos de concentrado de óxido de hierro y de prerreducido ha sido estudiada en un reactor con volumen interno de 0,9 m<sup>3</sup>, equipado con una tobera destinada a la inyección del viento caliente (Ref. 84 de la II parte). La temperatura del "hombre muerto" se emplea para valorar la cantidad límite de la inyección de finos. En estos ensayos se estableció que la inyección de concentrado provoca dificultades en la operación del horno, mientras que el prerreducido puede ser inyectado en caudales de hasta 175 g/m<sup>3</sup>.

Kobe Steel realizó el estudio de otra variante alternativa en el HA-5, en Tiba Steel Works, mediante un sistema multiobjetivo diseñado para inyectar materiales pulverulentos por tobera (5). Durante tres semanas se estudió la influencia en los procesos que transcurren en el *raceway* al inyectar

de forma simultánea finos de mineral y fundentes (caliza y *clinker* magnésicos). En este caso, el contenido de silicio en el arrabio disminuye en 0,08 %, debido a la absorción del SiO por el fundente, mientras que la inyección de mineral no influye en la oxidación del silicio en el metal ni en el FeO contenido en la escoria a nivel de toberas, ya que éste se encuentra en determinadas cantidades en la escoria, independientemente de que se realice o no la inyección del mineral.

### 3. INYECCIÓN SIMULTÁNEA DE CARBÓN PULVERIZADO (CP) Y MATERIALES NO COMBUSTIBLES

Al comienzo de la década de los 60 se conocían patentes (6-9) sobre inyección simultánea por toberas de mezclas combustibles (CP + material no combustible). Sin embargo, estos procedimientos adolecían de una base teórica convincente y no habían sido probados a escala experimental o industrial.

Es posible intensificar la combustión del CP mediante la utilización de activadores o catalizadores inyectados simultáneamente en el horno alto junto con el carbón (10). Estos aditivos aumentan la concentración local de agentes oxidantes (O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>) en la zona en que comienza la combustión, lo que acelera la gasificación del CP debido al incremento de la superficie específica real. Es conocido que en las condiciones reales, la superficie específica del CP está notablemente reducida por la formación de conglomerados resistentes de sus propias partículas.

El desprendimiento simultáneo de los componentes volátiles de estas sustancias y de los volátiles del CP facilita la destrucción de los conglomerados

y el aumento de la superficie específica del combustible hasta un valor límite de 0,2-0,5 m<sup>2</sup>/g.

Un estudio en termobalanza de diferentes aditivos no combustibles (KNO<sub>3</sub>, NaNO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, NaClO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> y dolomía) al CP demostró que de todos los compuestos utilizados sólo los nitratos de calcio, potasio, y sodio intensifican la combustión del carbón. Los mejores resultados se logran para contenidos de los aditivos en la mezcla del 5-10 % (11 y 12).

Las características principales de la gasificación del carbón son las altas temperaturas de determinadas etapas, cuyo valor limita el desarrollo de las propias etapas y del proceso en general. La disminución de la temperatura de inicio del desprendimiento de las sustancias volátiles y de ignición del carbono residual del *char* confirman la reducción de las barreras de temperaturas en que se desarrollan, que a su vez determinan los estadios de combustión del carbón (Tablas I y II). Como resultado, la finalización de la combustión del CP se alcanza a temperaturas más bajas.

En este mismo estudio se realizaron ensayos con diferentes materiales que contienen hierro, que muestran que la adición de 5 % FeO (puro) o del 20-30 % de finos de sinter o pelets ejerce una acción catalizadora en la combustión del carbón (13).

La inyección en el *raceway* de distintos materiales no combustibles, de forma individual o simultánea al CP, se puede emplear efectivamente para otros fines: mejorar la composición de la escoria y la capacidad de desulfuración del arrabio al introducir fundentes y otros componentes que incrementen la actividad de la escoria y evitar los “emborrucamientos” del crisol por la presencia de masas viscosas de los materiales de la carga mediante la adición de sustancias que disminuyan la viscosidad de la escoria.

TABLA I.- Influencia de las adiciones de Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> y dolomía, CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> en la combustión del CP

TABLE I.- Effect of additions of Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> and dolomite, CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, on PC combustion

Composición de mezclas	Tiempo total de combustión, min	Duración relativa de las etapas de combustión, %		Temperatura de ignición del carbono residual, °C	Temperatura final de fusión, °C
		Desprendimiento de volátiles	Combustión del carbono residual		
CP (sin adiciones)	103,0	15,4	74,3	550	990
CP+2,5% Ca (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	104,4	14,6	73,9	560	915
CP+ 5% Ca (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	89,6	22,3	66,1	618	930
CP+10% Ca (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	74,8	29,9	56,1	660	920
CP+ 5% dolomía	99,6	18,9	69,4	566	882
CP+10% dolomía	83,6	18,2	69,4	566	949

TABLA II.- Características de las temperaturas de combustión de mezclas de CP y materiales no combustibles

TABLE II.- Fuel temperatures characteristics of PC and not fuels materials mixtures

Composición de mezclas	Temperatura, °C		
	Inicio de salida de volátiles	Ignición	Final del proceso
CP (sin adiciones)	360	570	1.320
CP + 5 % FeO	320	585	1.340
CP + 10 % FeO	320	560	1.340
CP + 20 % FeO	320	580	1.280
CP + 30 % FeO	310	580	1.280
CP + 10 % sinter	340	605	1.280
CP + 20 % sinter	300	500	1.340
CP + 30 % sinter	270	450	1.380
CP + 10 % pelets	325	595	1.325
CP + 20 % pelets	300	500	1.300
CP + 30 % pelets	355	580	1.200
CP + 10 % lodos	365	620	1.400
CP + 20 % lodos	325	600	1.300
CP + 30 % lodos	320	580	1.275
CP + 5 % NaNO <sub>3</sub>	320	480	1.290
CP + 10 % NaNO <sub>3</sub>	340	525	1.140
CP + 5 % KNO <sub>3</sub>	320	540	n.d.
CP + 10 % KNO <sub>3</sub>	340	560	1.170

### 3.1. Inyección simultánea de CP y minerales de hierro

Actualmente, para reducir gastos y lograr la regulación exacta de la composición del arrabio, se inyectan por toberas al horno alto CP y finos de mineral de hierro en grandes cantidades.

Sumimoto Metal ha realizado ensayos en hornos experimentales e industriales con el objetivo de esclarecer las características de este proceso (14). Los ensayos preliminares se realizan en un horno experimental de 0,9 m de diámetro de crisol y dimensiones internas de 1.500 × 1.000 × 2.350 mm. La altura desde el nivel de tobera hasta el tragante es de 3.500 mm; el horno está equipado con una piqueta de arrabio y tres toberas.

Los ensayos se realizan mediante la inyección simultánea, en el viento caliente (800 °C) enriquecido con oxígeno, de una mezcla de carbón y mineral en caudales hasta 300 y 200 kg/ta, respectivamente; el caudal de viento es de 900 m<sup>3</sup>/h. En el *raceway* se toman muestras de polvo y se efectúan

mediciones de temperatura. El coque se carga por el tragante, por donde se extraen los gases de salida. A una distancia de 700 mm sobre el nivel de toberas, el grado de combustión del carbón se reduce de 100 a 60 % al incrementar la tasa de inyección de CP de 50 a 200 kg/ta. Para una tasa de 100 kg/ta, el grado de combustión alcanza el 95 %. A la distancia de 200 mm de la tobera, el grado de reducción del mineral fue de 25-27 % para un caudal de mineral (sin CP) de 100-200 kg/ta. Al inyectar la mezcla de carbón-mineral en relación 1:1, el grado de reducción del mineral se incrementa hasta 35-40 %. El grado de reducción del mineral inyectado se incrementa en forma lineal a medida que se aleja de la tobera.

En el HA-3 en Wakayama, de esta compañía, se realizaron investigaciones a mayor escala. Durante la inyección simultánea de los reactivos se realizó el sondeo en el *raceway* con medición de temperaturas y toma de muestras de gas. El caudal de CP varió entre 100 y 300 kg/ta, y el caudal de mineral alcanzó 200 kg/ta. La inyección de carbón ocasiona el aumento de la temperatura en el *raceway*, en comparación con el caso de trabajar sólo con coque, mientras que la inyección de mineral la disminuye (14).

British Steel, en planta piloto, ha realizado ensayos de inyección individual de CP (400 kg/ta) y de mineral (300 y 750 kg/ta), así como de inyección simultánea de una mezcla de CP + mineral (200 y 400 kg/ta, respectivamente) (Ref. 62 de la II parte). Para tasas altas de inyección de mineral se plantea la posibilidad de disminuir el contenido de silicio en el arrabio de 1,15 a 0,1 %.

Por otra parte, para disminuir el desgaste de las conducciones por abrasión se propone realizar la inyección simultánea de carbón y mineral mediante transporte a baja velocidad (15). A tal efecto se construyó una instalación que permite crear e interrumpir el flujo de transporte, tanto para los componentes individuales como para sus mezclas.

Para describir los procesos que ocurren en el *raceway* durante la inyección de carbón y mineral, en Kobe Steel se elaboró un modelo matemático que incluye ecuaciones que describen el movimiento del gas y las partículas, desprendimiento de volátiles del carbón, combustión del carbón y coque, descomposición térmica, y reducción y fusión del mineral. También se establecen las condiciones de intercambio térmico entre las fases (16 y 17). Los ensayos realizados en un horno experimental, se hicieron a mayor escala en el HA-2 en Kakogawa, existiendo una buena correspondencia entre ambos resultados.

Se estableció que al inyectar simultáneamente carbón y mineral en el *raceway* ocurre un calentamiento rápido de estos materiales, y a la distancia de 0,2 m de la tobera se quema el carbón y termina

la descomposición térmica. El inicio de la reducción del mineral se observa a la distancia de 0,35 m. A la distancia de 1,5 m, los grados de la combustión del carbón y de reducción del mineral son 73 y 40 %, respectivamente.

Se destaca que, en la inyección simultánea, los caudales de CP y de mineral están limitados por el descenso de la temperatura del gas en el *raceway*, aunque el enriquecimiento del viento con oxígeno conlleva el aumento de la temperatura en el *raceway* y también ejerce una gran influencia en la combustión del carbón.

Sumimoto Metal ha realizado ensayos de inyección simultánea de CP y mineral de hierro en cantidades del orden de 150 kg/ta (de cada material), con temperatura adiabática de 1.800-2.600 °C. El horno está equipado con dos filas de toberas. Por las toberas superiores se inyecta el CP y/o mineral mediante la adición de oxígeno a temperatura ambiente o, en su defecto, vapor de agua. Por las toberas inferiores se inyecta CP y/o mineral mediante viento caliente enriquecido en oxígeno. Hay que destacar que este procedimiento garantiza una buena combustión del carbón en el *raceway* y evita un empeoramiento de la permeabilidad a los gases e interrupciones en la marcha del horno (18).

En Corea del Sur se han realizado investigaciones en un horno de laboratorio a 1.350 °C sobre la combustión, en corriente de oxígeno, de mezclas de CP-wustita y CP-hematita. La wustita se funde primeramente y luego experimenta reducción directa por los inquemados del carbón. La hematita se descompone térmicamente a magnetita que luego funde y experimenta reducción directa (19 y 20).

Sumimoto Metal ha realizado experiencias de inyección simultánea de CP y finos de sinter (21). En este caso es posible que surjan una serie de dificultades, tales como: empeoramiento de la permeabilidad de los gases en la carga, desgaste por abrasión de las toberas y combustión incompleta del carbón en el *raceway*. Para solucionar estos problemas se propone realizar un cribado previo de los finos de sinter en dos fracciones: polvo y granular. Ambas fracciones se dosifican de forma individual o en mezcla con CP y se inyectan por toberas ubicadas en dos niveles. Para la inyección se emplea viento caliente como portador, y las fracciones más finas se dosifican de forma continua y las gruesas con interrupciones. Este procedimiento garantiza una operación uniforme del horno para grandes caudales de inyección (22).

La tecnología de inyección *In-Flight Smelting Reduction* (IFSR) permitirá conseguir en el horno alto, mediante la inyección de finos de minerales de hierro, la disminución del consumo de energía en el tratamiento del mineral, el aumento de la utilización de los minerales de baja ley y el uso de la

inyección de fundente para controlar la composición del arrabio.

La figura 2 ilustra la tecnología IFSR (2) y (Ref. 81 de la II parte). La hematita, después de la inyección en el *raceway*, se reduce, en un tiempo muy corto, a magnetita. A continuación, la reacción avanza y se forma hierro fundido que fluye hacia abajo en el horno. La figura 3 muestra una fotografía de microsonda de partículas de mineral de hierro que han experimentado reducción. El núcleo de hierro esférico está rodeado de wustita. El fenómeno es completamente diferente a la reducción topoquímica convencional gas-sólido, que se produce en la cuba del horno, en donde la wustita está rodeada de hierro.

Investigadores del CENIM, en un reactor de pared fluida de alta temperatura, han realizado ensayos de reducción con coque de finos minerales de hierro (< 0,150 mm) de diferente naturaleza (23 y 24). El tiempo de residencia impuesto por la caída libre de la carga en el reactor, del orden de

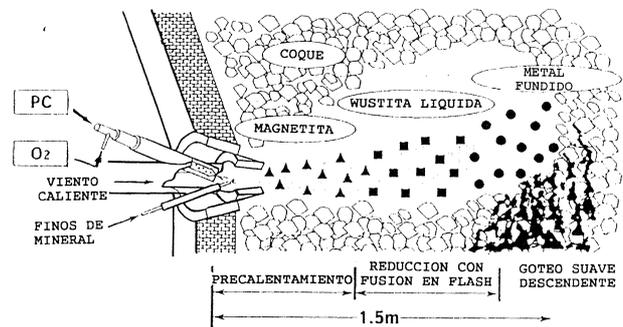


FIG. 2.— Tecnología de inyección combinada (IFSR).

FIG. 2.— Combined injection technology (*In-Flight Smelting Reduction*).

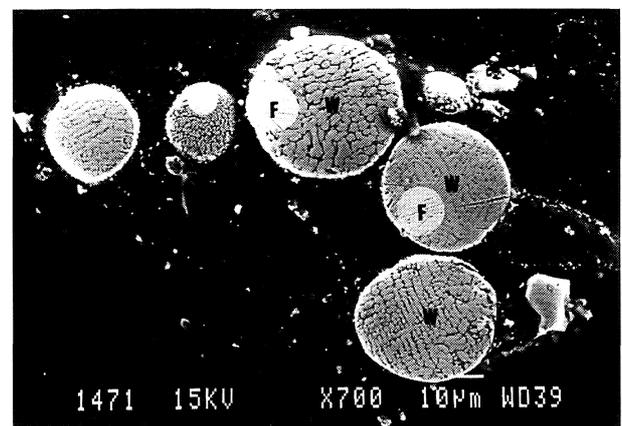


FIG. 3.— Partículas de mineral de hierro reducido. F: hierro; W: wustita.

FIG. 3.— Particles of reduced iron ore. F: iron; W: wustita.

segundos, limita el grado de desarrollo de la reacción. Las partículas que han experimentado reacción también presentan un núcleo de hierro rodeado de wustita, análogo a la reducción que se obtiene por la tecnología IFSR.

### 3.2. Inyección simultánea de CP y fundentes

Cuando se inyectan fundentes en el horno alto ocurre un elevado desgaste de las toberas por abrasión, lo que provoca el deterioro del régimen de soplado. Para evitar este problema, Nippon Kokan (25) propone inyectar por toberas una mezcla de CaO, MgO y CP con una relación entre los diámetros medios de las partículas de los fundentes y el carbón entre 0,4 y 3,2. El procedimiento permite no sólo reducir el desgaste de las toberas sino además obtener un arrabio con bajo contenido de silicio, debido a que el fundente regula la velocidad de formación de SiO en el *raceway*.

En el HA-2 de Keihin Steel Works (Nippon Kokan) se investigó sobre este aspecto (26). El fundente (CaO, MgO) se inyectó por tobera a través de una lanza junto con el viento caliente (1.000 °C). Con el aumento de la distancia desde el extremo de la tobera hasta el lugar de la inyección del fundente, aumenta el tiempo de retención del fundente en el flujo de viento caliente. El fundente, que entra calentado en la zona de toberas, se funde rápidamente y pasa a la escoria, no alcanzando la superficie interior del *raceway*.

Otro procedimiento alternativo para evitar en lo posible la adherencia del fundente no fundido a la superficie de la carga es inyectar el fundente por tobera en un régimen intermitente, o sea el caudal de fundente aumenta o disminuye periódicamente (27). En este caso, el fundente no fundido adherido a la carga en el período de inyección, se funde durante los períodos de interrupción de la inyección, lo que permite mejorar la permeabilidad a los gases en la parte inferior del horno.

Para regular el contenido de silicio y azufre en el arrabio, Suminoto Metal realizó, durante dos semanas, investigaciones de inyección simultánea de mezclas de CP y dolomía en el HA-2 de Kokura, con un máximo de inyección de 25 kg CP/ta y 15 kg dolomía/ta. El contenido de silicio y azufre en el arrabio disminuyó en 0,06 % y 0,005 %, respectivamente, para contenidos iniciales de 0,40 % Si y 0,020 % S. Sin embargo, se observó un aumento del consumo de coque de 6,2 kg/ta (28-31).

En la figura 4 se muestra el efecto de la inyección. La dolomía se descompone en óxidos básicos que luego forman una escoria fundida que entra en contacto con los componentes ácidos que se originan de la ceniza del CP. La actividad del SiO<sub>2</sub> dis-

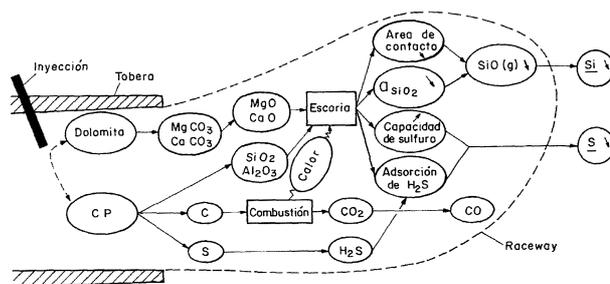


FIG. 4.— Efecto de la inyección simultánea de CP y dolomita en el comportamiento del *raceway* y el contenido de silicio y azufre en el arrabio.

FIG. 4.— Effect of simultaneous injection of PC and dolomite on the phenomena in the *raceway* and silicon and sulphur pig iron content.

minuye, y con ello se elimina la reacción de formación del SiO, y como resultado disminuye el contenido de silicio en el arrabio. El aumento de la absorción del H<sub>2</sub>S que se origina por el azufre del CP ocasiona la disminución del contenido de azufre en el arrabio (28).

## 4. INYECCIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES

### 4.1. Inyección de aceites

En los países industrializados es relativamente reciente la preocupación por dar a los residuos de origen industrial un destino adecuado para la preservación de la salud humana y del medio ambiente.

La UE, a través de cinco programas de acción medioambiental elaborados entre 1973 y 1993, ha dictado normas para evitar que el medio ambiente se dañe por la eliminación incontrolada de aceites residuales, y también para garantizar tanto la eliminación sin riesgos como el reciclado de los residuos.

Las plantas siderúrgicas, y principalmente sus trenes de laminación, producen una gran cantidad de aceites residuales que deben eliminarse por incineración o por otros medios, puesto que su vertido está prohibido (32).

Un medio para la eliminación de los aceites residuales es por incineración en el horno alto.

La empresa Cockerill Sambre inyecta en las toberas del HA de Lieja, en una tasa de hasta 600 L/h por tobera, un aceite residual que después de un tratamiento de purificación ha reducido su contenido de agua al 2 % y posee una capacidad calorífica de 42.500 kJ/kg. En los años 1991 y 1992 se inyectaron en el horno 3.900 y 3.700 t de aceite, respectivamente. Puesto que el aceite estaba casi libre de

agua, no se detectaron problemas. En las toberas del HA-4 y HA-5 de Charleloi, se inyectaban aceites residuales menos purificados, con un contenido de agua del 35 al 60 %, en una tasa de 500 t/año por horno. Este aceite impuro causa problemas en la marcha del horno y, por ello, cada dos días se tiene que cambiar la posición de la tobera donde se hace la inyección, y si la temperatura del arrabio desciende de 1.400 °C, se tiene que parar la inyección de la emulsión (33). Se aconseja no inyectar aceite residual al horno con un contenido de humedad superior al 20 % y que las sustancias sólidas que pueda llevar el aceite en suspensión tengan un tamaño inferior a 2 mm.

En el CENIM se ha estudiado la utilización y al mismo tiempo la eliminación del tinol (un aceite residual, de origen animal, muy difícil de manipular, almacenar y destruir) y de mezclas de tinol con otros aceites residuales de origen mineral, que se producen en las fábricas de Aceralia, mediante la quema en una cámara de combustión, que simula las condiciones del HA en la zona de toberas, con el objetivo de comprobar la eficiencia de la combustión de cada aceite residual (34).

En los trenes de laminación en Alemania, se producen anualmente 170.000 t de cascarillas contaminadas de aceite y 550.000 t de aceite residual en la industria del automóvil. En este país se desarrolla un sistema patentado, denominado CARBOFER, que permite reciclar los lodos de cascarillas de laminación y los polvos de los filtros del horno por inyección en los hornos eléctricos de arco y en hornos altos (35). El CARBOFER es una palabra compuesta formada por “carbón” y “ferrita”, que denomina a un producto obtenido a partir de cascarillas de laminación y polvo de tragante, o en su defecto residuos inquemados de carbones utilizados en las centrales termoeléctricas (36). Por el proceso CARBOFER, las cascarillas aceitosas se mezclan con las cenizas volantes que proceden de una central térmica y esta mezcla, después de tamizada, se puede transportar neumáticamente hasta las toberas del horno alto.

El aceite de automóvil también se ha inyectado en las toberas en tasas de 8 kg/ta. En ambos casos no ha habido alteración en la marcha del horno y se estima que los volúmenes de inyección se pueden elevar (37).

#### 4.2. Inyección de escorias

En 1978, en la planta piloto de la fábrica siderúrgica en Donetsk (Ucrania), se realizaron ensayos industriales de inyección de mezclas combustibles: CP y trozos de escoria, residuos que contenían

MnO y flúor procedentes de la fabricación de tubos soldados (38). Los ensayos confirmaron la posibilidad de una influencia beneficiosa de la mezcla combustible en los procesos que se desarrollan en el *raceway* y en la zona de formación de la escoria primaria, lo que permite mejorar la utilización del CP, elevar la productividad del horno en 1,1-1,7 %, y reducir el consumo de coque en 6,1-26,9 kg/ta.

El mecanismo de mejora de esta mezcla está determinado, fundamentalmente, por influencias favorables directas del contenido de flúor y óxido de manganeso (activos diluyentes) en la escoria final y, parcialmente, en la escoria primaria. Además, la adición de estos residuos puede promover la estabilización de la temperatura y volumen en el *raceway*.

La eficacia de estas medidas se puede aumentar por la circunstancia de que el flúor y el óxido de manganeso se introducen en la escoria, que pasa a través del *raceway*: esta escoria está expuesta a grandes oscilaciones y en grado decisivo determina el funcionamiento del horno.

En las condiciones de funcionamiento del horno con escorias básicas y de difícil fusión, las variaciones mencionadas promueven un aumento considerable de la estabilidad y fluidez de las escorias final y primaria y, como consecuencia, se produce una mejora en la capacidad del crisol, la distribución de la corriente gaseosa, el descenso de la carga y los principales índices técnico-económicos.

En 1982-1985, esta tecnología encontró un mayor desarrollo al ser asimilada en los HA-1 y HA-2 en Donetsk.

#### 4.3. Inyección de plásticos

El horno alto también se puede utilizar para la eliminación de residuos de naturaleza no siderúrgica, tales como plásticos.

En la tabla III se muestra una comparación de la composición química de combustibles (carbón y fuel oil) inyectados al horno y residuos plásticos usados en el HA-2 de Bremen. El límite para la inyección de plásticos es la concentración elevada de cloro.

Stahlwerke Bremen ha realizado ensayos de inyección usando plásticos granulados en 8 de las 32 toberas del HA-2 de Bremen, con una tasa de inyección de 35 kg/ta, limitada por la concentración de cloro de los plásticos para evitar problemas de corrosión en las conducciones del tragante y la formación de dioxinas y furanos (39 y 40). Nippon Kokan ha realizado la inyección de plásticos granulados en 4 de las 40 toberas del HA-1 en Keihin, con una tasa de inyección de 10 kg/ta (41 y 42).

TABLA III.– Comparación de la composición química del carbón, fuel oil y residuos plásticos, %

TABLE III.– Comparison of chemical analysis of coal, oil and plastics, %

Elementos	Carbón pulverizado	Fuel oil	Residuos plásticos
Carbono	79,60	85,90	77,81
Hidrógeno	4,32	10,50	11,99
Azufre	0,97	2,23	0,90
Cloro	0,20	0,04	1,40
Potasio	0,265	0,001	0,048
Sodio	0,081	0,001	0,092
Ceniza	9,03	0,05	4,90

## 5. INYECCIÓN DE ARENAS TITANÍFERAS (ILMENÍTICAS)

Se sabe que contenidos controlados de titanio en el arrabio permiten disminuir las cargas térmicas en las paredes laterales y en el fondo del crisol del horno. A tal efecto, se han realizado ensayos de inyección de mezclas que contienen un 8 % de arenas titaníferas (ilmenitas) a las que se adicionan polvos de arrabio y minerales de hierro (43).

Para estudiar las distribuciones de arrabio y calor en el crisol se emplea un modelo matemático que permite describir cuantitativamente las distribuciones de calor en el fondo y las paredes laterales del crisol, y la viscosidad de la escoria en función de la concentración de titanio y la temperatura. Por otra parte, se calculan la velocidad y trayectoria de descenso del arrabio en el horno, así como la velocidad de reducción del titanio.

Se establece que al inyectar las arenas titaníferas el desplazamiento del arrabio a lo largo de las paredes hacia el orificio de la colada se hace más lento y, desde el lugar de inyección de los materiales titaníferos hasta el orificio de colada, existe una zona con alta concentración de titanio que favorece el aumento de la viscosidad del arrabio y la disminución de la velocidad de desplazamiento.

Los resultados de explotación experimental en los HA-1 y HA-2 de Nissin Steel Works, en Kure, muestran que es posible regular la temperatura de la solera del horno mediante la inyección de arenas titaníferas.

## 6. OTROS TIPOS DE INYECCIONES

En distintos países se ha propuesto una serie de variantes alternativas al proceso convencional del

horno alto con utilización de viento frío con elevado contenido en oxígeno inyectado en un segundo nivel de toberas. Son los procesos Fink (Alemania), Lu (Canadá), NKK (Japón) y Qin (China). En todos ellos se prevé la ICP en el horno y la recirculación del gas de tragante para compensar la disminución del volumen de gases que entran en la cuba desde las toberas, y también para regular la temperatura de combustión en las mismas.

En los procesos Fink y Lu, el gas de tragante (después de limpiarlo del CO<sub>2</sub>) se inyecta en el crisol simultáneamente con CP y oxígeno, aunque en el Fink se prevé también su inyección en el vientre del horno. El proceso Qin prevé la inyección de gas de tragante exento de polvo en el crisol junto con CP y oxígeno, así como la inyección en la parte inferior de la cuba del gas de tragante (eliminando los contenidos de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O) calentado hasta 900-1000 °C. El proceso NKK considera la inyección en el crisol de gas de tragante (sin limpieza del CO<sub>2</sub>) junto al CP y oxígeno, y también la inyección del gas de tragante con oxígeno en la cuba del horno.

Estos procedimientos prevén un aumento considerable de la productividad del horno (40-60 %) y la disminución del costo de producción en 10-20 %. El caudal de ICP puede alcanzar hasta 350-400 kg/ta con disminución del consumo de coque hasta un nivel mínimo de 200-250 kg/ta (44-47). Sin embargo, aunque no existen ensayos a escala industrial, pueden considerarse como las líneas que conformarán el horno alto del futuro.

Existe un interés mundial para la mejora y protección del medio ambiente que se manifiesta por el número creciente de proyectos de I+D que tienen como objetivos principales: reducir la emisión y vertido incontrolado de sustancias tóxicas; mejorar todas las etapas de un proceso que incluya la reducción de los volúmenes de residuos a través de su tratamiento, reutilización, y, lo más importante, el reciclado.

En la figura 5 se muestra el esquema de un horno alto ecológico basado en la tecnología de inyección de carbón y otros materiales, aplicada al horno convencional.

## 7. CONCLUSIONES

El proceso más importante para la fabricación de arrabio, por reducción directa de los óxidos de hierro, es el que se realiza en el horno alto, que totaliza el 98 % de la producción total de arrabio. El 2 % restante se produce en una amplia variedad de procesos alternativos que reducen directamente los concentrados de minerales de hierro utilizando gases o carbones no coquizables como reductores.

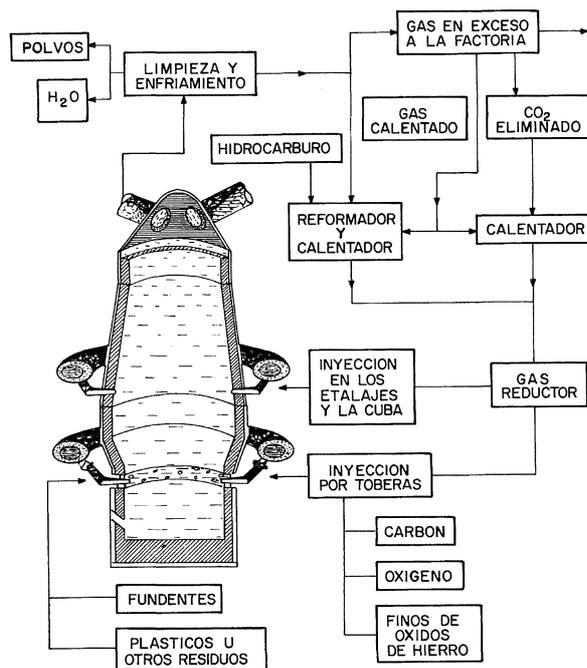


FIG. 5.— Desarrollo del horno alto basado en la tecnología de inyección.

FIG. 5.— Development of blast furnace based on injection technology.

En el horno alto, una tarea primordial es la disminución del consumo de coque por tonelada de arrabio fabricado, debido a los costes elevados de las baterías de coque y los problemas medioambientales que ocasionan estas baterías. Este objetivo se consigue por medio de la inyección de combustibles por toberas al horno, siendo en la actualidad la inyección de carbón el proceso más utilizado.

El objetivo principal de esta tecnología, en la mayoría de los países, es el incremento de la tasa de ICP hasta 200-250 kg/ta, y en una perspectiva más lejana hasta 350-450 kg/ta con una reducción del consumo de coque hasta un nivel mínimo de 200-250 kg/ta. Este coque es necesario para la carburación del arrabio, la reducción directa y garantizar la permeabilidad de la carga a los gases.

La inyección por tobera de materiales no combustibles (finos de óxidos de hierro, fundentes, escorias, residuos siderúrgicos y plásticos, etc.), tanto de forma individual como en mezcla con carbón pulverizado, será en el siglo XXI una tecnología usual en la fabricación de arrabio, que puede introducir variaciones en la concepción clásica de funcionamiento del horno alto.

### Agradecimiento

Los autores agradecen a la Comunidad Europea (ECSC 710-AA/936 y 710-AA/938), al Ministerio

de Educación y Ciencia (Ref. Sab. 92-0144 y 95-0151), a Aceralia Corporación Siderúrgica y a la Factoría Siderúrgica de Donetsk (Ucrania) el apoyo recibido para la realización de este trabajo.

### REFERENCIAS

- (1) NOZAWA, K. *CAMP-ISIJ*, 4 (4), 1991: 1138.
- (2) NOZAWA, K., SHIMIZU, M. e INABA, S. *Tetsu-to-Hagane*, 79 (4), 1993: 443-448.
- (3) HIAO, H. *CAMP-ISIJ*, 4 (4), 1991: 1139.
- (4) MONOKAWA, H. *CAMP-ISIJ*, 4 (4), 1991: 1025-1027.
- (5) TAKEDA, K., SAWA, Y. y TAGUSHI, S. Proc. 6th Int. Iron and Steel Congress, Nagoya. Vol. 2, 1990: 566-573.
- (6) Patente núm. 1300137 de la República Federal Alemana, 1970.
- (7) Patente núm. 1281460 de la República Federal Alemana, 1968.
- (8) Patente núm. 1337277 de Francia, 1963.
- (9) Patente núm. 3460934 de los EE.UU., 1969.
- (10) BABICH, A., GARCIA, L., FORMOSO, A., MOCHON, J. y CORES, A. *Rev. Metal. Madrid*, 33 (2), 1997: 71-79.
- (11) YAROSHEVSKII, S., SKLADANOVSKII, E., STEPANOV, V., NEJAEV, G., ANUFRIEV, O. y BABICH, A. *Steel URSS* (6), 1987: 254-257.
- (12) BABICH, A. e IVLEVA, T. *Izv. Vussh. Uch. Zav. Chernaya Metall.*, (3), 1995: 75-76.
- (13) BABICH, A. e IVLEVA, T. *Izv. Vussh. Uch. Zav. Chernaya Metall.*, (1), 1992: 113-116.
- (14) YAMAGATA, C. *CAMP-ISIJ*, 4 (1), 1991: 142-144.
- (15) YAMAGATA, C. *CAMP-ISIJ*, 4 (4), 1991: 1141.
- (16) HIAO, H. *CAMP-ISIJ*, 4 (4), 1991: 1140.
- (17) XINGGUO, X., NOZAWA, K., SASAHARA, S., SHIMIZU, M. e INABA, S. *Tetsu-to-Hagane*, 78 (7), 1992: 1230-1237.
- (18) YAMAGATA, C., KADZIWARA, H., YAMAMOTO, T. y SUYAMA, S. *Kokay Tokke Kojo. Serie 3* (4), 71, 1990: 31-37.
- (19) JOO, S., JOON MIN, D., MYUNG KANG, S. y OCK LEE, I. Proc. 1st. Int. Congress on Sci. and Tech. of Ironmaking. Sendai (Japón). *ISIJ*, 1994: 583-588.
- (20) MYUNG KANG, S., JOO, S., JOON MIN, D. y OCK LEE, I. *ISIJ Int.*, 36 (2), 1996: 156-163.
- (21) SHEN, F., INADA, T., YAMAMOTO, K. e IWANOOGA, Y. Proc. 1st. Int. Congress on Sci. and Tech. of Ironmaking. Sendai (Japón). *ISIJ*, 1994: 559-564.
- (22) YAMAGATA, C., KADZIWARA, H. y SUYAMA, S. *Kokay Tokke Kojo. Serie 3* (4), 42, 1990: 31-37.
- (23) CORES, A., FORMOSO, A., GUTIERREZ, A. y LARREA, M. T. *Rev. Metal. Madrid*, 24 (1), 1988: 22-29.
- (24) CORES, A. LARREA, M. T., GUTIERREZ, A. y FORMOSO, A. *Ironmaking Steelmaking*, 15 (2), 1988: 65-73.
- (25) HOTTA, H., SAWADA, T. e ISHII, K. *Kokay Tokke Kojo. Serie 3* (4), 51, 1991: 45-47.
- (26) NAKAJIMA, R., KISHIMOTO, S., HOTTA, H., SIMOMURA, A., ISHII, K. y YAMAOKA, Y. *Tetsu-to-Hagane*, 76 (6), 1990: 832-839.
- (27) NAKAJIMA, R., KISHIMOTO, S., HOTTA, H. y SIMOMURA, A. *Kokay Tokke Kojo. Serie 3* (4), 47, 1990: 35-37.
- (28) YAMAGATA, C., KAJIWARA, Y., SUYAMA, S., SATO, K. y KOMATSU, S. *ISIJ Int.*, 30 (5), 1990: 362-371.
- (29) KOMATSU, S., YAMAGATA, C., SUYAMA, S., KADZIWARA, H. y SATO, K. *Sumitomo Metal*, 44 (1), 1992: 77-82.

- (30) YAMAGATA, S., KADZIWARA, H., SUYAMA, S., KOMATSU, S. y SATO, K. *Sumitomo Search*, 48 (3), 1992: 1-12.
- (31) KOMATSU, S., SATO, K. e YAMAGATA, C. *Proc. 6th. Int. Iron and Steel Congress*, Nagoya, Vol. 2, 1990: 558-568.
- (32) MEADOWCROFT, T.R. *Iron Steelmaker*, 20 (12), 1993: 33-37.
- (33) COCKERILL SAMBRE. Recycling of oily waste at Cockerill Sambre. (Comunicación privada), 1993.
- (34) CORES, A., FORMOSO, A., VERDURAS, J.L. y FERREIRA, S. *Rev. Metal. Madrid*, 34 (núm. extraordinario), 1998: 416-420.
- (35) POPE, P.G. y SHAW, D.J. *Steel Times*, 224 (8), 1996: 264.
- (36) HUNGER, J., KALINOWSKI, W., KRÜGER, W., LETZEL, D., OSING, A. y SCHABERG, F. The production of CARBOFER from oil contaminated residues and its use in blast furnaces. Seminar on Metallurgy and Ecology, Economic Commission for Europe, Nancy (France), 19/R.39, 1993: 1-14.
- (37) BUCHWALDER, J., HUNGER, J., KALINOWSKII, W., KRÜGER, W. y LETZEL, D. Utilization of oil-contaminated millscale and shredder light fraction from automobiles in blast furnaces. Seminar on the Steel Industry and Recycling. Düsseldorf (Alemania), 24-27 abril 1995.
- (38) YAROSHEVSKII, S.L., SKLADANOVSKII, E.N. y NEJAEV, G.E. *Metallurgicheskaya Gornorudnaya Promyshlennost*, (4), 1981: 28-31.
- (39) JANZ, J. y WEISS, W. *Proc. 3rd European Ironmaking Congress*, Gante (Bélgica), 1996: 114-119.
- (40) JANZ, J. y WEISS, W. *Rev. Metall.-CIT*, 93 (10), 1996:1219- 1226.
- (41) *Iron Steelmaker*, 23 (12), 1996: 5.
- (42) LINDENBERG, H-U., HASS, H., JUCHHOFF, W., JANZ, J., REIMER, G. y WEISS, W. *Stahl Eisen*, 116 (8), 1996: 89-94.
- (43) TOMITA, Y. *CAMP-ISIJ*. 4 (4), 1991: 1075-1076.
- (44) MATSUURA, M., MITSUFUJI, H., FURUKAWA, T. y OHNO, Y. *Proc. 6th. Int. Iron and Steel Congress*, Nagoya, Vol. 2, 1990: 581-588.
- (45) QIN, M-S. y QI, B-M. *Proc. 6th. Int. Iron and Steel Congress*, Nagoya, Vol. 2, 1990: 589-595.
- (46) *Bergsmannen, Suppl.* N° 2, 1990: 28-34.
- (47) OHNO, Y., MATSUURA, M., MITSUFUJI, H. y FURUWAKA, T. *ISIJ Int.*, 32 (7), 1992: 838-847.