

Tecnología de fabricación de arrabio con inyección de combustibles y otros materiales por toberas en el horno alto^(*)

II parte. Inyección de carbón pulverizado (ICP)

L. García^(*), A. Cores^(**), A. Formoso^(**), A. Babich^(***) y S. Yaroshevskii^(***)

Resumen Se describe la tecnología de fabricación de arrabio con inyección de carbón por toberas en el horno alto. Se analiza y comenta la influencia de los principales constituyentes del carbón en la operación del horno. Se ofrece información sobre los países que emplean esta tecnología.

Palabras clave: **Fabricación de arrabio. Horno alto. Inyección de carbón. Consumo de coque. Productividad.**

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

Part 2. Pulverized coal injection (PCI)

Abstract The technology of ironmaking with coal injection by tuyeres in the blast furnace is described. The influence of the main coal constituents in the furnace operation is analyzed. Information about the countries that employ this technology is given.

Keywords: **Ironmaking. Blast furnace. Coal injection. Coke consumption. Productivity.**

1. INYECCIÓN DE CARBÓN PULVERIZADO (ICP)

La idea de inyectar carbón pulverizado en el horno alto ya fue propuesta en 1840 por S.M. Bansk. Hacia 1840-1845 se realizaron los primeros ensayos industriales, pero solamente en 1960 en los EE.UU. se comenzó a crear equipamiento industrial para este fin y, en la actualidad, prácticamente todos los grandes hornos están equipados, o tienen previsto el montaje en estas instalaciones (1).

En el mundo más de 100 hornos altos utilizan esta tecnología en 17 países (2 y 3).

Como mínimo se emplean 17 sistemas diferentes de ICP, que se engloban en tres grupos:

- Sistemas con dosificadores automáticos y distribución individual del CP por tobera, con un error menor del 3%.
- Sistemas con dosificadores de rotor, en los que el carbón se inyecta mecánicamente con rotores y distribución individual por toberas.
- Sistemas con distribuidores estáticos del CP simultáneos en todas las toberas, con una exactitud superior al 95 %.

Los niveles máximos de ICP aún no han sido alcanzados. En los años 1960-1970, en la fábrica Amanda (EE.UU.), el caudal de carbón inyectado fue de 58,5 kg/ta (kg/tonelada de arrabio), o el 12,5 % del combustible total. En el período 1980-1991, en Europa funcionaban más de 30 hornos altos con esta tecnología, y en el Japón más de 25. A comienzos de 1990 se inyectaban en algunos de estos hornos hasta 157 kg/ta, lo que permitía una sustitución del 35 % del coque (4). Posteriormente, se han

(*) La I parte de este trabajo se ha publicado en *Rev. Metal. Madrid*, 34 (1) 1998.

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

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

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

alcanzado tasas de inyección superiores a 200 kg/ta. En la figura 1 se muestra la tendencia en las tasas de inyección de carbón en los países de la UE.

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 (5 y 6). Sin embargo, se debe destacar que estos últimos valores se han obtenido en hornos experimentales y mediante modelización matemática del proceso del horno alto; por tanto, es necesario la realización de ensayos industriales a gran escala que permitan determinar los caudales máximos de inyección y la forma de llevarlos a cabo.

2. GENERALIDADES SOBRE LA ICP POR TOBERA

De forma breve serán tratadas algunas de las principales características de esta tecnología.

Una de las ventajas del CP, en comparación con otros combustibles, es su bajo costo. El carbón es más barato que el coque, incluso cuando se añaden al precio del carbón los costes de preparación y de inyección al horno alto.

En las factorías siderúrgicas que se plantean la construcción o reconstrucción de las baterías de coque, el coste del equipo de inyección de carbón es menor que la planta de coque, sobre la base de una unidad equivalente de aporte de combustible al horno alto. Los sistemas de inyección cuestan de 5.700 a 9.500 PTA/t anual de carbón inyectado. En

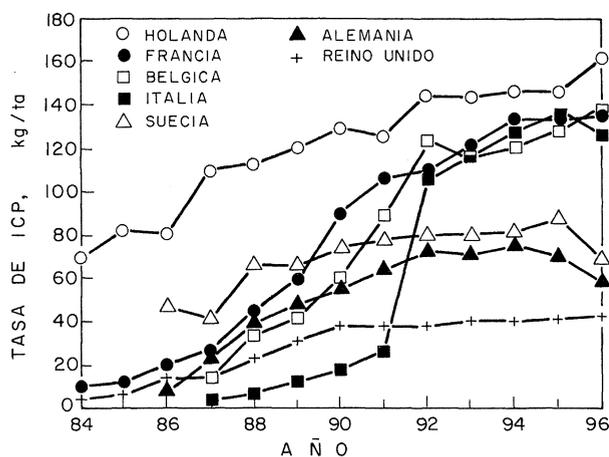


FIG. 1.— Tendencias en las tasas de inyección de carbón en los países de la UE.

FIG. 1.— Trends in the coal injection rates in EU countries.

las nuevas baterías de coque, el coste de producción es del orden de 28.500 PTA/t-año.

En la tecnología de inyección de carbón se han encontrado las siguientes dificultades tecnológicas y de explotación: aparición de masas fundidas en las toberas; quema masiva de las toberas; disminución progresiva del coeficiente de sustitución del coque por carbón; aumento de la caída de presión en el horno; aumento de la salida de carbono con el gas del tragante y con la escoria, y atascamiento de las conducciones de polvo y de los equipos de las toberas al deteriorarse el refractario del horno en las zonas de su ubicación.

Sin embargo, los avances en las técnicas de preparación del carbón y de transporte neumático han disipado la mayoría de estas dificultades y se está destacando el éxito en todo el mundo para una gran variedad de sistemas de ICP. Se ha utilizado una amplia gama de carbones no coquizables, de bajo costo, en las coladas experimentales e industriales.

Es importante señalar que el principal efecto del CP en el horno alto es la sustitución directa del carbono del coque por el carbón. Generalmente, cuanto más alto sea el contenido de carbono en el carbón inyectado, tanto más alta es la sustitución del coque, aunque naturalmente, el valor de un carbón en particular es función de muchas características, o sea, que el coeficiente de sustitución del coque por carbón depende, fundamentalmente, de las propiedades del carbón y, en particular, de los contenidos de éste de carbono, volátiles, ceniza, azufre y humedad.

2.1. Estructura del carbón

Se piensa que la estructura del carbón es altamente planar y en capas, con un volumen de poros del 8-20 %.

En la figura 2 se muestra un modelo de una estructura hipotética del carbón, establecida

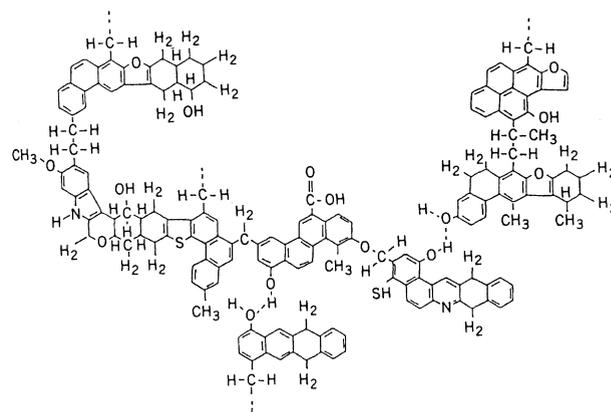


FIG. 2.— Estructura de una molécula hipotética de carbón.

FIG. 2.— Structure of a hypothetical coal molecule.

mediante la información obtenida por medidas de infrarrojo, resonancia magnética nuclear, análisis inmediato y elemental y datos de pirólisis (7-10). La materia mineral puede existir como oclusiones en la estructura orgánica base.

Las medidas de infrarrojo proporcionan las concentraciones cuantitativas para los siguientes componentes del carbón: hidróxilo, hidrógeno alifático o hidroaromático, carbono alifático y carbono aromático.

2.2. Combustión de volátiles

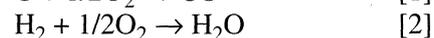
Las partículas de carbón durante su calentamiento liberan volátiles y se forma el hollín (*char*) residual. Durante la liberación de volátiles se produce una variedad de productos que incluyen alquitranes e hidrocarburos líquidos, hidrocarburos gaseosos, CO₂, CO, H₂, H₂O, y HCN. En los alquitranes se han identificado varios cientos de compuestos, la mayoría hidrocarburos aromáticos (11). Estos productos reaccionan con el oxígeno en la vecindad de las partículas de hollín aumentando la temperatura y consumiendo el oxidante. Este proceso de reacción complejo es muy importante para el control de los óxidos de nitrógeno, formación de hollín, estabilidad de las llamas del carbón e ignición del hollín. Algunos aspectos de este proceso incluyen lo siguiente:

- Liberación de volátiles del carbón-hollín.
- Condensación y repolimerización de los alquitranes en los poros del hollín.
- Evolución de la nube de hidrocarburos a través de los poros pequeños de la partícula en movimiento.
- *Cracking* de los hidrocarburos a fragmentos de hidrocarburos más pequeños, con producción local de hollín.
- Condensación de los hidrocarburos gaseosos y aglomeración de las partículas de hollín.
- Macro-mezcla de las partículas de carbón desvolatilizadas con el oxidante, por ejemplo, aire.
- Micro-mezcla de la nube de volátiles y el oxígeno.
- Oxidación de las sustancias gaseosas a productos de combustión.
- Producción de óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre por reacción de los productos de la desvolatilización y oxígeno.
- Transferencia de calor de los fluidos reaccionantes a las partículas de hollín.

A temperaturas de combustión elevadas hasta un 70 % o más de la masa de carbón se consume a través de este proceso.

En las condiciones de la inyección de carbón en el horno alto, las etapas se pueden resumir como sigue (12).

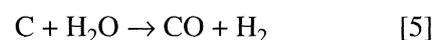
Los volátiles del carbón experimentan las siguientes reacciones de combustión en fase gaseosa:



El hollín experimenta una reacción heterogénea (sólido-gas) de combustión



Por otra parte, el coque experimenta una reacción heterogénea de combustión similar al hollín



Entre los requerimientos a la calidad del carbón se recomiendan contenidos mínimos de ceniza y elevados de volátiles. La efectividad de ignición del carbón es menor cuando disminuye la concentración de volátiles (13). Por otra parte, la cantidad de calor generado crece al disminuir el contenido de volátiles (14).

Es interesante la experiencia del Instituto para la Metalurgia Ferrosa RWTH, en Aquisgrán (Alemania), que recomienda la utilización de mezclas de carbones para su inyección al horno alto en las que uno de los carbones tenga alto contenido de volátiles, lo que permite corregir la temperatura de ignición, y el otro carbón un alto contenido de carbono fijo para eliminar las perturbaciones en la generación de calor durante la combustión (15).

2.3. Contenidos de ceniza, azufre y humedad

Las cenizas del carbón tienden a aumentar el volumen de escoria, lo que puede reducir la economía de coque al inyectar carbón al horno. La relación entre los porcentajes de cenizas en el carbón y el coque modifica la tasa de sustitución de acuerdo a la ecuación (16):

$$K_s = 1,48 - 0,66 (\% A_{\text{carbón}} / \% A_{\text{coque}}) \quad [6]$$

donde, K_s = coeficiente de sustitución del coque por carbón, kg/kg;

$A_{\text{carbón}}$ = contenido de ceniza en el carbón, %;

A_{coque} = contenido de ceniza en el coque, %.

El coeficiente de correlación de esta ecuación es 0,594. Por tanto, parece que la inyección de 1 kg de cenizas por tobera tiene mayor efecto en el consumo de combustible que 1 kg de cenizas de coque cargado en el horno.

El azufre, introducido con el carbón, puede pasar parcialmente al arrabio, en relación directa con su caudal de inyección, pero es recomendable limitar el contenido de este elemento al realizar la selección de carbones para inyectar.

La inyección de carbón, en asociación con otros parámetros del viento, permite que pueda alcanzarse y controlarse la temperatura óptima de llama en el *raceway*. En comparación con la operación “todo coque”, la inyección de carbón limita la temperatura de llama, puesto que se inyecta en condiciones ambientales, y la disociación del carbón en el *raceway* a carbono, hidrógeno, etc, es endotérmica. Esta limitación en la temperatura de llama permite que las adiciones de vapor al viento, generalmente necesarias con la operación “todo coque”, sean eliminadas.

A diferencia de los combustibles gaseosos o líquidos, el carbón tiene un contenido bajo de H₂ (en volátiles y vapor de agua), por tanto, la inyección de carbón en el crisol ejerce una débil influencia en los procesos de reducción.

El efecto combinado de inyectar carbón (ningún vapor en el viento), con el aumento de la temperatura del viento y/o enriquecimiento en oxígeno, hace mínimo el consumo de combustible y contribuye a lograr una máxima productividad en el horno alto.

La ICP proporciona un funcionamiento del horno más suave, con menos colgaduras y desprendimientos en comparación con la operación “todo coque”. Con la inyección de carbón las condiciones gasodinámicas de fusión no varían prácticamente, por tanto, un posible factor limitante en la cantidad de carbón a utilizar es lograr un buen calentamiento del crisol. La disminución de la entrada de calor, debido al menor calor de combustión del carbón, en comparación con el coque, y a la presencia de vapor de agua, que tiende a disociarse en esta zona, conllevan a la disminución de la temperatura, a tal efecto es recomendable el empleo de carbones secos en el horno.

2.4. Enriquecimiento del viento en oxígeno

Se han realizado ensayos industriales de ICP al horno alto que indican que hasta el 20-30 % de carbón no experimenta combustión en la zona de toberas, lo que hasta los años 1985-1990 se consideraba como una limitación para aumentar la tasa de ICP. Sin embargo, mediante el enriquecimiento del viento en oxígeno y la aplicación de una serie de medidas compensatorias y mejoras tecnológicas, se han logrado notables avances en este sentido (17 y 18).

Según Peters *et al.* (19), para que ocurra la combustión completa de las partículas de carbón de 1 mm de diámetro se requieren 6-7 s, cuando, en realidad, el tiempo de retención del CP en la zona de toberas es sólo de centésimas de segundo. La disminución del tamaño de las partículas y, en particular, el aumento de la temperatura del viento, reducen drásticamente el tiempo necesario para lograr una gasificación más completa. Los cálculos realizados por Baskakov (20) sobre la combustión de polvos finamente dispersos, muestran que la gasificación completa del CP se puede lograr para dimensiones de partículas menores de 0,1 mm y temperaturas del viento superiores a 1.000 °C.

2.5. Molienda del carbón

Para realizar una buena molienda, se debe utilizar carbón de tamaño inferior a 50 mm, con un índice *hardgrove* de 45. Es importante conseguir un carbón bien molido por las siguientes razones:

- El CP suministra la máxima potencia calorífica por combustión rápida y completa. Para lograr una buena eficiencia, cualquier combustible inyectado al horno debe gasificarse rápida y completamente en la zona de toberas.
- Un tamaño menor de partículas produce menor abrasión, lo que puede facilitar un trabajo prolongado e ininterrumpido de los sistemas empleados en el transporte neumático, ya que se reducen las paradas de mantenimiento por abrasión de las conducciones, tuberías y equipos de inyección.
- Se logra una distribución más uniforme del CP por toberas y se facilita el suministro estable al horno.

En la literatura se pueden encontrar descripciones detalladas de diferentes sistemas de preparación e ICP (21-27). En la figura 3 se incluye un esquema de la planta de preparación de carbón y sistema de inyección oxígeno-carbón instalado en Aceralia, en Gijón (Asturias).

La introducción creciente de esta tecnología ocasiona un cambio en el coque que se emplea en el horno; por ejemplo, el tamaño medio debe ser superior a 50 mm (M40 > 83 % y M10 < 7 %), capacidad de reacción (pérdida de masa en presencia de CO₂ a alta temperatura) < 28 %, y la resistencia después de la gasificación debe ser > 60 % (28).

Es un criterio generalizado que con una mayor estabilidad en el suministro de carbón a partir de las reservas existentes en el mundo, los precios del carbón serán a largo plazo aún mucho más bajos que los del petróleo y el gas natural (29-30).

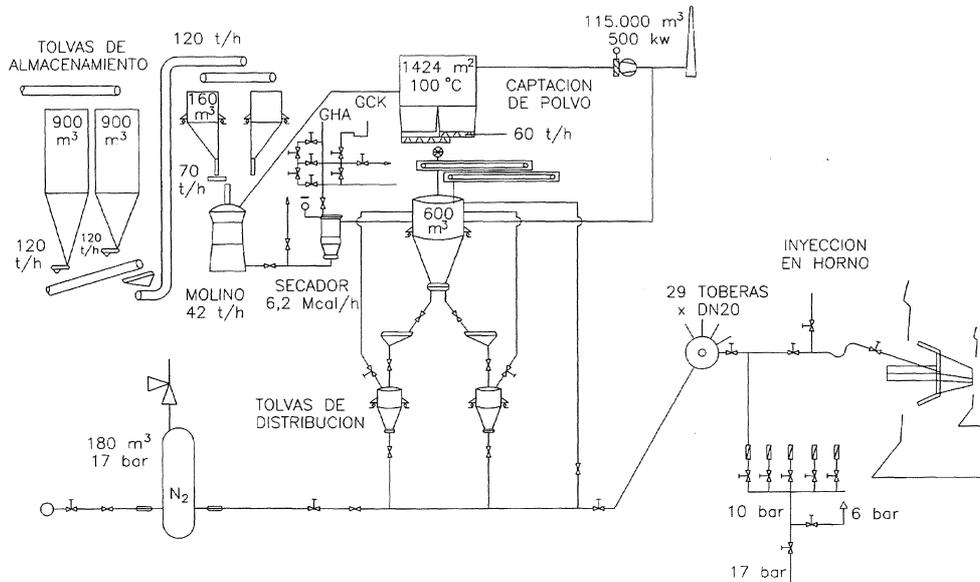


FIG. 3.— Planta de preparación de carbón y sistema de ICP de Aceralia, en Gijón.

Fig. 3.— Coal preparation plant and PCI system of Aceralia in Gijón.

3. PROBLEMAS DE FUNCIONAMIENTO DEL HORNO ALTO CON TASAS ELEVADAS DE ICP

Por consideraciones teóricas y experiencia práctica, parece que el límite de la ICP en el horno aún no se conoce. Sin embargo, debido a la tasa en aumento de ICP, parece posible conseguir el objetivo de un consumo de coque de 250 kg/ta.

En el HA-1 de Kobe Steel, en Kakogawa Works (Japón), la tasa de ICP ha aumentado de 100 a 201 kg/ta (media de 1994). Los problemas de funcionamiento que se presentaron en el horno cuando la tasa de inyección alcanzó los 180 kg/ta se muestran en la figura 4 (31). Estos problemas son:

- Aumento del flujo de gas en la periferia del horno como consecuencia de una mayor relación mineral/coque, lo que ocasiona un aumento en la pérdida de calor por las paredes del horno.
- Aumento de la caída de presión debido al aumento de la temperatura del gas en la parte superior de la cuba.
- Disminución de la permeabilidad en el crisol como resultado de la degradación del coque en la zona del hombre muerto.

Estos problemas se han resuelto al tomar las siguientes medidas en el funcionamiento en el horno:

- Control de la distribución de la carga, y con ello el control del flujo de gas, mediante la carga central del coque. La carga central del coque (Fig. 5) se consigue mediante un sistema de tamizado de coque con un solo silo para el coque central. El tamaño del tamiz para eliminar el coque pequeño se ha aumentado para el coque central. La calidad del coque central también se ha mejorado: mayor resistencia y aumento del tamaño medio de 45,9 a 49,4 mm.

Con la carga central del coque se reduce el problema de la degradación del coque (presencia de finos) en el hombre muerto, que se debe a un mayor tiempo de residencia del coque en el horno, lo que ocasiona un aumento de la caída de presión. La carga central también es necesaria para mantener la zona cohesiva con forma de V invertida, esencial para la buena marcha del horno.

- Mejora del *raceway* por control de la combustión del CP por posición correcta de la lanza de inyección en la tobera y por velocidad adecuada del viento enriquecido en oxígeno.
- La presencia de una cantidad mayor de arrabio y escoria fundidos en el crisol causa una mayor caída de presión en el horno debido a que el espacio para el flujo de gas se reduce como consecuencia del mayor nivel de líquido en el crisol. Para disminuir este nivel se recomienda acelerar la velocidad de colada del arrabio y realizar la colada a través de dos piqueras simultáneamente, en caso de que fuera necesario.

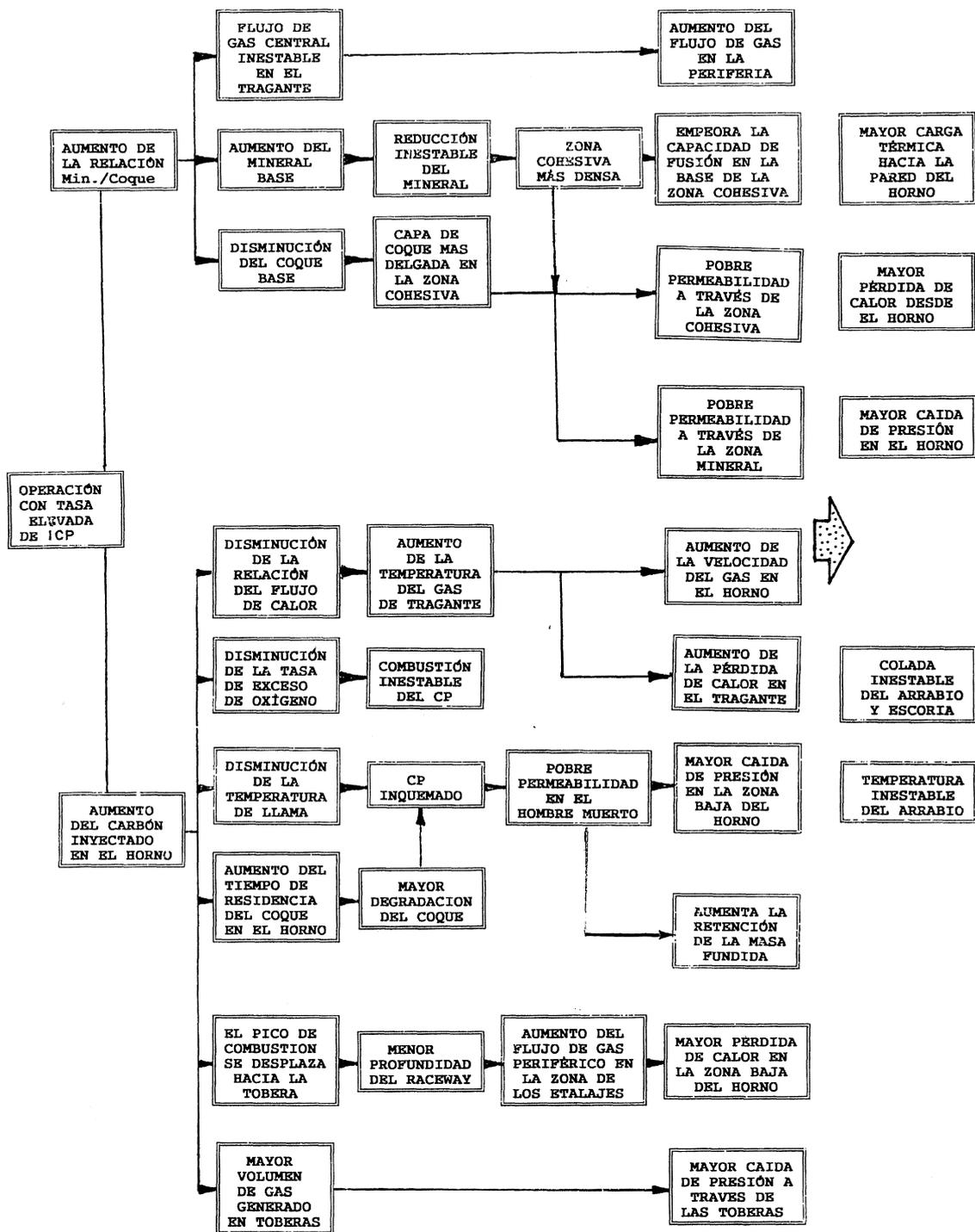


FIG. 4.— Problemas de funcionamiento con altas tasas de ICP.

Fig. 4.— Operation problems with high PCI rates.

4. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN INDUSTRIAL

A continuación será tratada la aplicación industrial de esta tecnología en los principales países productores de arrabio. En la tabla I se incluyen los

índices medios del funcionamiento de los hornos altos en los países de la UE en 1996. En la tabla II se incluyen datos de los hornos con inyección de carbón que presentan mejores índices de funcionamiento en la UE.

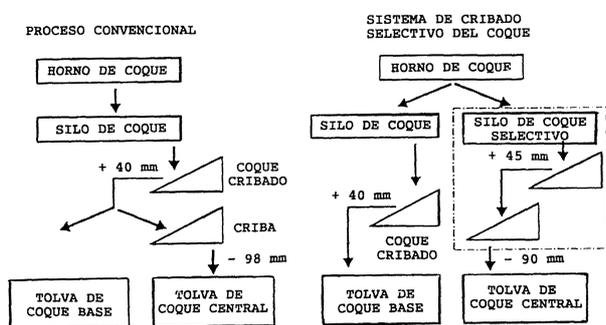


FIG. 5.— Carga central selectiva de coque.

FIG. 5.— *Selective center coke charge.*

4.1. Alemania

En 1983, en la planta Maxhütte Unterweertllern, se puso en funcionamiento la primera instalación de ICP, y en 1985, la segunda instalación (3). En aquellos momentos, para la inyección se empleaba carbón pardo en caudales de 70-80 kg/ta con un coeficiente de sustitución del coque por carbón de 0,55 kg/kg; en ese período se utilizaron más de $2 \cdot 10^5$ de carbones pardos, con una economía de $1,1 \cdot 10^5$ t de coque. En 1989 se observa un aumento del contenido de azufre en el carbón; por tanto, fue

necesario reducir el caudal de inyección por debajo de 70 kg/ta. Posteriormente, se propuso la utilización de carbones con menor contenido de azufre (1,0-1,5 %) para incrementar el caudal de carbón inyectado por encima de 100 kg/ta.

En 1983, la Thyssen Stahl comenzó a utilizar esta tecnología en el HA-4 instalado en Hamborn; en 1987 se introduce en los HA-1 (Schwelgern) y HA-6 (Ruhrtort). A finales de 1989 se habían empleado más de $2,2 \times 10^6$ t de diferentes carbones desde antracita hasta lignito (28, 32 y 33). En 1990, en el HA-1, se logra incrementar el caudal de CP hasta 175 kg/ta con un consumo de coque de 305 kg/ta. Este horno, con 13,6 m de diámetro de crisol, funcionaba en esos momentos con una temperatura de viento de 1.177 °C y un contenido de oxígeno en el viento de 22,4 %.

El empleo creciente del CP lleva a la ampliación y reconstrucción de las instalaciones de molienda existentes con el objetivo de ampliar la capacidad de la instalación desde 0,3 hasta $1,0 \times 10^6$ t. A tal efecto se instalan nuevos molinos que preparan el carbón (80 % en fracción < 0,080 mm) para su distribución a los hornos.

En el período octubre-noviembre de 1992, el HA-9 (Hamborn) funcionó con una ICP de 224 kg/ta y el consumo de coque se redujo hasta 268 kg/ta (34); para ello, ha sido decisivo el sistema que

TABLA I.— Índices medios de funcionamiento de los hornos altos con inyección de carbón en la UE en 1996

TABLE I.— *Mean parameters operation of blast furnace with coal injection in European Community in 1996*

Índices	Unidades	Alemania	Bélgica	Francia	Holanda	Italia	R.U.	Suecia
Hornos en funcionamiento	Unidad	7	6	8	2	3	3	4
Diámetro de crisol	m	11,34	9,73	10,31	12,4	11,60	8,78	7,88
Volumen útil	m ³	2.252	1.754	2.100	3.059	2.551	1.443	1.054
Utilización	%	97,6	97,3	95,2	96,1	98,0	98,0	94,9
Producción diaria	t/24h	6.076	4.096	4.431	8.140	7.297	3.333	2.543
Productividad	t/m ³ ·24h	2,36	2,33	2,11	2,66	2,86	2,31	2,41
Consumo de coque	kg/ta	361	386	351	335	354	347	397
Inyección de carbón	kg/ta	115	128	129	164	146	151	70
Volátiles en el carbón	%	28,7	26,3	21,8	39,1	25,2	18,2	36,9
Carga férrea:								
– mineral de hierro	%	9,54	7,83	11,88	3,18	8,22	18,81	0
– sinter	%	72,49	82,21	87,21	47,20	74,27	73,61	0
– pellets	%	17,71	9,90	0,30	49,62	17,51	7,58	97,00
– otros	%	0,26	0,06	0,61	0	0	0	3,00
Temperatura del viento	°C	1.175	1.112	1.172	1.198	1.182	1.120	1.047
Oxígeno en el viento	%	23,6	24,0	22,6	25,7	25,2	26,6	22,8
Temperatura de llama	°C	2.182	2.187	2.138	2.165	2.146	2.237	2.200
Contenido en el arrabio:								
– silicio	%	0,53	0,58	0,48	0,41	0,63	0,59	0,51
– azufre	%	0,043	0,043	0,026	0,039	0,029	0,030	0,060
Temperatura del arrabio	°C	1.495	1.480	1.481	1.509	1.504	1.478	1.467
Volumen de escoria	kg/ta	283	274	306	216	293	277	162

TABLA II.– Índices de funcionamiento de hornos altos con inyección de carbón en 1996

TABLE II.– Parameters operation of blast furnace with coal injection in 1996

Índices	Thyssen Hamborn HA-9 Alemania	Sidmar Gent HA-A Bélgica	Sollac Dunkerque HA-4 Francia	Hoogovens Ijmuiden HA-6 Holanda	Ilva Taranto HA-5 Italia	British Steel Scunthorpe HA-Queen Mary. R.U.
Diámetro de crisol, m	10,2	10,0	14,0	11,0	14,0	8,33
Volumen de trabajo, m ³	1.833	1.776	3.648	2.328	3.650	1.255
Productividad, t/m ³ ·24h	2,68	2,77	2,4	2,9	2,92	2,38
Carga, %:						
– mineral de hierro	5,29	1,62	19,52	3,05	7,69	21,40
– sinter	70,87	91,45	80,48	47,24	74,27	70,98
– pelets	18,50	6,87	–	49,71	18,04	7,62
– otros	5,34	0,06	–	–	–	–
Consumo de coque, kg/ta	338	303	316	328	349	348
Carbón inyectado, kg/ta	141	181	174	170	143	155
Volátiles en el carbón, %	25,7	26,6	20,6	39,1	25,2	18,2
Oxígeno en el viento, %	23,7	24,5	23,6	26,6	25,2	26,5
Temperatura del viento, °C	1.132	1.209	1.210	1.149	1.213	1.118
Temperatura de llama, °C	2.155	2.187	2.114	2.155	2.164	2.236
Contenido en el arrabio, %:						
– silicio	0,408	0,38	0,338	0,40	0,46	0,69
– azufre	0,038	0,018	0,026	0,039	0,020	0,032
Temperatura del arrabio, °C	1.503	1.488	1.491	1.512	1.511	1.471
Volumen de escoria, kg/ta	296	271	306	216	293	268

utiliza lanzas dúplex y coaxiales para el suministro de la mezcla carbón/oxígeno, lo que no sólo disminuye el tiempo de ignición sino que también incrementa la combustión. Este sistema también se instaló en los HA-4 y HA-7 de Hoëch Stahl (Vestfallehütte) (35).

4.2. Francia

La Unión Lorfonte (Uckange) inició la ICP en 1982 (36). Entre septiembre de 1988 y junio de 1992 se montan sistemas de recepción, preparación y almacenamiento del carbón. La instalación incluía molinos de martillos, secado de los polvos recuperados y los correspondientes inyectores (37 y 38). En esta fábrica se realizaron ensayos para la inyección simultánea de CP y mineral de hierro mediante antorchas de plasma colocadas en 6 de las 14 toberas del horno (6 y 39). Actualmente, esta fábrica no está en funcionamiento.

Sollac ha introducido la ICP en sus hornos en Dunkerque (1983) y Fos (1990). En el HA-2 de Dunkerque, en 1985, mediante inyección de 143 kg/ta se logra reducir el consumo de coque hasta

333 kg/ta. En 1986, se introduce esta tecnología en el HA-4, y en 1987, en el HA-7; sin embargo, los caudales de inyección eran moderados debido a la insuficiente capacidad de preparación del carbón, lo que fue solucionado al instalar nuevos molinos (40).

De mayo a julio de 1990, el HA-4 funciona con tasas de ICP de 156-180 kg/ta, logrando disminuir el consumo de coque por debajo de 300 kg/ta (41). En todo este período, el funcionamiento del horno es estable con una productividad de 2,4 t/m³·24 h. El contenido de oxígeno y la temperatura del viento alcanzan 22,5 % y 1.200 °C, respectivamente. La temperatura adiabática de combustión disminuye hasta 2.050-2.100 °C con un aumento de la temperatura del gas de tragante de 150 a 190 °C. El contenido de silicio en el arrabio se mantiene entre 0,2-0,3 %. El grado de utilización del CO en la periferia del horno fue de 0,48-0,50; en la parte intermedia de 0,55-0,58 y en el eje de 0,25-0,35 %. En mayo-junio de 1992, este horno logra el récord de ICP al trabajar con caudal de 194 kg/ta con un consumo mínimo de coque de 287 kg/ta (42). Estos elevados índices de operación se repiten entre julio de 1995 y enero de 1996 (43).

En Fos se puso en funcionamiento una instalación de ICP en 1990 (44 y 45). En uno de los hornos, entre mayo y septiembre de ese año, el caudal de ICP se incrementó de 73 a 128 kg/ta, con una inyección simultánea de 14 kg/ta de gas de batería; esto permitió disminuir el consumo de coque de 381 a 327 kg/ta (46). En el proyecto de remodelación de esta fábrica se prevé estabilizar el consumo de coque en 300 kg/ta mediante una tasa de ICP de 170 kg/ta (47).

En la figura 6 se muestra la evolución del consumo de combustible en el HA-4 (Dunkerque) y el HA-1 (Fos) entre 1988 y 1995.

4.3. Holanda

Hoogovens en sus hornos instalados en IJmuiden (HA-6 de 11 m de diámetro de crisol y HA-7 de 13,8 m) comenzó la inyección de carbón en 1982. Durante 14 años se han inyectado más de 20 clases de carbones con un intervalo amplio de composiciones: 17,5-42,4 % volátiles; 3-11 % cenizas y 7,5-8,5 % humedad. El coeficiente de sustitución del coque por carbón ha oscilado entre 0,79 y 0,96 kg/kg (48).

En 1988, la capacidad de la planta de molienda de carbón aumentó de 30 a 50 t/h, lo que ha permitido aumentar la tasa de ICP de 100 a 140 t/ta (26). A partir de 1989, en que el caudal de carbón inyectado alcanza 120 kg/ta, el contenido de oxígeno en el viento se mantiene entre 23-25 %, lo que garantiza mantener la temperatura adiabática en 2.200 °C. En 1992, en el HA-6, se realizaron ensayos de inyecciones de 204-218 kg/ta, con un consumo de

oxígeno en el viento del 26 %, lográndose un consumo mínimo de coque de 270 kg/ta (49 y 50). Sin embargo, al trabajar con tasas de ICP superiores a 200 kg/ta, se observa cierto empeoramiento en el descenso de la columna de coque en el horno como resultado del aumento de la viscosidad de la escoria, y también un aumento en la caída de presión de 0,2-0,3 bares como consecuencia de la disminución del espesor de las capas de coque en la zona cohesiva del horno (51).

Actualmente, en los dos hornos altos que funcionan en el país se logran las mayores tasas de inyección de la UE (Tabla III); de ellos, el HA-6 presenta los mejores índices de funcionamiento (Tabla II).

4.4. Italia

Ilva comenzó en 1991 la ICP en los cuatro hornos instalados en Taranto (HA-1, HA-2, HA-4 y HA-5). En los HA-2 y HA-4 se alcanza un caudal de inyección de 150 kg/ta a los cinco meses de funcionamiento, y en el HA-1 esto se logra en sólo tres meses. En abril de 1992 ya se logra operar el HA-2 con un consumo de coque de 324 kg/ta (52-56).

En la tabla III se incluyen los resultados de funcionamiento de estos hornos desde su puesta en funcionamiento, y se destaca la reducción considerable en el consumo de coque y la mejora de la productividad, tanto para cada horno como para la fábrica en su conjunto. Destaca el trabajo del HA-2 durante 1994, cuando reduce su media de consumo de coque hasta 309 kg/ta mediante tasas medias de ICP de 187 kg/ta, aunque la mayor tasa de inyección (197 kg/ta) se logró en el HA-4 en abril de 1994 (57).

4.5. Reino Unido

La British Steel, en sus cuatro hornos instalados en Scunthorpe, tiene una capacidad de ICP superior a 10.000 t/24 h (58). A los ensayos realizados en el horno Queen Victoria (1.537 m³), se atribuyen varias marcas mundiales en el consumo de coque. En un primer período se establece un consumo de coque de 289 kg/ta con un caudal de inyección de carbón de 208 kg/ta (59). En un segundo período de cuatro semanas se reduce el consumo de coque hasta 284 kg/ta con inyección de carbón de 200 kg/ta, aunque posteriormente se logra, durante 28 días, una disminución del consumo de coque hasta 262 kg/ta mediante la inyección de 182 kg/ta (60 y 61). Durante la etapa experimental de 18 semanas, el horno funcionó con estabilidad.

Las empresas British Steel y Simon Macawber han elaborado una tecnología para inyectar carbón

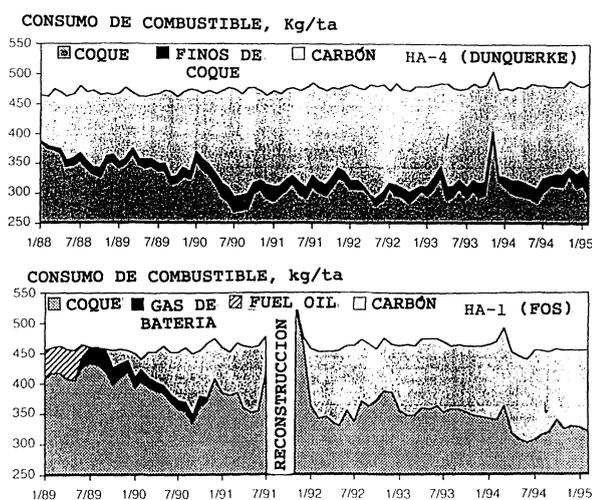


FIG. 6.— Tendencias en el consumo de combustible de Sollac en el HA-4 (Dunkerque) y HA-4 (Fos).

FIG. 6.— Trends in fuel rate consumption of Sollac in BF-4 (Dunquerke) and BF-4 (Fos).

TABLA III.– Hornos altos en funcionamiento en Taranto (Italia) e IJmuiden (Holanda)

TABLE III.– Operating blast furnace in Taranto (Italy) and IJmuiden (Netherlands)

Índices	Año	ILVA (Taranto), Italia				HOOGOVS (IJmuiden), Holanda	
		HA-1	HA-2	HA-4	HA-5	HA-6	HA-7
Inyección de carbón, kg/ta	1991	0	56	28	6	138	147
	1992	117	148	139	103	178	123
	1993	116	174	164	116	171	127
	1994	153	187	175	129	177	125
	1995	159	170	150	134	161	126
	1996	–	151	143	143	170	157
Consumo de coque, kg/ta	1991	420	439	412	420	357	349
	1992	353	337	332	361	304	363
	1993	366	320	320	354	320	359
	1994	334	309	324	357	331	369
	1995	335	332	346	350	339	370
	1996	–	354	360	349	328	341
Productividad, t/m ³ ·24h	1991	2,40	2,32	2,50	2,48	2,61	2,02
	1992	2,50	2,69	2,66	2,44	2,62	2,24
	1993	2,48	2,82	2,69	2,45	2,73	2,46
	1994	2,21	2,84	2,67	2,41	2,68	2,55
	1995	2,53	2,70	2,61	2,57	2,92	2,52
	1996	–	2,82	2,81	2,92	2,90	2,51

granulado en caudales superiores a 200 kg/ta, en uno de los hornos instalados en Scunthorpe (62 y 63). El carbón granulado está constituido por partículas con granulometría inferior a 2 mm. El consumo de coque en los hornos en Scunthorpe disminuyó de 500 a 360 kg/ta trabajando con caudales de inyección de carbón de 100 kg/ta. La productividad de los hornos aumentó de 1,3 a 2,24 t/m³·24 h y se logró una mejora en la estabilidad de los hornos. En los ocho primeros años de explotación del sistema en los hornos, se consumieron 1,6·10⁶ t de carbón granulado, mientras que entre 1994 y 1995, el consumo de carbón granulado ya era superior a 5·10⁵ t/año, y para 1996-1997 se prevé que sea superior a 6·10⁵ t/año (64).

La British Steel, en el horno situado en Ravenscraig, construyó una instalación para la inyección de carbón granulado en cantidades superiores a 200 kg/ta y se han realizado inyecciones hasta 300 kg/ta, lográndose consumos mínimos de coque del orden de 270 kg/ta (65).

4.6. Bélgica

La inyección de carbón se inicia en 1982, lográndose las mejores tasas de inyección a partir

de 1990. En 1995, siete de los ocho hornos funcionaban con ICP con un caudal promedio de 125 kg/ta, y con un consumo de coque de 384 kg/ta. El HA-A de Sidmar, de 10 m de diámetro de crisol, instalado en Gante, tiene los mejores índices de funcionamiento. ICP: 181 kg/ta; consumo de coque: 303 kg/ta, y productividad: 2,77 t/m³·24 h. Los mejores resultados se han obtenido con tasa de ICP de 194 kg/ta y un consumo mínimo de coque de 278 kg/ta (66).

4.7. Suecia

SSAB inició la ICP en 1986 con un promedio de 40 kg/ta. Desde 1988 se mantiene estable (60-80 kg/ta), lo que ha permitido reducir el consumo de coque en 60 kg/ta. A partir de ese momento, ha sido prácticamente nula la inyección de fuel oil. Durante 1995 y 1996, se observa en los hornos de Oxelösund una tendencia a inyectar caudales de carbón superiores a 90 kg/ta; por ejemplo, en 1995, en el HA-4 se logra disminuir el consumo de coque hasta 348 kg/ta con una tasa de inyección de carbón de 119 kg/ta.

4.8. España

En diciembre de 1995 funcionaban seis hornos altos con una producción de $5,5 \times 10^6$ t/año, que utilizaban fuel-oil como combustible auxiliar. Dentro del programa de remodelación y modernización de la industria siderúrgica española se prevé su sustitución por dos hornos altos de un diámetro de crisol de 11,3 m. La capacidad conjunta de producción es de $4,2 \times 10^6$ t/año. En la tabla IV se incluyen las principales características de estos hornos, que funcionarán con ICP en caudales de hasta 175-190 kg/ta, lo que permitirá disminuir el consumo de coque hasta 310-340 kg/ta. Entre las principales características de la instalación de inyección de carbón por toberas con capacidad nominal de 43,2 t/h para cada horno, se encuentran: grado de molienda, 80 % < 0,075 mm; molinos de rodillos; inyección por lanza; 2 tolvas de alimentación de 900 m³ c/u, y un sistema de captación de polvo de 115.000 m³/h. En la figura 3 se incluye el esquema de este sistema de inyección. El primero de estos hornos, HA-B, fue puesto en marcha el 30 de septiembre de 1996, y el segundo, HA-A, el 10 de noviembre de 1997. La tasa media de ICP en el período enero-mayo de 1998 ha sido: HA-B, 129 kg/ta, y HA-A, 133 kg/ta.

4.9. Antigua URSS

Los primeros ensayos de ICP se realizaron en los años 1948 y 1956 en la fábrica en Dnieprozerzhinsk. Entre 1960 y 1970 funcionaban cinco instalaciones experimentales-industriales en las fábricas siderúrgicas en Zaparozh, Dnieprozerzhinsk, Donetsk, Novokuznetsk y Karaganda.

En 1980, en la fábrica siderúrgica de Donetsk (Ucrania), se construye y pone en explotación el pri-

TABLA IV.- Características de los hornos A y B de Aceralia (Gijón)

TABLE IV.- Characteristics of blast furnaces A and B in Aceralia (Gijón)

Productividad por horno	Media 5.310 ta/día Máximo 5.923 ta/día
Diámetro de crisol	11,3 m
Volumen total	2.731 m ³
Volumen útil	2.349 m ³
Número de toberas	29 (con doble cámara)
Número de piqueras	3
Inyecciones	Oxígeno Carbón pulverizado (hasta 175 kg/ta)

mer complejo industrial de Europa para la ICP en dos hornos altos. La capacidad anual del complejo es de $1,4 \cdot 10^5$ t de carbón (Ref. 4 de la I parte). En este período se han utilizado más de un millón de toneladas de CP elaborado a partir de concentrado de hullas magras. El caudal de ICP era de 70-90 kg/ta, con un coeficiente de sustitución de 0,9 kg/kg. La característica de esta tecnología era la utilización simultánea de CP y gas natural (60-70 m³/ta (Ref. 2 de la I parte). El consumo de coque se reduce de 590-600 kg/ta (en 1980) a 450-460 kg/ta (a comienzos de 1990) con un aumento de la productividad de los hornos y de la calidad del arrabio (67).

Actualmente, debido a la escasez de gas natural existente en Ucrania, en esta fábrica se pasó a utilizar un 100 % ICP. Se ha elaborado una serie de medidas especiales para intensificar la combustión del carbón inyectado en la zona de toberas y mejorar los regímenes de escoria y gasodinámico de la fusión, lo que permitirá incrementar la cantidad de carbón inyectado hasta más de 200 kg/ta (68).

4.10. EE.UU.

Los primeros ensayos de inyección se realizaron en un horno de AK Steel (antes ARMCO) en Ashland (Kentucky) en 1963; sin embargo, en los 20 años posteriores no tuvo mayor difusión debido al bajo costo y efectividad de la inyección de fuel-oil (hasta la década de los 70) y de la inyección de gas natural (1980-1990). La necesidad de realizar grandes inversiones para modernizar o reconstruir las viejas baterías de coquización y los requerimientos de conservación del medio ambiente forzaron a las compañías norteamericanas a reevaluar económicamente la inyección de carbón desde inicios de los 90 (69).

Desde febrero de 1993 a enero de 1996, la inyección de carbón fue puesta en servicio en doce hornos altos, estando prevista su introducción en uno o más hornos durante 1996-1997. Hasta enero de 1996 se utilizaban cinco sistemas de inyección en seis plantas de preparación de carbón, con una capacidad combinada de molienda de $4,3 \times 10^6$ t. En dos años se alcanzaron tasas de inyección de carbón mayores de 150 kg/ta y consumos de coque inferiores a 340 kg/ta (70 y 71).

En este período, la U.S. Steel equipó sus cuatro hornos altos en Gary (Indiana) con ICP, que fueron puestos en marcha en febrero-julio de 1993. Inland Steel también instaló la ICP en los HA-5, HA-6 y HA-7 en Indiana Harbor (Indiana) en agosto-septiembre de 1993. En agosto de 1994, la USS/Kobe pone en marcha la ICP en el HA-3 en Lorain (Ohio). En noviembre de 1994, la Bethlehem Steel instala la inyección de carbón granulado en los HA-C y HA-D en Burns Harbor (Indiana). La

tecnología para la inyección de carbón ha sido ejecutada por la British Steel, que ha participado en los trabajos de puesta en marcha y funcionamiento de la instalación.

Entre diciembre de 1995 y enero de 1996, Stelco introduce la ICP en los HA-D y HA-E en Hilton (Ontario). En la figura 7 se muestra la adopción de la inyección de carbón en los EE.UU.

En la tabla V se incluyen datos de funcionamiento de los hornos altos que presentan mejores índices de funcionamiento.

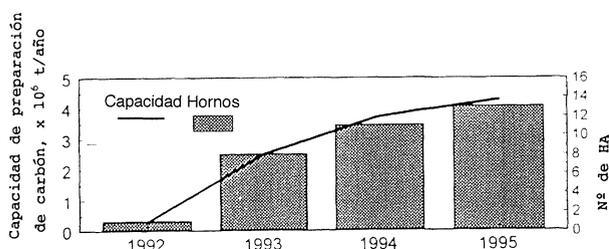


FIG. 7.— Adopción de la inyección de carbón en EE.UU. Capacidad de preparación de carbón, 10^6 t/año.

FIG. 7.— Adoption of coal injection in USA. Coal preparation capacity, 10^6 t/año.

4.11. Japón

En 1981 se introduce la ICP en el HA-1, en Oita Works (12). Desde esa fecha, las principales compañías siderúrgicas han desarrollado la inyección en la mayoría de sus hornos. En octubre de 1994 funcionaban con ICP 26 de los 29 hornos altos (72 y 73).

En la tabla VI se incluyen valores promedio de funcionamiento de los hornos para el período 1990-1996. Se destaca la reducción continua del consumo de coque, así como el incremento sucesivo del caudal de ICP (74). En la figura 8 se muestra la tendencia progresiva en la tasa de inyección.

Kobe Steel, en Kakogawa, comienza a utilizar la ICP en 1983 en los HA-2 y HA-3, y en 1988 en el HA-1. Hacia 1989, todos los hornos de esta compañía estaban equipados con sistemas de ICP (75 y 76). La cantidad de carbón inyectado en el HA-2 (3.850 m^3) se incrementa desde 50-70 kg/ta hasta que en 1990 se realizan ensayos con inyección simultánea de CP (128 kg/ta) y fuel-oil (65 kg/ta), logrando un consumo mínimo de coque de 289 kg/ta (77). En el HA-3, a partir de la puesta en marcha, se trabaja durante 42 meses con caudales de 100 kg/ta. En abril de 1990 comienza a aumentar el caudal, y en 1991, se alcanza una media anual de

TABLA V.— Marcas mensuales de tasas de coque en los hornos altos de EE.UU. que utilizan inyección de carbón

TABLE V.— Monthly coke rate records of USA blast furnace using coal injection

Índices	Inland Steel Indiana HA-7	U.S. Steel (Gary)			AK Steel Ashland HA-Amanda	USS/Kobe Lorain HA-3
		HA-4	HA-6	HA-13		
Período	05/95	12/94	05/94	06/95	10-12/94	10/95
Diámetro de crisol, m	13,7	8,8	8,5	11,1	10,2	8,7
Volumen útil, m ³	3.738	1.496	1.506	2.955	1.995	1.443
Productividad, t/m ³ ·24h	2,35	2,36	2,00	2,95	2,41	2,29
Carga, %:						
– mineral de hierro	0,8	0	0	0	0	0
– pelets	86,4	85,5	73,8	71,9	92,8	93,6
– sinter	11,9	0	9,2	24,8	0	0
– otros	0,9	14,5	17,0	3,3	7,2	6,4
Consumo de coque, kg/ta	310	336	337	281	370	338
Carbón inyectado, kg/ta	166	164	162	190*	163	181
Oxígeno en el viento, %	24,8	25,4	25,1	29,3	26,3	23,6
Temperatura del viento, °C	1.264	1.041	961	1.147	1.049	1.076
Contenido en el arrabio, %:						
– silicio	0,34	0,76	1,10	0,41	0,66	1,06
– azufre	0,035	0,051	0,049	0,066	0,052	0,062
Temperatura del arrabio, °C	1.494	1.474	1.472	1.483	1.470	1.479
Volumen de escoria, kg/ta	274	236	230	256	205	190

* En este período el horno funcionó con adición complementaria de gas natural (7 kg/ta) y de fuel-oil (35 kg/ta).

TABLA VI.— Índices de funcionamiento de los hornos altos en Japón

TABLE VI.— Parameters operation of blast furnaces in Japan

Índices	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996*
Materiales féreos, kg/ta	1.626	1.631	1.627	1.627	1.627	1.629	1.630
Sínter y pelets en la carga, %	85,0	84,1	84,1	83,7	83,6	81,9	82,7
Productividad, t/m ³ ·24h	1,99	2,03	1,85	1,90	1,91	1,93	1,88
Consumo de coque, kg/ta	446	431	432	427	414	412	404
Inyección de carbón, kg/ta	54,0	71,0	80,7	84,5	96,5	99,1	113,4
Consumo de combustible, kg/ta	505	505	515	514	513	515	520

* Hasta septiembre de 1996.

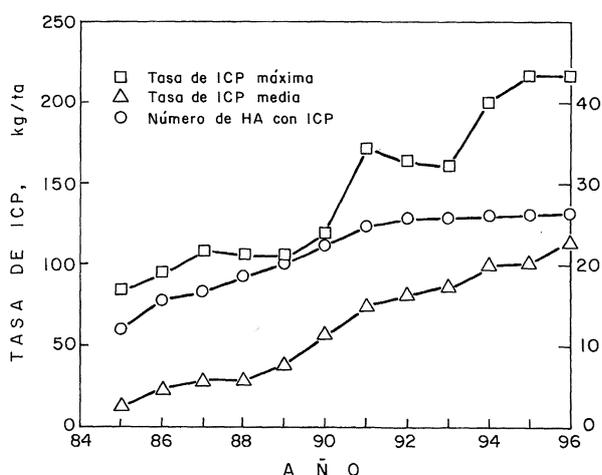


FIG. 8.— Cambios en las tasas de ICP de Japón.

FIG. 8.— Changes in PCI rates of Japan.

180 kg/ta. A tal efecto, se acomete una serie de medidas compensatorias de perfeccionamiento del régimen de viento y la carga de coque hacia la zona central del horno, así como una disminución de la carga mineral hacia las paredes del horno (78). Durante 1992, el HA-1 presenta una media de 187 kg/ta (79 y 80). En agosto de 1994, este horno funciona con un nivel máximo de inyección de 207 kg/ta (81 y 82).

Sumimoto Metal comienza a utilizar esta tecnología en 1985 en Wakayama Steel Works, y en 1986 en Kokura Steel Works. Inicialmente, las tasas de inyección eran bajas (25 kg/ta), pero en febrero de 1989 se incrementa hasta 75 kg/ta. Tomando como base la experiencia de cinco años de explotación de los sistemas de ICP, se elabora uno más perfeccionado que se instala en el HA-2 de Kashima Steel Works; la particularidad de este sistema está dada por su alta productividad de molienda (40 t/h) y la mejora, en comparación con el sistema anterior, de los niveles de automatización y seguridad industrial (81). Este sistema, en explotación desde 1990, permite trabajar con caudales de ICP entre 150-200 kg/ta.

En 1990, en Kokura Steel, después de poner en marcha la instalación de preparación de carbón, se realizan ensayos de ICP con caudales de 150 kg/ta, utilizando viento enriquecido en oxígeno.

En la Nippon Steel las tasas de inyección eran, inicialmente, de 40-50 kg/ta, pero se incrementaron sucesivamente. Por ejemplo, en los HA-1 y HA-3, en Nagoya, se necesitaron algunos meses para elevar la tasa de ICP hasta 100 kg/ta; sin embargo, la experiencia adquirida permitió que en el HA-2 se alcanzase este caudal en sólo 20 días (83).

En mayo de 1989 se inicia la ICP en el HA-4 (5.151 m³), en Kimitsu. A partir de 1990, la tasa de inyección ha sido de 132 kg/ta con un consumo de coque de 366 kg/ta. En este período se estableció que, para lograr un consumo total de combustible inferior a 500 kg/ta, el límite superior de carbón inyectado (para 100 % de combustión) debe ser de 180 kg/ta, y que el tamaño de molienda del carbón debe situarse en el 80 % < 0,070 mm (84). En el HA-3 de esta fábrica se han realizado ensayos para conocer la influencia de la inyección de 200 kg/ta sobre el estado térmico del *raceway* y la zona de toberas (85-87).

En marzo de 1994, el HA-2 (5.245 m³), en Oita, logra un consumo mínimo de combustible de 455 kg/ta mediante un caudal de ICP de 98 kg/ta (72).

En el HA-4 de Fukuyama Works de la Nippon Kokhan Kompany (NKK) se establece, en octubre de 1994, un récord mundial de inyección al trabajar durante un mes con 218 kg/ta (88 y 89). El sistema de inyección se pone en explotación en abril de 1994 y en sólo seis meses logra el objetivo inicial de inyectar tasas de 200 kg/ta. Este novedoso sistema de inyección incorpora técnicas de vanguardia: doble lanza excéntrica enfriada por agua que permite elevar la eficiencia de la combustión en 10-15 %; empleo de un nuevo híbrido pelets-sínter, que prevé mejoras en las características de reductibilidad y fusión; nuevas tecnologías para controlar la distribución de la carga al trabajar el horno con caudales elevados de ICP, y tecnologías de control térmico y de funcionamiento basadas en algoritmos. El récord de

Fukuyama está cercano al límite superior de la capacidad que presenta el sistema, cuyo objetivo es lograr un nivel de ICP de 250 kg/ta (88 y 90).

4.12. República Popular China

Actualmente, funcionan más de 500 hornos, la mayoría de pequeño volumen. Solamente 35 hornos tienen un volumen superior a 1.000 m³ y otros 22 se encuentran entre 500-999 m³. En los últimos años se observa una modernización en la industria siderúrgica (91), que incluye la construcción de 10 nuevos hornos de más de 2.000 m³, entre ellos dos de 4.063 m³ (92).

Los primeros ensayos de inyección de carbón se realizaron en un horno de 576 m³ (93). La tasa máxima de inyección fue de 279 kg/ta, y se logró disminuir el consumo de coque hasta 336 kg/ta. El horno funcionó con temperatura de viento de 1.150 °C (enriquecido hasta un 24,2 % O₂). En el período 1986-1987 en el HA-2 de Anshan Iron & Steel Co., al incrementar el caudal de CP de 73 a 170 kg/ta, se redujo el consumo de coque de 510 a 428 kg/ta. Este incremento en la ICP se acompaña con un aumento en la concentración de oxígeno en el viento hasta 28,6 %. Se señala que para garantizar la combustión del carbón es necesario mantener la temperatura de llama por debajo de 2.100 °C (a esta temperatura, el caudal máximo de inyección es de 130 kg/ta, cuando se trabaja con viento atmosférico). Al enriquecer el viento con oxígeno y situar entre el 23 y el 25 %, la tasa de inyección de carbón se puede incrementar de 175 a 220 kg/ta. Para un caudal de ICP de 220 kg/ta se logra una economía de coque de 154-156 kg/ta con un coeficiente de sustitución de coque por carbón de 0,7-0,8 kg/kg (94-96).

En la actualidad, el 75 % de los hornos funcionan con ICP. Se debe destacar que en 1995, para cumplir el plan de fabricación de arrabio se requerían 66 × 10⁶ t de coque metalúrgico; sin embargo, la ausencia de las suficientes instalaciones de lavado de los carbones no permite satisfacer este volumen de coque, por tanto, la tecnología de ICP con viento enriquecido en oxígeno se considera como la vía idónea a desarrollar (97).

4.13. Taiwan

En 1988, China Steel Corp. introduce el sistema de ICP, diseñado por ARMCO, en los HA-1 (2.434 m³) y HA-2 (2.850 m³), para tasas de inyección de 80 kg/ta, pero se propone incrementar la ICP hasta 100 kg/ta. Los hornos trabajan con 21,5-22,0 % O₂. En 1993, durante una semana, trabajaron con un caudal de 104 kgCP/ta, con un consumo de coque

de 401 kg/ta. El coeficiente de sustitución de coque por carbón fue de 1,17 kg/kg, y los hornos funcionaron con una productividad de 2,03 t/m³·24 h (98).

4.14. Corea del Sur

POSCO, en Kwangayang Steel Works, tiene en operación, desde 1985, tres hornos altos de 3.225 m³ de volumen útil c/u, (99). Desde esa fecha se ha acometido una modernización de la fábrica que incluye la puesta en marcha de un cuarto horno de igual capacidad en setiembre de 1992. Los HA-1 y HA-2 trabajan con caudales de ICP de 80 kg/ta; el HA-3 hasta 124 kg/ta, y el HA-4 con 150 kg/ta. Se destaca que, paralelamente al incremento de los caudales de ICP, se ha logrado un aumento en la productividad de los hornos (100-102). Esta fábrica que produce 11,4 × 10⁶ ta/año, funciona con altos contenidos de Al₂O₃ en la escoria. Desde su puesta en marcha se han utilizado 18 clases de carbones con un contenido relativamente alto en volátiles (103).

4.15. India

Tata Iron & Steel Co, en marzo de 1991, puso en funcionamiento, en el HA-F, una instalación de ICP. Durante más de un año, el horno funcionó satisfactoriamente con un caudal de ICP de 50 kg/ta y un coeficiente de sustitución del coque por carbón de 0,9 kg/kg. Posteriormente, mediante el enriquecimiento del viento con 1-2 % O₂ se logra aumentar la inyección de carbón hasta 70-80 kg/ta con un coeficiente de sustitución de 1,0 kg/kg y un aumento de la productividad del horno (104). En noviembre de 1992, la compañía pone en operación el HA-G, con un sistema de ICP de Klöckner que permite funcionar con caudales hasta 160 kg/ta (105 y 106).

REFERENCIAS

- (1) INABA, S. y YAGI, J. *Tetsu-To-Hagane (J. Iron and Steel Inst. Japan)*, 78 (7), 1992: 1187-1197.
- (2) CHATTERJEE, A. *Ironmaking Steelmaking*, 22 (2), 1995: 100-104.
- (3) SCHEIDING, K., VOGEL, M., MÖSCH, R. y BECK, W. *Neue Hütte*, 35 (7), 1990: 241-245.
- (4) *Steel Times*, 220 (10), 1992: 464-466, 477.
- (5) POOS, A. y PONGHIS, N. *Proc. Ironmaking Conf. Detroit*, 49, 1990: 443-453.
- (6) LASSAT DE PRESSINGNY, Y. *Future Ironmaking Process. Int. Symp. and Workshop. Hamilton (Canadá)*, junio 1990: 6C, 3/1- 3/3.
- (7) ANTHONY, D.B. y HOWARD, J.B. *Aiche J.*, 22, 1976: 625-633.

- (8) SALOMON, P.R. Characterization of Coal and Coal Thermal Decomposition. Chaper III- Rep. Advanced Fuel Research Inc., East Hatford, Connecticut (EE.UU.), 1980.
- (9) WISER, W.H. Preprint. Pap. Am. Chem. Soc., Div. Fuel Chem., 20, 1975: 122-129.
- (10) HEREDY, L. A. y WENDER, I. Preprint. Pap. Am. Chem. Soc., Div. Fuel Chem., 25, 1980: 4-13.
- (11) McNEIL, D. High Temperature Coal Tar. Chemistry of Coal Utilization (Ed., ELLIOT, M. A.) 2nd Suppl. Vol., Cap. 17, John Wiley, Nueva York, 1981.
- (12) TAKEDA, K. y LOCKWOOD, F.C. *ISIJ Int.*, 37 (5), 1997: 432- 440.
- (13) UENO, H. *CAMP-ISIJ*, 4, 1991: 1042.
- (14) OHGANI, M. *CAMP-ISIJ*, 4, 1991: 1060.
- (15) GUDENAU, H.W., KORTHAS, B., KIESLER, R. y BIRKHÄUSER, L. *Stahl Eisen*, 110 (11), 1990: 35-40.
- (16) ASENSIO, F., FORMOSO, A. y GUTIÉRREZ, A. Informe Comisión Técnica Horno Alto, CENIM, Madrid, 1978: 28-32.
- (17) BABICH, A., YAROSHEVSKII, S., FORMOSO, A., ISIDRO, A., FERREIRA, S., CORES, A. y GARCÍA, L. *ISIJ Int.* 36 (10), 1996: 1250-1258.
- (18) BABICH, A., YAROSHEVSKII, S., GARCÍA, L., FORMOSO, A., CORES, A., ISIDRO, A. y FERREIRA, S. *Rev. Metal. Madrid*, 32 (2), 1996: 103-116.
- (19) *Erdl-Erdgas Z.* 18 (2), 1965: 112-118.
- (20) BASKAKOV, A.P. *Izv. Akad. Nauk URSS, OTN* (6), 1965: 502-505.
- (21) TAKAMATO, Y., YAMAGUCHI, K., UENO, H., MATSUNAGA, S., KAKIUCHI, K y AMANO, S. *Rev. Metall.-CIT*, 92 (3), 1995: 351-359.
- (22) SATO, M., ARIYAMA, T. y YAMAKAWA, Y. *Rev. Metall.-CIT*, 92 (3), 1995: 343-349.
- (23) MATSUI, Y. y KUWANO, K. Proc. 6th Int. Iron and Steel Congress, Nagoya (Japón), Vol. 2, 1990: 484-491.
- (24) OHNO, Y., FURUKAWA, T. y MATSU-URA, M. *ISIJ Int.*, 34 (8), 1994: 641-648.
- (25) OHTAKA, M., NUMAZAWA, M., SHIMIZU, H., YAMAZAKI, T., OHHARA, S. y SHIBUTA, H. *Sumimoto Met.*, 43 (2), 1991: 62- 76.
- (26) BROUWER, R.C., SCHOONE, E.E. y TOXOPEUS, H.L. *Iron Steel Eng.*, 69 (12), 1992: 20-25.
- (27) WILLMERS, R.R. *Iron Steelmaker*, 16 (8), 1989: 27-35.
- (28) PETERS, K.H., BEPLER, E., KORTHAS, B. y PETERS, M. Proc. 2nd. European Ironmaking Congress, Glasgow (R.U.), 1991: 247-262.
- (29) YOSHIDA, Y., TANAKA, K., TADA, S. y KUWANO, K. Proc. Ironmaking Conf. Washington (50), 1991: 247-261.
- (30) STEILER, J.M. *CAMP-ISIJ*, 6, 1993: 844.
- (31) KADOGUCHI, K., GOTO, T., ITO, R. y YABATA, T. Proc. 3rd European Ironmaking Congress, Gante (Bélgica), 1996: 72-81.
- (32) PETERS, K. H., KORTHAS, B., MÜLHEINS, K. y KREIBICH, K. Proc. 6th Int. Iron and Steel Cong., Nagoya, Vol. 2, 1990: 492-499.
- (33) PETERS, K.H., PETERS, M., KORTHAS, B., MÜLHEIMS, K. y KREIBICH, K. *MPT: Met. Plant Tech.*, 13 (6), 1990: 32-43.
- (34) GUDENAU, H.W., PETERS, M. y JOKSCH, M. *Stahl Eisen*, 114 (2), 1994: 81-86.
- (35) *MPT: Met. Plant Techn.*, 14 (6), 1991: 88.
- (36) COLNOT, B. *Rev. Metall.-CIT*, 79 (11), 1982: 877-887.
- (37) HAMILIUS, A., DEROO, H., DEBAL, D. y DERYCKE, J. *Rev. Metal.-CIT*, 86 (5), 1989: 393-403.
- (38) FLAMION, D. *Rev. Metall.-CIT*, 87 (5), 1990: 433-439.
- (39) METZ, B., VAN CRAYELINGHE, M., EIBES, C. y TIEULIE, A. *Rev. Metall.-CIT*, 88 (4), 1991: 353-359.
- (40) *Steel Times*, 219 (11), 1991: 605-606.
- (41) GRAFFEUILLE, F., CAPELANI, R., DELABRE, Ph., BOUTTEMENT, J.L., PAIR, D. y LIBRALESSO, J.M. *Rev. Metall.-CIT.*, 88 (4), 1991: 335-343.
- (42) STEILER, J.M., LAO, D., LEBONVALLET, J.L. y HELLEISEN, M. *Rev. Metall.-CIT*, 93 (1), 1996: 55-67.
- (43) REBOUL, J.L., TIEULIE, A., DIDELON, F. y SERT, D. Meeting of the European Blast Furnace Committee, Gijón (España), 24-25 abril 1997.
- (44) *Stahl Eisen*, 110 (11), 1990: 21.
- (45) STEILER, J.M., LAO, D. y LEBONVALLET, J.L. Injection Technology in Ironmaking and Steelmaking. Technical Exchange Session. IISI. Bruselas (Bélgica), 1996: 15-32.
- (46) GRAFFEUILLE, F. JUSSEAU, N., SCHNEIDER, M., MOSSER, F. y NICOLLE, R. Proc. 2nd European Ironmaking Congress, Glasgow (R.U.), 1991: 233-246.
- (47) CRAYELINGHE, M. VAN, DOFOUR, A., SOLAND, J., FERET, J. y LEBONVALLET, J.L. *Rev. Metall.-CIT*, 92 (6), 1995: 721-728.
- (48) BROUWER, R.C. y TOXOPEUS, H.L. *Rev. Metall.-CIT*, 88 (4), 1991: 323-334.
- (49) STEEGHS, A.G., SCHOONE, E.E. y TOXOPEUS, H.L. Injection Technology in Ironmaking and Steelmaking. Tech. Exchange Seccion. Int. Iron and Steel Inst, Committee on Technology, Bruselas, 1996: 75-87.
- (50) TIJHUIS, G. Meeting of the European Blast Furnace Committee, Gijón (España), 24-25 abril 1997.
- (51) BROUWER, R.C., SCHOONE, E.E. y TOXOPEUS, H.L. *Iron Steel Eng.*, 69 (12), 1992: 20-25.
- (52) *Stahl Eisen*, 110 (9), 1990: 25.
- (53) *MPT: Met. Plant Tech.*, 13 (6), 1990: 80.
- (54) *Steel Times*, 219 (9), 1991: 519.
- (55) EICHINGER, F.T. y NOLDE, H.D. *Steel Times*, 220 (10), 1992: 462-463.
- (56) FEDERICO, G. Injection Technology in Ironmaking and Steelmaking. Tech. Exchange Seccion. Int. Iron and Steel Inst, Committee on Technology, Bruselas, 1996: 33-45.
- (57) CAPOGROSSO, L. y DI MAGGIO, G. Meeting of the European Blast Furnace Committee, Gijón (España), 24-25 abril 1997.
- (58) *Steel Times*, 220 (7), 1992: 336.
- (59) *MPT: Met. Plant Tech.*, 15 (5), 1992: 84-86.
- (60) *Iron Steel Eng.*, 69 (8), 1992: 98-99.
- (61) LEONARD, D. C., HARTLEY, B. K., CAMPBELL, D. A. y MATTHEWS, T.V. Proc. Journées Siderurgiques ATS, París, 7-8 dicbre 1994.
- (62) MALDONADO, R., MILLS, R.C., HARTLEY, B.K. y BUSBY, N.J. Proc. 1st Int. Congress of Sci. and Tech. of Ironmaking. Senday (Japón), ISIJ, 1994: 535-540.
- (63) GATHERGOOD, D.S. y JUKES, M.H. Injection Technology in Ironmaking and Steelmaking. Tech. Exchange Seccion. Int. Iron and Steel Inst, Committee on Technology, Bruselas, 1996: 89-107.
- (64) DAVISON, J. Meeting of the European Blast Furnace Committee, Gijón (España), 24-25 abril 1997.
- (65) CAMPBELL, D.A., FLIERMAN, G., MALGARINIO, G. y SMITH, R.B. Proc. 2nd European Ironmaking Congress, Glasgow (R.U.), 1991: 263-274.

- (66) BONTE, L. y PONGHIS, N. Meeting of the European Blast Furnace Committee, Gijón (España), 24-25 abril 1997.
- (67) TERESHENKO, V.P., YAROSHEVSKII, S.L. y NOZDRACHEV, V.A. *Stal* (8), 1992: 7-10.
- (68) YAROSHEVSKII, S.L., BABICH, A.I., TERESHENKO, V.P., NOZDRACHEV, V.A. y AFANASEVA, Z.K. *Stal* (8), 1995: 11-17.
- (69) HANLON, J.O. *Steel Times*, 221 (12), 1993: 508-522.
- (70) RANADE, M.G., WHITE, D.G., DUNCAN, J., RORICK, F.C. y MROZ, M.E. Proc. 3rd European Ironmaking Congress, Gante (Bélgica), 1996: 82-92.
- (71) LANZER, W. y LÜNGEN, H.B. *Stahl Eisen*, 116 (8), 1996: 61-69.
- (72) YAMAMOTO, Z. *ISIJ Int.*, 35 (4), 1995: 333-348.
- (73) KUBO, S. Proc. 3rd European Ironmaking Congress, Gante (Bélgica), 1996: 301-306.
- (74) FUJIWARA, T. *ISIJ Int.*, 37 (4), 1997: 305-317.
- (75) GOTO, T., KUWANO, K., HORI, R., MIYATANI, H., YABATA, T. y ONO, R. *Rev. Metall.-CIT*, 87 (11), 1990: 963-964.
- (76) GOTO, T., HORI, R., KUWANO, K., YABATA, T., MIYATANI, H. y ONO, R. *Rev. Metall.-CIT*, 88 (4), 1991: 345-352.
- (77) ONO, R., GOTO, T., MIYATANI, H., HORI, R., YABATA, T., KUWANO, K. *Rev. Kobelco Tech.* (159), 1992: 7-11.
- (78) SHIBATA, K., YAMAGATA, Y., ITO, R., GOTO, T., MIZUGUCHI, I. y YABATA, T. Proc. 1st Congress on Sci. and Tech. of Ironmaking. Sendai (Japón). ISIJ, 1994: 553-558.
- (79) YAMAMOTO, Z. *ISIJ Int.*, 34 (4), 1994: 299-312.
- (80) YAMAGATA, Y., NAKATA, T., OKUDA, T., ONO, R., GOTO, T., ITO, R. y MIZUGUCHI, I. *Rev. Metall.-CIT*, 91 (3), 1994: 431-437.
- (81) INABA, S. Injection Technology in Ironmaking and Steelmaking. Technical Exchange Session. IISI. Bruselas (Bélgica), 1996: 47-57.
- (82) OHTAKA, M., NUZAMARA, M., SHINIZU, H., YAMAZAKI, T., OHHAR, S. y SHIBUTA, H. *Sumimoto Met.*, 43 (2), 1991: 62-76.
- (83) IWATUKI, K. *CAMP-ISIJ*, 4, 1991: 1062.
- (84) YAMAGUCHI, K., UENO, H., NAITO, M. y TAMURA, K. *ISIJ Int.*, 31 (7), 1991: 677-684.
- (85) UENO, H., YAMAGUCHI K. y TAMURA, K. *ISIJ Int.*, 33 (6), 1993: 640-645.
- (86) KAKIUCHI, K. *CAMP-ISIJ*, 4, 1991: 1043.
- (87) YAMAGUCHI, K., UENO, H., MATSUNAGA, S., KAKIUCHI, K. y AMANO, S. *ISIJ Int.*, 35 (2), 1995: 148-155.
- (88) KIMURA, K., KISHIMOTO, S., SAKAI, A., ARIYAMA, T. y SATO, M. *Rev. Metall.-CIT*, 93 (4), 1996: 575-580.
- (89) MAKI, A., SAKAI, A., TAKAGAKI, N., MORI, K., ARIYAMA, T., SATO, M. y MURAI, R. *ISIJ Int.*, 36 (6), 1996: 650-657.
- (90) *Ironmaking Steelmaking*, 22 (1), 1995: 1.
- (91) JULIANG, X. y BAOMING, Q. Proc. 1st. Int. Congress on Sci. and Tech. of Ironmaking. Sendai (Japón). ISIJ, 1994: 55-60.
- (92) SHOURONG, Z. y HAN, Y. Proc. 1st. Int. Congress. on Sci. and Tech. of Ironmaking. Sendai (Japón). ISIJ, 1994: 450-455.
- (93) SHOURONG, Z. y ZHONG JIE, Y. Proc. 6th Int. Iron Steel Congress, Nagoya, Vol. 2, 1990: 500-504.
- (94) SHUHAN, M. y QINGHUA, T. Proc. 2nd. European Ironmaking Congress. Glasgow (R.U.), 1991: 221-223.
- (95) MA, S.H., LIU, Z.D. y TANG, Q.H. A Collection of Iron and Steel Research. Liaoning Sc. and Techn. Publishing, China, 1993: 192-197.
- (96) CHEN, Z.D., GAO, G.C. y TANG, Q.H. *Iron Steel (China)*, 29 (11), 1994: 8-13.
- (97) THANG, W.Q. y WANG, T.C. *Iron Steel (China)*, 29 (11), 1994: 1-7.
- (98) CHENG LAI, F., YUANG CHANG, D. y KUO CHEN, E. Proc. 1st. Int. Congress. on Sci. and Tech. of Ironmaking. Sendai (Japón). ISIJ, 1994: 541-546.
- (99) BANG, K.M., HUR, N.S. y MIN, J.K. *Steel Times Int.*, 15 (28), 1991: 28-46.
- (100) HAN, J.W., CHUNG, J.K., HEO, N.H., KIM, T.D., CHO, C.M., CHUNG, H.Ch., HEO, K.S y CHO, B.R. Proc. 1st. Int. Congress on Sci. and Tech. of Ironmaking. Sendai (Japón). ISIJ, 1994: 523-528.
- (101) HUR, N.S., CHO, B.R. y KIM, H.D. Injection Technology in Ironmaking and Steelmaking. Technical Exchange Seccion. IISI., Bruselas, 1996: 59-73.
- (102) CHUNG, J.-K. y HUR, N.-S. *ISIJ Int.*, 37 (2), 1997: 119-125.
- (103) HUR, N.S., CHO, B.R., CHOI, J.S., HANAND, K.W. y SEO, K.Y. *Rev. Metall.-CIT*, 93 (3), 1996: 367-377.
- (104) Berg Hüttenman. *Monatsh*, 136 (9), 1991: 387.
- (105) KUMAR, S., CHATTERJEE, A., CHATTERJEE, L., GUPTA, S., MUKHERJEE, T. y PANDEY, B. *Tata Search*, 1994: 35-42.
- (106) ANNAMALAI, G., SINHA, N. y VISWANATHAN, P. *Tata Search*, 1994: 29-42.