

REVISTA ENERGETICA ENERGY MAGAZINE



ORGANIZACION LATINOAMERICANA DE ENERGIA LATIN AMERICAN ENERGY ORGANIZATION

EL POTENCIAL BIOENERGETICO DE JAMAICA

JAMAICA'S BIOENERGY POTENTIAL

Ministry of Mining, Energy and Tourism

AVANCES EN LA INTEGRACION ELECTRICA CENTRO AMERICANA Y POSIBILIDADES PARA SU EXTENSION ABARCANDO A MEXICO Y COLOMBIA

ADVANCES IN CENTRAL AMERICAN ELECTRIC POWER INTEGRATION AND POSSIBILITIES FOR ITS EXTENSION INTO MEXICO AND COLOMBIA

Afonso Maria Furtado da Silva

METODO DE DOBLE ESCORIA PARA LA OBTENCION DE ACERO A PARTIR DE BRIQUETAS AUTORREDUCTORAS EN HORNOS DE INDUCCION

DOUBLE-SLAG METHOD FOR OBTAINING STEEL FROM SELF-REDUCING BRIQUETTES IN INDUCTION FURNACES

J. M. Rodriguez, M. Descazeaux, R. Rojas

LA NUEVA POLITICA PETROLERA ECUATORIANA: LA INFLUENCIA DEL PETROLEO EN LA ECONOMIA NACIONAL

THE NEW PETROLEUM POLICY OF ECUADOR:
THE INFLUENCE OF OIL ON THE NATIONAL ECONOMY

Fernando Santos Alvite

AÑO 9 N°1 ABRIL 1985

YEAR 9 N°1 APRIL 1985

METODO DE DOBLE ESCORIA PARA LA OBTENCION DE ACERO A PARTIR DE BRIQUETAS AUTORREDUCTORAS EN HORNO DE INDUCCION

J. M. RODRIGUEZ*, M. DESCAZEUX**, R. ROJAS***

RESUMEN

Se investigó experimentalmente, utilizando doble escoria, la posibilidad de bajar el alto índice de basicidad (4,1) requerido para obtener directamente acero de bajo carbono e impurezas a partir de briquetas autorreductoras, cuando se utiliza simple escoria.

Para ello se partió con briquetas autorreductoras con un índice de basicidad molar (CaO/SiO_2) = 3 y luego de procesarlas en un horno de inducción y efectuar un barrido de escoria, se introdujeron distintas cantidades de doble escoria de refino, lo que permitió obtener información acerca de las variaciones del rendimiento, del consumo energético específico y de la composición del acero obtenido, al variar la cantidad de escoria de refino.

1. INTRODUCCION

Utilizando briquetas autorreductoras con un 30% de coque en exceso sobre la cantidad estequiométrica requerida, se realizó con anterioridad una investigación (1) destinada a obtener directamente acero de calidad en un horno de inducción. Ella mostró que si bien se puede obtener con alto rendimiento (94%) acero de bajo contenido de carbono (0,02%), con un bajísimo contenido de fósforo (0,008%) y con un contenido tolerable de azufre (0,038%), las exigencias sobre todo del azufre proveniente del coque, obligaron a trabajar con un alto índice de basicidad molar (I.B.M. = 4,1), creándose dificultades de operación y un alto consumo de cal, además de un considerable desgaste de las paredes del crisol, fabricado en base a MAGNAMIX 363.

* Doctor en Ciencias e Ing. Civil, Profesor Titular, Depto. Ing. Mecánica y Metalurgia, Universidad Católica de Chile.

** Egresado del Depto. Ing. Mecánica y Metalurgia, Universidad Católica de Chile.

*** Ingeniero Civil, Depto. Ing. Mecánica y Metalurgia, Universidad Católica de Chile.

Estos inconvenientes hicieron ver que sería beneficioso bajar el valor del I.B.M., para lo cual se planteó la idea de investigar si es posible disminuir este índice utilizando la técnica de doble escoria; método en el cual la primera escoria que se produce después de procesar las briquetas autorreductoras en el horno de inducción, se retira por barrido, para luego introducir una nueva escoria de refino.

Así de este modo, prácticamente la cal se reparte en dos partes: una contenida en las briquetas autorreductoras y otra que se introduce como refino antes de colar. A diferencia del caso antes citado (1) en el cual la cal venía en su totalidad en las briquetas.

2. EXPERIENCIAS PRELIMINARES

Se realizaron cuatro experimentos previos con briquetas autorreductoras con un I.B.M. = 2,0 y con un exceso de coque de 30%: aglomerados que tenían la composición dada en la Tabla 1, con el objeto de observar su facilidad de fusión en el horno de inducción, sobre todo en cuanto al tiempo requerido para ello.

TABLA 1

COMPOSICION EN PESO DE BRIQUETAS AUTORREDUCTORAS DE EXPERIENCIAS PRELIMINARES (I.B.M. = 2,0; EXCESO DE COQUE 30%)

Mineral	56,78%
Coque	18,60%
Cal apagada	20,07%
Fluorita	3,41%
Bentonita	1,14%

Como chatarra inicial se utilizó un acero 1030 similar al que se especifica más adelante en la Tabla 7.

Después de realizadas estas experiencias previas, se observó que la velocidad de procesamiento de las briquetas era aproximadamente de 130 g/min., o sea poco menos de la mitad que en el caso (1) realizado con briquetas con I.B.M. = 4,1.

Este hecho indicó que era conveniente aumentar la rapidez del proceso de las briquetas autorreductoras, para lo cual se aumentó el porcentaje de cal apagada de los aglomerados, sustancia que contie-

ne "CaO" que como se sabe es un fundente de la ganga silicosa del mineral, por otro lado se disminuyó el porcentaje del mineral para disminuir así la ganga. Conjuntamente con el incremento de cal se incrementó la cantidad de fluorita para hacer más fluido el proceso, pudiendo así agilizarlo.

El porcentaje de coque es tal que implica un 30% de exceso sobre la cantidad estequiométrica, esta condición se mantuvo en la fabricación de todas las briquetas experimentadas en este trabajo.

3. TECNICA EXPERIMENTAL

A la luz de las experiencias preliminares se plantearon nuevas composiciones para las briquetas autorreductoras que son los aglomerados que se utilizaron en la primera etapa del proceso (etapa de simple escoria). Las composiciones de las nuevas briquetas fabricadas con un I.B.M. = 3, se indican en la Tabla 2.

TABLA 2

**COMPOSICION EN PESO DE LAS BRIQUETAS
AUTORREDUCTORAS UTILIZADAS EN LA ETAPA
SIMPLE ESCORIA DEL PROCESO
(I.B.M. = 3; EXCESO DE COQUE 30%)**

Mineral	48,43%
Coque	15,87%
Cal apagada	28,86%
Fluorita	4,90%
Bentonita	1,94%

Las briquetas cilíndricas de 6 cm. de diámetro y 1,8 cm. de altura se fabricaron en prensa hidráulica bajo una presión de 9.800 KPa. La granulometría de los diferentes integrantes de las briquetas era la misma que en el trabajo antes citado. (1).

Las composiciones químicas de cada uno de los compuestos que integran estos aglomerados con excepción de la fluorita, que era de alta pureza, se dan en las tablas siguientes (de la 3 a la 6).

TÁBLA 3
COMPOSICION EN PESO DEL MINERAL DE FIERRO

Oxido de fierro (casi en su totalidad Fe_3O_4)	84,99%*
SiO_2	7,40%
P	0,14%
S	0,06%
Otros	7,41%

TÁBLA 4
COMPOSICION EN PESO DEL COQUE

C (fijo)	69,92%
Cenizas	16,41%**
Materia volátil	10,82%
H_2O	2,00%
S	0,84%
P	0,01%

* Este porcentaje de óxido de fierro corresponde a 61,50% de fierro.

** Las cenizas contienen 80% de SiO_2 .

TÁBLA 5
COMPOSICION EN PESO DE LA CAL APAGADA

CaO	71,22%
H_2O	21,23%
SiO_2	2,27%
Al_2O_3	0,56%
Fe_3O_4	0,18%
MgO	0,32%
S	0,15%
Otros	4,07%

TÁBLA 6
COMPOSICION EN PESO DE LA BENTONITA

SiO_2	55,44%
Al_2O_3	20,14%
CaO	0,49%
Fe_3O_4	3,27%
Na_2O	2,76%
MgO	2,29%
K_2O	0,60%
Otros	15,01%

Las condiciones de secado de las briquetas eran por exposición directa al sol durante aproximadamente 8 horas análogamente a como se procedía en (1).

Ya que el horno eléctrico empleado, de 75KW de salida, era uno de inducción, se requirió introducir al crisol en cada experiencia, acero inicial, que fue en todos los casos de la misma composición, dada en la Tabla 7.

TABLA 7
**COMPOSICION EN PESO DEL ACERO INICIAL UTILIZADO
EN TODAS LAS EXPERIENCIAS DE DOBLE ESCORIA**

C	0,18%
Mn	0,83%
P	0,02%
S	0,02%
Si	0,04%

Luego de procesadas las briquetas autorreductoras, la escoria era barrida, para luego introducir cal apagada como escoria de refino, escoria que quedaba en el molde junto con el acero colado.

Debido a que la introducción de cal en polvo tiene el inconveniente que los gases de salida del horno, dispersan fuera del crisol una parte de este material, se peletizó previamente antes de su introducción al horno; pudiéndose así tener garantía de que las cantidades pesadas previamente entran realmente al sistema en proceso, constituyendo la segunda escoria (escoria de refino).

Los pellets de cal apagada de aproximadamente 0,8 cm. de diámetro se obtuvieron en un disco peletizador y tenían la composición dada en la Tabla 8.

TABLA 8
**COMPOSICION DE PELLETS DE CAL
APAGADA SECOS**

Cal apagada	92,3%*
Bentonita	7,7%*

* Las composiciones de ambas sustancias aparecen en las Tablas 5 y 6.

FIG. 1
PROCESAMIENTO DE BRIQUETAS AUTORREDUCTORAS
CON DESARROLLO DE LA 1ª ESCORIA

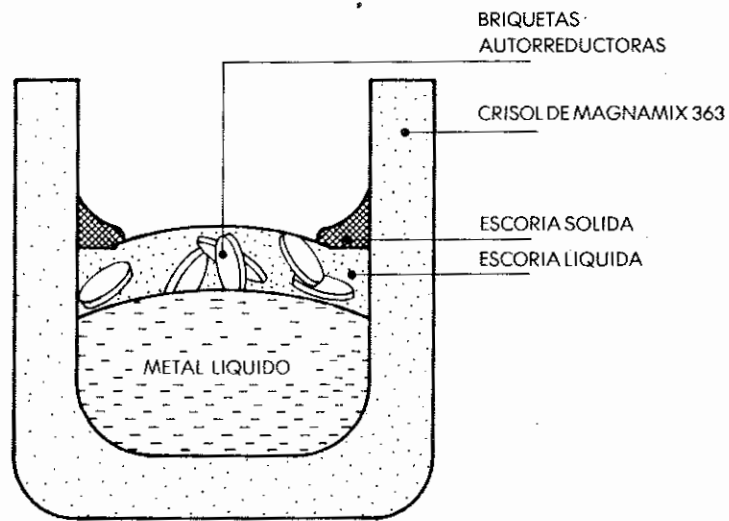
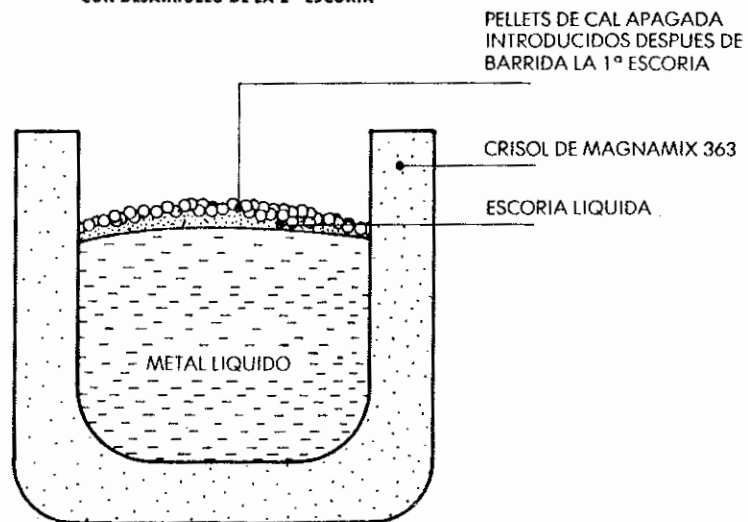


FIG. 2
PROCESAMIENTO DE PELLETS DE CAL APAGADA
CON DESARROLLO DE LA 2ª ESCORIA



La situación durante la operación se ilustra en las Figuras 1 y 2. La primera muestra el procesamiento de las briquetas autorreductoras, al término del cual se obtiene la primera escoria y, la segunda se refiere al proceso posterior al barrido de la primera escoria en la cual los pellets de cal al fundirse producen la escoria de refino.

El I.B.M. se varió en las distintas experiencias, en base a variar la masa de la escoria de refino, para lo cual se introducían en el crisol distintas masas de pellets cal (téngase presente que el I.B.M. de las briquetas era siempre el mismo, igual a 3).

Así se incrementó el I.B.M. a partir del valor inicial de 3, realizándose diferentes experiencias en la cual el I.B.M. de cada una difería de la anterior en dos décimas dentro del intervalo $3,0 \leq \text{I.B.M.} \leq 4,0$ (véase Tabla 10).

Los crisoles que fueron fabricados especialmente para estas experiencias, eran básicos y de la composición que se detalla en la Tabla 9.

TABLA 9
**COMPOSICION DEL MATERIAL REFRACTARIO SECO
UTILIZADO PARA LA FABRICACION
DE LOS CRISOLES**

MgO	91,0%
SiO ₂	4,5%
Fe ₂ O ₃	1,9%
(Na ₂ O + K ₂ O + Li ₂ O)	1,2%
CaO	0,5%
Al ₂ O ₃	0,3%
Otros	0,6%

La temperatura del baño de acero que se medía con un pirómetro óptico estuvo durante todas las experiencias comprendida entre 1.600°C y 1.700°C.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados experimentales obtenidos en las distintas experiencias con doble escoria se expresan en la Tabla 10 que muestra como varía el rendimiento (% de hierro combinado que pasa al estado metálico) al variar la masa de pellets de cal.

TABLA 10
**RENDIMIENTOS OBTENIDOS EN LOS PROCESOS CON DOBLE ESCORIA
 PARA DISTINTOS INDICES DE BASICIDAD MOLAR (I.B.M.)**

EXP.	ACERO INICIAL (GRAMOS)	BRIQUET. AUTORR. (GRAMOS)	PELLETS DE CAL (GRAMOS)	ACERO TOTAL OBTEN. (GRAMOS)	I.B.M.	% RENDIM.*
1	9.005	11.183	315	10.073	3,2	32,1
2	8.988	10.731	630	10.006	3,4	31,9
3	8.992	11.133	1.012	10.174	3,6	35,7
4	9.001	11.240	1.403	10.957	3,8	58,5
5	9.015	11.243	1.805	11.074	4,0	61,5

* % rendimiento $\frac{A - B}{0,2976 \cdot C} \cdot 100$

A = acero total obtenido
 B = acero inicial
 C = briquetas autorreductoras

La velocidad de procesamiento de briquetas fue de un valor promedio de 160 g/min.; valor sensiblemente mayor que el de las experiencias preliminares y que indicó que eran acertadas las innovaciones realizadas para lograrlo, pero que es aún bastante menor que el obtenido en el trabajo anterior (1) que fue de 280 g/min.

El consumo energético específico promedio del proceso de doble escoria investigado, aparece en la Tabla 11.

TABLA 11
**CONSUMO ENERGETICO ESPECIFICO DEL PROCESO DE
 DOBLE ESCORIA PARA OBTENER ACERO**

EXP.	KWH/KG, (acero obtenido)	I.B.M.
1	50,63	3,2
2	47,89	3,4
3	42,29	3,6
4	29,22	3,8
5	26,76	4,0

Las composiciones del acero obtenido se dan en la Tabla 12.

TABLA 12
**COMPOSICION DEL ACERO OBTENIDO EN EL
 PROCESO DE DOBLE ESCORIA**

EXP.	C%	P%	S%	Si%
1	0,310	0,013	0,021	0,045
2	0,034	0,008	0,034	0,040
3	0,041	0,008	0,018	0,037
4	0,194	0,005	0,019	0,056
5	0,317	< 0,005	0,028	0,023

El área específica medida para un aglomerado similar al que se utiliza en este trabajo, dio un valor de 14,70 m²/g. (1), aplicando el método de B.E.T. para evaluarla (2). Posteriormente, dada la importancia que se atribuye a esta medida (3), se empleó un método más moderno (4), (5)*, que confirmó este valor, ya que se obtuvo 17,99 m²/g.; valor que difiere del anterior en un porcentaje que puede ser aceptable para este tipo de medidas (2), y que como se sabe no se ve alterado ni por la forma del aglomerado (pellets o briquetas) ni por la presión que se le aplica para obtenerlo, siempre y cuando ésta no se exceda hasta el punto de producir fractura o incremento de defectos dentro de las diferentes especies cristalinas que lo componen.

5. ANALISIS DE RESULTADOS

En la Fig. 3, se muestra cómo depende el rendimiento del I.B.M. de la doble escoria. Para I.B.M. = 4,0 el rendimiento es 61,5%, porcentaje que resulta bajo si se compara con el de 94% obtenido para el mismo valor del I.B.M., pero en un proceso de simple escoria realizado con materias primas y condiciones similares (1). Además, la misma figura muestra un rendimiento de 33% para un I.B.M. = 3,5, en condiciones que con simple escoria y trabajando con el mismo valor de I.B.M., se obtenía 64% como valor del rendimiento (6).

Este mismo hecho se observó en trabajos anteriores realizados con aglomerados autorreductores, en el cual se hicieron algunas experiencias aisladas, con doble escoria; experiencias que mostraron que el rendimiento bajaba en relación al obtenido en el mismo proceso pero con simple escoria (7), (8) (en estos dos trabajos referidos se realizaron experimentos de simple y doble escoria).

* La Ref. (5) trae el valor del área específica de pellets; pero con distinto exceso de coque, de modo que se hace alusión a ella en cuanto al método de evaluación de esta área.

La interpretación de la reducción del rendimiento al trabajar con doble escoria, estaría en que en este caso se barre una escoria saturada de FeO (primera escoria) y la nueva escoria introducida sobre el baño limpio (segunda escoria) también se satura de este mismo óxido debido a la oxidación del metal líquido; obteniéndose como resultado global una merma química de hierro, mayor en este caso que en el caso de simple escoria, y consecuentemente un rendimiento menor.

Ahora comparando entre sí los experimentos de doble escoria de este trabajo, se puede observar en la Fig. 3 que la curva es creciente; comportamiento que se podría explicar teniendo presente que en los rangos de temperatura que se trabaja, no existirá en la escoria Fe₃O₄ sino que FeO (9), sustancia cuya actividad en función de la presión parcial del oxígeno PO₂ está dada (10) por la relación:

$$a_{\text{FeO}} = a_{\text{Fe}} \cdot K \cdot \sqrt{P_{\text{O}_2}} \quad [1]$$

en la que a_{Fe} es la actividad del hierro líquido y K es la constante de equilibrio de la reacción:



cuya energía libre en función de la temperatura es:

$$\Delta F^\circ = - 56.900 + 11,82T \quad [3]$$

y para la cual la dependencia K(T), está dada por la expresión:

$$\log K = \frac{12.440}{T} - 2,583 \quad [4]$$

en la que la temperatura está en grados Kelvin.

Cuando la escoria está en equilibrio con el hierro metálico (11)

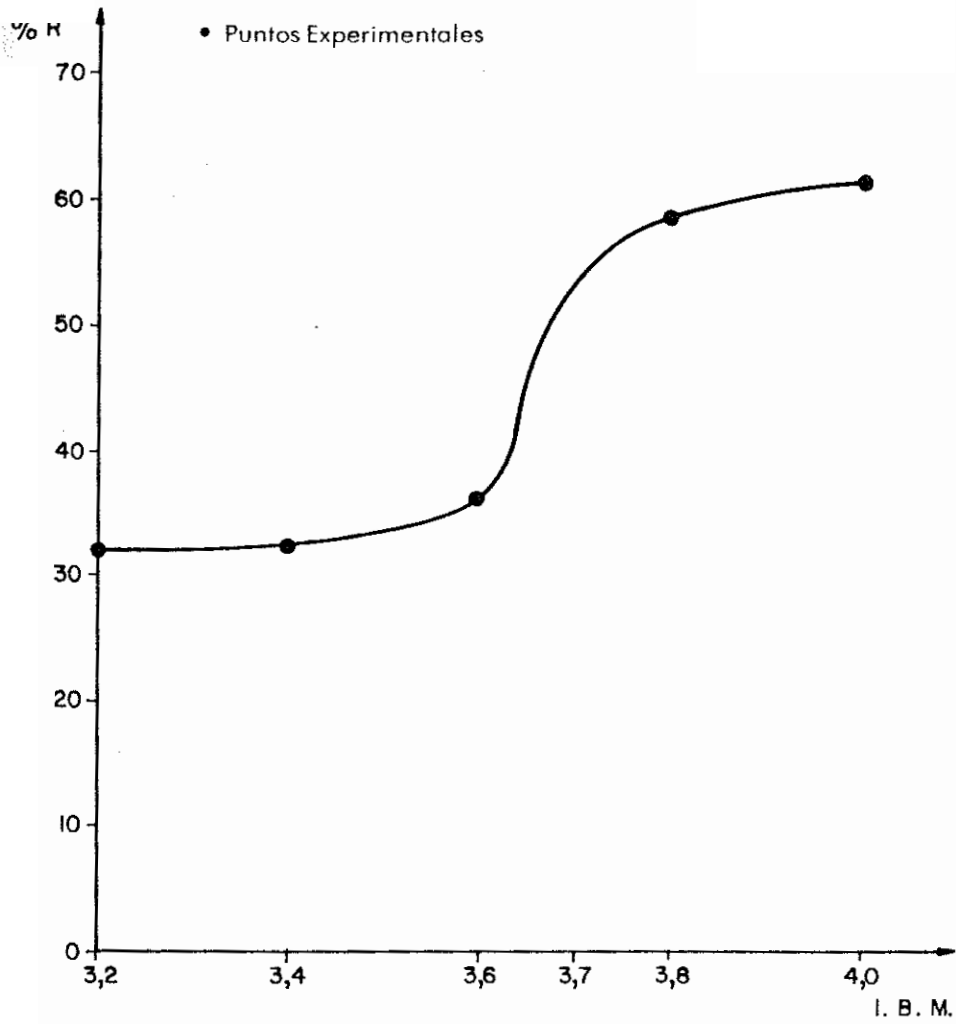
$a_{\text{Fe}} = 1$ y la relación [1] queda:

$$a_{\text{FeO}} = K \sqrt{P_{\text{O}_2}} \quad [5]$$

relación que permite explicar que al aumentar la masa de pellets de cal de refino, introducida inmediatamente después del barrido de escoria, la acción del oxígeno atmosférico llegará con menor presión parcial a la superficie del metal líquido, (el espesor de escoria implica una pérdida de carga para la presión parcial del oxígeno) disminuyendo la actividad del FeO y consecuentemente su concentración en la escoria; efecto que se traducirá en una mayor existencia de hierro reducido y por lo tanto en un mayor rendimiento.

El hecho de que el porcentaje de carbono del acero obtenido usando doble escoria (0,317%) sea mayor que el del acero obtenido para el mismo I.B.M. = 4,0 pero por simple escoria (0,021%), (1),

FIG. 3
RENDIMIENTO EN FUNCION DEL INDICE DE BASICIDAD MOLAR TOTAL
(Después del proceso de doble escoria)



podría deberse a la diferencia de rendimientos, ya que si se parte de cantidades iguales de carbono en ambos casos, el mayor rendimiento en el caso de simple escoria debe implicar un mayor consumo de este elemento en la reacción de reducción (que genera gases) y por lo tanto un contenido menor en el baño metálico.

En cuanto a las impurezas azufre y fósforo, se observa una clara disminución al utilizar doble escoria. La Tabla 13 muestra los porcentajes de estos elementos en el acero obtenido por simple y doble escoria para algunos casos en los cuales es posible la comparación a igualdad de I.B.M., ya que se dispone de datos.

TABLA 13
**PORCENTAJES DE AZUFRE Y FOSFORO EN EL ACERO
OBTENIDO MEDIANTE SIMPLE Y DOBLE ESCORIA**

I.B.M.	AZUFRE		FOSFORO	
	SIMPLE ESCORIA (1), (6)	DOBLE ESCORIA	SIMPLE ESCORIA (1), (6)	DOBLE ESCORIA
4,0	0.038	0.028	0.008	0.005
3,5	0.310	0.026*	0,05	0,008*

* Interpolados de Tabla 12.

En cuanto al consumo energético específico, se observa que decrece al aumentar el I.B.M., o sea la masa de pellets de cal y, que justamente en el mismo intervalo donde el rendimiento sube bruscamente, el consumo energético específico baja bruscamente.

Si se tiene presente que los tiempos y las potencias medias en las distintas experiencias fueron similares, se explica la variación del consumo energético específico por la variación del rendimiento, ya que la energía consumida en cada experiencia fue similar, pero no la producción de acero; o sea que mientras mayor fue el rendimiento menor fue el consumo energético específico.

6. CONCLUSIONES

Con este trabajo no se pretende obtener medidas directamente aplicables a situaciones industriales, porque el tamaño de los crisoles utilizados son de escala de laboratorio, por lo cual no debe extrañar el alto valor del consumo energético específico (12), (13), al trabajar con estos pequeños crisoles en los cuales se producían entre 10 a 11 Kg. de acero en cada experiencia; sin embargo, se pueden inferir diversas conclusiones comparativas:

1. La utilización de doble escoria en un proceso de obtención directa de acero a partir de aglomerados autorreductores baja el rendimiento en relación al que se obtiene en un proceso de simple escoria, similar en cuanto a las materias primas y condiciones de operación.
2. El proceso de doble escoria para obtener acero mediante aglomerados autorreductores elimina una mayor cantidad de azufre y fósforo que el de simple escoria operando con el mismo valor del índice de basicidad; diferencia que parece ser menos acentuada cuando este índice es demasiado alto.
3. Si se comparan entre sí los resultados obtenidos en diferentes experiencias con doble escoria se observa que el rendimiento es creciente en forma sigmoideal con el índice de basicidad; presentando sólo un incremento brusco cuando el índice de basicidad molar varía de 3,6 a 3,8.
4. El consumo de energía por Kg de acero obtenido, decrece al aumentar la masa de la segunda escoria de refino (pellets de cal apagada).
5. El porcentaje de carbono del acero obtenido trabajando con doble escoria resultó más de diez veces el porcentaje del acero obtenido por simple escoria con análogas materias primas y condiciones de operación.
6. Para disminuir el desgaste del refractario empleado en las experiencias, se sugiere incrementar el MgO y disminuir el SiO₂, fabricando crisoles con RAMMING C-MIX.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias al apoyo económico otorgado tanto por el DIUC de la Universidad Católica de Chile como por el P.M.T.M. de la O.E.A. Asimismo se agradece el valioso apoyo recibido en el Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalurgia de la Universidad Católica; en especial de su Jefe Dr. Cristian Vial Edwards.

BIBLIOGRAFIA

1. Rodríguez, J. M., Rojas, R., Scanavini, A. y Vial, C., Rev. del CENIM (1984) (en prensa).
2. Young, D. M., and Crowell, A. D., Physical Adsorption of Gases, Butterworths, London, 1962, 182.
3. Rodríguez, J. M., Fuller, R., and Salinas, J., Proceedings I Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology, Ed. CAPES, Río de Janeiro, 1982, 936.
4. Rodríguez, J. M., and Rodríguez, C., Can J. Phys., 61, 6, (1983), 903.
5. Rodríguez, J. M., y Rodríguez, C., Latin American of Metallurgy and Materials, 3, 1, (1983), 30.
6. Rojas, R. y Scanavini, A., Obtención de Acero de Bajo Carbono e Impurezas a partir de Briquetas Autorreductoras en Horno de Inducción, Depto. de Ingeniería Mecánica y Metalurgia, Universidad Católica de Chile, Santiago, 1983, 39.
7. Rodríguez Cruchaga, J. M., Rivera Agüero, J. D. y Muñoz Bravo, I.M., Advances in Materials Technology in the Americas, ASME, San Francisco (U.S.A.), 1980, 93.
8. Ref. (6), 92.
9. Bénard, J., Michel, A., Philibert, J. y Talbot, J., Metalurgia General, Ed. Hispano Europea, Barcelona, 1973, 314.
10. Philbrook, W. O., and Bever, M.B., Basis Open Hearth Steelmaking, AIME, New York, 1951, 650.
11. Darken, L. and Gurry, R., Physical Chemistry of Metals, Mc Graw - Hill Book Company, Inc., Tokyo, 1953, 351-357.
12. De Sy, A., Iron Ore Reduction (Proceedings), Pergamon Press, New York, 1962, 134.

DOUBLE-SLAG METHOD FOR OBTAINING STEEL FROM SELF-REDUCING BRIQUETTES IN INDUCTION FURNACES

J.M. RODRIGUEZ*, M. DESCAZEUX**, R. ROJAS***

SUMMARY

Experimental research was done on the possibility of lowering the high basicity index (4.1) required to obtain low-carbon, low-impurity steel from self-reducing briquettes by using a double-slag rather than single-slag method.

With this aim in mind, work began with self-reducing briquettes having a molar basicity index (CaO/SiO_2) = 3, and after their processing in an induction furnace and scavenging of the slag, different amounts of a second, refining slag were introduced; this made it possible to obtain information on variations in yield, on specific energy consumption, and on the composition of the steel obtained, as a function of the amount of refining slag.

1. INTRODUCTION

Using self-reducing briquettes with 30% more coke than the stoichiometric amount required, preliminary research was done (1) geared to obtaining quality steel directly from an induction furnace. This showed that while high-yield (94%) steel with a low carbon content (0.02%), a very low phosphorus content (0.008%) and a tolerable sulphur level (0.038%) could be obtained, the demands (especially for sulphur from the coke) made it necessary to work with a high molar basicity index ($\text{MBI} = 4.1$), thereby creating difficulties of operation and a large lime consumption, in addition to considerable wear and tear on the wall of the crucible manufactured on the basis of the MAGNAMIX 363.

* Ph. D. in Science, Civil Engineer, Tenured Professor, Department of Mechanical Engineering and Metallurgy, Catholic University of Chile.

** Graduate of the Department of Mechanical Engineering and Metallurgy, Catholic University of Chile.

*** Civil Engineer, Department of Mechanical Engineering and Metallurgy, Catholic University of Chile.

These drawbacks led to the conclusion that it would be beneficial to lower the MBI value, and a proposal was made to investigate if it would be possible to reduce the index by using a double-slag technique. In this method, the first slag produced after processing the self-reducing briquettes in an induction furnace is scavenged and then a new refining slag is introduced.

Thus, practically speaking, the lime is divided into two parts: one contained in the self-reducing briquettes and the other introduced as a refiner before casting (unlike the first case cited, in which the lime came entirely from the briquettes).

2. PRELIMINARY EXPERIMENTS

Four preliminary experiments were done with self-reducing briquettes having an $MBI = 2.0$ and a 30% surplus of coke, the agglomerates having the composition given in Table 1, with the aim of observing their facility for fusion in the induction furnace, especially in terms of time required.

TABLE 1

**COMPOSITION BY WEIGHT OF SELF-REDUCING
BRIQUETTES IN PRELIMINARY EXPERIMENTS
($MBI = 2.0$; EXCESS COKE = 30%)**

Ore	56.78%
Coke	18.60%
Slaked lime	20.07%
Fluorite	3.41%
Bentonite	1.14%

A 1020 steel similar to that specified further on, in Table 7, was used as the initial scrap.

After the preliminary experiments, it could be observed that the speed of processing of the briquettes was approximately 130 g/min., i.e., a little under half the time of the first case using briquettes with an $MBI = 4.1$.

This indicated that it was useful to increase the rapidity of the process of making self-reducing briquettes. Therefore, the percentage of slaked lime in the agglomerates was increased. This substance contains CaO , which, as is well known, serves as a welding com-

pound (flux) for the silicose gangue of the mineral ore. The percentage of ore was also reduced in order to reduce the gangue. Together with the increase in lime, the amount of fluorite was increased in order to expedite the process and make it more fluid.

The percentage of coke was such that it implied a 30% excess above and beyond the required stoichiometric amount; this condition was maintained in the fabrication of all the briquettes experimented with in this effort.

3. EXPERIMENTAL TECHNIQUE

In light of the preliminary experiments, new compositions were proposed for the self-reducing briquettes which are the agglomerates that were used in the first stage of the process (first-slag stage). The composition of the new briquettes made with an MBI = 3 are indicated in Table 2.

TABLE 2

**COMPOSITION BY WEIGHT OF SELF-REDUCING
BRIQUETTES USED IN THE FIRST-SLAG STAGE OF THE
PROCESS (MBI = 3; EXCESS COKE = 30%)**

Ore	48.43%
Coke	15.87%
Slaked lime	28.86%
Fluorite	4.90%
Bentonite	1.94%

The cylindrical briquettes, having a diameter of 6 cms. and a length of 1.8 cms., were manufactured in a hydraulic press under 9800 KPa of pressure. The granulometry of the different components of the briquettes was the same as in the first effort mentioned above (1).

The chemical composition of each one of the compounds that make up these agglomerates --with the exception of the fluorite, which was very pure-- is given in the following tables (3 through 6).

TABLE 3
COMPOSITION BY WEIGHT OF THE IRON ORE

Iron oxide (almost Totally Fe ₃ O ₄)	84.99% *
SiO ₂	7.40%
P	0.14%
S	0.06%
Others	7.41%

TABLE 4
COMPOSITION BY WEIGHT OF THE COKE

C (fixed)	69.92%
Ash	16.41% **
Volatile materials	10.82%
H ₂ O	2.00%
S	0.84%
P	0.01%

* This percentage of iron oxide corresponds to 61.50% iron,

** The ash contains 80% SiO₂.

TABLE 5
COMPOSITION BY WEIGHT OF THE SLAKED LIME

CaO	71.22%
H ₂ O	21.23%
SiO ₂	2.27%
Al ₂ O ₃	0.56%
Fe ₃ O ₄	0.18%
MgO	0.32%
S	0.15%
Others	4.07%

TABLE 6
COMPOSITION BY WEIGHT OF THE BENTONITE

SiO ₂	55.44%
Al ₂ O ₃	20.14%
CaO	0.49%
Fe ₃ O ₄	3.27%
Na ₂ O	2.76%
MgO	2.29%
K ₂ O	0.60%
Others	15.01%

The briquette-drying conditions were direct exposure to the sun during approximately 8 hours, just as in the procedure in case (1).

Since the electric furnace used (with a 75-kW output) was an induction furnace, it was necessary to introduce starter steel into the crucible for each experiment; in all cases, this initial steel had the same composition, given in Table 7.

TABLE 7
**COMPOSITION BY WEIGHT OF THE STARTER STEEL
USED IN ALL OF THE DOUBLE-SLAG EXPERIMENTS**

C	0.18%
Mn	0.83%
P	0.02%
S	0.02%
Si	0.04%

Once the self-reducing briquettes had been processed, the slag was removed in order to later introduce slaked lime as the refining slag which remained in the mold together with the cast steel.

Due to the fact that the introduction of lime powder has the drawback that the furnace gases disperse a part of this material outside the crucible, it was pelletized prior to its introduction into the furnace, thus guaranteeing that the amounts weighed out previously would really enter the system process as the second (refining) slag.

The slaked lime pellets, of approximately 0.8 cms. in diameter, were obtained from a pelletizing disk and had the composition given in Table 8.

TABLE 8
**COMPOSITION BY DRY SLAKED
LIME PELLETS**

Slaked lime	92.3%*
Bentonite	7.7%*

* The composition of both substances appears in Tables 5 and 6.

FIGURE 1
PROCESSING OF SELF-REDUCING BRIQUETTES WITH DEVELOPMENT
OF THE FIRST SLAG

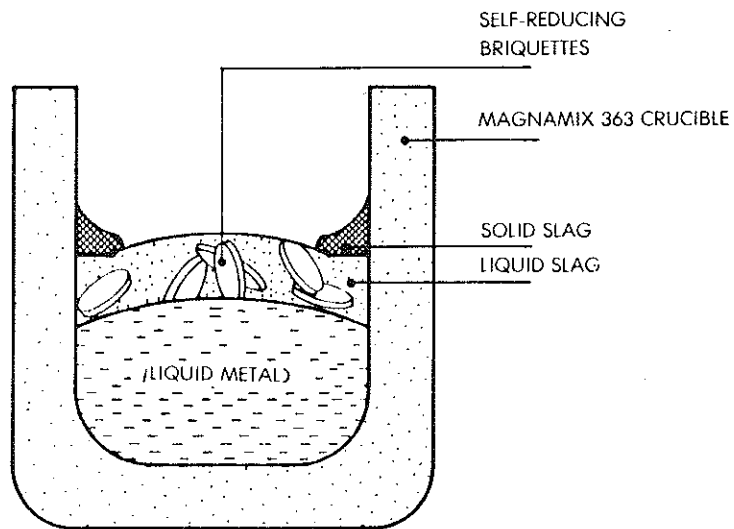
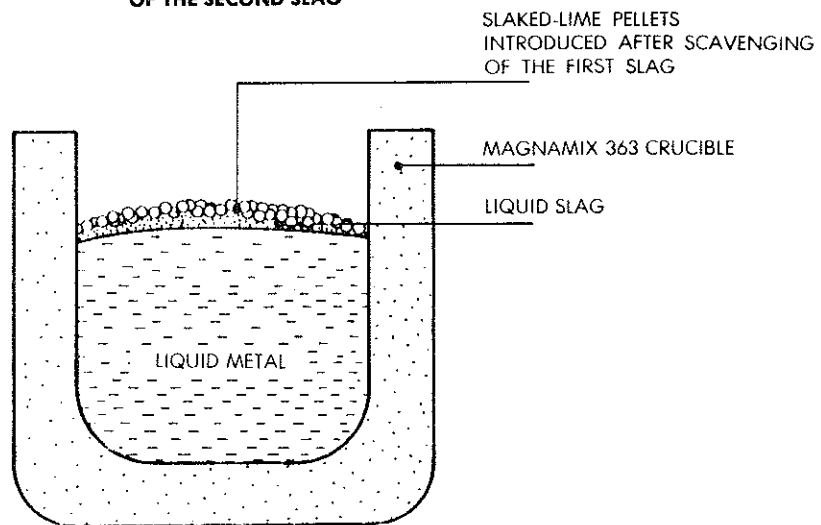


FIGURE 2
PROCESSING OF SLAKED-LIME PELLETS WITH DEVELOPMENT
OF THE SECOND SLAG



The situation during operation is shown in Figures 1 and 2. The first shows the processing of self-reducing briquettes, at the end of which the first slag is obtained; and the second refers to the process following the removal of the first slag where the lime pellets, upon melting, produce the refining slag.

The MBI varied in the different experiments as a function of variations in the mass of the refining slag, when different masses of lime pellets were introduced into the crucible. (Keep in mind that the MBI of the briquettes was always the same: equal to 3.)

Thus, the MBI increased from the initial value of 3 and various experiments were done in which the MBI of each one differed from the previous one by two tenths, within the interval $3.0 \leq \text{MBI} \leq 4.0$ (See Table 10).

The crucibles that were manufactured specially for these experiments were basic and had the composition detailed in Table 9.

TABLE 9
**COMPOSITION OF THE DRY REFRACTORY MATERIAL
USED IN MANUFACTURING THE CRUCIBLES**

MgO	91.0%
SiO ₂	4.5%
Fe ₂ O ₃	1.9%
(Na ₂ O + K ₂ O + Li ₂ O)	1.2%
CaO	0.5%
Al ₂ O ₃	0.3%
Otros	0.6%

The temperature of the steel bath, as measured with an optical pyrometer, fell in the range of 1600 to 1700°C during all the experiments.

4. EXPERIMENTAL RESULTS

The results obtained from the different experiments with double slag are expressed in Table 10, which shows how the yield (% of combined iron which passes to the metal state) varies when the mass of the lime pellets is varied.

TABLE 10
**YIELDS OBTAINED IN DOUBLE-SLAG PROCESSES FOR
 DIFERENT MOLAR BASICITY INDEXES (MBI)**

EXP.	STARTER STEEL (GRAMS)	SELF-RED BRIQUETTES (GRAMS)	LIME PELLETS (GRAMS)	TOTAL STEEL OBTAINED (GRAMS)	MBI	% YIELD*
1	9 005	11 183	315	10 073	3.2	32.1
2	8 988	10 731	630	10 006	3.4	31.9
3	8 992	11 133	1 012	10 174	3.6	35.7
4	9 001	11 240	1 403	10 957	3.8	58.5
5	9 015	11 243	1 805	11 074	4.0	61.5

* % rendimiento $\frac{A - B}{0,2976 \cdot C} \cdot 100$

A = acero total obtenido

B = acero inicial

C = briquetas autorreductoras

The speed of processing of the briquettes had an average value of 160 g/min., a value notably higher than that from the preliminary experiments and indicative of the fact that the innovations made to achieve it were correct; however, this figure is still far below the 280 g/min. obtained in the first case.

The average specific energy consumption for the double-slag process under study appears in Table 11.

TABLE 11
**SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION IN THE
 DOUBLE-SLAG PROCESS TO OBTAIN STEEL**

EXP.	KWH/KG, (steel obtained)	I.B.M.
1	50.63	3.2
2	47.89	3.4
3	42.29	3.6
4	29.22	3.8
5	26.76	4.0

The composition of the steel obtained can be seen in Table 12.

TABLE 12
**COMPOSITION OF THE STEEL OBTAINED FROM
 THE DOUBLE-SLAG PROCESS**

EXP.	C%	P%	S%	SI%
1	0.310	0.013	0.021	0.045
2	0.034	0.008	0.034	0.040
3	0.041	0.008	0.018	0.037
4	0.194	0.005	0.019	0.056
5	0.317	< 0.005	0.028	0.023

The specific area measured for an agglomerate similar to that used in this effort yielded a value of 14.70 m²/g (1), applying the BET method of evaluation (2). Afterwards, given the importance attributed to this measurement (3), a more modern method was used (4), (5)*, to confirm this value. The figure obtained was 17.99 m²/g, which differed from the first by an acceptable percentage for this type of measurement (2), and which would not be altered by either the form of the agglomerate (pellets or briquettes) or by the pressure applied to obtain these, as long as the pressure did not exceed the point of cracking or increase defects within the different crystalline components that comprise it.

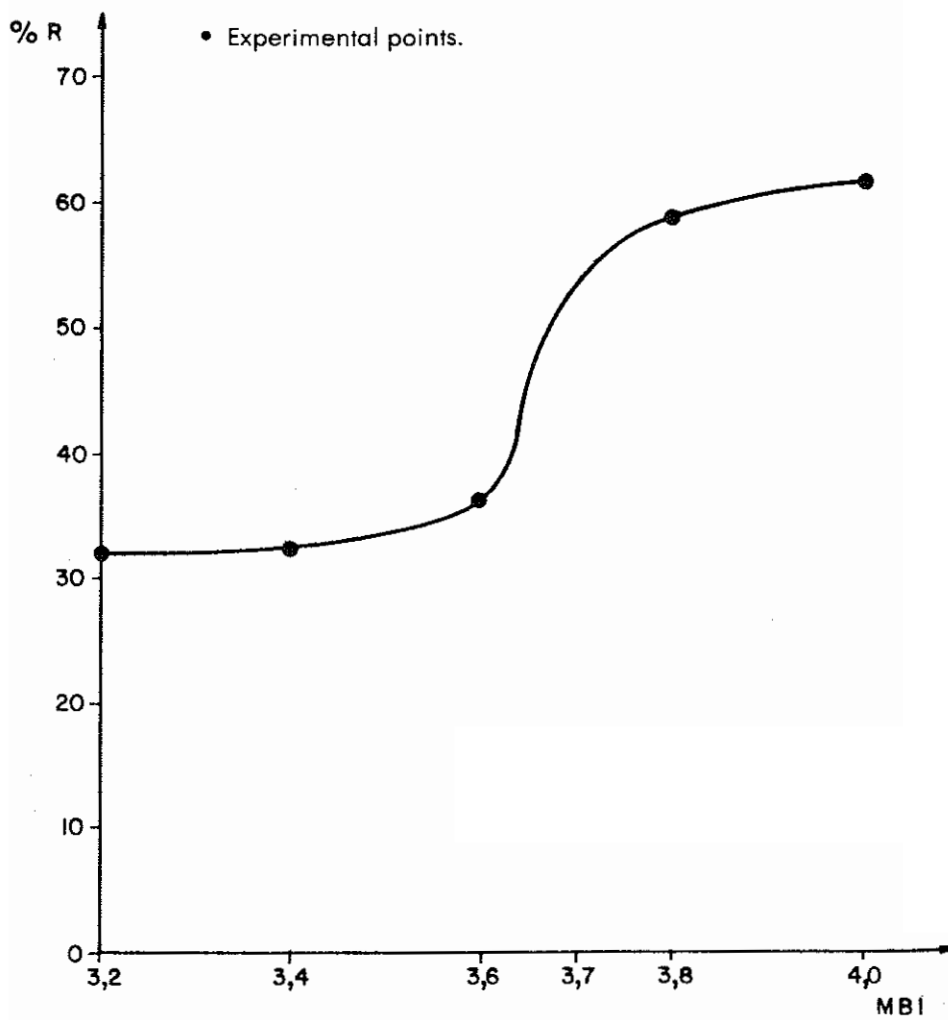
5. ANALYSIS OF RESULTS

Figure 3 shows how the MBI yield depends on the double slag. For MBI = 4.0, the yield was 61.5%, a percentage which seems low if compared with the 94% obtained for the same MBI value in a single-slag process carried out with similar raw materials and conditions (1). Furthermore, the same figure shows a yield of 33% for an MBI = 3.5, under conditions where, working with one slag and with the same MBI value, a yield of 64% was obtained (6).

This fact was observed in previous work done with self-reducing agglomerates, in which some isolated experiments were carried out with double slag. These experiments showed that the yield dropped in relation to that obtained using the same process but with single slag (7), (8). (In these two projects experiments were done with single and double slag.)

* Reference (5) gives a specific area value for pellets, but with a different surplus of coke, so it is alluded to in terms of the evaluation method for this area.

FIGURE 3
YIELD AS A FUNCTION OF THE TOTAL MOLAR BASICITY INDEX
(After a double-slag process)



The interpretation of the drop in yield when working with double slag would lie in the fact that in this case the FeO-saturated slag (first slag) would be scavenged and the new slag introduced in the clean bath (second slag) and also saturated with the same oxide due to the oxidation of the liquid metal, thus resulting -overall- in a chemical reduction of the iron, greater in this case than in the case of single slag, and consequently a smaller yield.

Now, comparing among themselves the results of the experiments carried out with double slag for the purposes of this paper, it can be observed in Figure 3 that the curve is upward. This behavior can be explained keeping in mind that in the temperature ranges being worked with Fe_3O_4 would not exist, but rather FeO (9), a substance whose activity as a function of the partial pressure of oxygen PO_2 is given by the expression:

$$a_{\text{FeO}} = a_{\text{Fe}} \cdot K \cdot \sqrt{\text{PO}_2} \quad [1]$$

in which a_{Fe} is the activity of the liquid iron and K is the equilibrium for the reaction:



the free energy of which as a function of temperature is:

$$\Delta F^\circ = - 56,900 + 11,82T \quad [3]$$

and for which the dependence $K(T)$ is given by the expression:

$$\log K = \frac{12,440}{T} - 2,583 \quad [4]$$

where the temperature is in Kelvin degrees.

When the slag is in equilibrium with the firm metal (11)

$a_{\text{Fe}} = 1$ and relation (1) is as follows:

$$a_{\text{FeO}} = K \sqrt{\text{PO}_2} \quad [5]$$

This relation makes it possible to explain that, on increasing the mass of the refining lime pellets, introduced immediately after scavenging the slag, the action of the atmospheric oxygen will have less partial pressure when reaching the surface of the liquid metal (the thickness of the slag implies a loss of load for the partial pressure of the oxygen), thereby reducing the activity of the FeO and consequently its concentration in the slag. This effect would transate into a greater amount of reduced iron and, therefore, a larger yield.

The fact that the percentage of carbon steel obtained using double slag (0.317%) is higher than that of the steel obtained for the same MBI = 4.0 using single slag (0.21%), (1), could be due to the

difference in yields, since starting with equal amounts of carbon in the two cases, the greater yield in the case of single slag would imply a greater consumption of this element in the reduction reaction (which generates gases) and therefore a lower content in the metal bath.

As for sulphur and phosphorus impurities, a clear decline can be observed when double slag is used. Table 13 shows the percentage of these elements in the steel obtained using either one or two slags for some cases in which it is possible to make comparisons using an equal MBI, since data are available.

TABLE 13
**PERCENTAGES OF SULPHUR AND PHOSPHORUS
 IN THE STEEL OBTAINED USING SINGLE AND DOUBLE-SLAG**

MBI	SULPHUR		PHOPHORUS	
	SINGLE SLAG (1),(6)	DOUBLE SLAG	SINGLE SLAG (1), (6)	DOUBLE SLAG
4.0	0 038	0 028	0 008	0 005
3.5	0 310	0 026*	0.05	0 008*

* Interpolated from Table 12.

As for specific energy consumption, it can be seen that this decreases as the MBI increases (i.e., the mass of lime pellets) and that, precisely in the same interval in which the yield rises sharply, specific energy consumption drops sharply.

Keeping in mind that the time and average power of the different experiments were similar, the variation in specific energy consumption can be explained by the variation in yield, since the energy consumed in each experiment was similar, but steel production was not: the larger the yield, the lower the specific energy consumption.

6. CONCLUSIONS

This paper does not intend to obtain measurements directly applicable to industrial situations, because the size of the crucibles used were laboratory-scale. Thus, the high value of specific energy consumption (12), (13) should not be surprising when work is being done with these small crucibles in which between 10 and 11 kg. of steel are being produced in each experiment. However, various conclusions can be inferred from the comparisons:

1. The use of two slags in a process to obtain steel directly from self-reducing agglomerates lowers the yield in relation to that obtained from a single-slag process similar in terms of raw materials and operational conditions.
2. The double-slag process to obtain steel by means of self-reducing agglomerates eliminates a greater quantity of sulphur and phosphorus than a single-slag process operating with the same basicity index value; this difference seems less accentuated when the index is excessively high.
3. If the results obtained in the different experiments with two slags are compared, it can be observed that the yield increases sigmoidally with the basicity index, presenting only a sharp increase when the molar basicity index varies between 3.6 and 3.8.
4. Energy consumption per kg of steel obtained decreases as the mass of the second refining slag (slaked-lime pellets) increases.
5. The percentage of carbon steel obtained by working with two slags proved to be ten times higher than the percentage of steel obtained using a single slag with similar raw materials and operational conditions.
6. In order to reduce the wear and tear of the refractory used in the experiments, it is suggested that the MgO be increased and the SiO₂ be decreased, and that the crucibles be manufactured with RAMMING C-MIX.

ACKNOWLEDGEMENTS

This paper was possible thanks to financial support granted by both the DIUC of the Catholic University of Chile and by the PMTM of the OAS. An expression of gratitude is also extended for the invaluable support received from the Department of Mechanical Engineering and Metallurgy of the Catholic University, especially its Head, Dr. Cristian Vial Edwards.

BIBLIOGRAPHY

1. Rodriguez, J. M., Rojas, R., Scanavini, A. and Vial, C. CENIM Magazine, 1984. (At press)
2. Young, D. D. and Crowell, A.D. *Physical Adsorption of Gases*, Butterworths, London, 1962, p. 182.
3. Rodriguez, J. M., Fuller, R., and Salinas, J. *Proceedings I Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology*, Ed. CAPES, Rio de Janeiro, 1982, p. 936.
4. Rodriguez, J. M. and Rodriguez, C. *Canadian Journal of Physics*, Vol. 61, N° 6, 1983, p. 903.
6. Rojas, R. and Scanavini, A. "Obtention of Low-Carbon Steel with Few Impurities from Self-reducing Briquettes in Induction Furnaces," Department of Mechanical Engineering and Metallurgy, Catholic University of Chile, Santiago, 1983, p. 39.
5. Rodriguez, J. M. and Rodriguez, C. *Latin American of Metallurgy and materials*, Vol. 3, N° 1, 1983, p. 30.
7. Rodriguez Cruchaga, J. M., Rivera Agüero, J. D., and Muñoz Bravo, I.M. *Advances in Materials Technology in the Americas*, ASME, San Francisco, California, U.S.A., 1980, P. 93.
8. Ref. (6), p. 92.
9. Benard, J., Michel, A., Philibert, J. and Talbot, J. *General Metallurgy*, Ed. Hispano Europea, Barcelona, 1973, p. 314.
10. Philbrook, W.O. and Bever, M.B. *Basic Open-Hearth Steelmaking*, AIME, New York, 1951, p. 650.
11. Darken, L. and Gurry, R. *Physical Chemistry of Metals*, McGraw-Hill Book Company, Inc., Tokyo, 1953, pp. 351-357.
12. De Sy, A., *Iron Ore Reduction* (Proceedings), Pergamon Press, New York, 1962, p. 134.