

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE GUADALAJARA
INCORPORADA A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONA DE MEXICO.

♦♦



Un Proceso Duplex para Obtener Acero en Fundiciones Pequeñas

- Balance de Material y de Calor -

TESIS PROFESIONAL
QUE PRESENTA EL SR.

Guillermo de la Mora N.

PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO

GUADALAJARA, MEX..

DICIEMBRE DE 1944



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE GUADALAJARA
INCORPORADA A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONA DE MEXICO.



Un Proceso Duplex para Obtener Acero en Fundiciones Pequeñas

- Balance de Material y de Calor -

63

GUADALAJARA, MEX.,

DICIEMBRE DE 1944

A MIS PADRES, CON CARINO
Y AGRADECIMIENTO

AL SR. ING. D. ALBERTO LANCASTER
JONES, DIRECTOR DE LA FACULTAD,
CON RESPETO Y AGRADECIMIENTO.

Balance de Material y de Calor en un Proceso "Duplex" para obtener Acero en Fundiciones pequeñas.

EL PROCESO COMPRENDE:

- 1.—Obtención de hierro fundido (fundición) a partir de pedacera de fundición disponible en la planta.
- 2.—Eliminación del Si, parte del C y parte del Mn en un convertidor Bessemer tipo ácido.
- 3.—Eliminación del P y S en un horno eléctrico básico.

La planta va a disponer de éste equipo para poder trabajar desde pedacera de acero para refundirla en el horno eléctrico únicamente; fundición con bajo % P (menos de 0.1%) para fundirla en el cubilote y eliminar C, Si y Mn en el convertidor con objeto de obtener lámina de acero, varilla corrugada, etc. que requieren solamente menos de 0.10 % P; fundición con bajo % C, y Si, mezclada con pedacera de acero en el cubilote y refinar el metal directamente en el horno eléctrico; hasta trabajar la pedacera de fundición aún con muchas impurezas por el proceso arriba indicado.

El balance presente abarca únicamente el estudio del proceso indicado al principio, o sea: obtención de fundición líquida a partir de pedacera de fundición usando el cubilote, y la refinación de ésta fundición líquida obtenida, por medio del Bessemer y del horno eléctrico.

El proceso descrito tiene las ventajas siguientes: Combina el proceso del Bessemer que es el más barato en costos de instalación y adaptable a trabajos chicos; con el horno eléctrico básico que da las clases de acero más finas.

Las desventajas son las siguientes: Es necesario, antes de cargar el metal fundido proveniente del convertidor al horno eléctrico, quitar la escoria proveniente del Bessemer y que flota en el metal de la olla; porque esa escoria es ácida y atacaría el revestimiento básico del horno eléctrico (ver balances de horno eléctrico).

También es necesario (como se verá en los balances del horno eléctrico, sacar del horno la primera escoria (escoria "negra") que se forma en el horno.

Estas dos operaciones son muy molestas porque hay que hacerlas ladeando la olla y el horno respectivamente y con palas o raquetas de mano. Sin embargo, la eliminación de la escoria en la olla se ha facilitado mucho con el uso de ollas que se descargan por el fondo y también, la operación de sacar del horno la escoria "negra" no es tan molesta en hornos chicos como en grandes.

Estas dos dificultades han obstaculizado la aplicación del proceso a plantas de grandes capacidades. Sin embargo, su uso en fundiciones pequeñas es recomendable.

El convertidor siempre tiene a su disposición una nueva carga de metal fundido al terminar el "soplo", ya que la capacidad del convertidor es tal que en 1 hr. puede trabajar todo el metal líquido que produce el cubilote en 1 hr.

El horno eléctrico siempre tiene a su disposición una nueva carga de metal al terminar la carga anterior.

El acero que se desea obtener es acero para "fundir piezas" y que tiene generalmente la composición siguiente:

Fe	.....	98 41	'
C	.....	0 30	..
Si	.....	0 60	..
Mn	.....	0 60	..
S	.....	0 02	..
P	.....	0 07	.. (algunas veces menos ' P)
		100 00	'

La composición promedio de la pedacera de fundición disponible es:

Fe	93.53	%
C	3.25	"
Si	2.25	"
Mn	0.60	"
S	0.07	"
P	0.30	"
	<hr/>	
	100.00	%

De suyo pueden obtenerse gran cantidad de aceros para diferentes usos, aceros aleación, . . . pero el tipo de acero que se hará con más regularidad es el arriba mencionado.

El trabajo se dividirá en las siguientes partes:
Introducción.

- 1.—Balance de material en el cubilote.
- 2.— " " calor " " "
- 3.— " " material " " convertidor Bessemer.
- 4.— " " calor " " " "
- 5.— " " material " " horno eléctrico.
- 6.— " " calor " " " "
- 7.— " " material " " proceso completo.
- 8.—El equipo.

BALANCE DE MATERIAL EN CUBILOTE:

Base: 100 Ks. de pedacera limpia.

ENTRAN:

Pedacera de fierro (fundición).

Caliza.

Cok.

Aire.

Agua en aire, caliza, cok y pedacera.

SALEN:

Fundición limpia obtenida.
Escoria.
Gases de combustión.
Agua en gases de combustión.

Análisis de cok, dado por la Cia. carbonífera: (base seca):

Cenizas	18.72 %
Carbón fijo	80.36 ..
Materia Volátil	0.92 ..
	<hr/>
	100.00 %
Humedad	2.10 Ks./100 Ks. cok se- co aprox.
Azufre	1.00 % aprox.

Análisis último de cok:

Cenizas corregidas: (Houghton & Watson; Ind. Chem. Calc.)
% cenizas corregidas = % cenizas por determinación directa - 3g % S.
" " " " 18.72 - 1.00 = 3g 18.35%,

Luego, análisis último aproximado: (base seca):

Cenizas corregidas	18.35 %
Carbón	80.36 ..
Azufre	1.00 .. aprox.
H, N y diferencia entre Carbón total y Carbón fijo	0.29 .. aprox.
	<hr/>
	100.00 %

En el caso presente, como no dispongo del dato de Carbón total ni del % de H y N, y puesto que el valor de los tres % s indicados arriba sumados es apenas 0.29%, incurriré solo en un pequeño error

en los balances de material y térmicos si hago las siguientes aproximaciones:

C total	C fijo.
% H	0.0 %
% N	0.0 %

ya que no se requiere una extrema exactitud puesto que hay otras pérdidas pequeñas también muy difíciles de determinar y controlar en el funcionamiento de un alto horno o de un cubilote y lo importante es controlar las reacciones que se llevan a cabo en forma más decisiva o en escala mayor en el proceso.

Valor calorífico del cok deducido del análisis último:

Valor calorífico total	14,550 C + 61,000 Ha + 5,600 S (Hougen & Watson).
" " "	14,550 + 0.8036 + 5,600 + 0.0100.
" " "	11,690 Btu lb. de cok seco.
c sea, 11,690/1.8	6,520 Cal./ Kg.

Análisis de pedacera limpia:

Dada la clase de pedacera de fundición disponible, puede suponerse como análisis promedio el siguiente:

Fe	93.53 %
C	3.25 ..
Si	2.25 ..
Mn	0.60 ..
S	0.07 ..
P	0.30 ..

	100.00 %

Análisis de caliza usada: (Base seca).

CaCO ₃	96.50 %
MgCO ₃	1.01 ..
FeCO ₃	0.54 ..
Al ₂ O ₃	0.85 ..
SiO ₂	0.33 ..

SO ₃	0.072 „
P ₂ O ₅	0.007 „

Total determinado ... 99.309%

Dado éste análisis en otra forma:

CuO	54.07 „
MgO	0.48 „
FeO	0.34 „
Al ₂ O ₃	0.85 „
SiO ₂	0.33 „
S	0.029 „
P	0.0016 „
CO ₂	43.17 „

Total determinado ... 99.2706%

Proporción COK: PEDACERA:

La fundición tiene que descargarse a 1,400 °C aproximadamente para que en el convertidor Bessemer alcance más fácilmente la temperatura necesaria (1,600 °C aprox. Ver Balance térmico del convertidor).

Contenido de calor de fundición descargada (1,400 °C) ... 310 Cal./Kg. (Hougen & Watson).

Valor calorífico de cok 6,520 Cal./Kg.

Eficiencia térmica aproximada de cubilotes 35%.

luego:

Ks. de fundición/ 1 Kg. de cok = $6,520 \cdot 0.35$ = 7.36 Ks.

y: 310

Ks. cok/ 100 Ks. de fundición = $100 / 7.36$ = 13.6 Ks. cok

luego: seco.

usaré en la práctica 13.6 Ks. de cok seco / 100 Ks. de pedacera; ya que aproximadamente Ks. fundición obtenida Ks. pedacera cargada.

Cantidad de caliza a usar:

Conviene producir escoria sesqui-silicato que es la más fluida y desulfuriza mejor (Boylston: Introduction to the metallurgy of Iron and steel.)

Fórmula de escoria sesqui-silicato: $4\text{CaO} : 3\text{SiO}_2$.

Luego:

Ks. CaO para fundir un Kg. SiO_2

p. mol. SiO_2	.....	60.08
„ CaO	.....	56.08
„ CaCO_3	.....	100.08

4 CaO	4 × 56.08	
<hr/>		1.24 Ks. CaO/ 1 Kg. SiO_2 .

3 SiO_2	3 × 60.08	
------------------	-----------	--

o también:

1.24 × 100.08	
---------------	--

<hr/>	2.22 Ks. CaCO_3 / 1 Kg. SiO_2 .
-------	---

56.08

Generalmente se recomienda 2.0 a 2.2 Ks. CaCO_3 / 1 Kg. SiO_2 (Boylston).

Ks. CaO para fundir 1 Kg. Al_2O_3 :

fórmula del aluminato formado: $2\text{CaO} : 1\text{Al}_2\text{O}_3$.

P. mol. Al_2O_3	101.94
---------------------------------	-------	--------

2 CaO	2 × 56.08	
-------	-----------	--

<hr/>	<hr/>	1.1 Ks. CaO/ 1 Kg. Al_2O_3 .
-------	-------	--

1 Al_2O_3	1 × 101.94	
---------------------------	------------	--

o también:

1.1 × 100.08	
--------------	--

<hr/>	1.96 Ks. CaCO_3 / 1 Kg. Al_2O_3 .
-------	--

56.08

Tomo en cuenta que el FeO y el MgO de caliza hacen el mismo papel que el CaO de caliza; que el SiO_2 y el Al_2O_3 de la caliza se unen con CaO para producir escoria; que el FeO y MnO formados por la combustión parcial del Fe y Mn de pedacera se unen con SiO_2 de las cenizas del cok para formar escoria en igual forma que el CaO ; que el SiO_2 formado por combustión parcial del Si en la pedacera se une con CaO de caliza para producir escoria.

Según esto: Escorificables /100 Ks. de caliza:

MgO	.....	0.48 Ks.	.....	0.48/40.32	0.0119 K-mol. MgO
FeO	.....	0.34 Ks.	.....	0.34/71.84	0.0047 K-mol. FeO
CaO	.....	54.07 Ks.	.....	54.07/56.08	0.9642 K-mol. CaO
					0.9808 K-mol. Total.
Al ₂ O ₃	.....	0.85 Ks.	.....	0.85/101.92	0.0083 K-mol. Al ₂ O ₃
SiO ₂	.....	0.33 Ks.	.....	0.33/60.06	0.0055 K-mol. SiO ₂

Luego, para escorificar 0.0083 K-mol. Al₂O₃ según proporción
2CaO: 1Al₂O₃ se necesitan:

0.0083 × 2/1 = 0.0166 K-mol. CaO o CaCO₃/100 Ks caliza.
y para escorificar 0.0055 K-mol. SiO₂ según proporción

3CaO:4SiO₂ se necesitan:

0.0055 × 4/3 = 0.0073 K-mol. CaO o CaCO₃/100 Ks. caliza.

Luego:

K-mol. útiles/100 Ks. caliza 0.9808 - 0.0166 - 0.0073

" " " " " 0.9569 K-mol. CaO útiles/100 Ks. caliza.

Escorificables/100 Ks. cok:

Considero como si los 18.26% de cenizas corregidas fueran totalmente SiO₂ (así se toma generalmente para estos cálculos, puesto que en primer lugar, predomina el SiO₂ en las cenizas, y en segundo lugar, como la cantidad de caliza para escorificar 1 Kg. Al₂O₃ y 1 Kg. SiO₂ es muy semejante: 2.2 v 1.96 respectivamente, no hay error muy notable al hacer ésta suposición. Esta es una de las razones por las que se usa 2.0-2.2 en vez de 2.22 Ks. CaCO₃ 1 Kg. SiO₂. Además, es muy peligroso para el revestimiento cargar más caliza de la necesaria para escoria sesqui-, aunque fuera pequeño exceso).

Luego: K-mol. SiO₂/100 Ks. cok 18.26 60.06 0.3040
K-mol.

En el trabajo del cubilote hay mermas de Si, Mn, Fe y S presentes en la pedacera, por quemarse parcialmente a SiO₂, MnO, FeO y SO₂ respectivamente. El contenido de C no varía o hay poco aumento. El P no varía porque se oxida sólo con escorias muy básicas y hierro descarburado.

Merms de Si y Mn: (Olsen: Fundición de fierro y acero):

Cque se quema a CO 6.2/12.01 0.52 K-át.
 o sea:
 Ks. CO₂ 0.39 x 44.01 17.2 Ks.
 Ks. CO 0.52 x 28.01 14.6 „

La calcinación de la caliza producirá 100 Ks. pedacera
 % CO₂ en caliza = 43.17%.

43.17 x 3.45/100 1.48 Ks. CO₂.

CO₂ total en gases:

17.2 + 1.48 18.68 Ks. CO₂.

22.41 x 1000 x 18.68 / 44.01 9,512 Lts. CO₂ a condiciones standr.
 Lts. CO en gases:

22.41 x 1000 x 0.52 11,653 Lts. a condiciones standard.

Aire necesario para quemar el C/ 100 Ks. pedacera:

Para quemar 0.39 K-át C a CO₂ 0.39 K-mol. O₂

Para quemar 0.52 K-át. C a CO 0.52/2 0.26 K-mol. O₂

O₂ total necesario 0.65 K-mol. O₂

Pero es necesario un exceso de aire, como en todos los procesos de combustión en que el contacto del aire con el combustible no puede ser completamente íntimo por razones físicas (volumen del cok. ..).

El aire total inyectado se calcula (Boylston: Introduction to the Metallurgy of Iron and Steel) considerando como si todo el C del cok se quemaría a CO₂, según esto:

O₂ para quemar 0.91 K-át. C a CO₂ 0.91 K-mol. O₂

p. mol. aire seco 29.0.

fracción-mol. de O₂ en aire seco 0.21.

Ks. aire seco 0.91 x 29.0 / 0.21 125.6 Ks. aire seco.

Lts. del aire húmedo actual: (20 C y 72 % humedad): (760 mm.,)

volúmen húmedo (carta de humedad) 13.5 cu ft./lb aire seco.

o sea: 843 Lts. /Kg. aire seco.

luego:

Lts. aire húmedo = 125.6×843 105,880 Lts./100 Ks. pedacera.
 + 10 % adicional (escapes....) 10,588 " " " "

Lts. total . . . 116,468 " " " "

presión atmosférica promedia en Guadalajara 635 mm.

Lts. de aire húmedo en Guadalajara:

116,468 \times 760/635 = 139,180 Lts. 100 Ks. de pedacera.

Gases del cubilote: 100 Ks. de pedacera:

N₂ en gases:

K-mol. O₂ total en aire inyectado 0.91

" N₂ en gases = $0.91 \times 0.79/0.21$ = 3.423 K-mol.

Ks. N₂ = 3.423×28.016 96.0 Ks.

Lts. N₂ = $3.423 \times 22.41 \times 1000$ 76,710 Lts. a condicio-
 (nes standard.

Agua en gases:

agua en aire = 0.01 Ks. agua Kg. aire seco (carta de hum.)

Ks. agua en aire 126.5×0.01 1.256 Ks.

Ks. agua en caliza $3.45 \times 1.5 \times 100$ 0.051 "

Ks. agua en cok $12.5 \times 2.0 \times 100$ 0.250 "

1.557 Ks.

o sea:

$22.41 \times 1000 = 1.557 \times 18.016$ 1,937 Lts. a condicio-
 (nes standard.

O₂ en gases:

O₂ en aire alimentado 0.91 K-mol.

O₂ para originar CO y CO₂ 0.65 "

0.26 K-mol. O₂ en gases.

(exeso de O₂ = O₂ total $0.26 \times 100/0.91$ = 28.5% exeso).

Fuerte exeso de O₂ perjudica porque produce atmósfera oxidante en el cubilote.

Ks. O₂ en gases 0.26×32.0 8.32 Ks.

Lts. O₂ en gases $0.26 \times 22.41 \times 1000$ 5,827 Lts. a condicio-
 (nes standard.

3.45 × 0.029/100 0.001 Ks.

S total entrado 0.185 Ks.

luego:

S en fundición obtenida:

0.185 × 50/100 = 0.0925 Ks. S/ 100 Ks. pedacera.

S. que se quema a SO₂ 0.0925 Ks./ 100 Ks. pedacera.

Mn en fundición obtenida:

0.60 — 0.05 = 0.55 Ks. Mn.

Si en fundición obtenida:

2.25 — 0.34 = 1.91 Ks. Si.

Fe en fundición obtenida:

93.53 — 0.655 = 92.875 Ks. Fe.

luego:

composición del metal obtenido:

Fe	.....	92.875	Ks.	.....	93.83	%
C	.....	3.25	"	.....	3.28	"
Si	.....	1.91	"	.....	1.93	"
Mn	.....	0.55	"	.....	0.56	"
S	.....	0.0925	"	.....	0.093	"
P	.....	0.30	"	.....	0.303	"
<hr/>						
98.98 Ks. fundición/100 Ks. pedacera					100.00	%

Solo el P y S interesan hasta la 3a. decimal por ser pequeña su proporción y sin embargo muy importantes las propiedades que comunican.

Escoria producida / 100 Ks. de pedacera:

proviene la escoria de CaO, FeO, MgO, SiO₂, MnO, Al₂O₃ y cenizas provenientes a su vez de la pedacera, caliza o cok usados.

FeO de oxidación frente a toberas	0.655 x 71.25	55.85	0.84	Ks.		
MnO	"	"	0.05 x 70	93/54	0.06	"
SiO ₂	"	"	0.34 x 60	06/28	0.73	"

SiO ₂ de caliza	0.33 x 3.45/100	= 0.01	„
Al ₂ O ₃ „ „	0.85 x 3.45/100	= 0.03	„
FeO „ „	0.34 x 3.45/100	= 0.01	„
MgO „ „	0.48 x 3.45/100	= 0.02	„
CaO „ „	54.07 x 3.45/100	= 1.85	„
S ₂ en escoria (supongo)		= 0.00	„
P ₂ „ „ („)		= 0.00	„
Cenizas de cok	11.91 x 12.5 100	= 1.49	„

total Ks. escoria .. 5.04 Ks.

Análisis ("deducido") de la escoria:

FeO	16.9	%
MnO	1.2	„
MgO	0.4	„
CaO	36.7	„
Al ₂ O ₃ y SiO ₂	44.8	„

100.0%

Gas producido / 100 Ks. pedacera:

Si tomamos el dato que: "siempre aproximadamente 4.7 Ks. C se queman a CO₂ 100 Ks. pedacera" (Olsen):
de los 12.5 Ks. cok con 87.18% C, prácticamente se queman a CO₂ 4.7 Ks. C.

luego:

C en 12.50 Ks. cok 12.5 0.8718 10.9 Ks.

C que se quema a CO₂ 4.7 „

luego, C que se quema a CO 6.2 Ks.

p.at. C	12.01
p.mol CO ₂	44.01
„ CO	28.01

C en cok / 100 Ks. pedacera 10.9/12.01 0.91 K-át.

C que se quema a CO₂ 4.7/12.01 0.39 „

Valor calorífico total = $14,550 \times 0.8718 + 5,600 \times 0.0091$

Valor calorífico total = 12,707 Btu/ lb.

o sea:

$12,707/1.8 = 7,059$ Cal. / Kg.

Eficiencia térmic aprox. de cubilotes: 35 %.

Contenido de calor de fundición descargada (1,400°C):

· 310 cal./ kg. (a 18°C.)

Luego Ks. fundición . 1 Kg. cok:

7,059

———— × 0.35 = 7.97

310

o sea:

Ks. cok/ 100 Ks. fundición: 100

———— = 12.56 Ks.

7.97

Puede usarse en la práctica la proporción 12.5 Ks cok/ 100 Ks. de fundición.

Escorificables 100 ks. cok:

p. mol. SiO₂ = 60.06

11.91

———— = 0.1983 K-mol. SiO₂/100 Ks. cok.

60.06

Escrificables/ 100 Ks. pedacera:

(igual al caso anterior con cok "Standard").

Se necesitan 0.00878 K-mol. SiO₂/ 100 ks. pedacera para escorificar el FeO proveniente de pedacera.

Se necesitan 0.00068 K-mol. SiO₂/100 Ks. pedacera para escorificar el MnO proveniente de pedacera.

Luego:

SiO₂ necesario para escorificar FeO y MnO de pedacera 100

Ks. cok:

0.00878 + 0.00068

———— / 100 = 0.0757 K-mol. SiO₂/ 100 Ks. cok

12.5

SiO₂ de pedacera a escorificar con caliza:

0.34 Ks. Si/ 100 Ks. pedacera, o sea:

0.34 100

———— × ———— = 0.0957 K-mol. SiO₂/ 100 Ks. cok.

28.06 12.5

SiO₂ total a escorificar con CaO útil de caliza:

11.91

———— + 0.0957 — 0.0757 0.2183 K-mol. SiO₂/ 100 Ks. cok.

60.06

Caliza necesaria en total para escorificar:

0.2183 × 4/3 = 30.4 Ks. caliza / 100 Ks. cok.

Si usamos la proporción de 2.1 en vez de 2.22 Ks. caliza/ 1 Kg. SiO₂, la cantidad de caliza necesaria será:

30.4 × 2.1/2.22 = 27.6 Ks. caliza / 100 Ks. cok.

o sea:

27.6 × 12.5/100 = 3.45 Ks. caliza/ 100 Ks. de pedacera.

Esta proporción es muy buena en la práctica y corresponde bien a la escoria "sesqui—" y por tanto el metal obtenido tendrá menos inclusiones no metálicas, cosa importante cuando la fundición se destina a fabricar aceros finos como en el caso presente. La práctica indica que la calidad del acero descargado del horno eléctrico está en relación directa con los procesos que le precedieron y métodos usados en ellos.

El balance de material y térmico estará basado en su totalidad en el uso de cok "imperial" ya que se trata de fabricar acero eléctrico para fundir piezas.

Análisis ("deducido") de la fundición a obtener: /100 Ks. pedacera.

Cálculo de la merma de S:

El S se quema a SO₂ al principio, pero enseguida el SO₂ formado con el Fe caliente produce FeS que se queda en la fundición; sin embargo, la desulfurización alcanza generalmente como promedio el 50% del S total:

S entrando en pedacera 0.07 Ks.

S entrando en 12.5 Ks. cok.

12.5 · 0.91/100 0.114 Ks.

S entrando en caliza (3.45 Ks. caliza)

“para 0.6% Mn y 2.25% Si:

merma de Si 15% del Si en pedacera.

merma de Mn 9.1% del Mn en pedacera.

Luego:

$$\text{merma de Si} = \frac{15 \times 2.25}{100} = 0.34 \text{ Kgs. Si } 100 \text{ Ks. pedacera.}$$

$$\text{merma de Mn} = \frac{9.1 \times 0.60}{100} = 0.05 \text{ Ks. Mn } 100 \text{ Ks. pedacera.}$$

Merma de Fe (Olsen: id.)

aproximadamente el 0.7% del Fe en pedacera.

luego:

$$\text{merma de Fe} = \frac{0.7 \times 93.53}{100} = 0.655 \text{ Ks. Fe } 100 \text{ Ks. pedacera.}$$

Según esto:

Escorificables 100 Ks. de pedacera:

0.655 Kgs. Fe, o sea 0.655 55.85 = 0.0117 K. át. Fe.

requieren para escorificar:

0.0117 x 3/4 = 0.00878 K-mol. SiO₂/100 Ks. pedacera.

0.05 Ks. Mn, o sea 0.05 /54.93 = 0.00091 K-át. Mn requieren para escorificar:

0.00091 x 3/4 = 0.00068 K-mol. SiO₂/100 Ks. pedacera.

luego:

SiO₂ para escorificar FeO y MnO provenientes de la pedacera (usando 13.6 Ks. cok/ 100 Ks. pedacera).

0.00878 + 0.00068 = 100 = 0.0696 K-mol. SiO₂ / 100 Ks. de cok.

13.6

SiO₂ de pedacera a escorificar con caliza:

0.34 Ks. Si 100 Ks. pedacera se quemán a SiO₂.

o sea 0.34/28.06 = 0.0121 K-mol. SiO₂ formados / 100 Ks. pedacera;

o sea: (usando 13.6 Ks. cok 100 Ks. pedacera).

$0.0121 \times 100, 13.6 + 0.089 \text{ K-mol. SiO}_2/100 \text{ Ks. cok.}$

SiO₂ total a escorificar con CaO útil de caliza/ 100 Ks. cok:
 $0.3040 + 0.0890 - 0.0696 = 0.3234 \text{ K-mol. SiO}_2/100 \text{ Ks. cok.}$

Caliza total para escorificar:

$0.3234 \times 43 = 0.4312 \text{ K-mol. CaO/ 100 Ks. cok.}$

o sea:

0.4312×100

45.0 Ks. caliza /100 Ks. cok.

0.9569

proporción enorme en la práctica, porque el gran volumen de caliza aumenta el contacto con las paredes de refractario; no se permiten en la práctica generalmente proporciones mayores de 28 Ks. de caliza/ 100 Ks. cok.

Si se usa el cok "Imperial" (se procurará usar siempre que se pueda) la proporción de caliza a añadir es mucho menor como se verá:

Análisis del cok "Imperial" dado por la Cia. Carbonifera:

C fijo	87.18 %
Materia volátil	0.40 %
Cenizas	12.42 %
	<hr/>
	100.00 %

Análisis último:

C total	87.18 %
Azufre	0.91 %
Cenizas corregidas	11.91 %
H, N y O	0.0 %
	<hr/>
	100.00 %

Valor calorífico del cok deducido del análisis último:
Valor calorífico total 14,550 C + 61,000 H + 5,600 S. (Hougen & Watson).

SO₂ en gases:

Ks. S₂ que se queman a SO₂ 0.0925 Ks.

p.at. S 32.06

Lts. SO₂ = 22.41 × 1000 × 0.0925/32.06 64 Lts a condicio-
(nec standard.)

Composición del gas:

CO ₂ ..	9,512 Lt	13.68 Ks.	0.424 K-mol.	9.0 %
CO ..	11,653 "	14.60 "	0.520 "	11.0 % (ceros
N ₂ ..	76,710 "	96.00 "	3.423 "	77.0 % (de:)
O ₂	5,827 "	8.32 "	0.260 "	11.0 "
Vap. a-				72.6 "
gua ..	1,937 "	1.56 "	0.086 "	5.5 "
SO ₂ ..	64 "	0.0925,	0.002 "	1.8 "
<hr/>				
	105,703 Lt	139.25 Ks.	4.715 K-mol.	100.0 %

p.mol. promedio del gas 139.25 4.715 29.5.

SUMARIO DE BALANCE DE MATERIAL EN CUBILOTE:

Entran:

pedacra limpia	100.00 Ks.
Cok seco	12.50 "
agua en cok (2.0 Ks. agua/100 Ks. cok seco)	0.25 "
caliza seca	3.45 "
agua en caliza (1.5 Ks. agua/100 Ks. caliza seca)	0.05 "
aire seco	125.60 "
agua en aire	1.256 "

Suma 243.106 Ks.

Salen:

Fundición obtenida	98.98 Ks
escoria	5.04 "
gases de cubilote	139.16 "

Suma 243.18 Ks.

Diferencia para sumas exactas: (error en operaciones)

243.18 — 243.106 0.074, o sea menos de 0.05%.

BALANCE DE CALOR EN CUBILOTE:

base: 100 Ks. pedacera limpia y 18 °C.

bases para los cálculos:

"el cambio total de energía depende sólo de los estados de agregación, temperatura y presión iniciales y finales."

Calor de "combustión parcial" del cok:

"calor desprendido en una reacción suma de calores de combustión de reactantes -- suma de calores de combustión de productos."

Calor de "combustión total" del cok/100 ks. pedacera:

Ks. cok seco 100 ks. pedacera 12.5 Ks.

calor de combustión del cok seco 7,059 Cal./Kg. cok.

luego:

12.5 × 7,059 88,238 Cal./100 Ks. pedacera.

Calor de combustión de los productos de la "combustión parcial" del cok: /100 Ks. pedacera:

Productos	K-mol.	Cal./K-mol.	Calor de combustión (en total)
CO	0.520	67,620	35,162 Cal.
CO ₂	0.424	0	0 ..
N ₂	2.450	0	0 ..
O ₂	0.00	0	0 ..
vap. agua	0.066	0	0 ..

TOTAL — 35,162 Cal. 100 Ks. pedacera.

Luego:

calor desprendido en "combustión parcial" del cok:

88,238 — 35,162 53,076 Cal. 100 Ks. pedacera.

(se supone, lo cual es prácticamente cierto, que todo el C del cok se quema y que nada del C del cok pasa a aumentar o disminuir el % C de la pedacera).

Contenido de calor del gas de combustión (seco):

temp. de salida de los gases 450 °C aprox.

Capac. de calor media entre 18 y 450 °C para SO ₂	.. 11.9 Cal./K-mol.
" " " " " " " " " " CO ₂	.. 10.2 " "
" " " " " " " " " " CO	.. 7.25 " "
" " " " " " " " " " N ₂	.. 7.25 " "
" " " " " " " " " " O ₂	.. 7.25 " "

luego:

Contenido de calor de SO ₂	- 0.002 × 11.90	= 0.024 Cal./°C.
" " " " CO ₂	- 0.424 × 10.2	= 4.325 " "
" " " " CO	- 0.520 × 7.25	= 3.770 " "
" " " " N ₂	- 3.423 × 7.25	= 17.762 " "
" " " " O ₂	- 0.260 × 7.25	= 1.885 " "

SUMA = 27.766 Cal./°C.

Contenido de calor total 27.766 (450-18) 11,900 Cal./100 Ks. pedac.

Contenido de calor de agua en gases de combustión:

K-mol. agua en gas/100 Ks. pedacera 0.0865 K-mol.
 K-mol. gas seco 100 Ks. pedacera 4.714-0.0865 4.6275 K-mol.
 Humedad molal 0.0865 /4.6275 0.0187
 punto de rocío para esa humedad molal (carta de humedad) .. 16°C.

Como la temp. de rocío es menor que la temperatura que tomo como base para el balance, no tomo en cuenta el calor de vaporización del agua sino sólo la capacidad de calor del vapor de agua.

Capacidad de calor del vapor de agua, promedio entre 18°C y 450°C: 8.65 Cal. K-mol. °C.

Contenido de calor total .. 8.65 · 0.0865 (450-18) 323 Cal./100 ks. (de pedacera.

Contenido de calor de fundición obtenida: /100 Ks. pedacera:
 temperatura de salida de la fundición obtenida 1400 °C.

Contenido de calor a 1,400°C (desde 18°C) .. 310 Cal./Kg. aprox. (Hougen & Watson).

Ks. de fundición obtenidos de 100 ks. de pedacera 98.98 Ks

Luego: contenido de calor total:

98.98 · 310 30,684 Cal. 100 Ks. de pedacera.

Calor de formación del FeO, SiO₂ y MnO provenientes de la combustión de una parte del Fe, Si y Mn en pedacera:

Productos		Cal. K-mol	Calor total de formación.
FeO	0.655 71.85	0.0091 64,000	583 Cal.
SiO ₂	0.340 60.06	0.0057 201,000	1,136 „
MnO	0.05 70.93	0.0007 90,800	64 „

Total 100 Ks. pedacera 1,783 Cal.

Calor desprendido en formación de escoria:

Habría que determinar el calor de formación de silicatos de Ca, Mg, Fe, Mn, con SiO₂: la formación de monosilicatos a partir de los óxidos va acompañada de desprendimiento de calor, por otro lado la formación de silicato dicálcico a partir de CaO y SiO₂ va acompañada de absorción de calor; luego, la formación de la escoria "sesquisilicato" que podría considerarse formada de los dos silicatos anteriores, puede suponerse que prácticamente no absorbe ni desprende calor (este mismo supuesto se hace para el balance térmico de los altos hornos: Hougén & Watson). Además puede esperarse que el efecto térmico resultante no será grande; raramente se ven datos acerca de este punto en bibliografía (Hougén & Watson).

Luego: calor desprendido en formación de escoria (supongo) 0.0.

Contenido de calor de escoria 100 Ks. de pedacera: (como tiene composición parecida a la escoria de los altos hornos, sus propiedades térmicas serán muy semejantes; además, casi todas las escorias producidas en los diferentes hornos en metalurgia del acero y del hierro tienen propiedades térmicas muy semejantes (Hougén & Watson).

Temperatura de salida de la escoria 1,400 °C.

Contenido de calor de escoria desde 18 a 1,400 °C 390 Cal. Kg. (Hougén & Watson).

Luego:

Contenido de calor total 5.04 - 390 1,965 Cal. 100 Ks. pedacera.

Calor de calcinación de carbonatos en fundente:

Ks. fundente / 100 Ks. de pedacera = $27.4 \times 12.5 / 100 = 3.425$ Ks.
 K-mol. CO₂ en fundente = $3.425 \times 0.4317 / 44.01 = 0.0336$ K-mol.
 " CaO " " = $3.425 \times 0.5407 / 56.08 = 0.0330$ "
 " MgO " " = $3.425 \times 0.0048 / 40.32 = 0.0004$ "
 " FeO " " = $3.425 \times 0.0034 / 71.85 = 0.0002$ "

Reactantes	K-mols.	Calor molal de formac.	Calor total de formac.
CaCO ₃	0.0330	288,000 Cal.	9,504 Cal.
MgCO ₃	0.0004	267,000 "	107 "
FeCO ₃	0.0002		50 " (estimado)
Total			9,661 Cal.

Productos	K-mols.	Calor molal de formac.	Calor total de formac.
CO ₂	0.0336	94,400 Cal.	3,171 Cal.
CaO	0.0330	151,700 "	5,006 "
MgO	0.0004	145,600 "	58 "
FeO	0.0002	64,000 "	13 "
Total			8,248 Cal.

Luego:

calor total absorbido en calcinación de caliza:

9,661 - 8,248 = 1,413 Cal./100 Ks. de pedacera.

Contenido de calor del aire húmedo suministrado:

temperatura del aire 20°C.

Calor húmedo (para 0.01 lb. agua/ lb. aire seco 0.2445

(Btu. °F x lb. aire seco.)

Dif. °C $\times 1.8$ = Dif. °F.

Ks. de aire seco 125.6 Ks./ 100 Ks. de pedacera.

Ks. $\times 2.205$ = lbs.

Cal. = 0.252 \times Btu.

Luego: contenido de calor total /100 Ks. de pedacera: (base: 18°C.)

$125.6 \times 0.2445 + 0.252 + 1.8 (20 - 18) = 13$ Cal./100 Ks. pedacera.

2.205

SUMARIO DE BALANCE DE CALOR EN CUBILOTE:

Base: 100 Ks. de pedacera y 18°C.

Entran:

Calor de "combustión parcial" del cok	53,076 Cal.
Contenido de calor del aire húmedo	13 "

Total ... 53,089 Cal.

Salen:

Contenido de calor de fundición obtenida	30,684 Cal.
" " " " escoria	1,965 "
" " " " gas seco	11,990 "
" " " " agua en gas	323 "
Calor de calcinación de carbonatos	1,413 "
Calor de formación de SiO ₂ , MnO y FeO	1,783 "

48,158 Cal.

Calor perdido por radiación del horno (53,089 - 48,158)	4,931 Cal.
---	------------

Total ... 53,089 Cal.

Las pérdidas por radiación no se calculan, por las siguientes razones:

1.—Hay mayor radiación hacia el final del "soplo" que al principio porque el ladrillo refractario usado se va corroyendo y cada vez opone menor resistencia al flujo de calor a través de las paredes del horno.

2.—Se ha determinado que la eficiencia térmica promedia de los cubilotes, teniendo en cuenta como bases el calor de "combustión total" del cok y el calor recuperado en la fundición obtenida es muy cerca de 35% para un cubilote de dimensiones medias. Yo tomé al principio como base para los balances de material y térmico este dato.

BALANCE DE MATERIAL DEL CONVERTIDOR BESSEMER

Base 100 Ks. metal cargado al convertidor (es decir, fundición del cubilote).

ENTRAN:

fundición líquida del cubilote;

Aire seco;

agua en aire.

SALEN:

Gases de combustión, húmedos;

escoria;

metal fundido descargado del convertidor.

Análisis de fundición alimentada (ver análisis de fundición descargada del cubilote).

La operación del convertidor para el caso en que el metal descargado de él tenga que pasar a un horno eléctrico, se basa en las consideraciones siguientes:

1.—Todo el Si se quema a SiO₂ prácticamente (Sisco - Electric Furnace).

2.—Se pasa por un punto en el transcurso de la operación en que el Mn está en un 0.15% aprox. y el C en un 0.60% aprox.; este punto es el más conveniente para descargar el convertidor porque conviene que el metal alimentado al horno eléctrico básico contenga más de 0.10% Mn porque metal con menos Mn no puede desoxidarse bien en el horno eléctrico; esto se debe a que el Mn se oxida de preferencia al Fe, pero disminuyendo de 0.10% Mn, el Fe comienza a oxidarse fuertemente.

3.—El P y S no se eliminan porque su eliminación requiere adición de CaO que atacaría preferentemente al SiO₂ del revestimiento por ser más fijo que el P₂O₅ y el S de los sulfuros de Fe y Mn; por tanto cualquier adición de CaO atacaría fuertemente al revestimiento.

Según esto:

escoria producida 100 Ks. de metal cargado:

Si en metal cargado 1.93 28.06 0.069 K-át. Si;

que producirá 0.069 K-mol. SiO₂ que irán a la escoria; o sea:
0.069 60.06 4.144 Ks. SiO₂.

Mn en metal descargado 100 Ks. metal cargado:

(supongo obtener 92 Ks. metal descargado 100 Ks. metal cargado.)
0.15 92/100 0.14 Ks. Mn

Mn en metal cargado. 0.56 Ks.
 K-át. Mn que se queman a MnO = 0.56 · 0.14 = 0.0077 K-át. Mn, que

54.93

producirán 0.0077 K-mol. MnO; o sea:
 0.0077 × 70.93 = 0.546 Ks. MnO.

La cantidad de FeO en escoria es tal, que generalmente se realiza la proporción:

SiO ₂	4				
----- ; tomadas las cantidades de SiO ₂ , MnO y FeO en mols.					
MnO + FeO	3				

Luego, sustituyendo en ecuación anterior:

0.0077 + FeO	3				
----- ; y despejando FeO:					
0.069	4				

FeO en escoria = 0.044 K-mol.; o sea:
 0.044 × 71.85 = 3.161 Ks. FeO / 100 Ks. de metal cargado.
 Ks. escoria total = 4.144 + 0.546 + 3.161 = 7.851 Ks. escoria.

Metal descargado del convertidor / 100 Ks. de metal cargado:

Fe en escoria = 0.044 × 55.85 = 2.46 Ks.
 (supongo obtener 92 Ks. de metal descargado / 100 Ks. metal cargado, para calcular el C y Mn).

Fe	.93.83 · 2.46	91.37 Ks.	98.82 %
C	0.60 + 92/100	0.55 ..	0.60 ..
Si	.....	0.00 ..	0.00 ..
Mn	0.15 + 92/100	0.14 ..	0.15 ..
S	.....	0.093 ..	0.101 ..
P	.....	0.303 ..	0.328 ..

Metal obtenido ... 92.456 Ks. 100.00 % aprox.

(sólo el S y P interesa conocerlos hasta la 3a. cifra decimal).

Aire requerido = 100 Ks. de metal cargado:

para evitar en lo posible una grande oxidación del Fe a la alta temperatura de la masa y en la atmósfera fuertemente oxidante del convertidor, que es una de las causas que perjudica mucho la calidad de los aceros, se inyecta únicamente la cantidad de aire indispensable para quemar todo el Si a SiO₂, parte del Mn a MnO, parte del C a

CO y la parte de Fe que se quema siempre inevitablemente a FeO al mismo tiempo de producirse las oxidaciones anteriores; según lo indicado en párrafos anteriores.

Según esto:

	3.28-0.55	
C que quema a CO	-----	0.227 K-át. C.
	12.01	
Si que se quema a SiO ₂ (ver antes)	0.069	Si.
Mn que se quema a MnO (ver antes)	0.0077	Mn.
Fe que se quema a FeO (ver antes)	0.044	Fe.

Sin embargo, probablemente hay mayor formación de FeO que queda disuelto en metal, pero como no sé con qué cantidad de FeO sale el metal del cubilote, cualquier estimación probablemente es errónea por no tener una base. Por tanto no lo tomo en cuenta. Es de esperarse que sea muy pequeña ésta cantidad de FeO que queda disuelto en metal comparada con la cantidad de FeO en escoria.

Aire requerido:

0.227 K-át. C requieren	0.227 2	0.1135 K-mol. O ₂
0.069 " Si "		0.0690 " "
0.0077 " Mn "	0.0077 2	0.0039 " "
0.044 " Fe "	0.044 2	0.0220 " "

Total ... 0.2084 K-mol. O₂.

fracc. - mol. O₂ en aire seco 0.21

p.mol. aire seco 29.0

K-mol. aire seco 0.2084 0.21 0.990

Ks. aire seco 0.990 29.0 28.71 Ks.

vol. húmedo del aire usado (ver balance del cubilote) 843 Lts./Kg.
(de aire seco.)

Lts. aire húmedo necesarios a 760 mm. y 20°C:

843 28.71 24,200 Lts.

Lts. aire a 635 mm. (presión media en Guadalajara) y 20°C:

24,200 760/635 28,920 Lts./100 Ks. de fundición cargada.

+ 10 % adicional 2,892 Lts. (por escape.)

31,812 Lts. aire en total.

Luego:

Lts. de aire necesario en Guadalajara ... 31,800 Lts./1100 Ks. de
(metal cargado.)

Ks. agua en el aire:

Humedad: 0.01 Ks. agua/ Kg. aire seco.

0.01 × 28.71 = 0.287 Ks./ 100 Ks. metal cargado.

(0.29 aprox.)

K-mol. equivalentes 0.287 18.016 0.016 K-mol.

La composición probable de los gases producidos en el proceso será: (se supone que no hay exceso de aire):

0.227 K-át. C originan 0.227 K-mol. CO

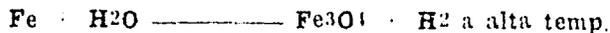
0.990 K-mol. aire seco tienen:

0.990 × 0.79 0.782 „ N₂

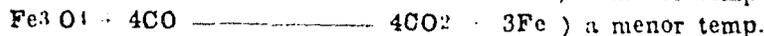
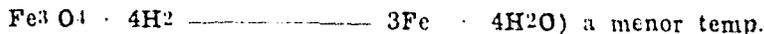
agua en gases = agua en aire .. 0.016 „ H₂O vapor.

TOTAL ... 1.025 K-mol. gases/100 Ks. carga.

Hay además probablemente la reacción siguiente entre el vapor de agua y el Fe al rojo:



pero también se verifican las siguientes:



Por la complejidad de reacciones supongo que en total todo el H₂O que entra en el aire, sale en el gas del convertidor, y que todo el C que se quema lo hace a CO. (el equipo calculado con esta base da en la práctica el resultado deseado).

Análisis probable de gases antes de ponerse en contacto con aire ajeno al proceso:

CO 0.227 · 100/1.025 = 22.1 %

N₂ 0.782 · 100/1.025 = 76.4 %

Van. agua ... 0.016 · 100/1.025 = 1.5 %

100.0 %

composición en peso del gas:

CO	0.227	×	28.01		6.36	Ks.
N ₂	0.782	×	28.016		21.90	„
Vap. agua	0.016	×	18.016		0.29	„

TOTAL 28.55 Ks.

SUMARIO DEL BALANCE DE MATERIAL DEL CONVERTIDOR:

ENTRAN:

fundición líquida del cubilote	100.00	Ks.
aire seco	28.71	„
agua en aire	0.29	„

129.00 Ks.

SALEN:

Metal descargado	92.45	Ks.
escoria descargada	7.86	„
gases desprendidos	28.55	„

128.86 Ks.

Diferencia:

129.00 — 128.86 = 0.14.

o sea 0.11 % error en operaciones.

BALANCE DE CALOR DE BESSEMER:

Base: 100 Ks. de fundición líquida cargada al convertidor y 18°C.

Contenido de calor de la fundición cargada:

La fundición al descargarse del cubilote tiene 1,400° C, pero, por estar el convertidor más frío que esa temperatura y por el recorrido que hace el metal fundido desde la boca de descarga del cubilote hasta el convertidor en contacto con el aire ambiente, considero que el metal adentro del Bessemer en el momento de iniciarse el "soplo" está en éste caso a 1,370° C. aproximadamente.

Contenido de calor de fundición cargada (1,370° C.) ... 305 Cal/Kg. (H. & W.)

Contenido de calor total $305 \times 100 = 30,500$ Cal. / 100 Ks.
metal cargado.

Contenido de calor del aire alimentado:

Al calcularlo en idéntica forma al Balance en el cubilote, se encontró ser 3 Cal. (despreciable).

Contenido de calor de gases de combustión:

(En el momento de producirse, antes de reaccionar el CO producido en la masa fundida con O₂ del aire para formar CO₂):

Tep. de gases de combustión temp. del metal fundido =
1,600° C. aprox.

Adelante indicaré cómo el metal fundido al terminar el "Sople" está a 1,600° C. aprox.

Capacidad de calor entre 18 y 1,600° C. del CO, N₂ y vapor de agua:

agua en gas 0.016 K-mol.
gas seco = 0.226 + 0.782 1.008 ..

Humedad molal de gas 0.016 1.008 = 0.016.

Punto de rocío para ésta humedad molal (carta de humedad)
14°C.

Como 14° C. es menor que la temperatura que tomo como base para los cálculos (18° C.), sólo tomo capacidad de calor del vapor de agua entre 18 y 1,600° C., que es 10.2 Cal. K-mol. °C.

Capacidad de calor del N₂ entre 18 y 1,600 C.
7.6 Cal. K-mol x° C.

Capacidad de calor del H₂O entre 18 y 1,600 °C
7.6 Cal. K-mol x° C.

Luego:

Contenido de calor del CO	0.226	7.6	1.71 Cal. °C.
Contenido de calor del N ₂	0.782	7.6	5.94 " "
Contenido de calor del H ₂ O	0.016	10.2	0.16 " "
	<hr/>		
	Total		7.81 Cal. °C.

Luego:

Contenido de calor total 7.81 (1,600-18) 12,355 Cal./100
Ks. fundic. cargada.

Contenido de calor del hierro descargado del Bessemer:

La temperatura de fusión de un "hierro colado" con 4.3% C., 1.1% Si y 0.5% Mn aprox., es alrededor de 1,170° C. (H. & W.): este tipo de fundición es de los de punto de fusión más bajo. La temperatura de fusión del hierro puro es aproximadamente 1,535° C. (Boylston); y entre estos dos extremos hay toda una escala de puntos de fusión correspondientes a diferentes composiciones de las fundiciones y los aceros.

En general, a mayor pureza de un "hierro", más alto es su punto de fusión.

El punto de fusión del "hierro" tal como se descarga, en este proceso del Bessemer, se considera muy cerca del correspondiente al hierro puro, puesto que contiene pocas impurezas.

Además, como el hierro una vez descargado del convertidor tendrá que quedar unos minutos en ollas antes de cargarlo al horno eléctrico, se necesitará como regla general que el hierro "escurra" algo sobrecalentado; considero como temperatura correcta de descarga alrededor de 1,600° C.

Capacidad de calor a 1,600° C. 330 Cal. Kg. (H. & W).
Ks. de hierro descargado 94.74 Ks.
Contenido de calor total 330 - 91.82 30,300 Cal.

Contenido de calor de escoria: 100 Ks. fundición cargada.
Temp. de escoria al descargar 1,600° C. aprox.
Contenido de calor de escoria 500 Cal./Kg. aprox.
Ks. de escoria 7.857 Ks./100 Ks. carga.
Contenido de calor total:
7.857 - 500 3,930 Cal. aprox.
Calor de formación del CO, MnO, SiO₂ y FeO:

Productos,	K-mol.	Calor molar de formac.	Calor total de formac.
CO	0.226	26,780 Cal.	6,050 Cal.
MnO	0.008	90,800 "	726 "
FeO	0.044	64,000 "	2,815 "
SiO ₂	0.069	201,000 "	13,850 "

Contenido del calor TOTAL . . . 23,441 Cal.

Calor de formación de escoria a partir de los óxidos: no hallé datos al respecto, es opinión general ser muy pequeño y portanto lo considero 0 C l. (supuesto erróneo, pero aproximado).

SUMARIO DE BALANCE DE CALOR DEL CONVERTIDOR BESSEMER:

Base: 100 Ks. de fundición del cubilote cargados: y 18° C.

Entran:

Por fundición líquida alimentada	30,500 Cal.
„ combustión del C, Si, Mn y Fe	23,441 „
„ aire húmedo alimentado (despreciable)	3 „

Total . . . 53,944 Cal.

Salen:

Por metal descargado	30,300 Cal.
„ escoria descargada	3,930 „
„ gases desprendidos	12,355 „

Total . . . 46,585 Cal.

Calor perdido por radiación de las paredes del convertidor (53,940-46,585)	7,359 Cal.
--	------------

Salen total . . . 53,944 Cal.

Como se ve, el contenido de calor de la fundición alimentada a 1.370 °C aproximadamente, es casi igual al contenido de calor del metal descargado del convertidor; ésto se debe a que el contenido de calor de los diferentes fierros y aceros es "relativamente" parecido (no varía demasiado) a la temperatura de sus respectivos pun-

tos de fusión, pero los puntos de fusión si son bastante diferentes.

Eficiencia térmica del convertidor Bessemer:

considerado como un horno, el convertidor tiene la eficiencia siguiente:

contenido de calor del metal descargado.

Efic. _____

Calor de Comb. de C, Si, Mn, Fe + cont. de calor de fundic. (alimentada.)

56%. (el dato general aprox. es 60%).

BALANCE DE MATERIAL EN HORNO ELECTRICO:

El metal y la escoria descargados del Bessemer, debido a la atmósfera fuertemente oxidante del convertidor, lleva siempre FeO disuelto; y en el tiempo que transcurre desde su descargue hasta vaciarlo al horno eléctrico, disminuye en su contenido de C debido a la reacción:



y se tiene determinado que el 0.60% C del metal descargado del convertidor se reduce a 0.30% en el metal al ser cargado al horno. (Sisco).

Luego, composición del metal cargado al horno:

Fe	98.82	Ks.	99.12 %
C	0.3	„	0.30 „
Si	0.00	„	0.00 „
Mn	0.15	„	0.15 „
S	0.101	„	0.10 „
P	0.328	„	0.33 „
	99.699	Ks.	100.00 %

El proceso del horno eléctrico consiste de 2 partes principales:

1.—Formación de la primera escoria (escoria "negra" por presencia de FeO). Consiste en la oxidación del P a P₂O₅ por medio de adición de escamas de laminación (también se usa mineral de Fe cuando no se dispone de escamas de laminación) y conversión del P₂O₅ a Ca₃(PO₄)₂ por medio de caliza o cal viva.

2. Formación de la segunda escoria (escoria "blanca" por presencia de exceso de CaO). Consiste en la desoxidación y desulfurización del metal por medio de C_2Ca producido por la acción del arco eléctrico sobre CaO y coque añadido, para formar la escoria.

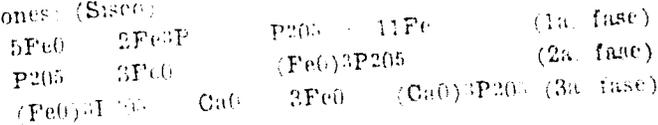
Además se añade CaF_2 o SiO_2 para hacer más fluida la escoria; el CaF_2 ayuda a la desulfurización (Sisco)

Nota: como la primera escoria lleva bastante FeO al fin del primer periodo, porque siempre queda exceso de FeO en la escoria como se verá adelante, conviene sacarla del horno antes de añadir los reactivos para la formación de la segunda escoria, porque la acción desoxidante de la segunda escoria sobre el metal no se realizaría si no hasta haber eliminado la mayor parte del FeO de la escoria primera; trabajo más difícil y que gastaría mayor cantidad de reactivos y no, y es molesto en hornos de diámetro grande, no así en hornos chicos.

Formación de la escoria "negra"
 elimina P y C únicamente, la eliminación de Mn requeriría presencia de SiO_2 en escoria o de Si en metal (ambos prácticamente pueden considerarse 0.0). La eliminación de S en la primera escoria se estima en 20% del S total, pero este es un dato estimativo (Sisco); en la práctica, tanto al iniciarse la operación como al sacar del horno la primera escoria se nota olor a SO_2 , además, los análisis de escoria negra indican casi siempre un 0.2% S. Esta eliminación de S se debe probablemente a que al iniciarse la operación los sulfuros de Fe y Mn (que es la forma en que está el S, probablemente están emulsificados en la masa de metal, y una parte de ellos alcanzan a ascender hasta la escoria en el transcurso de la operación y por la quietud relativa de la masa. Sisco)

Eliminación del P

reacciones: (Sisco)



5FeO + 2Fe₃P + 3CaO + 11Fe = (CaO)₃P₂O₅ (reacción total).
 La ausencia de SiO_2 ayuda a la eliminación del P, porque el SiO_2 co-

mo más fijo que el P2O5 tiende a reemplazarlo según la reacción:
 $(CaO)_3P_2O_5 + SiO_2 \rightarrow (CaO)_x(SiO_2)_y + P_2O_5$

esta es la razón de que el P no pueda eliminarse en procesos ácidos.
 Debido a la poca estabilidad del $(FeO)_3P_2O_5$ debe haber un exceso de
 CaO disponible en la escoria para asegurar la reacción en la 3a. fase.

Según la reacción total, para eliminar los 0.33 Ks. P en el
 metal ó sea:

0.33 / 30.98 = 0.0106 K-at. P se necesitan:

0.0106 x 5/2 = 0.0265 K-mol. FeO, ó sea:

0.0265 x 71.85 = 1.90 Ks. FeO

y:

0.0106 x 3/2 = 0.0159 K-mol. CaO, ó sea:

0.0159 x 56.08 = 0.89 Ks. CaO ó:

0.89 / 0.5407 = 1.65 Ks. caliza 54.07 % CaO.

Eliminación del C:

reacción (Sisco)

$FeO + Fe_3C \rightarrow 4Fe + CO$

luego:

para eliminar 0.30 Ks. C, ó sea:

0.30 / 12.01 = 0.025 K-át. C,

se necesitan:

0.025 K-mol. FeO ó sea:

0.025 x 71.85 = 1.80 Ks. FeO.

Total de cantidades calculadas para formación de la escoria
 "negra":

FeO para eliminar P 1.90 Ks.

" " " " C 1.80 "

 FeO total 3.70 Ks.

y:

Caliza 54.07 % CaO para eliminar P 1.65 Ks.

Según análisis, las escamas de laminación usadas tienen como
 promedio 94 % FeO, luego:

Ks. escamas de laminación = 3.70 / 0.94 Ks. ó mejor 4.0 Ks.

No conviene añadir fuerte exceso de escamas de laminación,
 porque el metal, como proviene de un proceso muy oxidante (con-

vertidor), ya lleva de por sí FeO disuelto; además la operación siguiente, es decir, la desoxidación, se dificultaría más.

Sin embargo, para poder eliminar más de 0.07% P y 0.07% C. en metal, se hace indispensable añadir mayores excesos de FeO y hacer más largo el período de desfosforación.

En el caso presente, dado que el acero obtenido del proceso se usará para fundir piezas (fundición de acero), generalmente se permite hasta 0.07% P.

Respecto a la caliza, si conviene añadir un exceso considerable, puesto que no perjudicará al metal; sin embargo, un gran exceso gasta incesantemente corriente eléctrica en la calcinación de los carbonatos en la caliza y hay peligro de absorción de P de la caliza por el metal.

Por tanto, en el balance presente supongo una cantidad de caliza cargada (tomada de datos en la práctica) de: (aproximada)
4.5 Ks. caliza / 100 Ks. de metal cargado al horno.

FeO gastado realmente:

Ks. de P eliminados 0.33 — 0.07 0.26 Ks. P, ó sea:
0.26 · 30.98 = 0.0084 K-át. P.
que gastaron: (ver reacción de eliminación de P)
0.0084 · 5/2 0.021 K-mol. FeO para eliminar P.

Ks. de C eliminados 0.30 — 0.07 0.23 Ks. C. ó sea:
0.23 · 12.01 = 0.019 K-mol. FeO para eliminar C.
(ver reacción de eliminación del C).

Luego:

Ks. FeO realmente gastado 0.021 + 0.019 0.040 K-mol. FeO
ó sea: 0.040 · 71.85 = 2.87 Ks. FeO.

Los 0.0084 K-át. P eliminados requirieron para formar fosfato (ver reacciones de desfosforización):

0.0084 · 3/2 0.013 K-mol. CaO ó CaCO₃, ó sea:
0.013 · 100.09 = 1.30 Ks. CaCO₃

Ks. de metal al fin del 1er. período:

Ks. metal cargado	100.00 Ks.
Ks. C eliminado	0.23 „
Ks. P eliminado	0.26 „
Ks. metal al fin del período = 100.00 — 0.23 — 0.26	99.51 Ks.

Ks. de escoria "negra" descargados del horno:

Los 0.0084 K-át. P. eliminados producirán:

0.0084 2 = 0.0042 K-mol. $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (ver reacciones).

o sea: 0.0042 \times 310.20 = 1.30 Ks. fosfato.

Por escamas de laminación: (94 % FeO)

impurezas de escamas
 4.0 \times 6/100 = | 0.24 Ks. |

FeO en 4.0 Ks. escamas
 4.0 \times 94.100 = | 3.76 Ks. |

FeO gastado
 | 2.87 Ks. |

Luego exeso de FeO 3.76 — 2.87
 | 0.89 Ks. |

Por exeso de caliza (ver análisis de caliza en balance de cubilote):

Ks. caliza total
 4.50 Ks. |

Ks. CaO en caliza total 4.50 \times 54.07 100
 2.43 Ks. |

Ks. CaO por caliza gastada = 1.30 \times 54.07 100
 0.70 Ks. |

Ks. CaO en escoria descargada 2.43 — 0.70 =
 1.73 Ks. |

Ks. MgO 4.50 \times 0.0048
 0.02 Ks. |

Ks. FeO 4.50 \times 0.0034
 0.02 Ks. |

Ks. Al_2O_3 4.50 \times 0.0085
 0.04 Ks. |

Ks. SiO_2 4.50 \times 0.0033
 0.01 Ks. |

Composición de escoria-aprox. (deducida): (suponiendo % S = 0.0)

$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$
 1.30 Ks. | 30.5% |

Impurezas de escamas = Al_2O_3 + SiO_2 0.29 „
 | 6.8% |

FeO exeso + FeO de caliza
 0.91 „ | 21.6% |

CaO exeso
 1.74 „ | 40.8% |

MgO
 0.02 „ | 0.3% |

Total — Ks. escoria ... 4.26 Ks. 100.0%

Si se considera CaO en escoria CaO libre + CaO combinada:

Ks. CaO en escoria
 2.48 Ks. | 55.8% |

Gases durante 1er. período:

% CO_2 en caliza
 43.17 % |

Ks. caliza
 4.50 Ks. |

— 39 —

Ks. CO₂ 4.50 × 0.4317 1.94 Ks. CO₂
 0.23/12.01 0.019 K-át. C, o sea 0.019 × 28.01 = 0.54 Ks CO

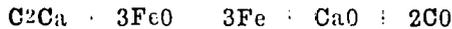
Formación de la escoria "blanca".

Desoxidación (eliminación del FeO):

reacción fundamental:



pero la escoria de C₂Ca desoxida mucho mejor que C sólo, las reacciones siendo las siguientes:



3C + 3FeO → 3CO + 3Fe (reacción total idéntica a la indicada arriba).

Luego:

suponiendo que el metal lleve disuelto al fin del 1er. período 1% FeO (según estimación: Boylston), o sea:

1/71.85 = 0.014 K-mol. FeO;

Para eliminarlo se necesitarán (según reacción anterior):

0.014 K-át. C, o sea

0.014 × 12.01 = 0.17 Ks. C.

Desulfurización (eliminación de S):

reacciones: (por medio de C₂Ca)



(lo mismo para FeS)

Para eliminar 0.10 Ks. S, o sea

0.10 / 32.06 = 0.0031 K-mol. sulfuros (de Fe y Mn),

se necesitan:

0.0031 K-át. C, o sea: 0.0031 × 12.01 = 0.037 Ks. C

0.0031 K-mol. CaO o sea: 0.0031 × 56.08 = 0.175 Ks. CaO

En estas condiciones, el S fácilmente se elimina hasta 0.02% S en metal, en 1-1/2 Hr. o poco más.

Las condiciones para la desulfurización son las siguientes:

1—escoria muy básica; 2—elevada temperatura (1,650-1,700°C);

- 3—escoria muy fluida; 4—C o C_2Ca necesario.
 5—bajo %S en los materiales que originan la escoria.

C gastado en realidad: Y CaO gastado en realidad en desulfurización.

Para eliminar 0.10 — 0.02 = 0.08 Ks. de S, o sea:

0.08 / 32.06 = 0.0025 K-mol. sulfuros

se necesitan:

0.0025 K-át. C, o sea: 0.0025 · 12.01 = 0.030 Ks. C.

0.0025 K-mol. CaO, o sea: 0.0025 · 56.08 = 0.140 Ks. CaO.

La desoxidación si es completa prácticamente (Boylston).

Cantidades de reactivos a usar:

Ks. C para desoxidar = 0.17 Ks. = 0.014 K-mol.

Ks. C para desulfurizar = 0.037 „ = 0.0031 K-mol.

C total = 0.207 Ks. = 0.0171 K-mol.

Lo calculado de CaO fueron 0.175 Ks., pero todas las reacciones anteriores suponen que todo el C se unió con CaO totalmente para formar C_2Ca , y aparte hay una cantidad de CaO libre para funcionar como tal en la desulfurización.

CaO necesario para formar C_2Ca con todo el C:

reacción: $3C + CaO = C_2Ca + CO$

Luego:

0.0171 K-át. C requerirán:

0.0171 / 3 = 0.0057 K-mol. CaO, o sea:

0.0057 · 56.08 = 0.32 Ks. CaO.

Aparte, (según reacciones de desulfurización):

la eliminación de 0.0031 K-mol. sulfuros requerirá:

0.0031 · 2/3 = 0.0021 K-mol. CaO libres, o sea:

0.0021 · 56.08 = 0.118 Ks. CaO.

Luego:

Ks. CaO totales = 0.320 + 0.118 = 0.438 Ks.

luego:

Ks. cok 87 % C = 0.207 / 0.87 = 0.238 Ks.

Ks. cal 95.5 % CaO = 0.438 / 0.955 = 0.459 „

proporción cal: cok en este caso = 0.459 / 0.238 = 5.8/3.

La proporción recomendada para el caso de que el horno trabaje metal muy oxidado, es:

cal: cok: CaF_2 o SiO_2 6 : 3 : 1 o 2 (respectivamente).

Esta proporción se acomoda más al caso porque el metal proviene de un proceso muy oxidante (del convertidor). Sin embargo, lógicamente las cantidades de reactivos deben variar también con la cantidad de S en metal.

Debido a que un exeso de CaO aun un poco mayor no perjudicará en nada, y para que siempre haya C_2Ca en escoria descargada a pesar de las eliminaciones de C en seguida mencionadas, en la práctica usará las cantidades:

Ks. cal 95.5% CaO 0.54 Ks.

Ks. cok 87.0% C 0.27 ..

ajustándome así a la proporción indicada antes (6:3).

Todos éstos cálculos, son únicamente aproximados, porque la cantidad de FeO disuelto en metal es imposible poderla determinar exactamente y por eso se partió de un dato que se supone aproximado (1% FeO); sin embargo, la cantidad actual de FeO puede diferir del 1% y en ese caso la cantidad de reactivos a añadir deberá ser diferente; esto se sabe en la práctica, puesto que la consistencia de la escoria se mantiene a ojo: "La condición de la escoria de C_2Ca es muy importante, porque cambiará de tiempo en tiempo, y cal, fluorspato (en éste caso sílice) o cok, deben ser añadidos para guardarla a la propia consistencia, que puede ser comparada a lejía de jabón con poca espuma, exepcto cerca del arco donde estará suave y delgada". (Boylston).

Es peligroso añadir fuerte exeso de cok porque habria alguna tendencia a mayor carburización del metal.

Conviene mezclar fuera del horno el cok, la cal y la sílice y añadirlos al horno en forma de mezcla facilitando así una rápida formación de C_2Ca y evitando el contacto de masas grandes de cok con el metal.

Conforme va avanzando el proceso, el C_2Ca gastado en la desoxidación del metal originará CaO libre que servirá también como exeso de CaO presente (ver reacción de desoxidación).

Ks. de escoria Blanca:

La cal tiene aproximadamente el siguiente análisis (base seca).

CaO	95.5 %
MgO	1.0 "
FeO	0.5 "
Al ₂ O ₃	1.6 "
SiO ₂	0.6 "

Total determinado ... 99.2 %

Ks. CaO en cal añadida 0.54×0.955 0.515 Ks.

Ks. CaO gastados con FeO y S 0.140 "

Se ha observado que la absorción de C por el metal es aproximadamente 1-2 puntos hr. (0.01-0.02 Ks.). El segundo periodo dura aproximadamente 1-1/2 hr., luego la absorción total de C por el metal será aproximadamente de 0.02 Ks.

El C. que no pasó a CO en la desoxidación y desulfurización, y que no fué absorbido por el metal, queda en su mayor parte en la escoria en forma de C₂Ca; otra parte más pequeña probablemente se quema con cualquier cantidad de aire que entre a la atmósfera del horno y que no sea eliminada por combustión del grafito de los electrodos, esta cantidad es incontrolable y muy pequeña y por tanto no se toma en cuenta:

Ks. C en cok añadido $0.27 \cdot 87 \cdot 100$ 0.235 Ks.

Ks. C gastados $0.17 \cdot 0.030$.. 0.20 Ks.

Ks. C absorbidos por metal 0.02 Ks.

Ks. C a formar C₂Ca residual en esc. $0.235 - 0.20 - 0.02$ = 0.015 Ks. según la reacción:



$0.015/12 \cdot 01$ 0.00125 K-át. C producirán:

$0.00125/3$ 0.00041 K-mol. C₂Ca, o sea:

$0.00041 \cdot 64 \cdot 10$ 0.026 Ks. C₂Ca

al reaccionar con:

$0.00041 \cdot 56 \cdot 08$ 0.023 Ks. CaO

Luego:

Ks. CaO libre en escoria $0.515 - 0.140 - 0.023$ = 0.352 Ks. CaO.

CaS formado en desulfurización:

0.0025 K-mol. CaS, o sea

$0.0025 \cdot 72 \cdot 14$ 0.18 Ks. CaS.

SiO₂ para adelgazar la escoria:

(aprox. 1.5 ks./ 6.0 Ks. Cal)
 Ks. Cal 0.54 Ks.
 Ks. SiO₂ = 0.54 × 1.5 / 6.0 = 0.14 Ks.

SiO₂ de cal:
 0.54 × 0.006 = 0.003 Ks. SiO₂.

Al₂O₃ de Cal:
 0.54 × 0.16 = 0.009 Ks. Al₂O₃

MgO de cal:
 0.54 × 0.01 = 0.005 Ks. MgO

FeO de cal: No lo tomo en cuenta porque es reducido por C₂Ca.

SiO₂ de cok 12 % cenizas aprox.:
 0.27 × 0.12 = 0.032 Ks. SiO₂

SiO₂ de cok para recarburizar:
 Ks. cok 0.14 Ks.
 0.14 × 0.12 = 0.017 Ks. SiO₂

Composición de escoria:

CaS	0.180 Ks.....	23.5 %
CaC ₂	0.026	3.4 "
CaO	0.352	46.0 "
SiO ₂ 0.14 + 0.003 + 0.032 + 0.017	0.192	25.2 "
Al ₂ O ₃	0.009	1.2 "
MgO	0.005	0.7 "
	total Ks. escoria. 0.764 ..	100.00 %

Gases en 2o. período:

0.014 + 0.0025 = 0.0165 K-át. de C que se transforman a CO, producen: 0.0165 × 28.01 = 0.46 Ks. CO.

Metal obtenido:

La adición de Si se hace por medio de Fe-Si con 50% Si como máximo (Fe-Si con más de 51.5% Si se desintegra espontáneamente).

te); y para obtener un metal descargado con 0.60% Si es necesario añadir 0.60 - 0.50 - 1.20 Ks. Fe-Si / 100 Ks. metal, y suponiendo obtener 103 Ks. de acero / 100 Ks. metal cargado, la cantidad de Fe-Si necesaria será:

$$1.20 \times 103/100 = 1.24 \text{ Ks. Fe-Si } 50 \% \text{ Si.}$$

La adición de Mn se hace por medio de Fe-Mn con 20 % Mn (spiegel) o 80% Mn (preferible), y para obtener un metal descargado con 0.60% Mn es necesario:

$$0.60 \cdot 0.15$$

$$0.56 \text{ Ks. Fe-Mn } 80 \% \text{ Mn.}$$

$$0.80$$

Fe en metal obtenido:

Fe de metal cargado 99.12 Ks.

Fe de FeO que reacciona en la. escoria ..

$$2.87 \times 55.85/71.85 \dots \dots \dots 2.23 \text{ ,,}$$

Fe por Fe-Si $1.24 \times 46/100$ 0.57 ,,

Fe por Fe-Mn $0.56 \times 13/100$ 0.07 ,,

$$101.99 \text{ Ks. Fe total.}$$

Cok necesario para la recarburización:

Después de la formación de la 2a. escoria (escoria "blanca") y a veces antes, se efectúa la recarburización del metal añadiendo cok, "metal lavado" o lingotes especiales de fundición.

El cok que se use no necesita ser de buena calidad; es común usar también pedacera de electrodos que casi siempre resulta en el almacenamiento de los electrodos; parece ser que el grafito de los electrodos es más absorbible que el C de cok. (Sisco).

El "metal lavado" es el mejor recarburizante, puesto que es Fe puro con 3.4 % C.

La mejor clase de metal lavado tiene menos de 0.02 % P y el grado siguiente menos de 0.025 % P, pero su costo es elevado y su adquisición generalmente problemática.

El lingote especial de fundición que se usa para recarburizar tiene aproximadamente 3.4 % C y menos de 0.03 % P y 0.03 % S.

Es un poco más barato que el metal lavado pero bastante más caro que el cok; remunerera usarlo sólo para las mejores clases de acero.

Expuesto lo anterior, y dada la facilidad relativa de disponer siempre de cok aunque sea de mala calidad, se usará como standard la recarburización con cok o pedacera de electrodos cuando la haya.

Gran parte del FeO que puede ser eliminado con C se eliminó del metal muy oxidado del convertidor en el transcurso de la descarga del Bessemer a la carga del horno eléctrico, sin embargo, si la recarburización se hace antes de la formación de la 2a. escoria, es de suponer que algo del cok o grafito añadido para la recarburización reaccione con algo de FeO remanente en el metal.

A pesar de ésto y por el poco contenido de C en metal en esa parte del proceso, la absorción del C por el metal es muy rápida y casi total, formando probablemente en su totalidad Fe₃C, aunque la recarburización se haga antes de la formación de la 2a. escoria.

Si hay algo de aire en la atmósfera del horno, parte del C se quemará a CO, aunque es de esperarse que la mayor parte del aire que entre a la atmósfera del horno ataque preferentemente al C de los electrodos, puesto que presentan una mayor superficie de contacto.

C absorbido por el metal durante la

acción de la 2a. escoria	.....	0.02	Ks.	100	Ks.	metal.
C absorbido de Fe-Si	.....	0.05	.. / ..	..	..	..
C absorbido de Fe-Mn	.....	0.04	.. / ..	..	..	..
C remanente de la descarburización en el						
horno	.....	0.07	.. / ..	..	..	..

C total antes de la recarburación del metal 0.18 .. /

C deseado en el acero final 0.30 % C, pero como se obtienen 103 Ks. metal 100 Ks. metal cargado (aprox.):

C en cero final 0.30 · 103 100 0.31 Ks. C.

luego:

C a añadir en forma de cok 0.31 — 0.18 0.13 Ks. C.

o sea:

0.13 0.87 0.14 Ks. cok 87 % C.

Cenizas de cok (12% cenizas aproxi.) = $0.14 \times 0.12 = 0.017$ Ks. cenizas.

Composición del metal obtenido:

Fe	101.99 Ks.	98.41 %
C	0.31 "	0.30 "
Si	0.62 "	0.60 "
Mn	0.62 "	0.60 "
P	0.07 "	0.07 "
S	0.02 "	0.02 "
	<hr/>	
	103.63 Ks.	100.00 %

SUMARIO DE BALANCE DE MATERIAL EN HORNO ELECTRICO:

Entran:

Metal cargado	100.00 Ks.
1a. escoria (Caliza	4.50 "
(Escamas de laminación	4.00 "
(Cal	0.54 "
2a escoria (cok	0.27 "
(SiO ₂	0.14 "
Recarburización .. cok	0.14 "
Fe-Si	1.24 "
Fe-Mn	0.56 "
	<hr/>
	111.39 Ks.

Salen:

Metal descargado	103.63 Ks.
Escoria "Negra"	4.26 "
Escoria "Blanca"	0.764 "
Bases 1er periodo (1.94 + 0.54)	2.48 "
Bases 2o. periodo	0.46 "
	<hr/>
	111.594 Ks.

Diferencia 111.505 - 111.30 = 0.205, o sea 0.2% error en operaciones aprox.

BALANCE DE CALOR DEL HORNO ELECTRICO:
base 100 Ks. metal cargado y 18 C)

Calor de formación de $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$:

ENTRANTES	K-mol.	Calor molal de formación	calor total de form.
P	0.0084	0 Cal.	0 Cal.
CaO	0.0130	151,700	1,960 Cal.
FeO	0.0210	64,000	1,340 ..

3,300 Cal.

Productos	K-mol.	Calor molal de formac.	Calor total.
$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	0.042	982,000 Cal.	4,130 Cal.
Fe	0	0 ..	0 ..

4,130 Cal.

Calor "desprendido" en formac. de $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$:

4,130 - 3,300 = 830 Cal.

Calor de formación del CO:

Entrantes:	K-mol.	Calor molal de formac.	Calor total de formac.
C	0.019	0 Cal.	0 Cal.
FeO	0.019	64,000 ..	1,220 ..

1,220 Cal.

Productos:

Fe	0.019	0 ..	0 ..
CO	0.019	26,780 ..	510 ..

510 Cal.

Calor "absorbido" en formac. de CO:

1,220 - 510 = 710 Cal.

La oxidación del P es exotérmica y la del C endotérmica, luego, por el principio de Le Chatelier: "cuando se modifica uno de los

factores de que depende el equilibrio de un sistema físico o químico, el equilibrio se desplaza en tal sentido, que si éste desplazamiento se efectuara por sí mismo, haría cambiar éste factor, pero en sentido contrario al que provocó la transformación"; luego, es de suponer que una disminución relativa de temperatura hará aumentar la desfosforización. Se tiene estimado que a temperaturas menores de 1,400 °C (Boylston) la oxidación del P es casi total antes de que el C. se oxide, y arriba de 1,400° C. suficiente calor externo es suministrado para oxidar al C.

Este fenómeno se aprovecha cuando se trabaja el horno con pedacera fría, porque se puede controlar la eliminación de P o C a voluntad entre amplios límites detalles en Sisco-Hornos Eléctricos).

Sin embargo, en la práctica del proceso descrito en ésta tesis no se hace uso de estas propiedades de la masa fundida, usándose trabajar a temperaturas sólo un poco arriba del P. fus. del metal, sin embargo, la temperatura de la masa en el 1er. período será muy aproximadamente igual a la temperatura del metal cargado, y como el Fe puro funde a 1,535 °C. aprox. (Boylston), y el metal descargado del Bessemer se acerca mucho (comparativamente) al Fe puro, supongo que el metal contenido en el horno está siempre a más de 1,500 °C.

Calor de calcinación de caliza:

Ks. caliza	4.5 Ks.				
K-mol. CaO	en caliza	4.5	0.5407	56.08	0.0433 K-mol.
" MgO	" "	4.5	0.0048	40.32	0.0005 "
" FeO	" "	4.5	0.0034	71.85	0.0002 "
" CO ₂	" "	4.5	0.4317	44.01	0.0441 "

Reactantes: K-mol. Calor molal de formac. Calor total de formac.

CaCO ₃	.....	0.0433	.....	288,000 Cal.	.....	12,480 Cal.
MgCO ₃	.....	0.0005	.....	267,000 "	.....	130 "
FeCO ₃	.....	0.0002	.....	.....	.....	50 " (estimado)

						12,660 Cal.

Productos:

CO ₂	0.0441	94,400	Cal.	4,160	Cal.
CaO	0.0433	151,700	"	6,550	"
MgO	0.0005	145,600	"	70	"
FeO	0.0002	64,000	"	10	"
					<hr/>
					10,790 Cal.

Calor "Absorbido" en calcinación de caliza:

12,660 — 10,790 = 1,870 Cal.

Contenido de calor de metal cargado: (1,550° C.) aprox.

Ks. Metal 100.00 Ks.

es prácticamente igual a

Contenido de calor de metal al fin de 1er. período (1550 °C) aprox.

Contenido de calor de "escoria negra": (1,550 °C) aprox.

Contenido de calor (estimado) supuesto semejante a escorias de Siemens Martín (las escorias de los diferentes procesos tienen generalmente entalpias semejantes). 550 Cal./ Kg. aprox.

Ks. escoria = 5.54 Ks.

Cont. total de calor = 5.54 · 550 = 3,040 Ks.

Capacidad de calor de gases:

Cuerpo	K-mol.	Capac.-media molal	Capac. C°
CO ₂	0.0441	12.1 Cal.	0.535 Cal.
CO	0.0190	7.55 "	0.143 "
Contenido de calor total	0.670	(1,550 — 18)	1,030 Cal.

Sumario de Balance de calor durante 1er. período:

Entran:

Calor de formación de Ca₃ (PO₄)₂ 830 Cal.

Contenido de calor de metal 32,800 "

33,630 Cal.

Salen:

Calor de formación de CO	710 Cal.
" " calcinación de caliza	1,870 "
Cont. de calor de escoria "negra"	3,040 "
" " " " gases	1,030 "
" " " " metal	32,800 "

39,450 Cal.

Diferencia = 39,450 — 33,630 = 5,820 Cal. teóricamente necesarias para realizar el proceso.

Calorías prácticamente necesarias:

menos del 5% del contenido de calor de la masa fundida dentro del horno, se pierde por conducción de las paredes del horno, entradas de aire frío, ranuras de las puertas, o sea:

$39,450 \times 5(100-5) = 2,080$ Cal. aproximadamente.
 calor teóricamente necesario = 5,820 Cal.
 calor dado por los electrodos = 5,820 + 2,080 = 8,900 Cal.
 o sea $8,900 \times 0.001163 = 10.35$ Kw.-hr.

La pérdida de potencia entrada a los electrodos por: agua de los anillos enfriantes y soportes de los electrodos, conductividad térmica de los electrodos, resistencia de los electrodos, es alrededor de 25% de la potencia medida a los electrodos;

luego:

potencia entrada a los electrodos = $10.35 \times 0.75 = 14$ Kw.-hr. aproximadamente /100 Ks. de metal.

Balance de calor durante el 2o. periodo:

Calor de reacciones de desulfurización:

Reactantes:	K-mols.	Calor molal de formac.	Calor total de formac.
S	0.0025	0 Cal.	0 Cal.
C (cok)	0.0025	—2,600 "	—10 "
CaO	0.0025	151,700 "	380 "
			<hr/> 370 Cal.

Productos:	K-mols.	Calor molal de formac.	Calor total de formac.
CO	0.0025	26,780 Cal.	70 Cal.
CaS	0.0025	113,500 "	280 "

350 Cal.

Calor absorbido en la formación de CaS = 370 — 350 = 20 Cal.

Calor de reacciones de desoxidación:

Reactantes:	K-mols.	Calor molal de formac.	Calor total de formac.
FeO	0.014	64,000 Cal.	900 Cal.
C (cok)	0.014	—2,600 "	—40 "

860 Cal.

Productos:	K-mols.	Calor molal de formac.	Calor total de formac.
CO	0.014	26,780 Cal.	370 Cal.
Fe	0.014	0 "	0 "

370 Cal.

Calor absorbido en la desoxidación = 860 — 370 = 490 Cal.

Calor de formación de C²Ca libre en la escoria descargada:

Reactantes:	K-mols.	Calor molal de formac.	Calor total de formac.
C (cok)	0.00125	—2,600 Cal.	—3 Cal.
CaO	0.00041	151,700 "	62 "

59 Cal.

Productos:	K-mols.	Calor molal de formac.	Calor total de formac.
C ² Ca	0.00041	14,580 Cal.	6 Cal.
CO	0.00041	26,780 "	11 "

17 Cal.

Calor absorbido en formación de C²Ca = 59 — 17 = 42 Cal. aprox.

Contenido de calor de metal al principio del 2o. período (1,550°C

Ks. de metal 99.51 Ks. (aprox.)
Contenido de calor 330 Cal./Kg. (H. & W.)
Contenido de calor total = $99.51 \times 330 = 32,800$ Cal. aprox.
Contenido de calor del metal al fin del 2o. período:
Temperatura del metal 1,700 °C aprox.
Contenido de calor 350 Cal./Kg. aprox.
Ks. de metal 103.63 Ks.
Contenido total de calor = $103.63 \times 350 = 36,300$ Cal.

Contenido de calor de la escoria "blanca":
temperatura de escoria al fin de 2o. período 1,700 °C aprox.
Ks. escoria blanca 0.765 Ks.
Suponiendo como para la escoria negra que el contenido de calor es semejante al de la escoria del horno Siemens-Martin:
contenido de calor aprox. (estimado H. & W.) 650 Cal./Kg.
Contenido de calor total = $650 \times 0.765 = 500$ Cal. aprox.

Contenido de calor de gases:
temperatura de gases durante el 2o. período 1,700 °C aprox.
K-mol. CO 0.0165
Capacidad molal media 7.65 Cal./K-mol. x °C.
Capacidad total de calor = $7.65 \times 0.0165 (1,700-18) = 210$ Cal.

Sumario de Balance térmico en el 2o. período:

Entran:

contenido de calor del metal al principio del período 32,800 Cal.

Salen:

Contenido de calor del metal al fin del período	36,300 Cal.
Calor de formación de CaS	20 "
" " " " " C ₂ Ca	42 "
" " " " " CO (desoxidación)	490 "
Contenido de calor de escoria "blanca"	500 "
" " " " " gases (CO)	210 "

37,562 Cal.

Diferencia = $37,562 - 32,800 = 4,762$ Cal. teóricamente necesarias.
Pérdidas por conducción de pared del horno, entradas de aire frío, ranuras de puertas 5% del contenido de calor total de la masa fundida dentro del horno; o sea:

37,562 × 5/(100-5) = 1,980 Cal. aprox.
 Calorías teóricamente necesarias = 4,762 Cal.

luego:

calor dado por los electrodos 6,742 Cal. aprox.

o sea 5,830 × 0.001163 7.8 Kw.-hr.

Potencia salida de los electrodos = 75% de la potencia entrada a los electrodos; o sea:

Kw.-hr. alimentados a los electrodos = 6.8/0.75 = 10.4 Kw.-hr./100
 (ks. metal.

BALANCE TOTAL DE MATERIAL DEL PROCESO COMPLETO:

Ks. acero/ 100 Ks. metal cargado al horno eléctrico . . .	103.60 Ks.
„ Metal cargado al horno 100 Ks. metal descargado del convertidor	99.70 „
„ „ descargado del convertidor/ 100 Ks. de metal descargado del cubilote	92.45 „
„ „ cargado al convertidor/ 100 Ks. de pedacera cargada al cubilote	98.98 „

Según esto:

Ks. metal cargado al horno 100 Ks. de pedacera	92.45	98.98	
	99.70	<u> </u>	<u> </u> 91.23 Ks.
	100	100	

Entran:

Al cubilote:

			Por 10 tons. pedacera
Pedacera	100.00 Ks.		10,000.00 Ks.
cok . . (12.50 : 0.25)	12.75 „		1,275.00 „
caliza (3.45 : 0.05)	3.50 „		350.00 „
aire . . (125.6 : 1.256)	126.85 „		12,685.00 „
	<u>243.10 Ks.</u>		<u>24,310.00 Ks.</u>

Al convertidor:

aire . . (28.71 × 98.98/100)	28.42 Ks.	2,842.00 Ks.
------------------------------	-----------	--------------

Al horno eléctrico:

caliza (91.23 × 4.50/100)	4.10 Ks.	410.00 Ks.
escamas de lamina- ción (91.23 × 4.0 /100)	3.65 "	365.00 "
cal (91.23 × 0.54/100)	0.493 "	50.00 "
cok (91.23 × 0.41/100)	0.374 "	37.00 "
silice (91.23 × 0.14/100)	0.128 "	13.00 "
	<hr/>	<hr/>
	8.745 Ks.	875.00 Ks.

Salen:**Del cubilote:**

escoria	5.04 Ks.	504.00 Ks.
gases	139.16 "	13,916.00 "
	<hr/>	<hr/>
	144.20 Ks.	14,420.00 Ks.

Del convertidor:

escoria (11.03 × 98.98/100)	7.75 Ks.	775.00 Ks.
gases (22.32 × 98.98 /100)	28.15 "	2,815.00 "
	<hr/>	<hr/>
	35.90 Ks.	3,590.00 Ks.

Del horno eléctrico:

escoria negra (91.23 × 4.26 /100)	3.89 Ks.	389.00 Ks.
escoria blanca (91.23 × 0.764/100)	0.70 "	70.00 "
gases 1o. período (91.23 × 2.48 /100)	2.26 "	226.00 "
gases 2o. período (91.23 × 0.46 /100)	0.42 "	42.00 "
metal obtenido (91.23 × 103.63 /100)	94.54 "	9,454.00 "
	<hr/>	<hr/>
	101.81 Ks.	10,181.00 Ks.

EL EQUIPO: (usando datos del balance)

Como la capacidad deseada es aproximadamente de 8-10 tons. hr. de acero, calculo el equipo para una capacidad de 10 tons. hr. aprox.

EL CUBILOTE:

Las dimensiones del cubilote están estandarizadas y son óptimas para cada capacidad.

Cálculo del ventilador:

Lts. aire en Guadalajara, 100 Ks. de pedacera 139,180 Lts.

luego:

capacidad del ventilador para 10 tons.:

$$139,180 \times 10 \times 10$$

$$= 232,000 \text{ Lts./min.}$$

60

o sea 4900 cu. ft./min.

La presión del aire usual para la capacidad del cubilote es.....

$$\dots\dots\dots 0.75 \text{ lb. sq.in.}$$

635 mm. = 12.3 lb. sq.in. (pres. atm. en Guadalajara).

$$\text{cu. ft. de aire a } 0.75 \text{ lb. sq. in. gage} = 4900 \times 12.3 \div 0.75 =$$

$$= 4,620 \text{ cu. ft./min. a } 0.75 \text{ lb. sq. in. gage.}$$

Potencia teóricamente requerida para el ventilador:

$$\text{lb./sq. in.} \times \text{cu. ft. seg.} = 0.75 \times 144 \times 4620/60 = 8,320 \text{ ft.-lb./seg.}$$

$$\text{o sea } 8,320 \div 0.00182 = 15.2 \text{ H. P.}$$

pero la eficiencia del ventilador, motor, transmisiones, hacen necesario en la práctica un motor de 25 H. P.

CONVERTIDOR BESSEMER:

Las dimensiones del convertidor están estandarizadas y son "óptimas" para cada capacidad.

Cálculo del compresor necesario:

La presión del soplo debe ser suficiente para impedir la entrada de metal por las toberas en los convertidores con soplo por el fondo:

altura aproximada de la columna de metal fundido 75 cms.

densidad aproximada de metal 7.85 gr. c.c.

$$\text{presión sobre el fondo } 75 \times 7.85 = 588 \text{ gr./cm. cuadr.}$$

$$\text{o sea } \dots\dots\dots 9.6 \text{ Ks./cm. cuadr.}$$

$$\text{o sea } \dots\dots\dots 8.5 \text{ lbs. sq. in.}$$

es común usar 10 lb. sq. in. y para comenzar el soplo hasta 20 lb. sq. in. en convertidores mayores.

Duración del soplo 12 min.

tiempo total desde carga a descarga 20 min.

Tons. hr. 10.0 tons. metal.

luego:

capacidad del convertidor 10 - 20 60 3.5 tons.

Vol. de aire necesario en Guadalajara 31,812 Lts. 100 Ks. metal.

$$\text{Vol. a } 10 \text{ lb./sq. in.} = \frac{31,812}{12} \times \frac{12.3}{12.3 + 10} = 1,450 \text{ Lts./min.} \times 100 \text{ Ks. (de metal)}$$

o sea 51 cu. ft. min. \times 100 Ks. de metal.

$$\text{cu. ft./ } 3.5 \text{ tons. de metal} = \frac{3.5 \times 10 \times 51}{1,785} = 1,785 \text{ cu. ft./min}$$

$$\text{Potencia teórica requerida} = \frac{1,785}{60} \times 10 \times 144 = 42,800 \text{ ft.-lb./seg.}$$

o sea:

$$42,800 \times 0.00182 = 78 \text{ H. P.}$$

en la práctica se necesitarán aprox. ... 100 H. P. por eficiencia del compresor, transmisiones, longitud de tubería conductora o las toberas, ...

HORNO ELECTRICO:

Kw.-hr. 100 Ks. de metal durante el 1er. período (acción de la escoria "negra") 14 Kw.-hr.

La acción de la 1a. escoria dura 30 min. aproximadamente, luego corriente necesaria 14 + 60/30 = 28 Kw./100 Ks. metal.

La acción de la 2a. escoria dura aproximadamente 1-1/2 hr. Kw.-hr./100 Ks. de metal durante 2o. período (acción de la escoria "blanca") 10.4 Kw.-hr.

luego corriente necesaria 10.4 + 1.5 = 6.9 Kw./100 Ks. metal. pero como al principio del 2o. período es necesario elevar en el menor tiempo posible la temperatura de la carga desde 1,550 hasta 1,700 °C aprox., es necesario disponer siempre al principio del 2o. período de mayor flujo de corriente:

Cal. para calentar la carga únicamente: (ver balance)

$$36,300 - 32,800 = 3,500 \text{ Cal.}$$

o sea 3,500 + 0.001163 = 4.1 Kw.-hr. 100 Ks. de metal.

y para calentar la carga en 15 minutos se requiere: una corriente de 4.1 \times 60/15 = 16 Kw. aprox. 100 Ks. metal.

Generalmente no toda la cantidad de fundición líquida descargada del cubilote se va a obtener como acero, sino sólo una parte de ella; lo demás se utiliza para obtener fundición que tiene demanda mucho mayor (ésto lo da la demanda de piezas por el público). En el balance del horno eléctrico supuse que el metal caliente

cargado al horno eléctrico estaba recientemente descargado del convertidor, ésto se realizará generalmente en la práctica.

La capacidad requerida por el horno eléctrico equivale a un horno para 2 tons. de metal carga, con una capacidad de sobrecarga de 50%.

luego: capac. máxima por carga del horno = 3 tons.

El tiempo total desde la operación de cargar el horno hasta la descarga del mismo es aproximadamente de 2-1/2 hr.

Según lo anterior, para 3 tons. de metal:

Corriente necesaria para el horno durante el primer período = $3 \times 10 \times 28 = 840 \text{ Kw.}$

Corriente necesaria para el horno durante el segundo período = $3 \times 10 \times 6.9 = 210 \text{ Kw.}$

Para el principio del 2o. período requerirá:

$3 \times 10 \times 16 = 480 \text{ Kw. aprox.}$

GUILLERMO DE LA MORA N.



FE DE ERRATAS:

	DICE:	DEBE DECIR:
Pág. 21)	9 0 %	9.0 % (línea 6 y
	0 1 .. (menos	11.0 .. sigts.)
	----- de:)	72.6 ..
	11 0 ..	5 5 ..
	72 6 ..	1 8 ..
	5 5 ..	0 1 ..
	1 8 ..	-----
	-----	100 0 %
	100 0 %	
Pág. 23)	Cal K-mol.	Cal. K-mol. °C. (línea 7).
Pág. 32)	N.	C0 (línea 23).
Pág. 36)	Faltan los renglones:	(línea 13-14).
	... de tiempo, entorpeciendo el trabajo, esta operación de sacar del horno la primera escoria se hace con palas largas o rasquetas, a mano, y es molesta ...	
Pág. 54)	7 8 Kw-hr.	6 8 Kw-hr. (línea 5).