

COQUE SIDERURGICO

1.-DEFINICION Y PROPIEDADES

Por F. PINTADO FE * y J. R. GARCIA-CONDE **

Iniciamos con el presente una serie de artículos que, bajo el epígrafe general que encabeza esta página, nos proponemos redactar en relación con los resultados más interesantes que el Instituto Nacional del Carbón va obteniendo a medida que avanzamos en el estudio del problema de la preparación de mezclas para la fabricación de coque siderúrgico a partir de los carbones españoles.

Es sabido que, debido a la complejidad y número de los factores que intervienen en el funcionamiento del horno alto, no es posible al presente establecer de modo absoluto las características necesarias en el coque. No obstante, en este primer artículo tratamos de señalar unas normas generales al respecto, adaptadas al caso español que, aunque no definitivas, reflejen nuestra opinión actual y nos sirvan para la interpretación de los resultados de nuestros trabajos experimentales.

1.1.-DEFINICION

Definido el coque como el producto sólido de la carbonización a alta temperatura de un carbón o mezcla de carbones, con o sin la adición de otros materiales correctores, su naturaleza dependerá de las materias primas de que se parta, de las características de los aparatos en que se realice industrialmente la carbonización, y del modo operatorio seguido. Cuando todas estas circunstancias sean las adecuadas para dar lugar a un producto cuyas propiedades le hagan apto para su empleo en el horno alto, diremos que el proceso de fabricación del coque ha logrado un *coque siderúrgico*.

A causa del elevado precio del coque, su

consumo por tonelada de fundición es un sumando decisivo para el establecimiento del precio de coste de la misma; y, como en la práctica siderúrgica corriente varía mucho más este consumo unitario que la naturaleza del mineral de hierro tratado, la fabricación del coque siderúrgico es operación fundamental para la marcha económica de toda la industria del hierro y del acero.

1.2.-PROPIEDADES

Para que un coque pueda calificarse de siderúrgico es preciso que reúna un conjunto de propiedades, unas químicas y otras de carácter físico, respecto de las cuales cabe hacer las siguientes consideraciones:

* Ingeniero de Minas, Director del Instituto Nacional del Carbón.

** Doctor en Química Industrial, de la Sección de Coquización del Instituto.

1.2.1.—COMPOSICION QUIMICA

Refiriendo el análisis a muestra seca, como composición química media del coque siderúrgico puede aceptarse la siguiente:

Carbono fijo.	84 a 89 %
Materias volátiles.	1 a 2 %
Cenizas.	10 a 14 %
Azufre.	0,5 a 1,5 %

El contenido en humedad varía según el sistema de apagado y las propiedades físicas del coque; el coque siderúrgico, apagado en torre, no contiene generalmente más del 5 por ciento de agua, no siendo difícil rebajar este contenido a casi la mitad si la operación se hace con cuidado. Las modernas coquerías, por la adopción de sistemas de extinción en seco, logran coques totalmente exentos de humedad.

Cenizas.—El contenido en cenizas del coque siderúrgico no puede pasar de cierto límite. En primer lugar, si se parte de carbones con demasiadas cenizas se disminuye el rendimiento en subproductos de la batería y se obtiene un coque menos resistente, con la consiguiente exagerada producción de tamaños pequeños; además, y fundamentalmente, un coque con muchas cenizas es un producto que, como consecuencia de la disminución que por unidad de peso originan estas cenizas en su contenido en carbono y en su potencia calorífica, tiene un bajo rendimiento en relación con las dos misiones principales—reductor y combustible—que debe cumplir en el horno alto.

Este bajo rendimiento del coque incrementa su consumo por tonelada de fundición; pero, por otra parte, como las cenizas son generalmente muy siliciosas, y frecuentemente bastante aluminosas, para escorificar estas materias es necesaria una adición suplementaria de cal, lo que da lugar a un aumento en la cantidad de material a fundir,

con el consiguiente incremento acumulativo de coque para esta operación. Todo ello se resume en una reducción de la capacidad del horno alto, un aumento del precio de coste de la fundición, y una mayor dificultad en la regulación de las temperaturas. Como cifra de orientación, admitida en varios países, se puede indicar que el aumento en el consumo de coque por tonelada de fundición es del orden del 2,5 por ciento por cada porcentaje en más de cenizas.

Azufre.—Para una marcha determinada del horno alto, es decir, para obtener una fundición de características prefijadas, tanto la composición del lecho de fusión como la temperatura en el crisol deben mantenerse entre límites bastante cercanos. Como el reparto del azufre del coque entre la escoria y la fundición depende esencialmente de estos variables, el primer producto no puede absorber más que una cantidad limitada del elemento perjudicial, pasando el resto al segundo.

Aunque el tipo de fundición a obtener lo permitiera, el problema de la eliminación del azufre de la fundición no se puede resolver satisfactoriamente por la adición de una cantidad adecuada de fundente, ya que cada incremento suplementario de esta materia lleva consigo un aumento en el consumo de coque. Las experiencias de Simmersbach y Schneider* conducen a admitir que en un horno alto que produzca 100 toneladas de fundición por día, con un consumo de 120 toneladas diarias de coque, cada incremento de un uno por ciento en el contenido de azufre hace necesaria la adición de 4,2 toneladas de cal, para cuya fusión, así como para la del azufre, se requieren 1,308 toneladas de coque.

En relación con el incremento que el contenido excesivo de azufre en el coque origina en el consumo de este producto por tonelada de fundición, es interesante consignar que de los trabajos llevados a cabo en el

* Kokschemie, J. Springer, Berlín, 1930, pp. 174-75.

Coal Research Laboratory del Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh, * se deduce que quizás se haya sobreestimado la importancia del elemento perjudicial de que nos estamos ocupando, ya que al estudiar experimentalmente esta cuestión es muy posible que no se haya prestado suficiente atención al hecho de que son más importantes las variaciones de la calidad del mineral de hierro y de la del fundente que las del contenido en azufre del coque. Desde este punto de vista, admitir, como se hace algunas veces, que ya para coques con contenidos en azufre comprendidos entre 1 y 1,5 por ciento un aumento de una unidad en este porcentaje supone un suplemento de consumo de coque del 4,5 por ciento, puede ser demasiado rigorismo.

Fósforo.—Las cenizas de algunos coques son fosforosas; esta circunstancia no es adversa para la fabricación de la fundición Thomas y de las fundiciones fosforosas de moldeo; pero en otros casos, por ejemplo en la fabricación de fundiciones hematites, habrá coques cuyo empleo deberá proscribirse en absoluto.

Caso de los coques fabricados con carbones españoles.—Las consideraciones anteriores definen en líneas generales la condición de pureza del coque siderúrgico, traducida en definitiva por unos porcentajes admisibles de cenizas, azufre y fósforo. Como la composición química del coque, en lo relativo a tales porcentajes, depende directamente de la de la mezcla de carbones empleada en su fabricación, hay un evidente interés para la industria siderúrgica en utilizar para esta fabricación carbones lo más puros posible.

El precio del carbón se calcula teniendo en cuenta las primas por calidad, que incrementan el precio base establecido para el producto con un determinado porcentaje de cenizas. Para fijar estas primas lo lógico será tener en cuenta el beneficio que reporte al usuario la utilización de carbones con menos

cenizas de las señaladas como límite, así como la necesidad de compensar al productor de la disminución de rendimiento en el lavado por debajo del tope de cenizas señalado para el precio base.

Como es imposible llegar a valorar dicho beneficio por medio de un único coeficiente que pueda aplicarse a toda clase de industrias consumidoras, lo natural es que, tanto el valor de las primas como el precio base, o por lo menos las primeras, sean distintos según la utilización prevista para las diversas clases de hulla. Cuando el precio oficial del carbón se fija, contrariamente a como debería ser, sin tener en cuenta esta necesidad, no es posible atender, para la determinación del precio base y de las primas, más que al valor combustible, definido por la relación entre las cenizas del carbón y su potencia calorífica.

En consecuencia, el siderúrgico, cuyo trabajo comienza realmente con la fabricación del coque, experimenta, utilizando carbones limpios, un beneficio muy superior al contravalor de la prima oficial a satisfacer por mejora de cenizas.

El productor de carbón, por su parte, determina el contenido en cenizas de las clases comerciales que prepara para la venta atendiendo a las condiciones de lavabilidad del bruto extraído de su mina y a los precios de tasa, de manera que el siderúrgico, si desea carbones más limpios, deberá compensar al productor con sobreprimas que cubran su perjuicio.

En este juego de la oferta y de la demanda, y si se permite legalmente el abono de estas sobreprimas, se establecerá un equilibrio que llegará a fijar el contenido en cenizas del carbón a emplear en las coquerías, contenido que dependerá fundamentalmente del rendimiento de los lavaderos.

Prescindiendo de los tonelajes que se venden libremente, correspondientes a «so-

* Publicados en el informe «Ash and Sulphur in the Blast Furnace», del Dr. H. H. Lowry, Director de dicho Laboratorio.

breproducciones», el precio de venta de los menudos de hulla viene fijado oficialmente en España por la fórmula

$$P' = P (1 + 0,025 (15-n))$$

en la que P es el precio base del producto con el 14 por ciento de cenizas (y el 6 por ciento de humedad) y n el porcentaje en cenizas del carbón de que se trate.

Sean R y r , respectivamente, los rendimientos teóricos, deducidos de las curvas de lavabilidad, de las depuraciones de un carbón determinado realizadas al 14 y al 9 por ciento de cenizas. Si los respectivos rendimientos internos de los aparatos en que se lava el carbón son H y h , y designamos por Z y z los correspondientes costos de lavado por tonelada depurada, por cada tonelada de carbón bruto tratada se obtendrán en la venta del producto comercial

$$RH P - Z \quad (1)$$

pesetas lavando al 14 por ciento de cenizas, y

$$rh P (1 + 0,025 \times 6) - z \quad (2)$$

pesetas si el lavado se hace al 9 por ciento.

Suponiendo, en primera aproximación, $Z = z$ y $H = h$, e igualando entonces las expresiones (1) y (2) se obtiene

$$R = 1,15 r$$

lo que indica que si el cociente R/r es mayor que 1,15, el productor sufrirá un perjuicio económico al disminuir el porcentaje de cenizas hasta el valor señalado.

En el cuadro 1, formado a partir de las curvas de lavabilidad que constituyen hasta ahora el archivo del Instituto Nacional del Carbón, consignamos los valores de R , r y R/r de algunos carbones asturianos. El examen de la última columna nos indica que, en la casi totalidad de los casos y de acuerdo con lo que acabamos de decir, un pequeño aumento en el valor de la constante—0,025— que figura en la fórmula del precio oficial del carbón, para los menudos que se destinan a la preparación de mezclas coquizables, bastaría, compensando las diferencias entre

Z y z y H y h , para que el productor no experimentase perjuicio lavando sus carbones al 9 por ciento de cenizas.

Con la fórmula oficial ligeramente corregida será pues factible adoptar el 9 por ciento como valor normal del contenido en cenizas de los carbones destinados a la fabricación de coque siderúrgico. Este valor es, desde luego, algo elevado puesto que conduce a coques de aproximadamente el 13 por ciento de cenizas, de manera que convendría además dejar en libertad al siderúrgico para, cuando le interesase utilizar carbones más limpios, el abono de premios sobre la prima legal que resulte por la aplicación de la fórmula reglamentaria modificada.

Las columnas A , B y C del cuadro 2 resumen las características de lavabilidad de los menudos figurados en el cuadro anterior; las cifras de la última de estas tres columnas indican la posibilidad técnica, es decir, con rendimientos internos aceptables en los aparatos de lavado, de la depuración al 9 por ciento de cenizas de la gran mayoría de los carbones hasta ahora estudiados por el Instituto Nacional del Carbón. En efecto, de acuerdo con el método americano fundado en la influencia de las fracciones *densidad* $\pm 0,1$, índices entre 0 y 7 señalan carbones fáciles de lavar al tope de cenizas prefijado, calificándose de difíciles los carbones con índices entre 10 y 15, y de muy difíciles (a tratar en aparatos precisos y en tonelajes reducidos) cuando dicho índice queda comprendido entre 15 y 20. Quizás sea conveniente observar, a propósito de este cuadro, que los bajos valores de algunos rendimientos teóricos no son debidos a la presencia de mixtos intrínsecos, sino más bien atribuibles al procedimiento de minado que incorpora demasiado estéril al bruto.

En cuanto al azufre, la otra impureza fundamental del coque, admitiendo como cálculo de orientación que la mitad del contenido en el carbón pasa al gas en forma de ácido sulfhídrico, y que de la otra mitad una décima parte pasa al alquitrán quedando

CUADRO N.º 1

Comparación entre los rendimientos teóricos de las depuraciones
al 14 % y al 9 % de cenizas de algunos menudos asturianos

CARBONES	Rendimiento teórico para lavar al 14 % de cenizas	Rendimiento teórico para lavar al 9 % de cenizas	R / r
	R	r	
1.—Mariana (F. M.)	56,00	47,50	1,18
2.—Quirós (F. M.)	78,50	70,50	1,11
3.—Baltasara (F. M.)	62,75	55,50	1,13
4.—Nicolasa (F. M.)	62,50	48,00	1,30
5.—Riquela	67,50	60,25	1,12
6.—Cobertoria (F. M.)	65,00	54,00	1,20
7.—Pozo Sotón (D. F.)	67,00	60,00	1,12
8.—Pozo Barredos (D. F.)	77,00	70,00	1,10
9.—Pozo Santa Bárbara (D. F.)	77,00	70,00	1,10
12.—Teverga (Hulleras e Industrias)	39,00	33,50	1,16
13.—Mina María Luisa (D. F.)	80,50	74,00	1,09
14.—Pozo María Luisa (D. F.)	62,00	53,75	1,15
15.—Modesta (D. F.)	57,50	50,25	1,14
16.—Valdelospozos (D. F.)	64,50	56,50	1,14
18.—Ballasa (Cementos Fradera)	88,75	82,00	1,08
19.—Coto Musel (J. Velasco y Cia.)	87,00	79,50	1,09
20.—Pozo Sorriego (Nespral y Cia.)	67,00	59,50	1,13
21.—Pozo San Luis (Carbones de la Nueva)	71,50	64,50	1,11
22.—Pozo Fondón (D. F.)	72,75	64,00	1,14
23.—La Piquera (Nespral y Cia.)	76,50	70,50	1,09
25.—Carbones Asturianos	75,00	67,75	1,11
26.—La Encarnada (Vigil Escalera)	69,00	62,00	1,11
27.—Hulleras de Veguín y Olloniego	59,25	48,00	1,23
28.—Pozo Mosquitera (D. F.)	63,75	55,25	1,15
29.—Pozo Santa Eulalia (Carbones de Langreo)	74,00	66,00	1,12
30.—Lláscaras (Langreo y Siero)	62,75	55,00	1,14
31.—El Viso (Langreo y Siero)	68,25	57,50	1,19
32.—Pumarabule (Langreo y Siero)	73,75	63,00	1,17
33.—Carbones del Pontico	55,25	48,50	1,14
34.—La Camocha (S. A. Felgueroso)	57,25	50,50	1,13
35.—La Oscura (Nespral y Cia.)	55,50	48,00	1,16
36.—Pozo San Mamés (D. F.)	66,50	59,25	1,12
37.—Minas de Escobio	60,00	53,00	1,13
38.—Desquite (Velasco Herrero Hermanos)	79,25	72,50	1,09
39.—Santa Ana (Industrial Asturiana)	75,00	67,50	1,11
40.—Pozo Santa Bárbara (Industrial Asturiana)	81,00	73,25	1,11
41.—Clavelina (Ortiz Sobrinos)	64,50	55,50	1,16
43.—Hulleras de Riosa	82,00	71,00	1,15

CUADRO N.º 2

Lavabilidad y datos analíticos de algunos carbones asturianos

Carbón núm.	Lavabilidad			Análisis referido a muestra seca del carbón lavado en el laboratorio			
	Cenizas en el bruto A	Rendimiento teórico para lavar al 9% de cenizas B	Dificultad del lavado al 9% de cenizas C	Cenizas D	Volátiles E	Azufre F	Fósforo G
1	42,75	47,50	8,00	8,72	31,52	1,18	0,0096
2	29,31	70,50	5,00	7,55	18,66	2,36	0,0041
3	41,24	55,50	2,00	9,47	32,45	1,58	0,0109
4	34,94	48,00	22,50	10,15	32,11	1,02	0,0066
5	32,64	60,25	3,50	7,74	23,81	0,99	0,0065
6	34,13	54,50	10,00	8,22	22,53	1,34	0,0154
7	36,82	60,00	2,00	8,65	36,15	1,20	0,0052
8	34,19	70,00	menor de 1	7,18	34,76	1,35	0,0044
9	29,38	70,00	2,50	8,90	35,57	1,66	0,0570
12	56,47	33,50	6,00	7,47	39,52	2,24	0,0024
13	28,44	74,00	1,00	7,38	36,17	1,21	0,0057
14	35,76	53,75	7,50	8,56	36,75	1,60	0,0051
15	46,51	50,25	4,50	9,55	36,35	1,53	0,0042
16	41,83	56,50	4,00	8,45	36,43	1,76	0,0057
18	23,23	82,00	menor de 1	6,43	28,74	1,51	0,0035
19	26,01	79,50	menor de 1	6,96	34,10	1,15	0,0049
20	34,52	59,50	6,00	7,78	36,95	1,30	0,0049
21	33,92	64,50	3,00	8,08	34,87	1,42	0,0092
22	32,52	64,00	7,25	8,78	35,77	1,72	0,0075
23	33,66	70,50	menor de 1	5,86	37,54	0,77	0,0046
25	33,59	67,75	menor de 1	8,45	35,85	1,56	0,0040
26	33,21	62,00	2,50	9,17	37,53	1,90	0,0053
27	37,74	48,00	16,50	10,27	32,68	0,88	0,0068
28	40,68	55,25	5,25	7,18	37,22	1,09	0,0063
29	33,32	66,00	5,00	8,97	34,85	1,35	0,0179
30	40,66	55,00	10,75	9,57	36,41	1,63	0,0070
31	31,49	57,50	10,25	9,52	29,31	1,93	0,0103
32	32,19	63,00	9,00	9,02	36,63	1,72	0,0057
33	48,40	48,50	5,00	8,27	35,94	0,95	0,0036
34	42,93	50,50	4,00	8,33	37,76	1,64	0,0058
35	44,52	48,00	6,00	9,44	37,39	1,36	0,0039
36	38,85	59,25	5,75	9,58	34,71	1,23	0,0079
37	42,77	53,00	4,50	9,67	35,88	1,37	0,0038
38	27,21	72,50	menor de 1	7,35	12,63	0,94	0,0073
39	31,22	67,50	4,25	9,85	33,76	1,78	0,0121
40	23,92	73,25	7,00	9,12	12,47	1,45	0,0043
41	38,49	55,50	7,00	8,92	30,48	0,98	0,0140
43	27,78	71,00	8,50	9,86	33,41	0,88	0,0091

los nueve décimos restantes en el coque, la destilación de los carbones reseñados en el cuadro conducirá a residuos sólidos con porcentajes de azufre comprendidos entre 0,5 y 1,3, salvo el carbón número 12 (1,66) y el 38 (0,48), cifras perfectamente tolerables de acuerdo con lo indicado respecto al porcentaje admisible.

Salvo raras excepciones, los carbones españoles contienen solamente algunas milésimas por ciento de fósforo, cantidad muy pequeña si se la compara con el contenido en el mismo elemento de la mayoría de los minerales de hierro que se emplean en siderurgia.

1.2.2.—PROPIEDADES FISICAS

Son las características físicas del coque las que, indudablemente, ejercen mayor influencia en la valoración de este producto como materia prima para la industria siderúrgica; según hemos visto, es relativamente fácil obtener a partir de los carbones españoles coques de suficiente pureza química, contentándose desde luego como regla general con un contenido en cenizas de alrededor del 13 por ciento, pero lo que no resulta casi nunca posible en la coquización de tales carbones, utilizados aisladamente, es la obtención de coques de suficiente resistencia mecánica para que lleguen a la zona de toberas del horno alto en tamaños que permitan un flujo de gases lo suficientemente intenso y uniforme para el aprovechamiento al máximo de las propiedades combustibles y reductoras del producto, y para el normal descenso de la carga del horno.

Solidez.—A la condición de pureza, definida en el apartado anterior, un coque siderúrgico debe pues reunir la de *solidez*, de tal manera que de esta última propiedad dependen esencialmente el consumo de coque por tonelada de fundición fabricada y la marcha normal del horno alto.

Al examinar qué parámetros convienen para caracterizar la resistencia mecánica del coque siderúrgico hay que atender especial-

mente a las condiciones de trabajo presentes en el horno alto, por las que el coque queda sometido a esfuerzos considerables debidos al efecto combinado de las cargas que soporta y de los frotamientos de los componentes del lecho de fusión durante el descenso del mismo. La simple consideración de la resistencia al aplastamiento, por muy eficaz que pueda parecer a primera vista, es completamente inadecuada ya que cualquier coque, por mediocre que sea, es capaz de resistir en esta prueba presiones de varias decenas de kilos por centímetro cuadrado, mientras que la presión de la carga de los hornos altos, aún en los de mayor capacidad, no excede de la décima parte de este valor.

En consecuencia, hay que concluir que el coque se rompe en el horno alto por falta de cohesión traducida en fragmentaciones (fragilidad) y producción de polvo por rozamiento (abrasividad); por lo tanto, un ensayo empírico que permita apreciar la magnitud de ambas características, será un buen medio para medir la solidez del coque siderúrgico.

De los varios ensayos ideados con este objeto, el normalizado en Francia como *ensayo al trómel Micum* da muy buenos resultados prácticos; consiste en someter una muestra de 50 Kg de trozos de coque de tamaños superiores a 50 mm a un movimiento de rotación dentro de un tambor metálico de un metro de diámetro y un metro de longitud, provisto de cuatro aletas longitudinales. Al cabo de 100 vueltas, efectuadas en cuatro minutos, se determina la granulometría del producto resultante estableciéndose, con cribas de agujeros redondos, las categorías superiores a 40 mm y 20 mm y la inferior a 10 mm, expresadas en tanto por ciento del peso original.

Designemos, respectivamente, por \mathcal{M}_{+40} , \mathcal{M}_{-10} y \mathcal{M}_{-40} la primera de estas fracciones, la tercera fracción y el peso, en tanto por ciento, que atraviesa la criba de 40 milímetros; de acuerdo con este ensayo, la abrasividad del coque puede representar-

se por el porcentaje de tamaños inferiores a 10 mm:

$$A = \mathcal{M}_{-10} \quad (3)$$

en tanto que la fragilidad puede caracterizarse por el porcentaje de tamaños comprendidos entre 40 mm y 10 mm, o sea:

$$\mathcal{F} = \mathcal{M}_{-40} - \mathcal{M}_{-10} \quad (4)$$

Teniendo en cuenta que, en relación con el comportamiento del coque y la marcha del horno alto, la abrasividad es más perjudicial que la fragilidad, la solidez del coque puede expresarse, a partir de los valores de A y \mathcal{F} , por una fórmula del tipo

$$S = 100 - \mathcal{F} - b \times A$$

siendo b un coeficiente superior a la unidad que, en la práctica, se toma igual a 2,5. Sustituyendo en esta fórmula este valor de b y poniendo en lugar de A y \mathcal{F} sus valores (3) y (4) se obtiene, teniendo en cuenta que $100 - \mathcal{M}_{-40} = \mathcal{M}_{+40}$:

$$S = \mathcal{M}_{+40} - 1,5 \mathcal{M}_{-10} \quad (5)$$

El valor de S deducido del ensayo Micum sirve para clasificar los coques, en relación con su comportamiento en el horno alto, con arreglo al siguiente cuadro:

Calidad del coque	Valor de S
mala.	menor de 50
mediocre.....	entre 50 y 60
mediana.....	entre 60 y 68
buena.	entre 68 y 73
excelente.....	entre 73 y 77

Con arreglo a esta clasificación, los valores normales de \mathcal{M}_{+40} (denominado simplemente índice Micum) y de \mathcal{M}_{-10} de las diferentes categorías de coques son los siguientes:

Calidad del coque	\mathcal{M}_{+40}	\mathcal{M}_{-10}
mala.....	menor de 63	mayor de 9
mediocre .	63 — 72	9 — 7,8
mediana ..	72 — 78	7,8 — 7,2
buena.....	78 — 82	7,2 — 6,0
excelente .	82 — 85	menor de 6

La fragilidad del coque es debida principalmente a su estado de fisuración, en tanto que la abrasividad es consecuencia de una fusión insuficiente. El coque siderúrgico debe pues estar, a la vez, poco fisurado y bien fundido; ambas propiedades, relacionadas por la expresión

$$\mathcal{F} = 100 - \mathcal{M}_{+40} - A$$

coexisten en los coques que pudieramos llamar *normales* según la clasificación anterior, en los órdenes de magnitud que se deducen de las cifras del segundo de los cuadros indicados. Pero en la práctica, por existir carbones cuya fusibilidad no guarda una relación necesaria con sus otras propiedades coquizantes, porque el mecanismo de la coquización de las mezclas es diferente del de los carbones unitarios empleados en su preparación, y porque muchas veces se actúa, por mezclado de carbones o por otros sistemas, de modo a mejorar una de las propiedades del coque, fragilidad o abrasividad, en detrimento de la otra, existen muchos casos que se apartan de aquella regla, es decir, que hay muchos coques que se deberían clasificar con arreglo a tipos de calidades diferentes según se mire a la segunda o tercera columna del cuadro.

La observación es importante; por una parte conduce a estimar las ventajas de una clasificación con arreglo al valor de S , que tiene en cuenta el efecto combinado de \mathcal{F} y A , por otra parte, señala la conveniencia de estimar la acción perjudicial de la abrasividad del coque en relación con el modo de trabajo del horno alto (mineral quebrantado, sinterizado, o con tamaños en polvo) y su capacidad. Siempre, y sobre todo si la capacidad del horno es elevada, el polvo de coque, combinado con el polvo de mineral, puede provocar las irregularidades de marcha (acción nociva sobre el refractario, perturbaciones súbitas en el descenso de la carga) tan conocidas por los que tienen a su cargo la vigilancia y regulación del trabajo del horno alto.

El consumo c por tonelada de fundición

de un coque crece al aumentar A y \mathcal{F} , esto es, al disminuir S . Escogiendo una expresión algebraica sencilla que tenga en cuenta esta circunstancia, y designando por c_0 el consumo por tonelada de fundición del coque siderúrgico normalizado como de buena calidad en cuanto a su solidez, se puede poner

$$c = \frac{c_0}{a - \frac{b}{S}} \quad (6)$$

expresión que debe dar $c = c_0$ para el valor de S correspondiente al buen coque.

Tomando para este valor de S el valor medio de los que corresponden como límites a dicho coque

$$S = \frac{68 + 73}{2} = 70,5$$

se admiten en Francia los siguientes valores de los parámetros de la fórmula (6)

$$\begin{aligned} a &= 1,34 \\ b &= 24 \end{aligned}$$

que queda entonces en la forma

$$c = c_0 \frac{S}{1,34 S - 24}$$

Haciendo

$$\mathcal{V} = 1,34 - \frac{24}{S} \quad (7)$$

la expresión anterior puede ponerse

$$c = \frac{c_0}{\mathcal{V}} \quad (8)$$

en la que \mathcal{V} , que es igual a la unidad para $S = 70,5$, se denomina *valor de utilización* del coque.

Por medio de este coeficiente \mathcal{V} , función exclusiva de S , se puede estimar la calidad de un coque siderúrgico, que se aproximará tanto más al normalizado como de buena calidad cuanto más cercano a la unidad esté \mathcal{V} . Puesto que para fijar el valor 1 de \mathcal{V} se ha tomado $S = 70,5$, como puede haber coques con mayor solidez, el valor de \mathcal{V} puede ser superior a la unidad.

Supongamos, para fijar las ideas, que en un horno alto que marcha con un coque mediocre de solidez $S_1 = 53$, se sustituye este coque por otro que, conservando idénticas sus propiedades químicas, tenga una solidez mayor $S_2 = 68$. El valor de utilización del primer coque es

$$\mathcal{V}_1 = 1,34 - \frac{24}{53} = 0,887$$

y el del segundo

$$\mathcal{V}_2 = 1,34 - \frac{24}{68} = 0,987$$

de manera que si el consumo por tonelada de fundición es en el primer caso c_1 , este consumo c_2 en el segundo caso se habrá reducido, de acuerdo con la expresión (8), a

$$c_2 = \frac{c_1 \mathcal{V}_1}{\mathcal{V}_2} = 0,9 c_1$$

es decir, en un 10 por ciento.

En general, el aumento de S_1 a S_2 en el valor de la solidez, producirá una reducción del

$$r_c = 100 \left(1 - \frac{\mathcal{V}_1}{\mathcal{V}_2} \right)$$

por ciento en el consumo de coque por tonelada de fundición. Sustituyendo \mathcal{V}_1 y \mathcal{V}_2 por sus valores según (7), queda

$$r_c = 100 \frac{24 (S_2 - S_1)}{1,34 S_1 S_2 - 24 S_1}$$

como expresión del tanto por ciento de reducción en el consumo en función de la solidez de los dos coques.

Densidad.—El concepto de densidad del coque, en cuanto al empleo de este producto en el horno alto, se refiere a la estimación de tres magnitudes físicas distintas relacionadas con el peso de un cierto volumen de aquél:

- densidad real, o peso específico verdadero;
- densidad aparente, y
- densidad de carga, o peso del metro cúbico a granel.

La densidad real se obtiene a partir del coque pulverizado a un grado suficiente para eliminar la influencia de la porosidad en la medida del volumen. La densidad aparente se determina sobre el coque en trozos midiendo, por inmersión en agua, el volumen de este líquido desplazado por un peso conocido del sólido; en todos los ensayos tipo ideados al efecto, la dificultad de la operación estriba en lograr una perfecta imbibición de las cavidades superficiales del coque sin que tengan lugar penetraciones de agua en los poros de la masa. Por ello, y porque esta característica arbitraria del coque varía ampliamente de unos trozos a otros de la misma hornada, no existe método normalizado satisfactorio para su determinación.

A partir de los valores de estas dos densidades se puede obtener el porcentaje de porosidad p del coque, aplicando sencillamente la fórmula

$$p = 100 \left(1 - \frac{\text{densidad aparente}}{\text{densidad real}} \right)$$

si bien este valor es puramente estimativo por estar influenciado por la indeterminación del numerador. Y sin embargo, la porosidad, que junto al estado de grafitación del coque define su reactividad, es una característica a tener en cuenta en la valoración de este producto para su empleo en el horno alto.

La porosidad influye en la reactividad del coque no solamente por su valor global p sino además y fundamentalmente por la distribución y tamaño de los poros, así como por el espesor de sus paredes y por las comunicaciones entre ellos, o sea, en definitiva, por la superficie específica que regula, como en todos los procesos de reacción sólido-gas, la velocidad de la transformación química puesta en juego.

Todas estas características de la estructura del coque que definen, mejor que la porosidad p , su superficie específica, son muy difíciles de estimar, a no ser por ensayos de laboratorio muy especiales y de poco cómoda aplicación industrial. En la práctica se intenta resolver la dificultad aceptando una

proporcionalidad entre dicha superficie específica y la densidad aparente, y, habida cuenta la indeterminación de esta última, asimilándola a la densidad de carga, medida por el peso de un volumen fijo de coque a granel. En resumen, un coque *ligero*, es decir, con baja densidad de carga, se supone de gran superficie específica y, despreciando la influencia de su estado de grafitación, se califica de reactivo.

Los errores así cometidos pueden llegar a ser de la suficiente magnitud para que esta circunstancia, unida a que los siderúrgicos no han podido todavía ponerse de acuerdo sobre el grado de reactividad más conveniente para los coques a emplear en sus hornos altos, haga que, por el momento, no concedamos atención a fórmulas en las que el valor del coque se estima utilizando la densidad de carga como uno de sus parámetros.

Uniformidad.—La uniformidad del coque siderúrgico, esto es, la homogeneidad de su masa y la constancia de las características físicas y químicas de las cargas sucesivas de combustible del horno alto, influye decisivamente en la buena marcha de éste, evitando los inconvenientes derivados de las modificaciones que en otro caso serían necesarias en la regulación y puesta a punto del horno.

Si se mantienen invariables las condiciones de marcha en la batería, lo que siempre resultará mucho más fácil que adaptar estas condiciones a posibles variaciones frecuentes en la calidad del carbón a enhornar, la uniformidad del coque depende exclusivamente de la de las cargas carbonizadas. Para conseguir la uniformidad de estas cargas es preciso ejercer una vigilancia rigurosa en su preparación, empleando sistemas de mezclado de carbones y métodos adecuados de preparación de granulometrías que compensen las variaciones en la calidad de los carbones recibidos.

Es un hecho comprobado que la producción de las minas españolas varía cualitativamente en el tiempo, no sólo por cambios de las características del carbón total extraído

a causa de ser diferentes los carbones de unas a otras capas explotadas, sino también por variaciones, longitudinales y verticales, dentro de la misma capa. Si no es posible en las mismas minas, por una selección de capas, llegar a mantener una calidad constante en la parte de su producción que se destine a las coquerías siderúrgicas, es imprescindible acentuar la vigilancia en la estación de mezclas de las baterías, para modificar las proporciones en que los distintos carbones recibidos entren en la composición de la mezcla uniforme que se debe carbonizar.

Existen otras consideraciones fundamentales que demuestran la necesidad de fabricar en España el coque siderúrgico a partir de mezclas de carbones; pero aún prescindiendo de estas otras consideraciones, de las

que nos ocuparemos más adelante, esta de la uniformidad bastaría para sacar la inmediata conclusión de que ninguna de las plantas industriales españolas destinadas a la producción de coque siderúrgico debiera carecer de una instalación adecuada para el mezclado de carbones de calidades diferentes. La importancia de la uniformidad en el tiempo de la calidad del coque es tanta que—y ello simplificaría hasta cierto punto el problema de la fabricación de este producto en España—el horno alto preferirá siempre un coque uniforme de medianas características al empleo de coques cuyas calidades varíen no ya entre mediocres y excelentes, sino entre límites mucho más estrechos de características físicas y químicas.

