

## Desarrollo de un nuevo método a escala de laboratorio para determinar la resistencia mecánica del coque<sup>(\*)</sup>

M.A. Díez\*, R. Álvarez\*, N. Radoslavov\*, C. Barriocanal\*, C.S. Canga\* y J. Xiberta\*\*

### Resumen

En este trabajo se describe la puesta a punto de un método a escala de laboratorio, que permite evaluar la cohesión y abrasión de coques obtenidos a escala piloto. Se definen dos índices de resistencia mecánica en frío, CS10 y CS1, como la cantidad de coque de tamaño mayor de 10 mm y menor de 1 mm, respectivamente, que se obtiene después de someter una muestra de 200 g de coque, con tamaño de partícula 19-22,4 mm, a 1.200 vueltas en un tambor que gira a 20 rpm. Los nuevos índices están relacionados con los derivados del ensayo normalizado IRSID, I20 e I10, utilizados por la industria siderúrgica para el control de la calidad de coque de horno alto. Los coques estudiados se obtuvieron en un horno de pared móvil de 250 kg de capacidad, a partir, tanto de carbones individuales como de mezclas industriales de carbones. De los resultados, se deduce que el método desarrollado utilizando el tambor descrito en el método NSC de resistencia mecánica después de reacción con dióxido de carbono, puede usarse en la valoración de coques obtenidos en hornos de menor escala, en los que la cantidad de coque producida es insuficiente para llevar a cabo ensayos normalizados que requieren una mayor cantidad de muestra.

### Palabras clave

Carbón. Carbonización. Coque siderúrgico. Resistencia mecánica. Abrasión.

## Development of a new laboratory-scale method for the determination of coke mechanical strength

### Abstract

This work is focused towards the development of a laboratory-scale method for the evaluation of the cold mechanical strength of blast-furnace coke from the point of view of cohesion and abrasion. The indices derived from this test, CS10 and CS1, are defined as the weight per cent of coke with a particle size >10 and <1 mm, respectively, after 1200 revolutions at 20 rpm in a tumbler. The initial amount of coke was 200 g and the particle size 19-22.4 mm. A close relationship was found between the new indices and those derived from the standardized IRSID test, I20 and I10, used by the steel industry in the evaluation of blast-furnace cokes. The cokes used were produced at pilot scale in a movable wall oven of 250 kg capacity, using single coals and coking blends. The method developed is based on the use of the same tumbler described for the evaluation of mechanical strength after reaction with carbon dioxide in the NSC method. From the results presented, it is deduced that this method can be used to assess cokes produced in smaller ovens, where the amount obtained is not enough to be able to carry out the standardized tests that require a larger amount of coke sample.

### Keywords

Coal. Coking. Coke quality. Mechanical strength. Abrasion.

## 1. INTRODUCCIÓN

El coque es el material carbonoso utilizado para la producción de arrabio en el horno alto, donde cumple las siguientes funciones:

– térmica, como combustible que proporciona la energía necesaria para que tengan lugar las re-

acciones endotérmicas y la fusión de la escoria y del mineral;

- química, como reductor, proporcionando los gases necesarios para llevar a cabo el proceso de reducción de los óxidos de hierro;
- física, como soporte de la carga, siendo el único componente sólido a temperaturas elevadas que

(\*) Trabajo recibido el día 22 de febrero de 2002 y aceptado en su forma final el día 23 de septiembre de 2002.

(\*) Instituto Nacional del Carbón (INCAR)-CSIC. Apartado 73, 33080 Oviedo (España).

(\*\*) Departamento de Energía. ETSIMO. Independencia 13, 33004 Oviedo (España).

garantiza la resistencia mecánica de la carga en la parte inferior del horno alto, de cuyo buen funcionamiento depende una buena permeabilidad en la carga sólida; y como un agente permeable, permitiendo el paso ascendente de los gases hacia el tragante del horno alto y el drenaje de la escoria y del hierro líquido hacia el crisol del horno alto<sup>[1]</sup>.

El coque puede ser sustituido, en las dos primeras funciones mencionadas, por otro tipo de combustible como aceite, gas, plásticos<sup>[2-5]</sup> y carbón<sup>[6]</sup> que se inyecta por las toberas del horno para la generación de energía y como fuente de carbono. La inyección de alguno de estos combustibles reduce la cantidad de coque necesario para producir una tonelada de hierro fundido o arrabio (consumo específico). Sin embargo, ninguno de estos combustibles puede sustituir al coque como material carbonoso que actúa como soporte permeable de la carga. La tendencia actual de utilizar la inyección de otros combustibles, unida al aumento del tamaño y rendimiento de los hornos altos, motivan que el papel del coque, como soporte permeable en el horno alto, haya llegado a ser de la mayor importancia, lo que ha traído consigo la necesidad de mejorar la calidad del mismo<sup>[7-9]</sup>.

Teniendo en cuenta las funciones desempeñadas, y una vez establecido el tamaño de coque que alimenta el horno alto, se puede decir que es imprescindible controlar la calidad del coque en términos de resistencia mecánica en frío y reactividad frente a dióxido de carbono. Esta última propiedad va unida a la resistencia mecánica del coque después de reacción.

La importancia de las propiedades del coque a temperatura alta se estableció por la industria siderúrgica japonesa, después del estudio de la carga de tres hornos altos que fueron apagados mientras estaban en funcionamiento<sup>[10]</sup>. Como consecuencia, la empresa *Nippon Steel Corporation* (NSC) desarrolló un método que permite evaluar la aptitud del coque siderúrgico a permanecer sólido y sin degradación durante su exposición a las condiciones extremas en el interior del horno alto (temperaturas altas y presencia de gases oxidantes). Este método se describe en detalle en un informe de la *British Carbonization Association*<sup>[11]</sup> y ha sido estandarizado recientemente -ASTM D 5341-93a-<sup>[12]</sup>. La aplicación del mismo por la industria del sector ha sido ampliamente aceptada y, en la actualidad, se utiliza de forma rutinaria para la medida de la calidad del coque siderúrgico, pasando a ser el en-

sayo más importante en la evaluación de la calidad del mismo.

Este método desarrollado por NSC consiste en un ensayo de reactividad frente a CO<sub>2</sub> realizado a 1.100 °C durante 2 h. El tanto por ciento en peso que el coque ha perdido en estas condiciones se define como índice CRI (*Coke Reactivity Index*). Este ensayo de reactividad se completa con un ensayo de resistencia mecánica en tambor, después de la reacción, que da lugar al índice CSR (*Coke Strength after Reaction*). Para la determinación del índice CSR se somete al coque gasificado a 600 vueltas en un tambor que gira a 20 rpm. El porcentaje en peso de coque con un tamaño mayor de 10 mm se define como el índice CSR. Un índice de reactividad alto indica que el coque se degrada y su tamaño disminuye en exceso, en su tránsito por el horno alto, lo que da lugar a una disminución de la permeabilidad, la eficiencia y, como consecuencia, de la productividad del horno alto.

Si bien la otra propiedad del coque, resistencia mecánica en frío, no refleja la resistencia del mismo en su descenso en el horno alto, donde está expuesto a la acción química de gases oxidantes y a temperaturas crecientes, la industria del sector continua considerando el comportamiento mecánico del coque en frío en los criterios de calidad.

Puesto que esta propiedad ha sido utilizada como criterio de calidad del coque desde hace muchos años, existe un gran número de métodos estandarizados para su determinación<sup>[13-17]</sup>. En este sentido, cabe mencionar los ensayos utilizados por la industria del sector: ensayo MICUM, que se acepta y utiliza ampliamente en la mayoría de los países (ISO 556); ensayo IRSID, que se utiliza fundamentalmente en Europa (ISO 1881); ensayo Tumbler normalizado (ASTM D3402-81), que está muy extendido en EEUU; y el ensayo JIS (JIS K2151), que se utiliza principalmente en Japón. Todos estos métodos tienen en común la determinación del grado de fisuración y/o cohesión del coque, una vez sometido a la acción de las fuerzas de rotura y abrasión en tambores de diversos tamaños y durante diferentes períodos<sup>[13-17]</sup>.

Debido a que la cantidad de coque utilizada en los ensayos mencionados anteriormente es de 10 y 50 kg (en particular el ensayo normalizado IRSID utiliza 50 kg), no es posible llevar a cabo el estudio mediante el método IRSID, de la resistencia mecánica de coques obtenidos en hornos a escala más pequeña (laboratorio y semi-piloto). Este es el caso, por ejemplo, de coques obtenidos en un horno a escala semi-piloto de 15 kg de capacidad y

disponible en el INCAR-CSIC. Utilizando este horno se obtiene una cantidad de coque insuficiente (aproximadamente 11 kg) para llevar a cabo el ensayo IRSID. Por ello, es necesaria la adquisición o diseño de un equipo adecuado que utilice una cantidad inicial de coque menor o la puesta a punto de un método que precise menor cantidad de muestra y que guarde relación con el ensayo IRSID, utilizado por la industria del sector. De estas dos opciones, parece más conveniente la puesta a punto de un nuevo ensayo, utilizando un tambor de menor tamaño y disponible en los laboratorios de la industria del sector, como es el caso del tambor utilizado en la determinación de la resistencia mecánica después de reacción por el método NSC. Con este fin, se estudiaron, inicialmente, una serie de coques obtenidos a escala piloto (horno de 250 kg capacidad) para validar el método a desarrollar utilizando el tambor del ensayo NSC y, para los cuales, se determinan los índices IRSID.

## 2. EXPERIMENTAL

### 2.1. Materiales

Para la obtención de los coques a estudiar se utilizaron 17 carbones individuales, todos ellos de importación, de diferentes características y procedencia (Australia, Canadá y EEUU), que cubren un amplio rango de contenido en materia volátil (17-33 % en base seca) y fluidez (40-30.000 ddpm, determinada mediante el ensayo de plastometría Gieseler –ASTM D2639-74-) y que se usan en la preparación de mezclas de carbones utilizadas por la industria del sector. El estudio se completa con la utilización de 19 mezclas de carbones coquizables constituidas por, al menos, 10 carbones de diferente rango, propiedades plásticas y origen geográfico. Las mezclas utilizadas tienen un contenido en materia volátil comprendido entre 24,2 y 25,7 % en base seca.

### 2.2. Ensayos de carbonización a escala piloto

Los ensayos de carbonización/coquización de carbones individuales y mezclas coquizantes, se llevaron a cabo en el horno de pared móvil de 250 kg de capacidad (HPM250), disponible en el INCAR-CSIC. Este horno posee un ancho de cámara regulable entre 205 y 560 mm, de forma que es posible variar el volumen y el peso nominal de la carga en función de la anchura utilizada, mientras que las otras dimensiones del horno, longitud en-

tre puertas (915 mm) y altura a la bóveda (1.015 mm), son fijas. La anchura utilizada en los ensayos de carbonización fue de 469 mm. En la figura 1 se presenta un esquema del horno utilizado.

Para cada ensayo de carbonización se cargan alrededor de 300 kg de carbón o mezcla, siendo más del 80 % del carbón de un tamaño de partícula < 3 mm. La temperatura en el momento de la carga es de 880 °C, progresando el calentamiento a una velocidad de 14 °C/h y alcanzando una temperatura de 1.200 °C en un tiempo de 18 h. En este momento, se lleva a cabo la etapa de deshornado y apagado en húmedo del coque. En estas condiciones, al final del proceso de carbonización la temperatura en el centro de la carga es aproximadamente 1.050 °C.

### 2.3. Ensayo IRSID de resistencia mecánica en frío del coque

El ensayo IRSID de resistencia mecánica en frío se llevó a cabo según la norma UNE 32 018. El equipo consiste en un cilindro metálico (tambor), provisto en su interior de cuatro angulares de acero separados entre sí 90° y orientados con el ala menor en oposición al sentido de giro. La pared cilíndrica del tambor lleva una puerta para permitir la carga y descarga del coque. El equipo dispone de un motor con reductor de velocidad para que el tambor gire a una velocidad uniforme de  $25 \pm 1$  revoluciones por minuto (rpm).

En el tambor se cargan 50 kg de coque de tamaño mayor de 20 mm y se someten a un tratamiento de 500 vueltas a  $25 \pm 1$  rpm. Los índices que se obtienen de este ensayo son: I20 (% en peso de

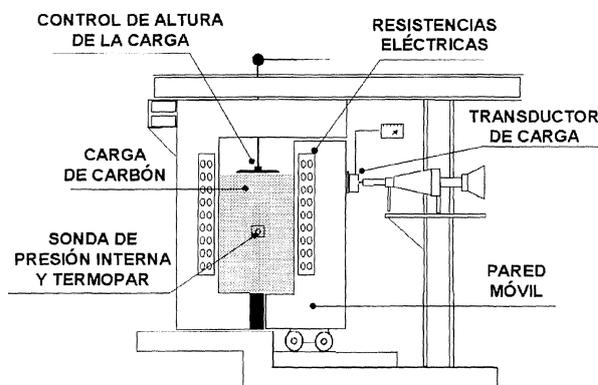


Figura 1. Esquema del horno de pared móvil de 250 kg de capacidad (HPM250) disponible en el INCAR-CSIC.

Figure 1. Scheme of the movable wall oven of 250 kg capacity (MWO250), available at INCAR-CSIC.

coque de tamaño mayor de 20 mm) e I10 (% en peso de coque de tamaño menor de 10 mm).

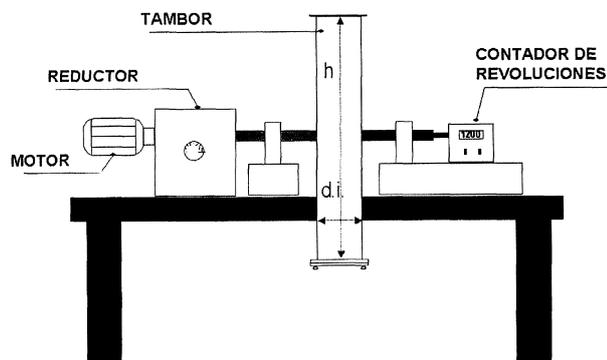
## 2.4. Ensayo INCAR de abrasividad

Para la medida de la resistencia mecánica en frío, se utilizó el dispositivo que forma parte del equipamiento del ensayo NSC<sup>[11 y 12]</sup> y que permite la medida de la resistencia mecánica del coque después de la reacción con CO<sub>2</sub> (índice CSR). En la figura 2 se muestra un esquema del mismo. El dispositivo consiste en un tambor cilíndrico de acero inoxidable, con una altura interna de 700 mm y un diámetro interno de 130 mm, que gira alrededor de su eje longitudinal por la acción de un motor eléctrico y que está provisto de un reductor de velocidad de giro. El espesor de la tapa y del fondo del tambor es de 10 mm.

Para la realización del ensayo se introdujeron en el tambor 200±1 g de coque de tamaño 19-22,4 mm. El coque se sometió a 1.200 revoluciones en 1 h (velocidad de giro, de 20 rpm), transcurrida la cual se descargó el tambor, se pasó la muestra por dos tamices de malla cuadrada de 10 y 1 mm y se pesaron las fracciones mayor de 10 mm y menor de 1 mm.

Los índices de resistencia mecánica CS10 y CS1 se determinan según las expresiones (1) y (2) respectivamente:

$$CS10 = \frac{P_{10}}{P_i} 100 \quad (1)$$



**Figura 2.** Dispositivo del método NSC, utilizado en el ensayo INCAR para la determinación del índice de abrasión CS ( $h$  = altura, 700 mm;  $d.i.$  = diámetro interno, 130 mm).

*Figure 2. Scheme of the NSC tumbler used in the determination of the abrasion CS index by the INCAR method ( $h$  = height, 700 mm;  $d.i.$  = internal diameter, 130 mm).*

$$CS1 = \frac{P_1}{P_i} 100 \quad (2)$$

donde,

- $P_i$  = peso inicial de la muestra
- $P_{10}$  = peso de la fracción mayor de 10 mm
- $P_1$  = peso de la fracción menor de 1 mm

La determinación de los índices CS10 y CS1 se llevó, también, a cabo para coques con diferentes valores de I20 e I10, utilizando la cantidad de muestra de coque (150 g), el número de vueltas (600) y la velocidad de giro (20 rpm). Estas condiciones experimentales son las utilizadas en el ensayo NSC en la determinación del índice CSR del ensayo NSC<sup>[11 y 12]</sup>.

Los índices CS10 y CS1, determinados a 600 y 1.200 revoluciones se comparan, posteriormente, con los índices I20 e I10 determinados por el método IRSID, con el fin de elegir las condiciones óptimas del ensayo.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

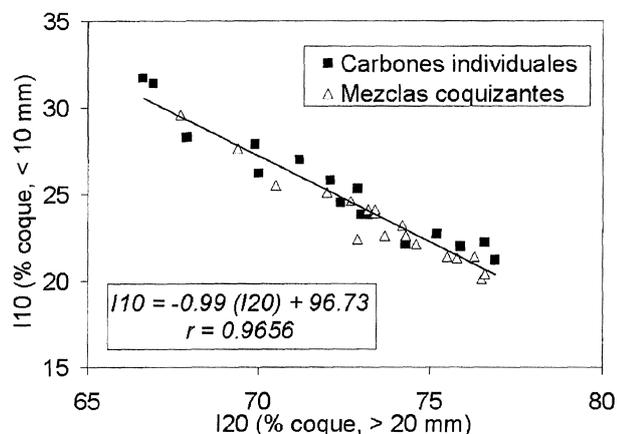
### 3.1. Índices IRSID de resistencia mecánica del coque

El ensayo normalizado IRSID estima la resistencia mecánica a temperatura ambiente, lo que viene llamándose “resistencia mecánica en frío”, en lo que se refiere a cohesión y abrasividad. La cohesión y abrasividad del coque quedan determinadas por el grado de aglomeración que se ha conseguido durante el proceso de carbonización. Es decir, cuánto mayor sea el grado de aglomeración alcanzado mayor será la cohesión de la masa de coque y, por tanto, menor será la producción de finos. Estas propiedades quedan reflejadas en los índices I20 (porcentaje en peso de coque que permanece con tamaño mayor de 20 mm), que refleja la cohesión de la masa de coque, e I10 (porcentaje en peso de coque que se degrada a un tamaño menor de 10 mm), que indica la resistencia o facilidad del coque para formar finos por abrasión.

Ambos índices guardan una relación muy estrecha, indicando que tienen el mismo significado. Es decir, el ensayo IRSID refleja fundamentalmente la falta de cohesión traducida en fragmentaciones con producción de finos (abrasividad), pero no refleja la fragmentación debida al grado de fisuración del coque, tal y como lo hace el ensayo MICUM en el que se somete al coque a un número menor de revoluciones (100).

Cuando el coque se somete a un número determinado de vueltas en un tambor, se fragmenta con formación de finos. Los fragmentos de tamaño menor que el inicial y los finos constituyen dos familias granulométricas distintas. El tamaño medio del coque disminuye, en general, rápidamente al principio del ensayo y, después, más lentamente. Por lo tanto, se pueden diferenciar dos etapas consecutivas en la degradación del coque: una etapa de fragmentación, que corresponde a la apertura de las fisuras preexistentes, donde las partículas de coque continúan rompiéndose hasta unas 300 ó 500 vueltas y una etapa de abrasión pura en la que el tamaño del coque sólo disminuye por un efecto de erosión superficial. De acuerdo con lo anterior, la degradación del coque tiene lugar de dos maneras: por fisuración y por abrasión. Los principales factores que influyen en el grado de fisuración del coque son: rango del carbón, velocidad de coquización, características de las baterías y variación de la densidad de carga, mientras que la resistencia a la abrasión y el grado de cohesión quedan determinados durante la etapa plástica por la que pasan los carbones durante el proceso de carbonización<sup>[16]</sup>. Tal y como se ha mencionado anteriormente, el ensayo IRSID, en el que se aplican 500 vueltas, da cuenta del grado de cohesión del coque y la facilidad para producir finos.

En la figura 3, se muestra la relación existente entre ambos índices para coques obtenidos en el HPM250 (Horno de Pared Móvil de 250 kg de capacidad) a partir de 13 carbones individuales de diferente rango, propiedades plásticas y origen geográfico, utilizados en la preparación de mezclas in-



**Figura 3.** Relación entre los índices IRSID I20 e I10 para coques producidos en el HPM250.

Figure 3. Relation between the IRSID indices I20 and I10 of cokes obtained in the MWO of 250 kg capacity.

dustriales coquizantes, y de 9 mezclas industriales de carbones. Tanto carbones como mezclas fueron carbonizadas con diferente densidad de carga, dando lugar a 34 coques que cubren un amplio rango de valores de I20 (66,6-76,6) e I10 (31,7-20,4).

La fracción intermedia en el rango de tamaño de 20 a 10 mm es minoritaria y está comprendida entre 1 y 3 %. De tal forma, se tiene la expresión (3):

$$I20 + I10 = 98 \pm 1 \quad (3)$$

Estas observaciones están de acuerdo con las descritas por otros autores<sup>[13 y 16]</sup> para series de coques industriales.

### 3.2. Índices CS de resistencia mecánica del coque

#### 3.2.1. Determinaciones preliminares a 600 revoluciones

Para el desarrollo de un método que permita evaluar la resistencia mecánica en frío, utilizando el tambor del método NSC, ha sido necesario efectuar un estudio de las condiciones para realizar el ensayo (cantidad de muestra, número de vueltas, granulometría). Para ello, inicialmente, se seleccionaron las mismas condiciones en que se lleva a cabo la determinación de la resistencia mecánica después de reacción con CO<sub>2</sub> (índice CSR) por el método NSC. Esto, implica someter al coque a 600 vueltas, a una velocidad de giro de 20 rpm. La cantidad de muestra de coque fue de 150 g, próxima a la utilizada en el método NSC, si se tiene en cuenta que la cantidad de coque sometida a la acción de CO<sub>2</sub> a 1.100 °C es de 200 g y que la pérdida de masa experimentada durante la reacción oscila entre 20 y 30 % para coques de buena o aceptable calidad. El tamaño de coque fue 19-22,4 mm, el mismo utilizado en la determinación del índice de reactividad frente a CO<sub>2</sub> (CRI), ya que la elección de esta fracción granulométrica, considerada representativa del coque producido, permitiría comparar la resistencia mecánica del coque antes (índices CS) y después de la reacción con CO<sub>2</sub> (índice CSR) y, además, permitiría la preparación de una única muestra para la evaluación de ambas propiedades, resistencia mecánica y reactividad frente al CO<sub>2</sub>.

En esta etapa, se seleccionaron 15 coques obtenidos en el HPM250 a partir, tanto de carbones individuales de diferente rango, propiedades

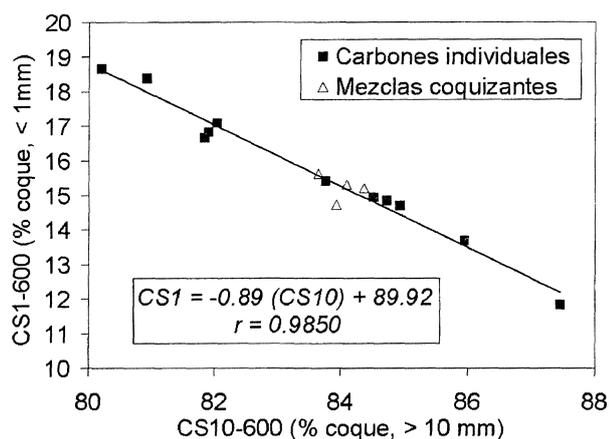
plásticas y origen geográfico, como de mezclas de carbones utilizadas en la producción industrial de coque. Esta selección da lugar a una serie de coques de buena y mala calidad, con índices IRSID cubriendo un amplio rango (I20 desde 66,6 a 74,2 e I10 desde 31,7 a 23,2).

En la figura 4 se representan los valores del índice CS10 determinados a 600 vueltas (porcentaje de coque de tamaño > 10 mm) frente a los correspondientes CS1 (porcentaje de coque de tamaño < 1 mm). Se observa una correlación aceptable entre ambos índices, siendo el coeficiente de 0,9850.

La fracción intermedia de tamaño entre 10 y 1 mm es minoritaria y está comprendida entre 0,4 y 1,5 % para los coques estudiados. Este hecho indica que los índices seleccionados tienen el mismo significado, siendo el índice CS1, al igual que el índice I10 del ensayo IRSID, fundamentalmente, de abrasión y no dar cuenta del estado de fisuración del coque.

En cuanto a la repetibilidad del ensayo en estas condiciones, si bien para coques de aceptable calidad, con I20 = 74,3 e I10 = 22,1, la desviación típica es pequeña, para coques de baja calidad, con I20 = 66,6 e I10 = 31,7, existe una mayor dispersión en los valores obtenidos en las diferentes determinaciones (Tabla I).

Aunque los valores medios de CS10 y CS1, presentados en la tabla I, marcan una clara dife-



**Figura 4.** Relación entre los índices CS10 y CS1 determinados a 600 vueltas (CS10-600 y CS1-600, respectivamente) para coques obtenidos en el HPM250 a partir de carbones individuales y mezclas coquizantes.

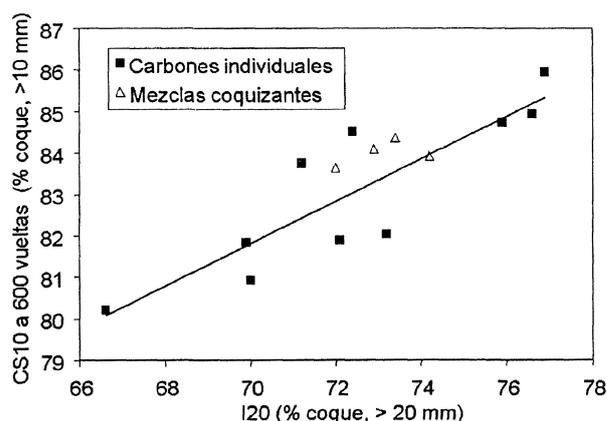
Figure 4. Relation between CS10 and CS1 indices determined after 600 revolutions (CS10-600 and CS1-600, respectively) for cokes obtained in the MWO250 from single coal and coking blends.

**Tabla I.** Repetibilidad en las determinaciones de CS10 y CS1 a 600 vueltas

Table I. Repeatability in the determination of CS10 and CS1 after 600 revolutions

Determinación	Coque 1: I20 = 66,6 I10 = 31,7		Coque 2: I20 = 74,3 I10 = 22,1	
	CS10	CS1	CS10	CS1
1	80,6	18,1	87,5	11,8
2	82,3	16,8	87,6	12,0
3	80,8	18,4	87,8	11,9
4	79,7	18,8	87,9	11,8
5	82,5	6,0	87,6	11,9
6	79,8	19,2	87,5	11,6
Media	80,9	18,1	87,6	11,8
Desviación típica	1,22	0,99	0,16	0,14

rencia en la calidad de estos dos coques obtenidos a partir de carbones unitarios, como ocurre en los índices IRSID, es preciso destacar que no se encontró una correlación aceptable entre los nuevos índices CS10 y CS1 determinados a 600 vueltas y los índices IRSID para los 15 coques estudiados (Fig. 5). En dicha gráfica se puede observar que los coques que presentan valores en un rango estrecho de I20 (72-74 %), especialmente procedentes de carbones individuales, son los que presentan valores más dispares entre los índices CS10 e I20. Este



**Figura 5.** Relación entre el índice CS10 determinado a 600 vueltas y el índice I20 para coques obtenidos en el HPM250 a partir de carbones individuales y mezclas coquizantes.

Figure 5. Relationship between the index CS10 determined after 600 revolutions and the IRSID index I20 for cokes obtained in the MWO250 from single coals and coking blends.

hecho puede ser debido a una diferente velocidad de formación de finos de coque.

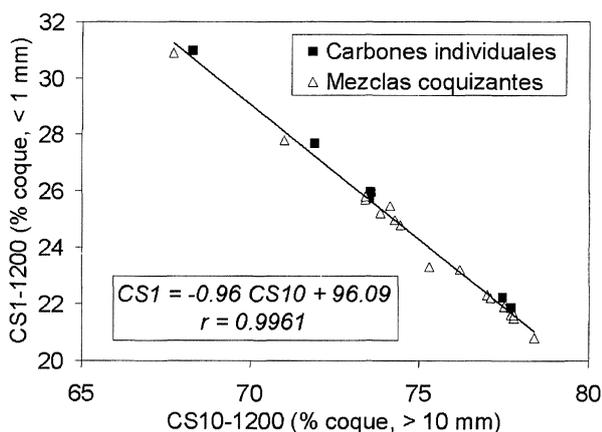
Teniendo en cuenta los resultados preliminares, se procedió a modificar las condiciones experimentales, tal y como se describe en el siguiente apartado.

### 3.2.2. Determinaciones a 1.200 revoluciones

En esta fase del estudio, se aumentó la cantidad de muestra a 200 g, con el fin de aumentar la representatividad del coque y de evitar la dispersión de resultados y, por otro lado, se aumentó el número de vueltas a 1.200, manteniendo la velocidad de giro, para aumentar el grado de fragmentación. Se seleccionaron 24 coques obtenidos en el HPM250.

Los valores de los índices CS10 y CS1, obtenidos al someter a la muestra de coque a 1.200 vueltas, son del orden de los obtenidos en el ensayo IRSID. En la figura 6 se representan los nuevos índices CS10 y CS1, media de, al menos, dos determinaciones, observándose que existe una buena correlación entre ambos índices, tal y como ocurría en las determinaciones realizadas a 600 vueltas.

La fracción intermedia de tamaño entre 10 y 1 mm (CS10-1) es, también, en este caso, minoritaria y está comprendida entre 0,4 y 1,4 %. Comparando los resultados obtenidos para esta fracción de coque a 600 y 1.200 revoluciones, se deduce que, en general, la cantidad producida de dicha



**Figura 6.** Relación entre los índices CS10 y CS1 determinados a 1.200 vueltas (CS10-1200 y CS1-1200, respectivamente) para coques obtenidos en el HPM250 a partir de carbones individuales y mezclas coquizantes.

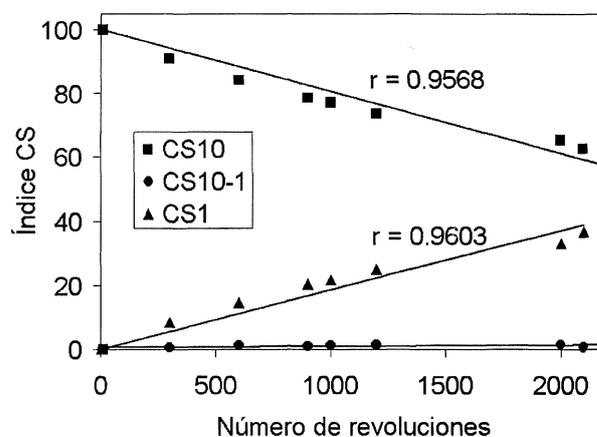
Figure 6. Relation between CS10 and CS1 indices determined after 1200 revolutions (CS10-1200 and CS1-1200, respectively) for cokes obtained in the MWO250 from single coal and coking blends.

fracción es independiente del número de revoluciones o vueltas a las que se someta el coque durante el ensayo. Este hecho se confirma a partir de los datos obtenidos a diferentes revoluciones. A modo de ejemplo, en la figura 7 se presenta la variación de los tres índices deducidos en el ensayo en función del número de vueltas aplicado para uno de los coques estudiados (300, 600, 900, 1.000, 1.200, 2.000 y 2.100). Se puede observar que mientras los índices CS10 y CS1 varían linealmente con el número de revoluciones, el índice CS10-1 no experimenta, prácticamente, variación con la intensidad del tratamiento mecánico y se mantiene dentro de un intervalo entre 0,6 y 1,4 %. De esta forma, se establece la expresión (4), similar a la expresada para los índices IRSID (Ec. 3):

$$CS10 + CS1 = 98 \pm 1 \quad (4)$$

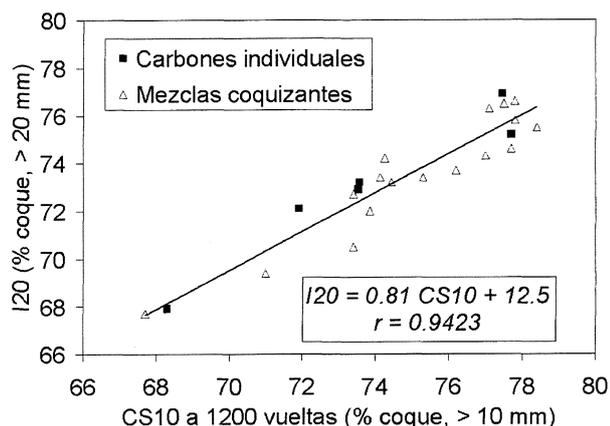
En las condiciones ensayadas existe una correlación aceptable entre los índices CS10 y CS1 y los derivados del ensayo IRSID para los coques obtenidos a escala piloto. Las figuras 8 y 9 muestran dichas relaciones.

Para evaluar la repetibilidad del ensayo, se seleccionaron tres coques, dos de los cuales proceden de una mezcla industrial carbonizada a diferente densidad de carga y cuyos índices IRSID son: I20 = 67,7 e I10 = 29,6 para el coque 1 e I20 = 76,3 e I10 = 21,4 para el coque 3. El tercer coque (coque 2) procede de una mezcla industrial de carbones con una adición de un aceite residual del 1 % en peso y cuyos índices IRSID son intermedios (I20 = 73,0 e I10 = 24,4). Los resultados obtenidos en



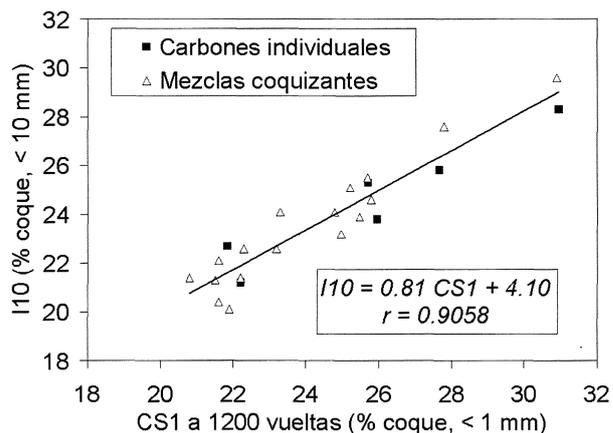
**Figura 7.** Variación de los índices CS10, CS1 y CS10-1 en función del número de revoluciones.

Figure 7. Variation of the CS10, CS1 and CS10-1 as a function of the revolution number.



**Figura 8.** Relación entre el índice CS10 determinado a 1.200 vueltas y el índice I20 para coques obtenidos en el HPM250 a partir de carbones individuales y mezclas coquizantes.

Figure 8. Relationship between the index CS10 determined after 1200 revolutions and the IRSID index I20 for cokes obtained in the MWO250 from single coals and coking blends.



**Figura 9.** Relación entre el índice CS1 determinado a 1.200 vueltas y el índice I10 para coques obtenidos en el HPM250 a partir de carbones individuales y mezclas coquizantes.

Figure 9. Relationship between the index CS1 determined after 1200 revolutions and the IRSID index I10 for cokes obtained in the MWO250 from single coals and coking blends.

cinco determinaciones, junto con los datos estadísticos se muestran en la tabla II. Se puede observar que los resultados son bastante satisfactorios, permitiendo diferenciar dichos coques en términos de su resistencia a la abrasión por rozamiento.

#### 4. CONCLUSIONES

En las condiciones optimizadas, el dispositivo utilizado para la evaluación de la resistencia mecánica del coque después de reacción con CO<sub>2</sub> por el mé-

todo NSC, permite la determinación de la resistencia mecánica en frío de coques obtenidos a escala piloto. Los índices de resistencia mecánica definidos, CS10 y CS1, en el ensayo INCAR de abrasividad reflejan el grado de cohesión y abrasión del coque siderúrgico, existiendo una correlación aceptable entre los nuevos índices y los índices del ensayo estandarizado IRSID, utilizados por la industria del sector. De los resultados obtenidos, es de esperar que los nuevos índices de resistencia mecánica (CS10 y CS1) permitan diferenciar

**Tabla II.** Repetibilidad en las determinaciones de CS10 y CS1 a 1.200 vueltas

Table II. Repeatability in the determination of CS10 and CS1 after 1200 revolutions

Determinación	Coque 1: I20 = 67,7 I10 = 29,6		Coque 2: I20 = 73,0 I10 = 24,4		Coque 3: I20 = 76,3 I10 = 21,4	
	CS10	CS1	CS10	CS1	CS10	CS1
1	67,7	30,8	74,3	25,0	77,8	21,6
2	67,6	31,1	73,1	26,0	76,5	22,6
3	66,5	31,9	72,9	26,0	76,9	22,5
4	67,2	31,8	74,0	25,0	77,2	21,7
5	67,9	31,1	73,3	24,8	76,6	22,9
Media	67,4	31,3	73,5	25,4	77,0	22,3
Valor mínimo	66,5	30,8	72,9	24,8	76,5	21,6
Valor máximo	67,9	31,9	74,3	26,0	77,8	22,9
Desviación típica	0,56	0,48	0,60	0,59	0,52	0,58

coques obtenidos en hornos de menor capacidad, simplificando y disminuyendo los costes de los ensayos de coquización.

### Abreviaturas

CRI	Índice de reactividad frente al CO <sub>2</sub> -Coke Reactivity Index-, determinado según el ensayo NSC [%].
CS1	Índice, propuesto por el INCAR, de abrasividad para la medida de resistencia mecánica en frío, adoptado del índice CSR de determinación de resistencia mecánica después de reacción con CO <sub>2</sub> [% coque < 1 mm].
CS10	Índice, propuesto por el INCAR, de abrasividad para la medida de resistencia mecánica en frío, adoptado del índice CSR de determinación de resistencia mecánica después de reacción con CO <sub>2</sub> [% coque > 10 mm].
CS10-1	Índice, propuesto por el INCAR, de abrasividad para la medida de resistencia mecánica en frío, adoptado del índice CSR de determinación de resistencia mecánica después de reacción con CO <sub>2</sub> [% coque, fracción intermedia entre 10 y 1 mm].
CSR	Índice de resistencia mecánica después de reacción con CO <sub>2</sub> -Coke Strength after Reaction-, determinado según el ensayo NSC [% coque, > 10 mm].
HPM250	Horno de Pared Móvil de 250 kg de capacidad.
I20	Índice IRSID de resistencia mecánica en frío [% coque, > 20 mm].
I10	Índice IRSID de resistencia mecánica en frío [% coque, < 10 mm].
INCAR	Instituto Nacional del Carbón (Oviedo)
IRSID	Institut Recherche Siderurgie (París)
NSC	Nippon Steel Corporation (Japón)

### Agradecimientos

Los autores agradecen a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) y a la Comisión Europea la financiación de este

trabajo (Proyecto 1FD97-1775), y a la empresa ACERALIA el suministro de carbones y mezclas utilizadas. N. Radoslavov agradece a la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI), perteneciente al Ministerio de Asuntos Exteriores de España, la concesión de una beca para su estancia en el INCAR-CSIC.

### REFERENCIAS

- [1] R. GUERIN, *Rev. Carbón ILAFA* (1979) 29-35.
- [2] J. JANZ y W. WEISS, *Proc. 3<sup>rd</sup> European Cokemaking Cong.*, CRM-VDEh, Gent, Bélgica, 1996, pp. 114-119.
- [3] T. IMAI, *ISIJ Int.* 39 (1999) 509-523.
- [4] M. ASANUMA, T. ARIYAMA, M. SATO, R. MURAI, T. NONAKA, I. OKOCHI, H. TSUKIJI y K. NEMOTO, *ISIJ Int.* 40 (2000) 244-251.
- [5] M. OHJI, *ISIJ Int.* 40 (2000) 529-543.
- [6] W.B. CROSS, *The Coke Oven Managers' Association (CÓMA) Year-Book*, Mexborough, Reino Unido, 1994, pp. 97-108.
- [7] H.B. LÜNGEN y A. POOS, *Cokemaking Int.* 9-2 (1996) 14-31.
- [8] H. BERTLING, *ISIJ Int.* 39 (1999) 617-624.
- [9] J. TERJUNG, *Proc. 4<sup>th</sup> European Coke and Ironmaking Cong.*, Vol. 2, ATS-RM, Paris, Francia, 2000, pp. 20-29.
- [10] N. NAKAMURA, Y. TOGINO y T. TATEOKA, *Coal, Coke and Blast Furnace*, The Metals Society, Londres, Reino Unido, 1977, pp.1-18.
- [11] BCRA (The British Carbonization Research Association), *Carbonization Research Report 91*, Chesterfield, Inglaterra, 1980.
- [12] ASTM D5341-93a, *Standard test method for measuring coke reactivity index (CRI) and coke strength after reaction (CSR)*.
- [13] J.W. PATRICK y H.C. WILKINSON, *Analytical Methods for Coal and Coal Products*, Vol. II, Clarence Karr Jr. (Ed.), Academic Press, Nueva York, EEUU, 1978, pp. 339-370.
- [14] E.A. MIYAR y R. ÁLVAREZ, *Rev. Metal. Madrid* 15 (1979) 311-314.
- [15] S. RAGAN y H. MARSH, *J. Phys. D:* 13 (1980) 983-993.
- [16] R. LOISON, P. FOCH y A. BOYER, *Coke. Quality and Production*, Butterworths, Londres, Reino Unido, 1989, pp. 178-189.
- [17] R. ÁLVAREZ y M.A. Díez, *Sciences of Carbon Materials*, H. Marsh y F. Rodríguez-Reinoso (Eds.), Universidad de Alicante, Secretariado de Publicaciones, Alicante, España, 2000, pp.595-635.