

ESTABLECIMIENTO DE UN INDICE PARA EXPRESAR CORRECTAMENTE EL HINCHAMIENTO DE LOS CARBONES EN EL DILATOMETRO AUDIBERT-ARNU

Por J. B. ESCUDERO FERNANDEZ *

EL ENSAYO ARNU Y LA CLASIFICACION DE LOS CARBONES :: ::

La importancia del dilatómetro Audibert-Arnu para el estudio de las propiedades coquizantes de los carbones unitarios o de mezclas de carbones, se pone de manifiesto en la propuesta sobre la «Clasificación internacional de los carbones» que se espera poder adoptar, lo más tarde, para fines del año 1955. En esta propuesta se establece un Código de clasificación de modo que a cada carbón le corresponde un conjunto de tres cifras, la tercera de las cuales se deduce, bien del tipo del semicoque obtenido en el ensayo Gray-King de carbonización a baja temperatura, bien de la contracción o de la dilatación máximas que el carbón haya experimentado al efectuar un ensayo Arnu realizado con una velocidad de calentamiento de tres grados por minuto.

Aunque parece ser que existe una buena correspondencia entre los resultados de

dichos dos ensayos, el primero de ellos se utiliza casi exclusivamente en Inglaterra, mientras que en el continente europeo y en los Estados Unidos se ha adoptado el dilatómetro. Así, de un ensayo con este aparato se obtiene como tercera cifra, según la propuesta, una de las siguientes:

a.—Los lápices que al finalizar el ensayo no han sufrido modificación alguna de volumen, es decir, aquellos cuya gráfica se mantiene en la línea del eje de abscisas, se consideran como correspondientes a carbones «no coquizantes», expresándose esta circunstancia con la adopción del número 0 para estos carbones.

b.—Los carbones que solamente reblanecen y no hinchan de nuevo se califican de «muy débilmente coquizantes» y se distinguen con el número 1.

c.—A los carbones que se contraen e hinchan a lo sumo hasta el volumen inicial, es decir, cuando las curvas dilatométricas muestran una contracción y luego una

* Licenciado en Ciencias Químicas, Colaborador de la Sección de Coquización del Instituto Nacional del Carbón.

«dilatación negativa», se les considera como «débilmente coquizantes» y se les asigna el número 2.

d.—Si el hinchamiento sobrepasa el volumen inicial, se adoptan las siguientes cifras distintivas: número 3, si los carbones presentan una dilatación entre 0 y 50 % («medianamente coquizantes»); número 4, cuando la dilatación está comprendida entre 50 y 140 % («carbones que coquizan bien»), y número 5 si la dilatación pasa del

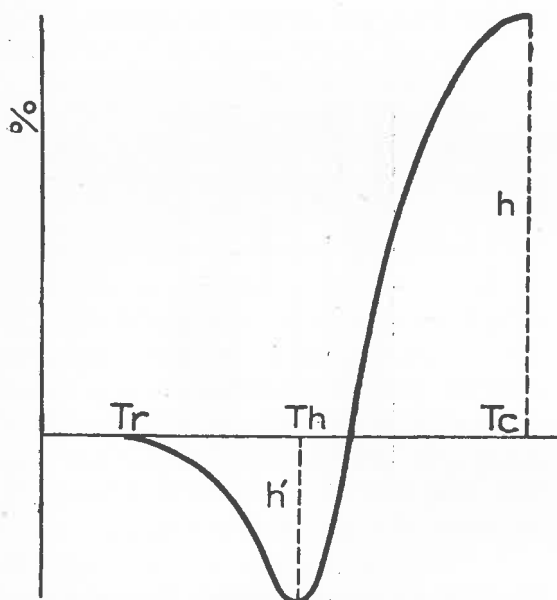


Fig. 1

140 %, calificándose a estos carbones como poseedores de una «abundante capacidad de coquización».

INCORRECTAS MANERAS ACTUALES DE EXPRESAR EL HINCHAMIENTO :: ::

Reconocida la gran importancia de los ensayos dilatométricos que, además de la tercera cifra del Código, suministran datos muy estimables en cuanto a la calidad del coque que puede obtenerse industrialmente del carbón ensayado, es evidente la conveniencia de expresar lo más correctamente posible los resultados proporcionados por el aparato, es decir, el hinchamiento expe-

rimentado por el carbón en el tubo dilatométrico. Pero la realidad es que, según se procede hoy, se está bien lejos de cumplir esta condición primordial para sacar la máxima utilidad de los ensayos de este tipo.

Durante la experiencia, el carbón comienza por reblandecer, y luego, en el caso general, hincha. El índice del pistón del dilatómetro acusa el descenso previo y el ascenso posterior, de manera que sus desplazamientos frente a una escala dan, en función de la temperatura, la curva de tipo general indicada en la figura 1.

Suele tomarse como medida del hinchamiento, bien la distancia entre las posiciones más alta y más baja del pistón ($h + h'$), bien la distancia desde el cero a la posición final del índice (h), o bien la longitud total ocupada por el semicoque al finalizar el ensayo ($h + 100$), expresadas todas estas magnitudes en tanto por ciento de la longitud inicial del lápiz, y ya hemos visto como para la clasificación internacional de los carbones se toma la «dilatación» o «contracción» a partir de la línea cero. En ninguno de los casos citados es correcta la medida del hinchamiento, pues la magnitud elegida no indica la verdadera variación de volumen que experimenta el comprimido de la hulla ensayada.

Ya el Profesor A. Gillet llama la atención sobre la incorrecta manera habitual de expresar el hinchamiento (contracción o dilatación en tanto por ciento de la longitud inicial del comprimido), indicando la necesidad de revisarla, y en sus trabajos sobre la fusión de las hullas a temperatura constante¹, efectuados con el dilatómetro, expresa el hinchamiento en tanto por ciento del volumen de la hulla fundida en masa y sin huecos.

Si se trata, simplemente, de representar el diagrama correspondiente a un ensayo de hinchamiento, las posiciones del índice del pistón pueden tomarse frente a una escala cuya graduación es indiferente que esté hecha en milímetros, en cualquiera otra unidad más o menos arbitraria o, como ha ge-

neralizado el uso, en tantos por ciento de la longitud inicial del lápiz. Pero si de un ensayo realizado con el dilatómetro se va a deducir o a citar un número que indique la magnitud del hinchamiento, es necesaria, en efecto, una revisión de la naturaleza y de la manera de expresar este número.

Puesto que el fenómeno que se manifiesta en el dilatómetro es una variación de volumen, la magnitud de esta variación será el verdadero hinchamiento experimentado por el carbón en el aparato.

El Dr. J. W. Kreulen², en un excelente trabajo sobre la influencia de la oxidación de las hullas sobre su hinchamiento al crisol, incluye tres curvas, correspondientes a otros tantos ensayos realizados con el dilatómetro, en las que denomina con la expresión «variación de volumen» a las ordenadas, en lugar de la expresión usual de tanto por ciento de la longitud inicial del lápiz. Pero dichas curvas son, sin embargo, las típicas de estos ensayos, y el hecho de que presenten rama descendente (reblandecimiento) nos indica que la expresión consignada «variación de volumen» no tiene para el citado autor su verdadero significado. En el texto del artículo no se hace referencia alguna a tal expresión, que bien pudiera ser un error en el dibujo de dichas curvas.

EXPRESION DEL VERDADERO HINCHAMIENTO EXPERIMENTADO POR EL CARBON EN EL DILATOMETRO :: :: ::

La variación de volumen experimentada por el comprimido en el ensayo dilatométrico se obtendrá calculando la diferencia entre el volumen final ocupado por el carbón hinchado (semicoque) y el volumen inicial del lápiz.

Si llamamos h a la altura sobre cero a la que se detiene el pistón al finalizar el ensayo (figura 1), expresada en tanto por ciento de la longitud inicial del lápiz, la altura total ocupada por el semicoque será $h + 100$, y siendo el diámetro medio del lápiz de

6,5 mm y su altura 100 unidades de la escala de tantos por ciento, y $R = 4$ mm el radio del tubo, la variación de volumen será:

$$\begin{aligned} \Delta v &= \pi R^2 (h + 100) - \pi 3,25^2 \times 100 \\ &= \pi R^2 \left[h + 100 - \left(\frac{3,25 \times 10}{4} \right)^2 \right] \\ &= \pi R^2 (h + 34) \end{aligned}$$

Se podría hacer relativa esta variación de volumen, con respecto al volumen inicial del lápiz, con lo que se lograría la eli-

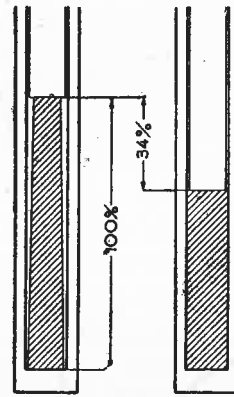


Fig. 2

minación de las magnitudes dimensionales. De este modo se tendría para el hinchamiento relativo la expresión:

$$\Delta v/v = 0,01515 (h + 34)$$

El valor numérico 34 que acompaña como sumando a la magnitud h en la expresión del hinchamiento, tanto absoluto como relativo, es precisamente el máximo descenso que puede experimentar el pistón (máximo valor de h' , figura 1), y que se alcanzaría, si este descenso no fuese prematuramente interrumpido por el comienzo del hinchamiento, en el momento en que el lápiz fundido y sin variar de densidad ocupase totalmente el fondo del tubo (figura 2). Para calcular este máximo descenso, cuyo valor fué ya citado por Ch. Arnou³, basta

tener en cuenta que antes de manifestarse el hinchamiento, el lápiz disminuye en altura, pero conserva constante su volumen (despreciando la pérdida de materias volátiles que tiene lugar en ese período de tiempo). Por lo tanto, si llamamos h' al máximo descenso, la altura ocupada por el lápiz cuando entre éste y el tubo ya no existe espacio vacío será $100-h'$, y debido a la constancia del volumen tendremos

$$3,25^2 \times 100 = 4^2 (100 - h')$$

de donde se deduce $h' = 34 \%$.

Examinemos ahora el caso en que h es negativa, es decir, cuando el carbón reblandece e hincha sin llegar a la posición inicial, o cuando solamente funde sin hinchar.

Si existe hinchamiento, es decir, si existe la rama ascendente de la curva, cuando el pistón comienza a subir ya se ha llenado el hueco correspondiente al máximo descenso y el pistón no acusa este «hinchamiento» por lo que a la magnitud h , aunque sea negativa, se le han de sumar también 34 unidades de la escala para obtener la correcta expresión del hinchamiento total de la hulla.

Cuando el lápiz reblandece solamente, es decir, cuando no aparece la rama ascendente en el diagrama, no existe hinchamiento. Se habla en estos casos de una «contracción final máxima», haciendo constar la ausencia de hinchamiento del carbón en estudio.

Al estudiar las mezclas de un carbón que hincha con otro que carece de hinchamiento (antracita, hulla seca de llama corta, coque o semicoque), se obtiene, a partir de cierta proporción de éste, un tipo de curvas como las que se esquematizan en la figura 3. No cabe duda de que la mezcla C está «más lejos de hinchar» que las mezclas B ó A, y de que un carbón cuyo diagrama sea del tipo D tendrá el mínimo posible de hinchamiento. De esta consideración deducimos la necesidad de introducir el concepto de

«hinchamiento negativo», denominando así a la diferencia entre el volumen que ocuparía el lápiz si llenase la totalidad del tubo correspondiente a la altura h (negativa) y el volumen que realmente ocupa durante el reblandecimiento. Un cálculo análogo al efectuado anteriormente, demuestra que el hinchamiento negativo es proporcional a la magnitud $-(h + 34)$, es decir, al mismo valor de antes, pero con el signo cambiado.

Resulta pues que el hinchamiento, tanto absoluto como relativo, considerado como variación de volumen, es siempre igual a $\pm k (h + 34)$, tomando h con el signo que le corresponda a partir de la línea cero del diagrama, y la constante k con signo más o menos, según que en dicho diagrama aparezca o no la rama ascendente de la curva.

He aquí pues como puede disponerse de un número para la medida del hinchamiento

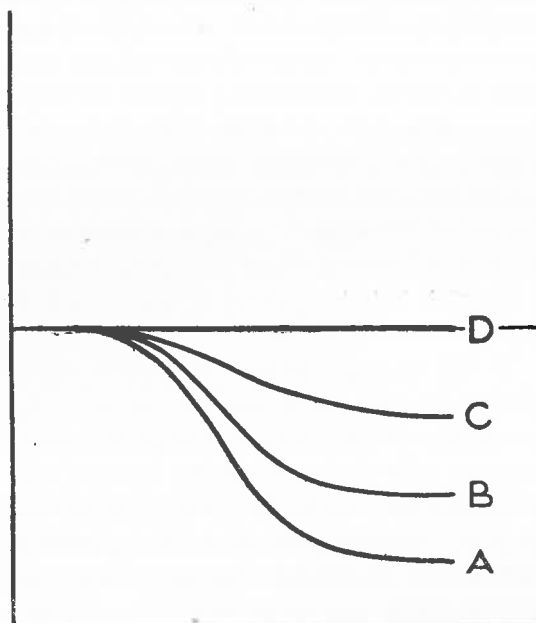


Fig. 3

de los carbones por medio del dilatómetro Arnú. El factor $\pm (h + 34)$, que multiplicado por 1,5 da el porcentaje de aumento de volumen del lápiz, podría denominarse «índice de hinchamiento en el dilatómetro

Arnu», o más simplemente, como hacemos en lo que sigue, «índice α ».

COMPROBACION EXPERIMENTAL DEL VALOR DEL INDICE PROPUESTO :: ::

Dos hechos fundamentales hablan en favor de nuestro índice α :

A.—El semicoque procedente de un ensayo cuya gráfica carece de rama ascendente puede ser extraído del tubo dilatométrico conservando la forma primitiva del lápiz (degenerada, desde luego, por el reblandecimiento o la contracción), y esta extracción es tanto más fácil de efectuar cuanto menor haya sido el hinchamiento (menor valor de h'). Esto se ha logrado incluso en ensayos cuyo descenso fué muy próximo a 34 % ($\alpha = 0$), como puede verse en las figuras 6 y 7 (15 % de mineral), en las figuras 8 y 9 (fracción 9) y en las figuras 14 y 15 (12,5 % de semicoque). Aunque esta afirmación tiene sus excepciones, como indicaremos más adelante, no se ha conseguido nunca, en cambio, la extracción del lápiz como tal en los ensayos que presentan rama ascendente, aunque ésta esté apenas iniciada, cualquiera que sea el valor de h' , prueba evidente de que el hinchamiento que ha experimentado el lápiz es mayor que el señalado por la pequeña rama ascendente.

B.—Si en los ensayos realizados sobre mezclas de una hulla que hincha con otra que carece de hinchamiento, representamos el índice α de cada mezcla en función del porcentaje de una de las hullas componentes de la misma, el paso de valores positivos a negativos se verifica de acuerdo a una función única.

Como ejemplo de este segundo hecho, representamos en la figura 4 una serie de ensayos realizados con mezclas de una hulla con elevado hinchamiento y una hulla seca de llama corta. En *a*) están las curvas dilatométricas (obtenidas, como en todos los casos que se citan en este trabajo, a la velocidad de calentamiento de dos grados por

minuto) a medida que aumenta el porcentaje de carbón seco, y en *b*) se representan los valores del índice α en función del tanto por ciento de este último carbón.

En la figura 5 se representa el efecto que la oxidación del mismo carbón produce en su comportamiento en el dilatómetro. La oxidación se llevó a cabo en estufa ordinaria, a la temperatura de 105 grados, tomando, como única variable, el tiempo transcurrido. En *a*) se indican los diagramas Arnu de la muestra reciente y los obtenidos cuando la misma muestra ha permanecido en la estufa los días que se señalan. La curva *b*) es la obtenida representando los valores del índice α correspondientes a los ensayos dilatométricos, en función del tiempo de oxidación. Como en el caso anterior, el paso de valores positivos a negativos se verifica sin que se altere la función que liga las variables elegidas, y en dicha curva está perfectamente representada la pérdida de la capacidad de coquización que se observa en las curvas de la figura 5-*a*.

Aunque está fuera de lugar, pues no se trata aquí de realizar un estudio sobre la oxidación de los carbones, indicamos a continuación la manera como hemos efectuado estos ensayos:

Se introducen en la estufa, a 105 grados, cinco grandes cápsulas planas con 25 gramos de carbón molido a 100 mallas en cada una de ellas, de modo que la distribución por unidad de superficie resultó de 0,3 gramos por centímetro cuadrado. Simultáneamente, se introducen en la estufa seis pesafiltros, cuatro de los cuales contienen cada uno 1 gramo de carbón y se van a destinar como control de la ganancia en peso durante la oxidación y de la capacidad de adsorción de agua, cuando se somete el carbón a un grado de humedad conocido. Los otros dos pesafiltros (vacíos) se usan como testigos en cuanto a la adsorción o a la pérdida de agua que experimente el vidrio durante las citadas operaciones.

El control de la humedad adsorbida se lleva a cabo colocando dos de los cuatro

pesafiltros en una vasija (desecador ordinario) en la cual se ha puesto una disolución saturada de SO_4HK con exceso de sal, y se coloca el conjunto en un termostato (construido por el autor para tal fin) a la temperatura de 20 grados, con lo que el carbón queda en un ambiente cuya humedad relativa es del 85 $\%$. Posteriormente,

el carbón secado al aire ambiente y los dos testigos hasta conseguir el equilibrio higroscópico. Logrado éste, se introducen los seis pesafiltros y las cinco cápsulas en la estufa a 105 grados, y con dos pesafiltros y un testigo se controla la alteración que experimenta el peso de la muestra en función del tiempo de oxidación. Con los otros dos

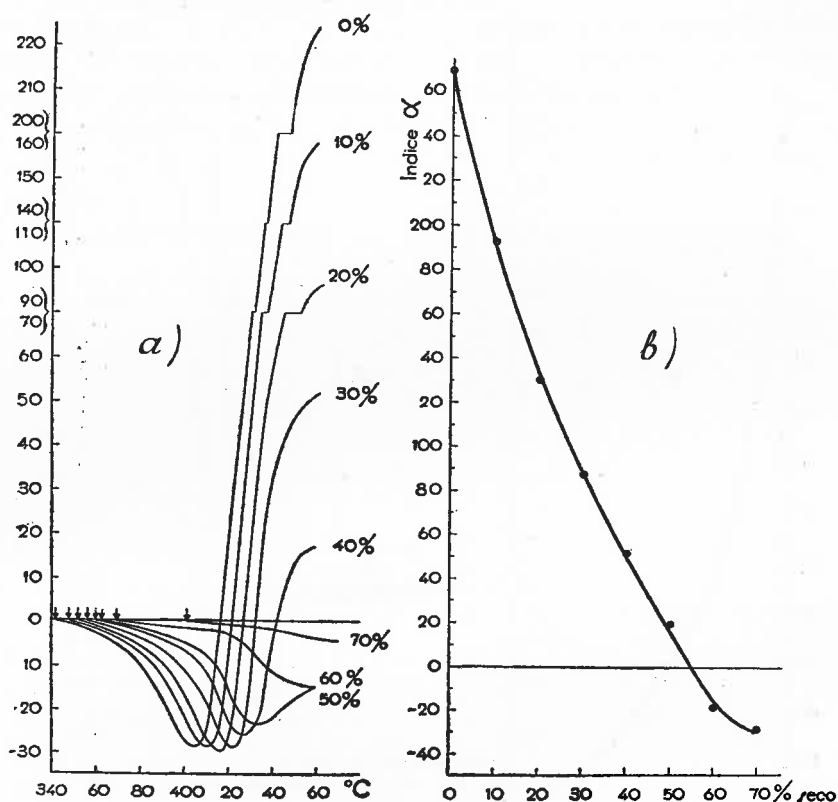


Fig. 4: Mezcla de carbones n.ºs 404 y T-38 *

hemos visto que en la propuesta ISO para la determinación de la humedad se expone el carbón en un ambiente cuya humedad relativa es del 97 $\%$, conseguida con una disolución saturada de SO_4K_2 y a la temperatura de 30 grados.

Se empiezan estos ensayos colocando en el termostato los cuatro pesafiltros con

pesafiltros y el otro testigo se controla la ganancia de humedad cuando se introducen en el ambiente húmedo anteriormente descrito. De las cápsulas se van sacando, casi periódicamente, las muestras necesarias para efectuar los ensayos dilatométricos.

La ganancia de peso debida a la oxidación aumenta con el tiempo, alcanzándose

* En todas las figuras con leyenda, las referencias con que se distinguen los carbones son las asignadas a los mismos en el registro del Instituto Nacional del Carbón.

el peso inicial de la muestra a los 9 días y tendiendo a pesada constante hacia los 28 ó 30 días. Por otra parte, la capacidad de adsorción de humedad va aumentando con el grado de oxidación, lo que, unido a la pérdida de hinchamiento que el carbón va experimentando, confirmaría la hipótesis de N. Berkowitz⁴ de que la oxidación ac-

que carecen de rama ascendente en el diagrama Arnu (figura 5-a). Estas curvas, como todas las incluidas en la figura, indican claramente que la naturaleza del carbón se ha modificado en alto grado: el desplazamiento de las curvas hacia las temperaturas altas indica evidentemente un aumento de la viscosidad, aumento que llega a un gra-

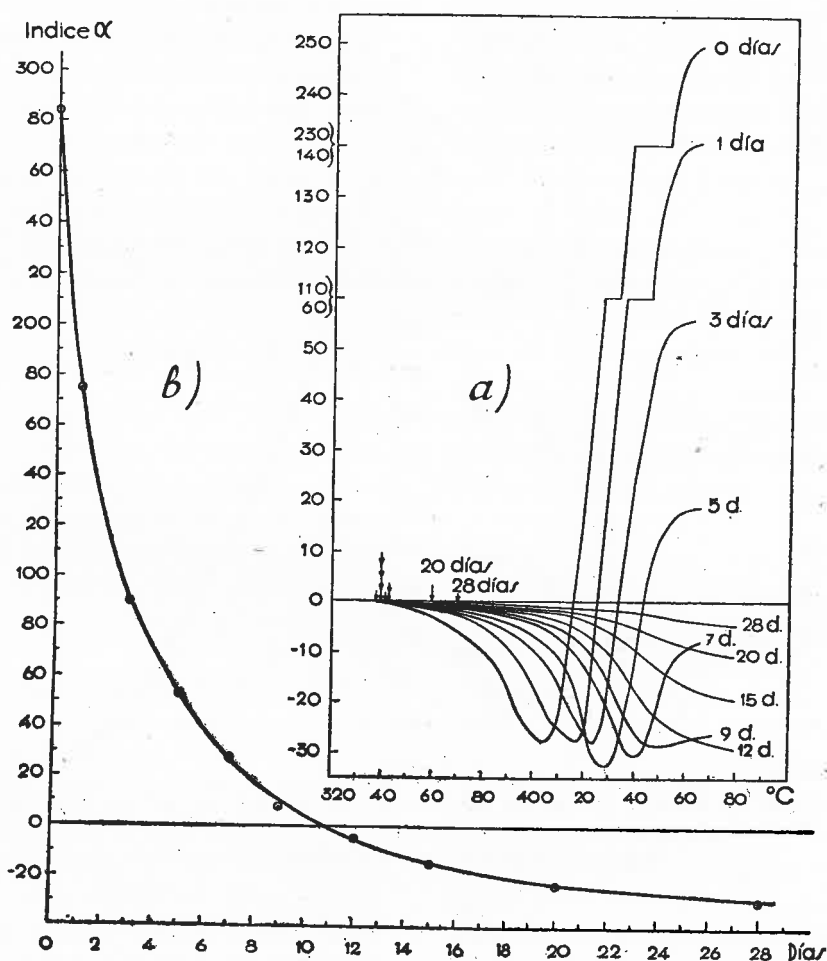


Fig. 5: Efecto de la oxidación a 105° del carbón n.º 404

túa sobre el carbón abriendo los poros ciegos de modo a producir una estructura a través de la cual los gases y vapores destilados difunden sin encontrar resistencia. Sin embargo, esta hipótesis no es suficiente para explicar la ganancia continua de peso que tiene lugar durante la oxidación, así como tampoco puede explicar las curvas

do tal que produce la anulación completa del hinchamiento y aún de los fenómenos dilatométricos.

Si se comparan las figuras 4 y 5 resulta que, por dos procedimientos diferentes, se han logrado en el mismo carbón los mismos efectos: desplazamiento de las curvas hacia las temperaturas altas y disminución

continua del hinchamiento, lo cual indica una disminución del «principio coquizante» debida, en la mezcla con carbón seco, a la dilución que experimenta dicho principio al aumentar el porcentaje de carbón no coquizante, y en la muestra oxidada a una degeneración del citado «principio».

HINCHAMIENTO DEL CARBÓN LIBRE DE MATERIA MINERAL

Como ya se ha indicado al comienzo del presente trabajo, la tercera cifra del Código para la clasificación internacional de

de cenizas como tal materia mineral. Es evidente que el aumento de cenizas produce una disminución de hinchamiento, debida, en primer lugar, a la menor concentración del «principio coquizante» y, en segundo lugar, a que la adición de inerte facilita siempre mecánicamente el desprendimiento de gases y vapores originados durante la pirogenación de la hulla.

Un método para encontrar el hinchamiento que el carbón libre de materia mineral experimenta en el dilatómetro, puede ser el siguiente:

Se determina el índice de hinchamien-

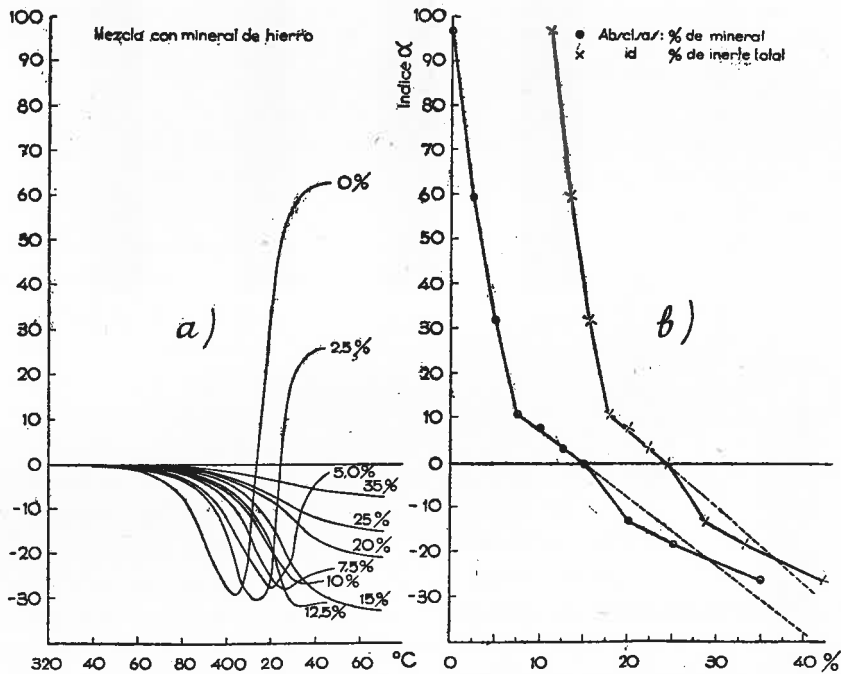


Fig. 6: Carbón TT-11

los carbones da una medida de la capacidad de coquización, sin que ello quiera decir que la cifra más alta corresponda a un carbón que produzca el mejor coque.

Creemos sería conveniente que dicha cifra fuese obtenida del hinchamiento que experimentaría el carbón si estuviese libre de materia mineral, tomando, si se quiere, como primera aproximación (desde luego suficiente para fines prácticos) el porcentaje

to α_1 del carbón en estudio correspondiente a su propio contenido en cenizas t_1 (como primera aproximación de la materia mineral). Se determina luego el índice α_2 correspondiente al mismo carbón al que se le ha mezclado una cantidad más o menos arbitraria de sus propias cenizas, con lo que el porcentaje de éstas en la mezcla alcanza ahora el valor t_2 . Continuando este procedimiento, obtendríamos una serie de pares

de valores (α_i, t_i) ligados por una función $\alpha = f(t)$, de la que, por extrapolación, obtendríamos, para $t = 0$, el valor α_0 del índice de hinchamiento del carbón libre de materia mineral.

A propósito de esto, citamos los ensayos dilatométricos sobre mezclas de un carbón y mineral de hierro que efectuamos para

tendiendo por inerte total el añadido más la materia mineral del carbón, calculada ésta por la fórmula de Parr⁶. Se ve en esta figura: que la relación entre el índice α y el tanto por ciento de inerte (total o añadido) es, en este caso, aproximadamente lineal; que se presenta una inflexión notablemente marcada por encima de la recta

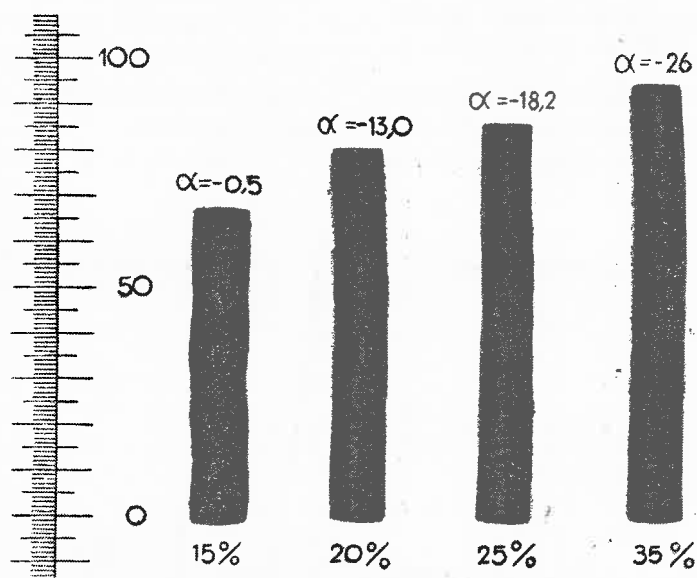


Fig. 7

los estudios sobre ferrococoque que lleva a cabo el Instituto. En la figura 6 se representa una serie de estos ensayos realizados con mineral de hierro. En a) están las curvas dilatométricas ordinarias, en las que se ve que el hinchamiento disminuye rapidísimamente con la adición de mineral hasta un 7,5% de éste, para continuar disminuyendo, ya no tan rápidamente, a partir de esta proporción.

En la figura 6-b se aprecia mejor esta pérdida de hinchamiento, tanto si se expresa el índice α en función del tanto por ciento de mineral, como si se expresa en función del porcentaje de inerte total, en-

$\alpha = 0$, y que parece presentarse otra inflexión, de menor importancia, para la línea de hinchamientos negativos.* Si se intentase la obtención del índice α_0 , es decir, del índice de hinchamiento del carbón libre de materia mineral, por extrapolación de la línea representada en la figura 6-b, obtendríamos un valor, a nuestro parecer, absurdo, y lo mismo debe ocurrir, como explicamos más adelante, si en lugar del mineral de hierro empleamos las propias cenizas del carbón en estudio.

Persiguiendo la determinación del hinchamiento del carbón libre de materia mineral (aunque solamente aproximada y un

* En esta serie se ha obtenido un valor de α muy próximo a cero. En la figura 7 reproducimos la fotografía del lápiz extraído al finalizar el ensayo, así como las de los otros tres que dieron hinchamiento negativo.

tanto arbitraria), se llevaron a cabo los diferentes ensayos que se describen a continuación.

En el primero de ellos se verificaron las

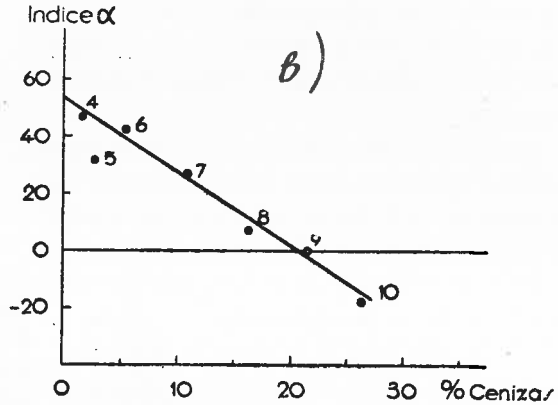
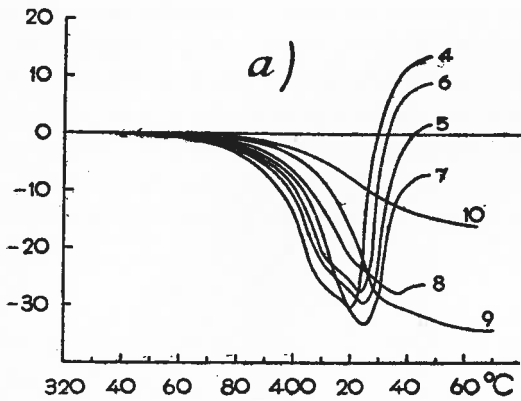


Fig. 8: Carbón n.º 605; fracciones densimétricas

determinaciones dilatométricas de cada una de las fracciones obtenidas en la separación densimétrica de un carbón, facilitadas por el Departamento de Preparación del Instituto al construir la curva de lavabilidad del citado carbón. Como es sabido, el contenido en cenizas de las diferentes fracciones obtenidas por flotación en líquidos de distintas densidades aumenta a medida que lo hace la del líquido. En la figura 8-a se representan las curvas Arnu correspondientes a las distintas fracciones, designadas con los números con que fueron señaladas por dicho Departamento para verificar sobre ellas los análisis oportunos. En la figura 8-b están los valores del índice α en función del contenido en cenizas de las muestras ensayadas. Se ve que la relación es lineal, si bien los errores son bastante mayores que los obtenidos normalmente en otros ensayos.* Esta relación lineal no puede, sin embargo, generalizarse para otros carbones, ya que la naturaleza del carbón contenido en las diferentes fracciones densimétricas puede ser incluso muy

diferente: los distintos componentes petrográficos, durenos, vitreos y fusenos, tienen también distinta densidad, por lo que pueden distribuirse de manera un tanto com-

plicada, quizás, en las diferentes fracciones.

En la figura 10 se representan las curvas dilatométricas obtenidas con las fracciones

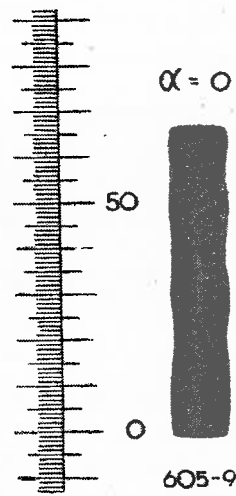


Fig. 9

densimétricas de otro carbón y la relación entre el índice α y el porcentaje de cenizas. Se ve que tal relación no es lineal, lo que

* En esta serie se ha obtenido un valor de $\alpha = 0$ para la fracción número 9. En la figura 9 reproducimos la fotografía de este lápiz.

unido al decrecimiento monótono que en las curvas dilatométricas experimenta el valor de h' , no observable en los casos de mezclas de un carbón coquizante con un inerte, constituye, a nuestro entender, una aclaración en lo que se refiere a la diferente naturaleza del carbón contenido en las distintas fracciones a que estamos haciendo referencia.

Puesto que estos dos casos presentados son, en nuestra opinión, perfectamente razonables y posibles, abandonamos los en-

mente a medida que lo hace el porcentaje de uno de dichos dos inertes en la mezcla.

El inerte ideal para llevar a cabo la determinación del índice que nos ocupa, tendrá que cumplir la condición esencial de no producir alteración sensible en el peso de los lápices al variar su porcentaje en la mezcla, para suprimir, en lo posible, la influencia de tal variable, lo que se ha logrado prácticamente con el uso de semicoque molido a 100 ó a 200 mallas. En la figura 11 se representa el peso de los lápices en fun-

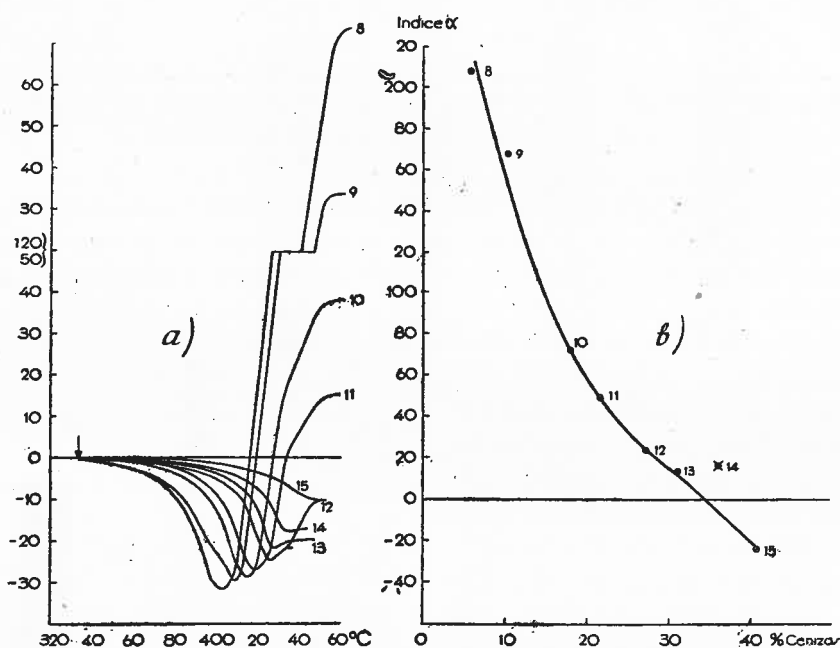


Fig. 10: Carbón n.º 606, fracciones densimétricas

sayos de esta naturaleza sustituyéndolos por otros en los que, partiendo de carbones más o menos coquizantes, se les van añadiendo porcentajes crecientes de un inerte.

Ya se ha visto que usando el mineral de hierro como tal inerte, llegaríamos a resultados absurdos para el índice α_0 debido, en nuestra opinión, a que con la adición de mineral (o de cenizas) introducimos en los ensayos dilatométricos una nueva variable: el peso o la densidad de los lápices con los que se realizan los ensayos de una misma serie, magnitud que aumenta considerable-

ción del inerte añadido (semicoque o mineral de hierro), y en función del porcentaje de cenizas como tal inerte para los carbones cuyas fracciones de variable contenido en cenizas hemos estudiado anteriormente. Se ve en dicha figura que el peso de los lápices aumenta extraordinariamente, y sensiblemente de igual modo, con la adición de hierro o de cenizas (en la misma cuantía, en el caso de las cenizas, para los correspondientes a las fracciones de los dos carbones citados), aumento que alcanza el valor de una unidad (es decir, aproximadamente el

33 % del peso del lápiz) en el intervalo de 0 a 50 % de inerte añadido. En cambio, en las mezclas con semicoque apenas se pro-

el estudio realizando series de ensayos en las que utilizamos como inerte un semicoque.

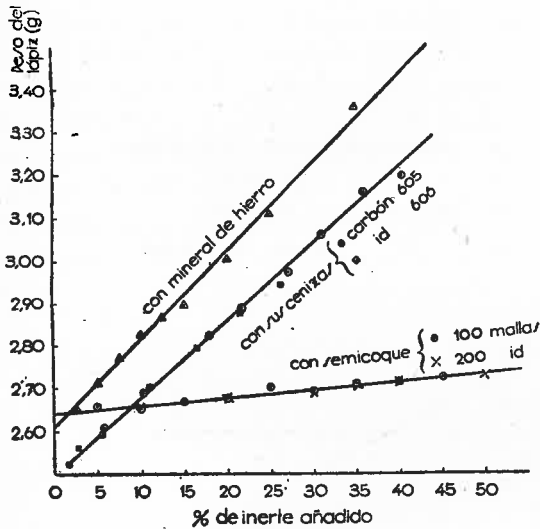


Fig. 11

duce una variación de 0,1 (menos del 4 %) para el mismo intervalo.

Por tales razones, decidimos continuar

En la figura 12 representamos dos de estas series de ensayos efectuados sobre un mismo carbón (otra muestra del carbón que se empleó en los ensayos de mezclas con mineral de hierro representados en la figura 6) con adiciones crecientes de semicoque. En a) se utilizó semicoque molido a 100 mallas, y en b) el mismo semicoque molido a 200 mallas. La influencia del tamaño de las partículas del inerte añadido es bastante apreciable, como puede verse directamente en las curvas representadas en dicha figura o, con más claridad, en la figura 13, donde se representan los valores del índice α en función del porcentaje de semicoque añadido y en función del inerte total.

En los ensayos realizados con el semicoque molido a 200 mallas, se distinguen para un mismo carbón dos líneas rectas representativas de los dos diferentes fenómenos que ocurren en el dilatómetro. La primera corresponde a los hinchamientos positivos, y la segunda a los negativos. Indudable-

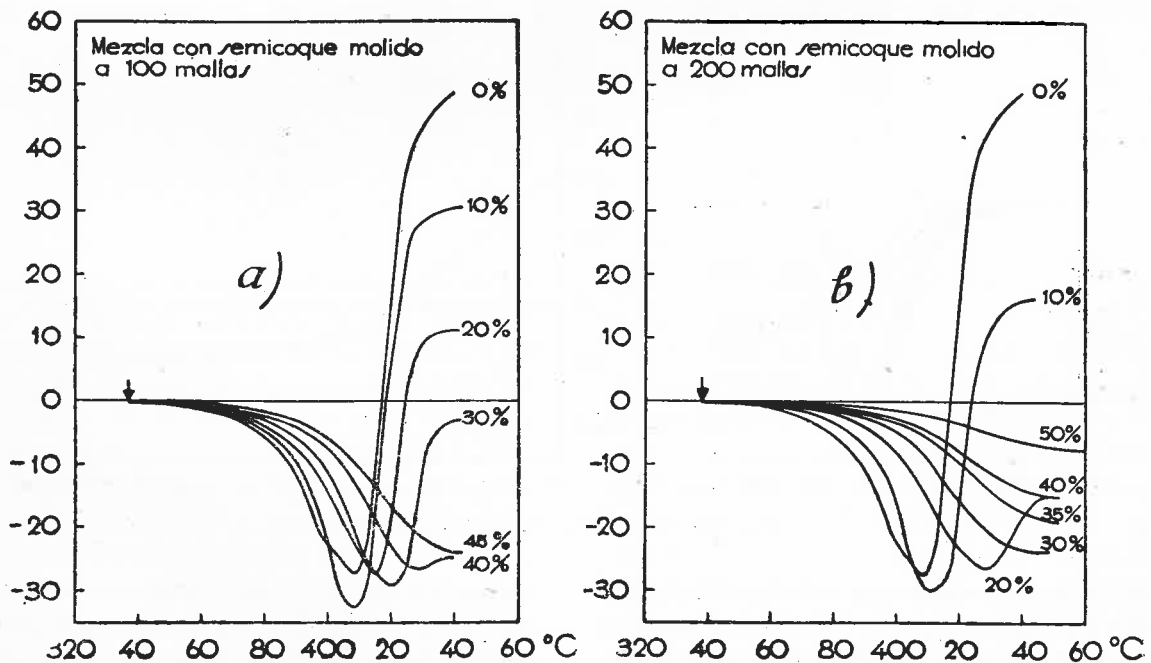


Fig. 12: Carbón TT-11

mente, en los ensayos en que solamente tiene lugar el reblandecimiento o la contracción del comprimido, el inerte añadido, además de impedir el hinchamiento, desem-

res positivos a negativos del índice α es insensible, lo que indica que nuestros cálculos sobre la determinación del citado índice como expresión del verdadero hincha-

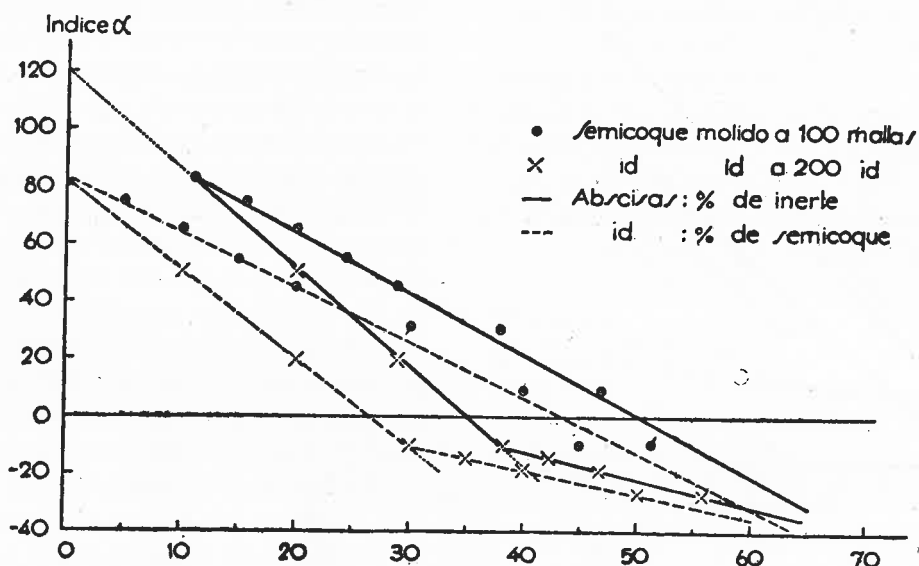


Fig. 13: Carbón TT-11 más semicoque

peña otra misión cuyo significado es obvio o, al menos, lo parece. Estas dos rectas se presentan en todos los ensayos que se han

miento están dentro del error propio de las determinaciones dilatométricas.

Si nos fijamos en las pendientes de las

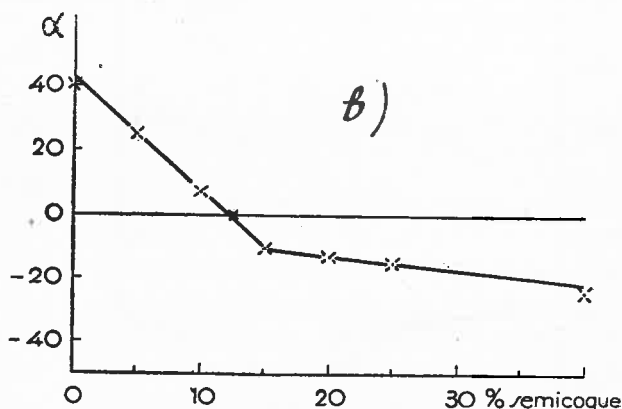
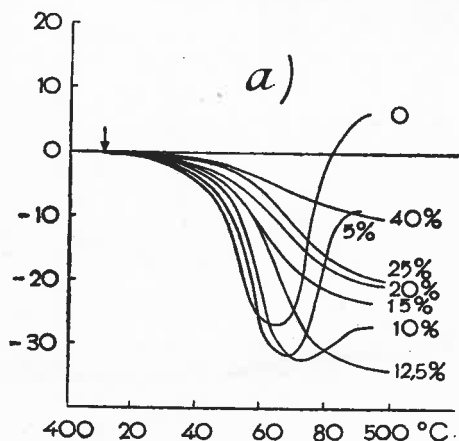


Fig. 14: Carbón n.º 560 más semicoque

realizado con semicoque molido a 200 mallas, y en todos los casos la inflexión se presenta fuera de la recta $\alpha = 0$. Es decir, permítasenos la insistencia, que el paso de valo-

rectas que con trazo lleno están representadas en la figura 13, y las comparamos con la de la recta representada en la figura 8-b, correspondiente a la relación lineal que

existe entre el índice de hinchamiento y el contenido en cenizas de las diferentes fracciones de un carbón, vemos que la pendiente de esta última recta es muy aproximadamente la media de las dos primeras, lo cual nos parece que indica que el error que podemos cometer al emplear el semicoque molido a 100 ó 200 mallas en sustitución de la materia mineral del carbón para la determinación del índice α_0 , puede ser aceptable.

Se ha elegido para los ensayos que se exponen a continuación el semicoque molido a 200 mallas, por la mejor reproducibilidad de los ensayos; además, este estado de división es más apropiado a aquél en que se encuentra la materia mineral en el carbón cuando éste ha sido molido a 100 mallas.

En la figura 14 — a se representan las curvas dilatométricas de uno de nuestros mejores carbones de coque y de sus mezclas con semicoque. Se ve en ellas cómo la llamada capacidad de coquización de un carbón no quiere decir que a mayor valor de ésta corresponda el mejor coque. El carbón a que nos referimos tiene, según la curva

dilatométrica, poca capacidad de coquización, y, sin embargo, el coque que de él se ha obtenido es, con gran ventaja, el mejor de cuantos se han fabricado en el Departamento de Transformación del Instituto.

En la figura 14 — b están los valores del índice α en función del porcentaje de inerte añadido. Se ven perfectamente las dos rectas a que se ha hecho referencia, y el paso insensible de valores positivos a negativos del índice α . También en estos ensayos se ha tenido la suerte de conseguir un $\alpha = 0$ al efectuar el correspondiente a la proporción del 12,5 % de semicoque, que era, se-

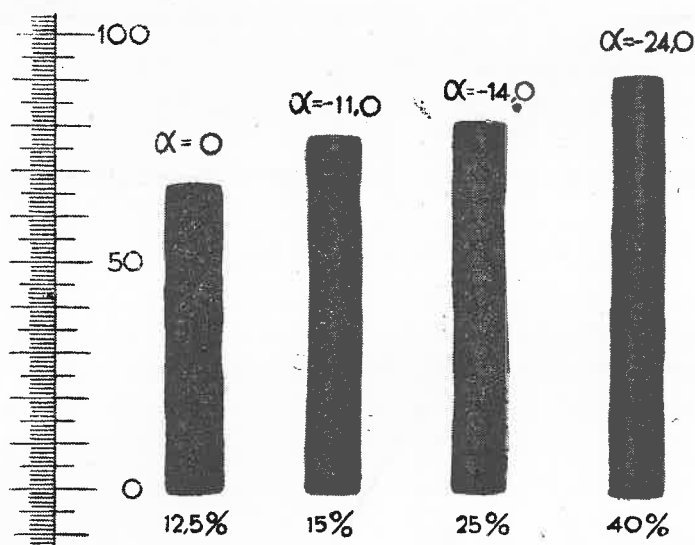


Fig. 15

gún se presentaba la recta superior, la proporción que debía producir tal índice de hinchamiento. La extracción de este lápiz del tubo dilatométrico fué muy costosa: hubo que golpear fuertemente el tubo para lograr la adquisición de tal lápiz que, si bien salió roto transversalmente en cinco trozos, fué de fácil reconstrucción. La figura 15 reproduce su fotografía, juntamente con la de tres de los cuatro lápices que dieron hinchamiento negativo. Nótese en ella que este valor $\alpha = 0$ está muy próximo a ser perfecto. Las contracciones transversales (peque-

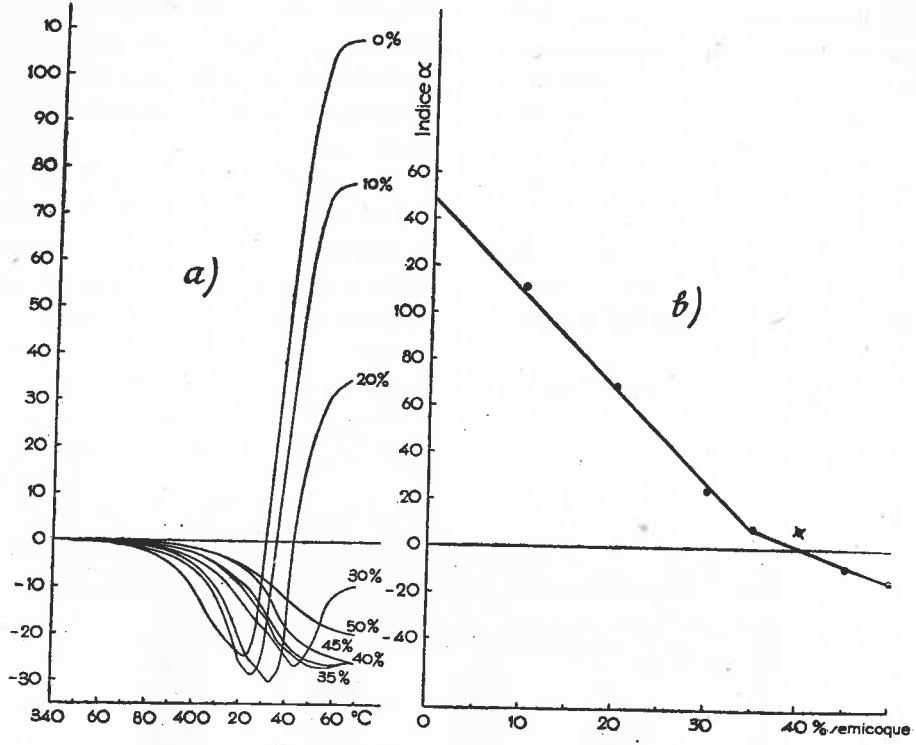


Fig. 16: Carbón n.º 588 más semicoque

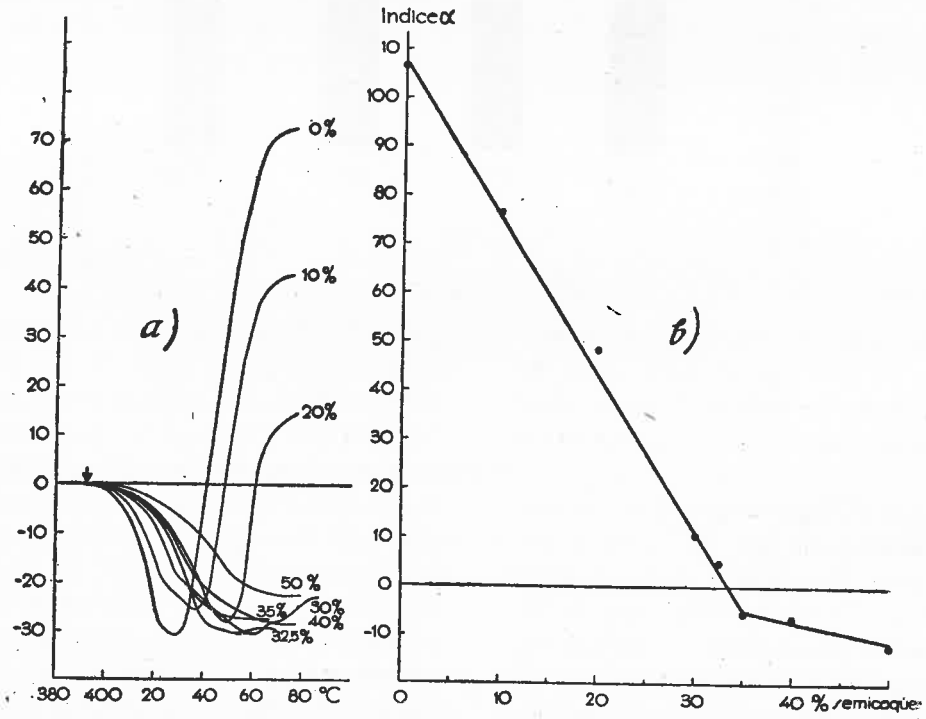


Fig. 17: Carbón n.º 386 más semicoque

ñas en este caso) que aún presenta el lápiz son debidas a la contracción propiamente dicha que todos los lápices que no han

sentados en las figuras 16 y 17, queda suficientemente demostrada la autenticidad del índice α como expresión del índice de hin-

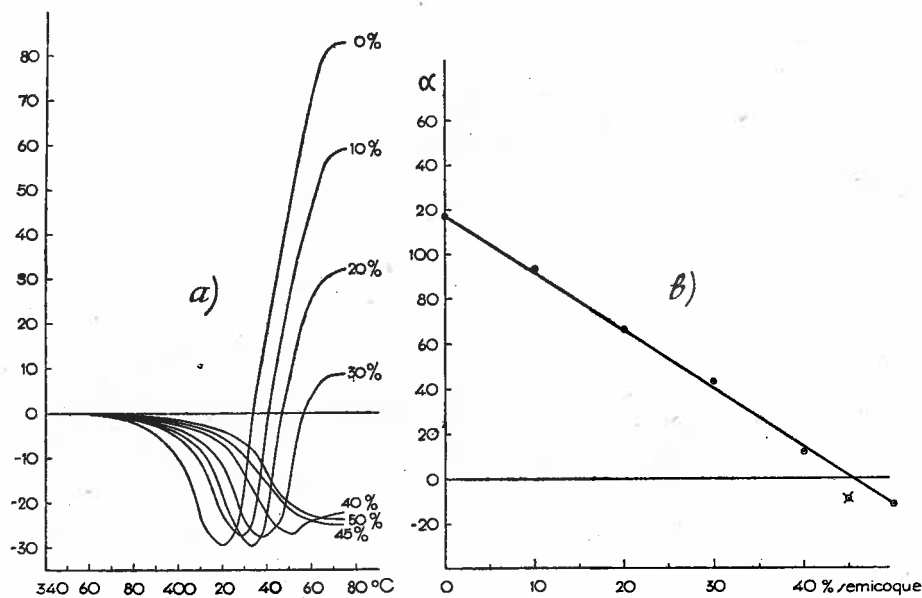


Fig. 18: Carbón n.º 589 más semicoque

hinchado sufren en la fase inmediatamente posterior al reblandecimiento.

Con los ensayos anteriores y los repre-

chamiento de un carbón en el dilatómetro Audibert-Arnu, así como la existencia de las dos rectas representativas una de los

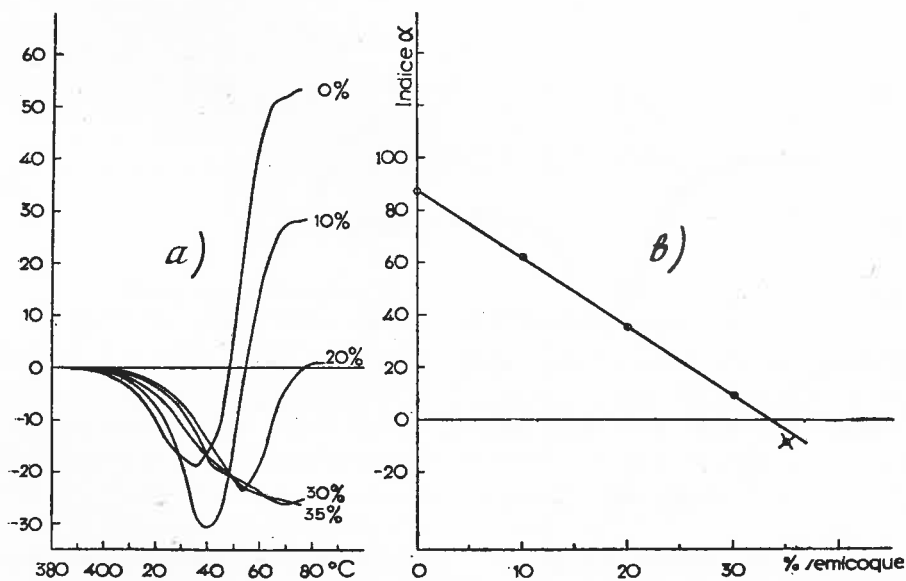


Fig. 19: Carbón n.º 498 más semicoque

hinchamientos positivos y la otra de los negativos, cuando los ensayos se verifican sobre mezclas de un carbón con un inerte

hullas con gran capacidad de coquización (gran valor de h), siendo lo sorprendente del caso que en ambos carbones se presen-

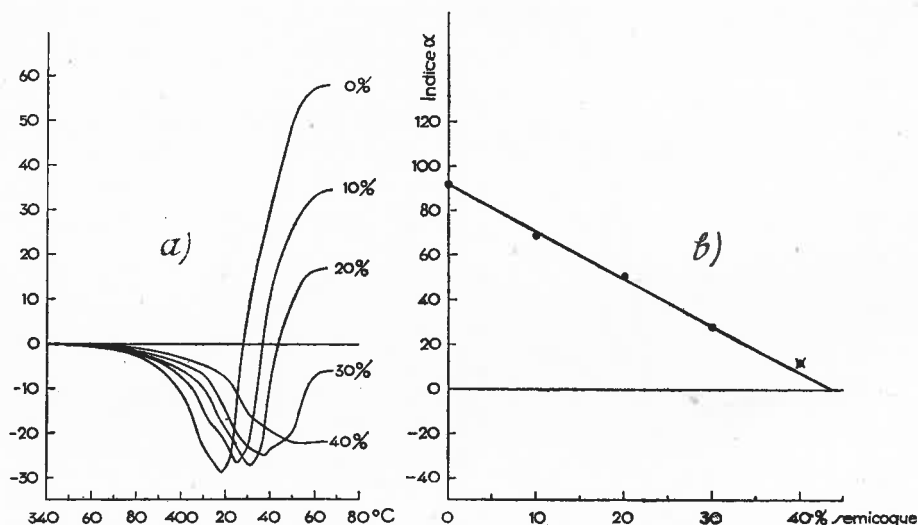


Fig. 20: Carbón TT-1 más semicoque

(semicoque) que no produce variación apreciable en el peso del lápiz.

Nuevos ensayos de mezclas con semicoque, prescindiendo de las mezclas que darían hinchamientos negativos, son los representados en las figuras 18, 19, 20 y 21.

tan dos rectas en la región de los hinchamientos positivos. Ello es debido a una anomalía que los carbones de gran índice de hinchamiento presentan en el dilatómetro, debida a deficiencias del aparato (por ejemplo, la distribución irregular de temperatu-

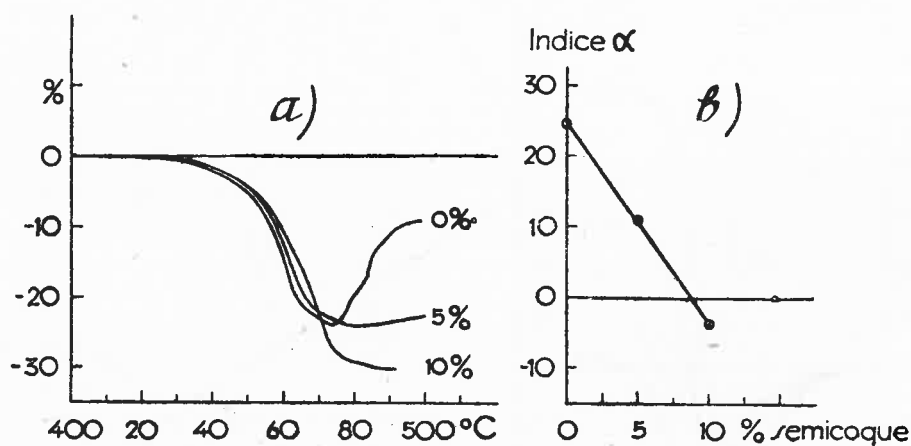


Fig. 21: Carbón n.º 563 más semicoque

Las figuras 22 y 23 representan los resultados de otros dos ensayos sobre mezclas de carbón con semicoque. Se trata de dos

ras en sentido vertical), que se ponen de manifiesto cuando el hinchamiento es exagerado. En todos los demás casos citados,

que comprenden la totalidad de los examinados hasta la fecha, no se ha presentado tal circunstancia. De todas maneras, la inflexión que forman las dos rectas no es muy destacada, por lo que creemos que aún para estos carbones se sigue cumpliendo la relación lineal entre el índice α y el porcentaje de inerte en la mezcla.

En los gráficos correspondientes al índice α en estas figuras se observan, en cada uno, dos puntos que se alejan de la línea

dos tipos de ensayos. Por una parte, aquellos cuyas curvas dilatométricas presentan la iniciación de la rama ascendente unos cinco minutos antes de finalizar el ensayo y cuya amplitud de hinchamiento aparente no llega a valer una unidad de la escala de tantos por ciento de la longitud inicial del lápiz. Es natural que éste sea uno de los casos de dudosa autenticidad del índice α ya que, como quiera que se presenta para porcentajes relativamente elevados de inerte añadi-

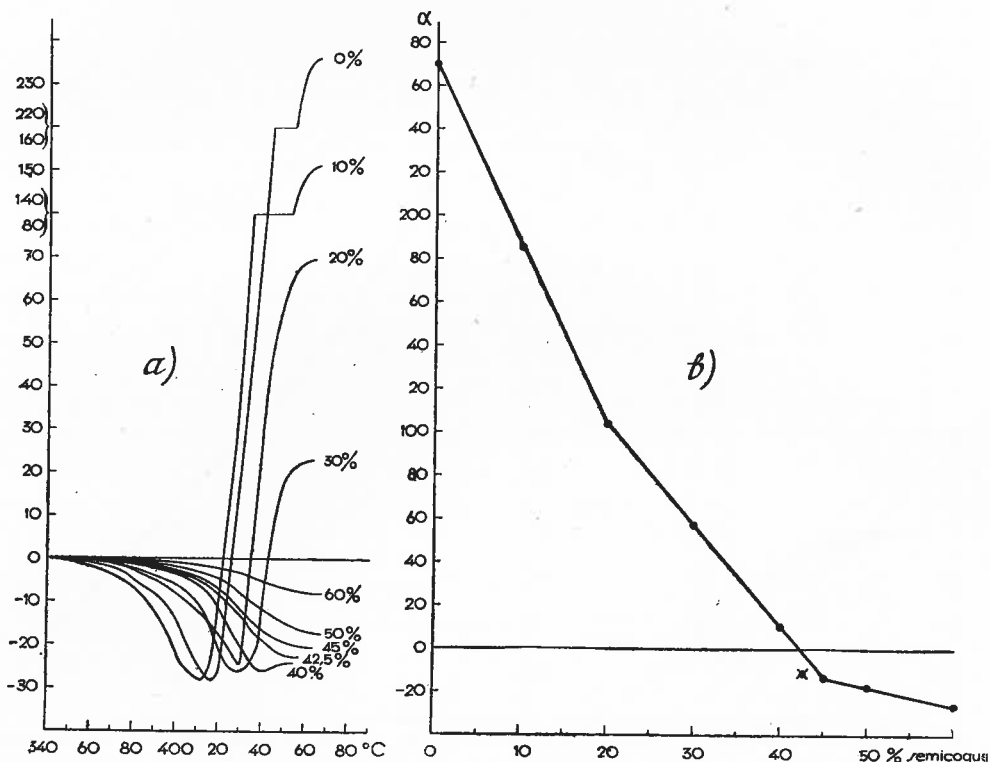


Fig. 22: Carbón n.º 404-E más semicoque

más de lo que permiten los errores de las determinaciones. Son los puntos señalados con un círculo y una cruz sobre él. Puntos de igual naturaleza se han obtenido en otros ensayos (figura 10, fracción 14; figura 16, 40 %; figura 18, 45 %; figura 19, 35 %, y figura 21, 40 %), que son aquellos donde cabe la posibilidad de que la determinación del índice α como expresión del verdadero hinchamiento no sea correcta. Se trata de

do, es posible que mientras dura este pequeño hinchamiento aparente, el lápiz, que aún no había llenado los huecos que existen entre él y el tubo, hinche ahora transversalmente, deteniéndose el hinchamiento por haberse alcanzado la temperatura de coagulación T. cuando todavía no se ha llenado la totalidad de dichos huecos. En este tipo de ensayos no se logra, sin embargo, la extracción del lápiz como tal a la ter-



ERRATAS ADVERTIDAS

En la página 35, línea 18 de la primera columna dice figura 21 y debe decir figura 20.

En la página 38, línea 13 de la primera columna dice figura 6-b y debe decir figura 8-b.

minación de los mismos. Se ha efectuado un cálculo para obtener el verdadero hinchamiento para estos casos, pero la fórmula obtenida que, por la naturaleza del fenómeno, no deja de ser una aproximación, es un tanto engorrosa y, creemos, de utilización innecesaria. Se obtiene buena concordancia si en tales casos en que el hinchamiento aparente sea inferior a una unidad de la escala, se sustituye el índice α teórico

no presentarse la rama ascendente de la curva dilatométrica, pero es posible que el lápiz haya sufrido un pequeño hinchamiento transversal en los últimos momentos. También en estos casos constituye una buena aproximación el tomar como índice α la mitad del teórico. En algunos de estos ensayos no se consigue fácilmente la extracción del lápiz.

Creemos que con este modo de proceder

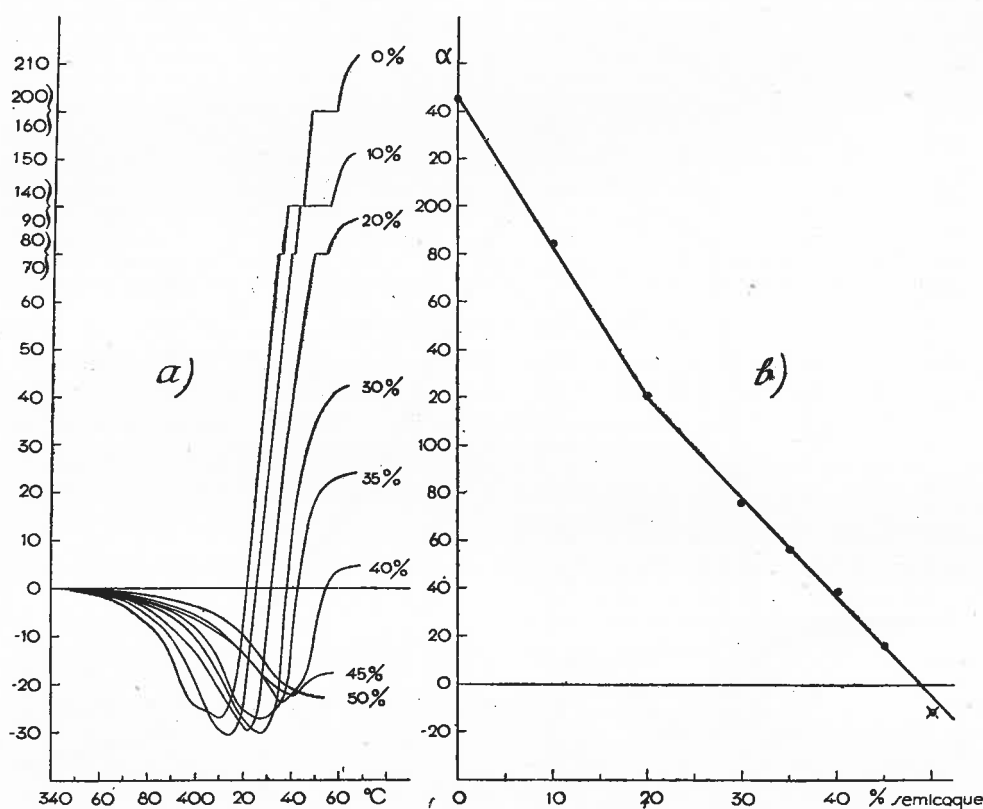


Fig. 23: Carbón n.º 267 más semicoque

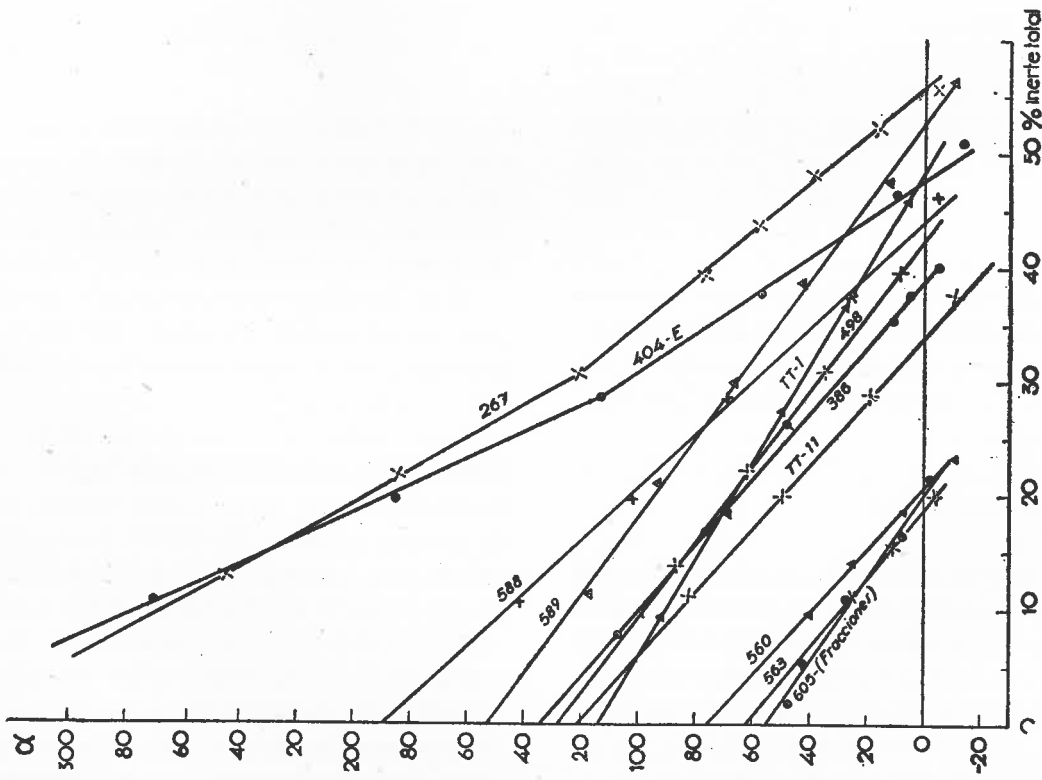
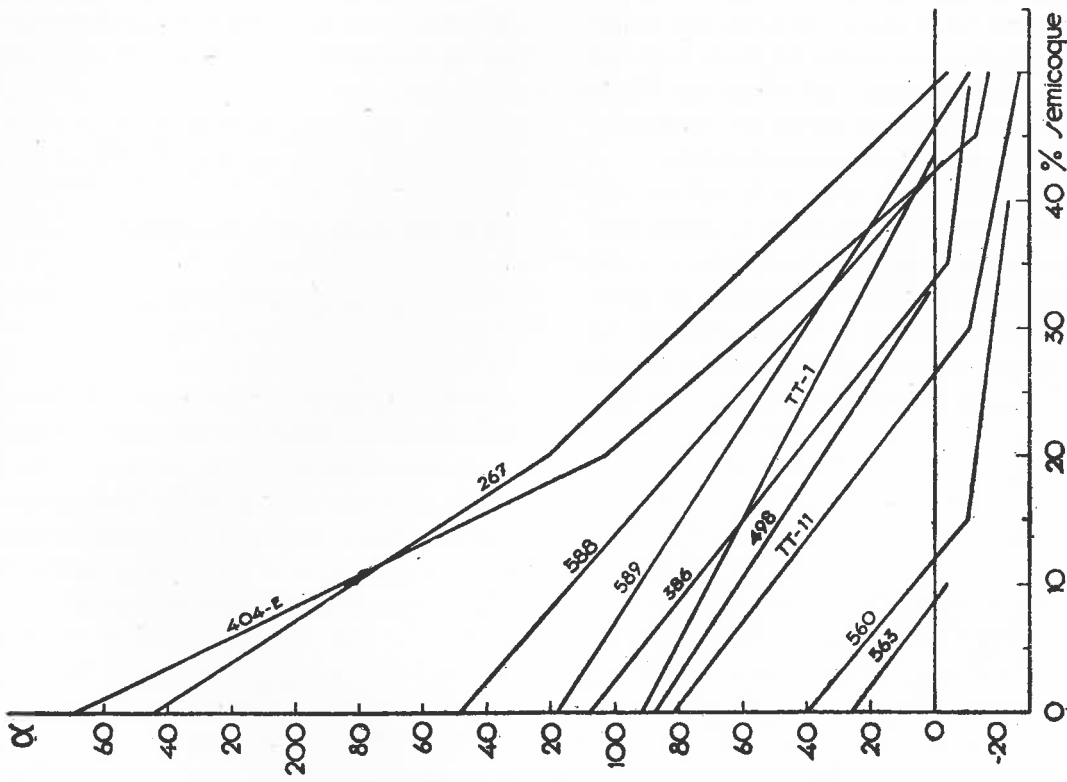
por la mitad de su valor, como se aprecia en las figuras citadas.

El otro caso en que el índice α parece dar puntos fuera de línea se presenta en los ensayos que conducen a curvas que carecen de rama ascendente, cesando el movimiento del pistón, casi bruscamente, antes de que se alcance la temperatura T_c deducida de los demás ensayos de la misma serie. Son casos de hinchamiento negativo, por

se evita la interpretación del índice de hinchamiento para estos casos dudosos, que son, naturalmente, los únicos que pueden presentarse como tales.

* * *

Como se ha visto por los resultados obtenidos de las mezclas con semicoque, la relación entre el índice α y el tanto por ciento



de inerte añadido es perfectamente lineal. En la figura 24 reunimos la totalidad de los ensayos realizados sobre tal materia y que ya han sido expuestos aisladamente. Como ordenadas tomamos el índice α y como abscisas el porcentaje de inerte añadido.

En la figura 25 se expone la relación entre el índice α y el porcentaje de inerte total (materia mineral del carbón coquizante más el semicoque añadido) para todos los ensayos representados en la figura anterior, representando además en la presente la recta de la figura 6-b correspondiente a las frac-

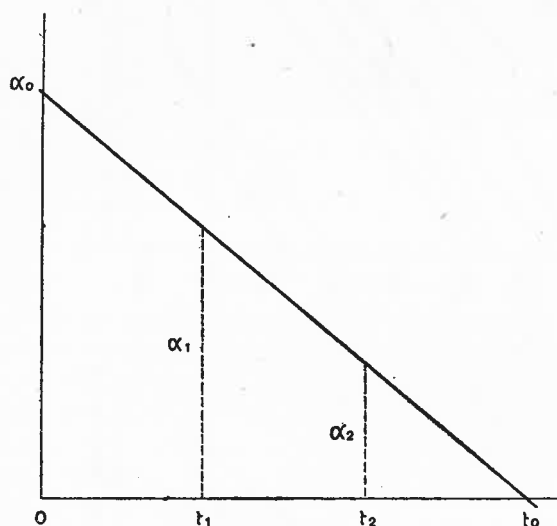


Fig. 26

ciones densimétricas de uno de los carbones descritos. Para estas fracciones se ha tomado como materia mineral su contenido en cenizas, el cual se considera como inerte total en la figura 25.

Sean (figura 26):

- α_0 el índice de hinchamiento del carbón libre de materia mineral,
- α el índice correspondiente al carbón con el $t\%$ de estéril,
- α_1 y α_2 los índices correspondientes a contenidos en estéril de t_1 y $t_2\%$, respectivamente.

La ecuación de la recta que expresa la relación entre el índice α y el porcentaje de inerte total será:

$$\alpha - \alpha_1 = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{t_1 - t_2} (t - t_1)$$

de la que, para $t = 0$, se deduce:

$$\alpha_0 = \alpha_1 + \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{t_1 - t_2} (-t_1)$$

que es la expresión del índice de hinchamiento del carbón libre de materia mineral.

Si se conoce el tanto por ciento de estéril t_0 necesario para anular justamente el hinchamiento, se puede hacer en la expresión anterior $\alpha_2 = 0$ y $t_2 = t_0$, con lo que dicha expresión se transforma en la

$$\alpha_0 = \alpha_1 \frac{t_0}{t_0 - t_1}$$

y en general

$$\alpha_0 = \alpha \frac{t_0}{t_0 - t}$$

que indica que el hinchamiento α_0 del carbón libre de materia mineral se obtiene multiplicando por la fracción $t_0/(t_0 - t)$ el índice de hinchamiento α obtenido para un contenido en estéril del $t\%$.

Si el hinchamiento se anulase justamente para un contenido en estéril del 100% se tendría $t_0 = 100$, con lo que la fracción anterior se convertiría en el conocido y tan utilizado factor $100/(100-t)$ para expresar, por ejemplo, las materias volátiles sobre combustible puro, es decir, sobre carbón libre de materia mineral. Este último factor no es válido para los ensayos dilatométricos puesto que en éstos, según hemos visto, el hinchamiento se anula ya para aproximadamente un 50% de estéril como máximo y, además, esta cantidad es muy variable y dependiente en primer lugar de la capacidad de coquización del carbón ensayado.

Claro está que a nuestros razonamientos para la determinación del índice de hinchamiento del carbón libre de materia mineral no puede atribuírseles mayor exactitud que la que corresponda a la suposición, que, en cierto modo, hemos demostrado, de que el semicoque en el dilatómetro actúa en contra del hinchamiento en la misma extensión que la materia mineral del carbón. Pero para fines prácticos basta con tal aproximación, y sería suficiente establecer una granulometría adecuada del semicoque usado en los ensayos para obtener de las relaciones lineales demostradas, además del hinchamiento del carbón libre de inerte, un valor para un «índice de aglutinación», es decir, el porcentaje de inerte total que anula justamente el hinchamiento.

Este índice de aglutinación puede obtenerse por extrapolación gráfica de la recta representada en la figura 26, obtenida con el número de ensayos que a juicio del operador fueran necesarios, o mediante la fórmula

$$t_0 = \frac{\alpha_1 t_2 - \alpha_2 t_1}{\alpha_1 - \alpha_2}$$

deducida de la ecuación de la recta, para cuyo uso serían solamente necesarios dos ensayos dilatométricos efectuados con cierta garantía, y cuyos valores α_1 y α_2 de los correspondientes índices de hinchamiento estuvieran lo suficientemente alejados para compensar los posibles errores de determinación. De todas maneras, la garantía sería

siempre mayor realizando tres o cuatro ensayos, según la precisión deseada, y determinando t_0 gráficamente.

Este método para la determinación de un índice de aglutinación del carbón nos daría un número más digno de confianza y más significativo que el método normalizado actualmente en vigor. El hecho de que tal índice no sea uno de los parámetros que entran en la propuesta de clasificación internacional de los carbones indica claramente que esta determinación, al menos como se realiza por el método de la B. S. I., ha caído en desuso, lo que no es de extrañar si se tiene en cuenta la gran cantidad de factores que hay que mantener constantes para obtener resultados dignos de confianza⁶.

Además, ¿por qué el índice de aglutinación de un carbón ha de determinarse utilizando un inerte (arena, bauxita fundida, carburo de silicio, caolín, etc.) que jamás se usará en los hornos de coque?. Mucho más lógico sería, a nuestro entender, que para tal determinación se emplease un inerte como coque, semicoque, antracita, mineral de hierro, o cualquier otro cuya adición pudiera mejorar la calidad del coque obtenido del carbón que se ensaye. Bastaría que la Organización Internacional de Normalización facilitase o estableciese uno de estos tipos de inertes para que, empleado en el dilatómetro a la granulometría que se estimase conveniente normalizar, sirviera para obtener las dos magnitudes t_0 y α_0 a que hemos hecho referencia.

EJEMPLOS DE APLICACION PRACTICA DEL INDICE α_0

Se ha podido comprobar que la situación de las curvas dilatométricas en la escala de temperaturas es uno de los datos más eficaces para predecir la calidad del coque industrial resultante del carbón sometido al ensayo Arnú. Así ocurre, como cita F. G. Kreulen⁷, que el desplazamiento de las curvas

hacia las temperaturas bajas, combinado con un fuerte hinchamiento, indica un coque en agujas, mientras que los desplazamientos hacia las temperaturas altas, acompañados de bajo hinchamiento, señalan coques compactos.

Al realizar ensayos de mezclas de dos

carbones coquizantes puede presentarse el caso, sumamente claro, que indica la figura 27. A medida que aumenta la proporción del carbón que posee menor hinchamiento y cuya curva está emplazada en la zona de temperaturas altas, se observa perfectamente al desplazamiento total hacia estas temperaturas de la curva correspondiente a la mezcla ensayada, así como la disminución del

jas, y de 1,030 para el otro carbón unitario.

En la misma figura 27 representamos los valores del índice α en función del porcentaje del carbón que posee menor hinchamiento, notándose en la curva representativa de dicha función la presencia de un mínimo correspondiente a la proporción del 90% del carbón últimamente citado.

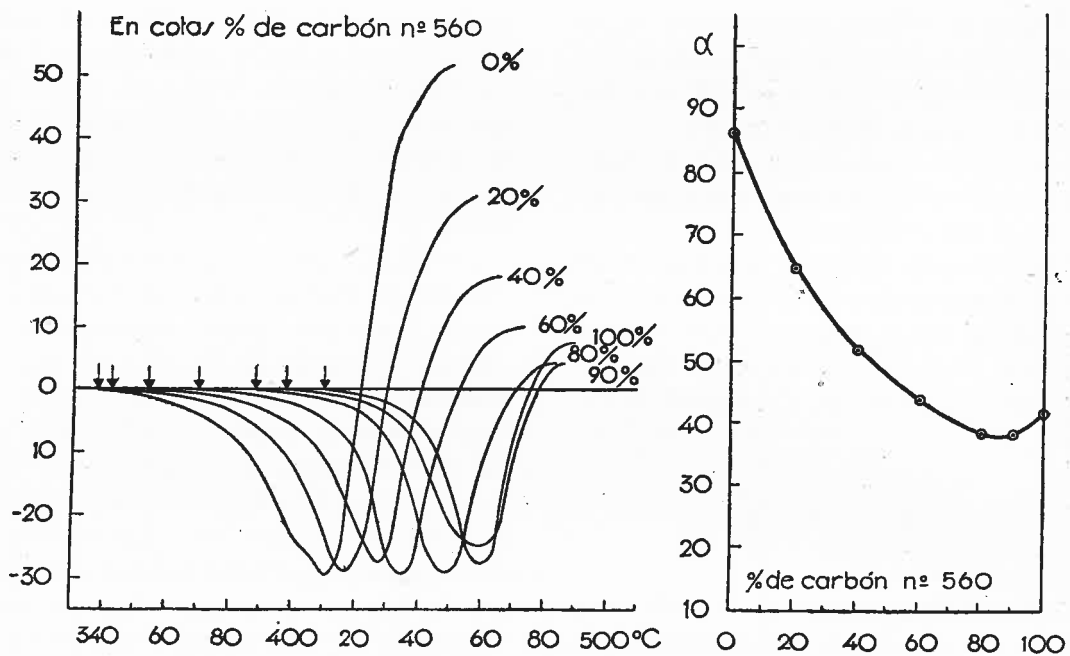


Fig. 27: Mezcla de carbones n.ºs 425-E y 560

hinchamiento. Correlativamente, los ensayos industriales* demuestran que la solidez del coque va aumentando con la proporción del carbón con menos hinchamiento Arnu. Indicaremos, a título de información, que en el ejemplo a que se refiere la figura 27, los valores útiles⁸ de los coques fueron de 0,725 para el carbón con mayor hinchamiento y curva hacia las temperaturas ba-

Como quiera que la curva dilatométrica obtenida con esta mezcla está más desviada hacia la zona de las temperaturas altas (aunque solo ligeramente) que las demás curvas, es de esperar que, efectivamente, sea la proporción citada la más conveniente para fabricar coque a partir de los dos carbones considerados.

Pero ocurren también casos como el

* La coquización de los carbones a que se hace referencia en lo que sigue, fué llevada a cabo por el procedimiento de «ensayos en caja», tal como se describe en el Boletín Informativo del Instituto Nacional del Carbón, número 11 (septiembre de 1953), pág. 31, con la única salvedad de que el carbón se coquizó con su propia humedad higroscópica.

que se representa en la figura 28. El carbón A tiene mayor hinchamiento que el B, pero el desplazamiento hacia la zona de las temperaturas altas de la curva del segundo carbón no es más que de unos pocos grados (de cinco a diez en el caso que examinamos) respecto a la del primero. En tales condiciones, las curvas correspondientes a las mezclas de los dos carbones unitarios mues-

mezcla capaz de producir el coque de mayor solidez o valor útil más elevado.

Para llegar a la predeterminación de tal mezcla mediante el estudio dilatométrico, es necesario recurrir a la variación de la otra magnitud que caracteriza en el aparato Arnul la calidad del coque, es decir, del hinchamiento. El valor útil del coque será tanto mayor cuanto menor sea el hinchamiento

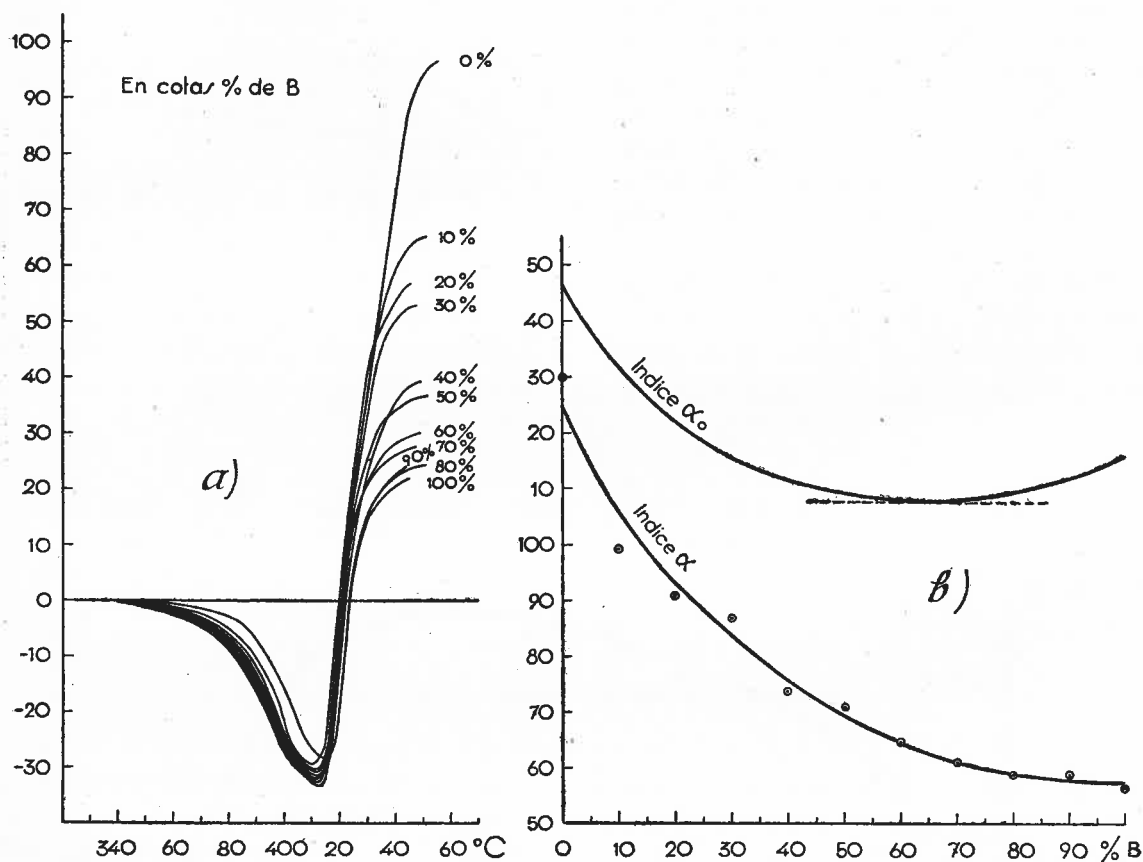


Fig. 28

tran superposiciones y retrocesos que impiden la aplicación de la sencilla regla indicada en el caso anterior. Aunque, desde luego, existe una tendencia al desplazamiento, hacia la derecha, de las curvas obtenidas a medida que aumenta la proporción de carbón B, los desplazamientos son, en todo caso, tan insignificantes que es imposible deducir de este hecho cual será la

(coque más compacto), correspondiéndose el máximo de dicho valor con el mínimo de hinchamiento, siempre y cuando, claro está, que este hinchamiento sea positivo y superior a un determinado valor que asegure una buena fusión de la mezcla.

En la figura 28-b se representa el índice α de cada mezcla en función del tanto por ciento de carbón B (curva inferior). Según lo

que acabamos de decir, los coques más compactos deberían corresponder a una de las mezclas con el 80, 90 ó 100 % de carbón B. Y sin embargo, no es ésto lo que ha ocurrido en la práctica.

La explicación es bien clara: el carbón B, por motivos que no es del caso indicar aquí, se utilizó con un contenido en cenizas del 17,5 %, en tanto que las cenizas del otro carbón de la mezcla eran solamente del 5,9 por ciento. Los índices de hinchamiento resultan pues muy influenciados por el aumento progresivo de materia mineral en las mezclas ensayadas. Como vamos a ver a continuación, la consideración del índice α_0 , es decir, del hinchamiento del carbón libre de materia mineral, resuelve completamente la dificultad.

Para calcular los diferentes índices α_0 , hemos tomado de los análisis de cada mezcla los porcentajes en cenizas y en azufre total, representados en la figura 29, y he-

por regresión. Con los valores que en estas rectas corresponden a las diferentes mezclas, se ha calculado la materia mineral de cada

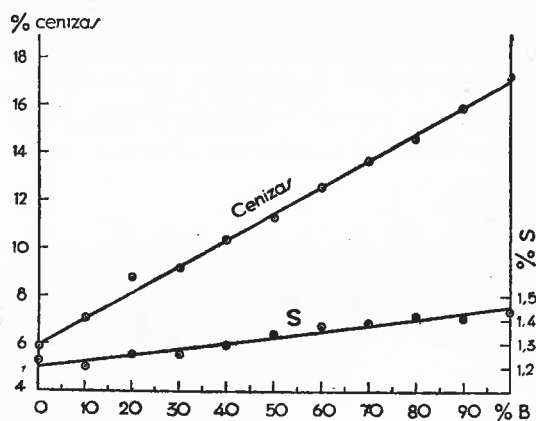


Fig. 29

una por aplicación de la fórmula de Parr.

Aceptando como auténticos los valores de α deducidos de la curva inferior de la

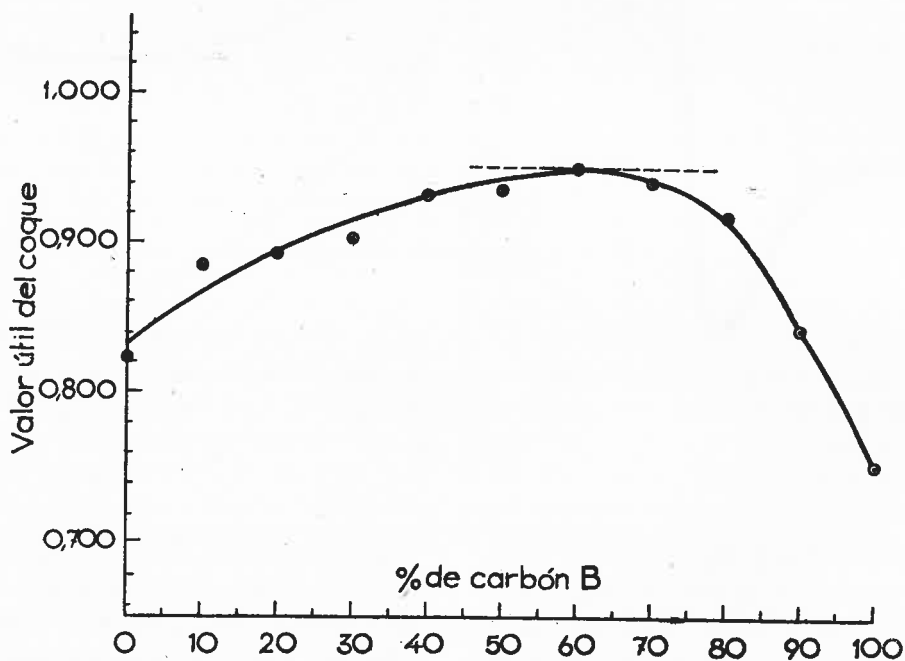


Fig. 30

mos considerado como valores verdaderos los correspondientes a las rectas cuyas ecuaciones se han obtenido mediante el análisis

figura 28-b, se han calculado los valores de los índices de hinchamiento libres de materia mineral por aplicación de la fórmula

correspondiente a la ecuación de la recta esquematizada en la figura 26

$$\alpha_o = \alpha + mt$$

En esta fórmula, α representa el índice de hinchamiento correspondiente a una mezcla con el $t\%$ de materia mineral, y m la pendiente de la recta (tomada con signo positivo). Por ser desconocida esta pendien-

para m como pendiente media de las rectas de la figura 25, tiene, digámoslo así, un amplio margen de seguridad, ya que si se tomasen las pendientes mínima ($m = 2,5$) o máxima de dichas rectas ($m = 4$), valores, por otra parte, los menos probables, el mínimo de la curva α_o oscilaría entre el 50 y el 75 $\%$ de carbón B. Pues bien, para las mezclas con estos porcentajes de carbón B es cuando se han obtenido en la práctica los

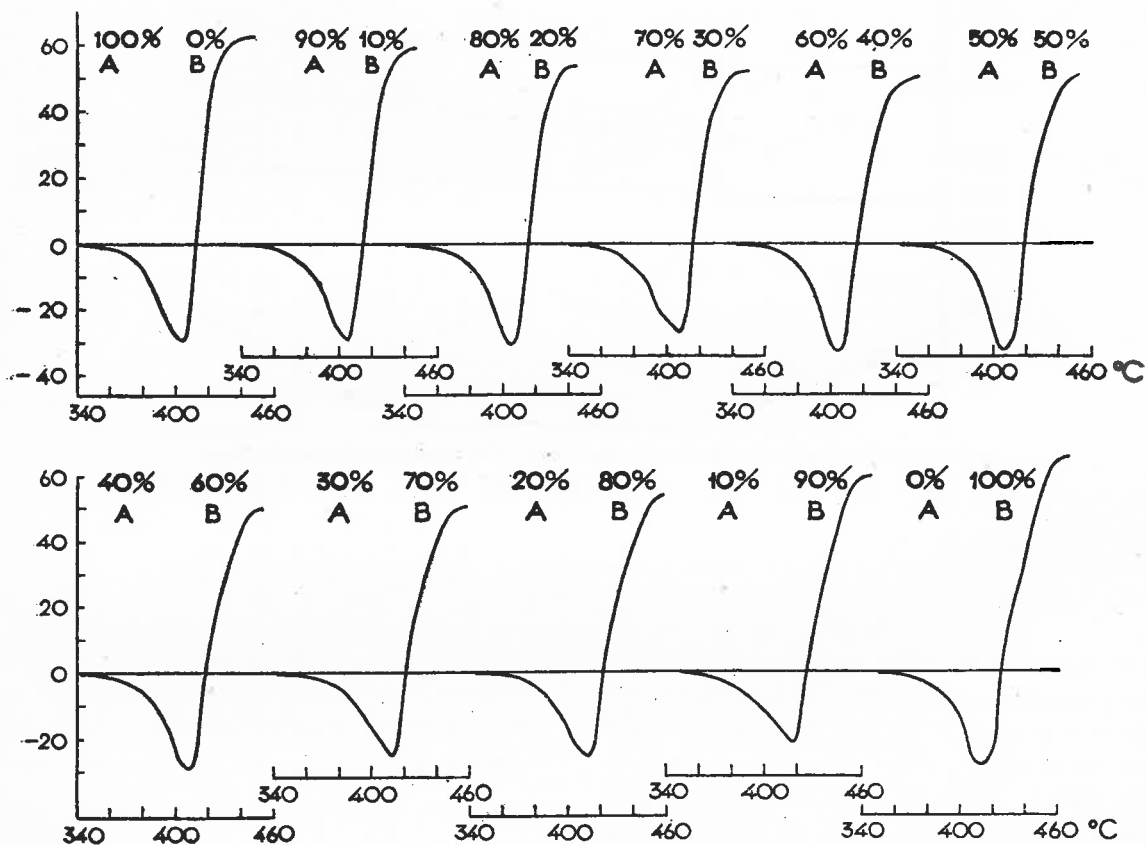


Fig. 31

te, se ha tomado $m = 3$, que es el valor medio de la pendiente de todas las rectas representadas en la figura 25.

De esta manera, los valores obtenidos para los índices α_o de las diferentes mezclas consideradas se disponen según la curva superior de la figura 28-b, que presenta un mínimo para las mezclas que contienen del 60 al 70 $\%$ de carbón B. El valor tomado

coques de mayor valor útil, tal como representa la figura 30, pues aunque en ella se señala el máximo para una mezcla con el 60 $\%$ de carbón B, puede estimarse la zona del 50 al 70 $\%$ de tal carbón como la óptima para la obtención del mejor coque a partir de los carbones señalados.

Las figuras 31 a 34 se refieren a otro caso de mezclas binarias, efectuadas ahora con

dos carbones cuyos contenidos porcentuales en cenizas difieren solo en dos unidades escasas: 9,50 para el carbón A y 7,90 para el B. La figura 31 reproduce las curvas Arnu

tro curvas de la figura 32 indica que, por existir un desplazamiento monótono de las temperaturas (reblandecimiento, descenso máximo del pistón, y detención de éste) ha-

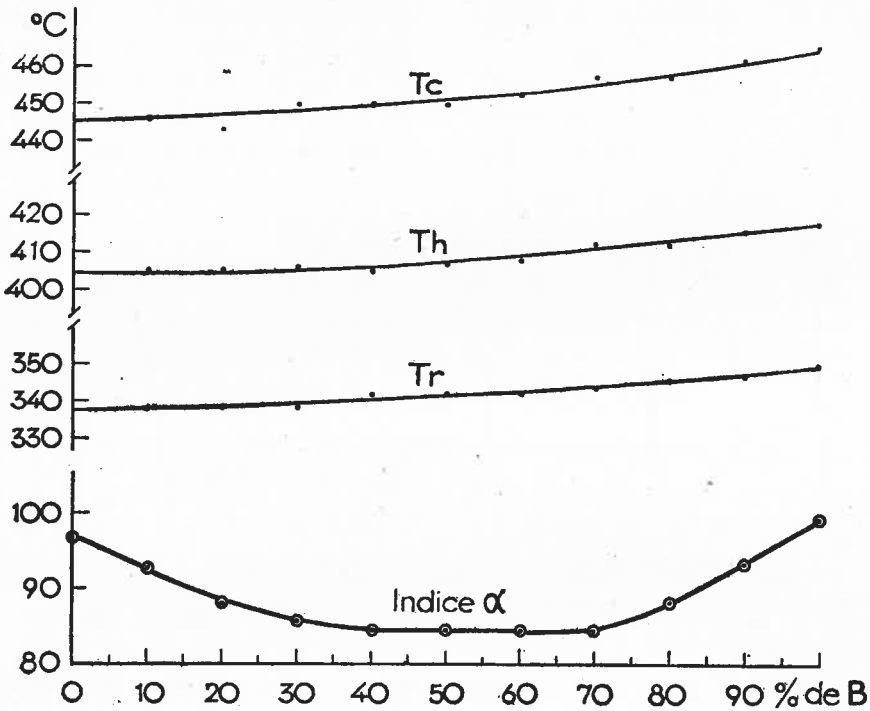


Fig. 32

correspondientes a las mezclas con diferentes porcentajes del carbón B. Se observa en ella que la capacidad de coquización pasa por un mínimo muy poco pronunciado, y que existe un ligero desplazamiento progresivo de las curvas hacia las temperaturas altas. En la figura 32 se aprecian mejor las variaciones de las temperaturas de los puntos notables de las curvas correspondientes a cada mezcla, así como las del hinchamiento que han experimentado éstas.

La curva α delimita perfectamente un intervalo de mezclas (del 40 al 70 % de carbón B) con hinchamiento mínimo, que será la zona de los mejores coques que pueden obtenerse a partir de mezclas de los dos carbones ensayados.

La consideración simultánea de las cua-

cia las temperaturas altas al aumentar el contenido de carbón B en la mezcla, el coque tendrá tanta mayor solidez o valor útil más elevado cuanto más rica en este com-

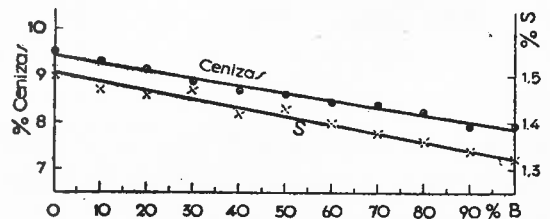


Fig. 33

ponente sea la mezcla, si el índice de hinchamiento se mantuviese constante. Pero la curva de este índice indica una disminución hasta un 40 % de carbón B, luego una zona

constante, desde el 40 al 70 % de este carbón, y luego un aumento progresivo a partir de este último porcentaje. Por lo tanto, hasta el 40 % de carbón B se combinan favorablemente el desplazamiento de temperaturas y la pérdida de hinchamiento, por lo que la solidez o el valor útil del coque debe ir aumentando hasta dicha proporción. A partir del 40 % de carbón B, el índice α permanece constante mientras continúa el

los incrementos del índice α , podemos suponer que el coque empeora o, a lo más, permanece de calidad constante.

La figura 33 contiene los valores de los porcentajes en cenizas y en azufre total de cada mezcla. Como en el ejemplo anterior, tomamos como verdaderos valores los dados por las rectas de regresión, mediante los cuales calculamos la materia mineral (Parr) de cada mezcla. Aplicando la fór-

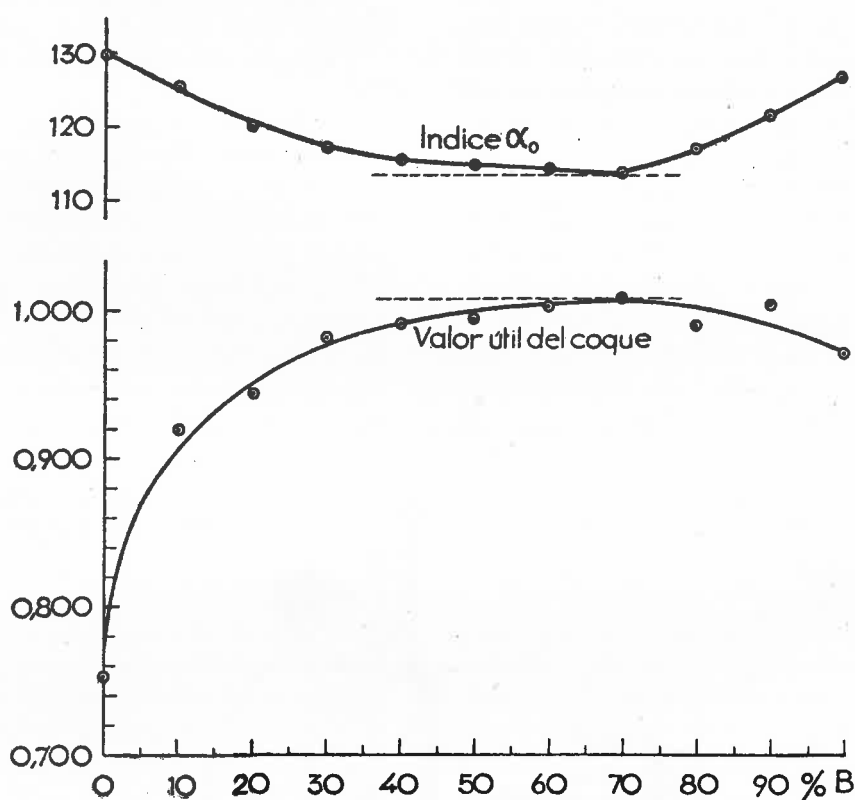


Fig. 34

desplazamiento hacia las temperaturas altas, por lo que debe seguir mejorando la calidad del coque, aunque más lentamente. Finalmente, más allá del 70 % de carbón B los dos fenómenos determinantes de la resistencia mecánica del coque se encuentran en oposición, por lo que quedará dudosa la calidad del coque procedente de tales mezclas si bien, por ser pequeños los desplazamientos de temperaturas y bastante apreciables

mula $\alpha_0 = \alpha + 3t$, calculamos, como antes, los índices α_0 de cada mezcla. Se obtiene así la curva α_0 de la figura 34, en la que queda precisado un mínimo de hinchamiento correspondiente a la mezcla con el 70 % de carbón B, que debe dar el coque de mayor valor útil.

En la figura 34 se ha representado también la curva del valor útil de los coques obtenidos en la carbonización industrial de

las mezclas, en función del porcentaje de carbón B en cada una de ellas. Se observa perfectamente un crecimiento rápido en el intervalo de 0 a 30 % de carbón B, una elevación suave entre el 30 y el 70 % de este carbón y luego un suave decrecimiento final, todo ello en perfecta concordancia con nuestros anteriores razonamientos.

No cabe duda pues que existe una relación entre el valor útil del coque y el índice α_0 del carbón, notándose cierta simetría entre las curvas que representan ambas funciones, respecto a una recta paralela al eje de abscisas, con la natural salvedad de ser diferentes la magnitud y naturaleza de las ordenadas de ambas funciones.

BIBLIOGRAFIA.

- ¹ Gillet, A. y Koutcherenko, I., *Rev. univ. min.*, 5, **12**, 436-452, 1949.
- ² Kreulen, J. W., *Fuel*, 29, **5**, 112-117, 1950.
- ³ Arnu, Ch., *Chim. et Industr.*, 32, **2/3**, 1934.
- ⁴ Berkowitz, N., *Fuel*, 28, **5**, 97-102, 1949.
- ⁵ Parr, S. W. y Wheeler, W. F., *Univ. Illinois Bull.*, número 37, 1909, y Lowry, H. H.: *Chemistry of Coal Utilization*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1945, vol. I, pág. 487.
- ⁶ Pintado Fe, F.: *El Carbón*, Instituto Nacional del Combustible, Madrid, 1949, t. I, pág. 77.
- ⁷ Kreulen, F. G., *Chemische Technik*, 5, **12**, 181-186, 1950.
- ⁸ Pintado Fe, F. y García-Conde, J. R., *Bol. Inform. Inst. Nac. Carbón*, I, **5**, 5-15, 1952.

