

# MEDIDA DEL GRADO DE ENVEJECIMIENTO DE ESCORIAS DE ACERIA

JULIAN GARCIA CARRETERO (\*)  
ENRIQUE SANJUAN GONZALEZ (\*\*)

**RESUMEN.** Las escorias de acería LD, convenientemente machacadas y envejecidas, constituyen un árido que puede ser empleado en mezclas bituminosas y zahorras artificiales. En este trabajo, se comentan los principales métodos existentes para caracterizar el grado de envejecimiento alcanzado por una escoria, y se propone un nuevo método, muy simple, que permita al usuario de estos áridos comprobar rápidamente la homogeneidad y grado de envejecimiento del producto suministrado.

**ABSTRACT.** LD steelmaking slags that have been suitably crushed and aged, are aggregates that can be used in bituminous mixtures and crushed rocks. This work is a report on the main methods used in characterizing the degree of ageing in slags, and also proposes a new and very simple method which allows the user of these aggregates to rapidly check the homogeneity and degree of ageing of the delivered product.

## 1. INTRODUCCION

Por encargo de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, el Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX está desarrollando una norma de ensayo NLT, para la medida del grado de envejecimiento de las escorias de acería, obtenidas en convertidores de afino tipo LD.

Las escorias LD, una vez machacadas y convenientemente envejecidas, constituyen un árido, pesado y duro que puede ser empleado como árido grueso en mezclas bituminosas —especialmente en capas de rodadura—, y como árido en capas de zahorra artificial.

Su empleo se ve limitado, en muchos casos, por la incertidumbre que existe sobre su grado de envejecimiento y homogeneidad. El ensayo que se describe en este trabajo, pretende dotar a los usuarios de este árido de una herramienta que les permita caracterizar tanto la homogeneidad como el grado de envejecimiento de los suministros de escoria LD.

## 2. FABRICACION DE ESCORIAS DE ACERIA

El afino es el proceso empleado para la obtención del acero a partir de la fundición del alto horno. Para ello, es necesario disminuir el porcentaje de carbono —que provocaría una rotura frágil en el acero— y de las impurezas presentes más perjudiciales para las caracterís-

ticas del futuro acero. La escoria de acería LD es el subproducto resultante del afino.

En el convertidor LD (figura 1) se introduce la fundición, junto con chatarra y cal viva. El proceso consiste, en primer lugar, en la introducción de la lanza de oxígeno, que desciende al interior del convertidor. A continuación, se inyecta el oxígeno, con un aporte simultáneo de cal viva o dolomía. El silicio arde en primer lugar; seguidamente, se oxida el carbono; por último, el fósforo comienza a consumirse. Al final del proceso se retira la lanza y se inclina el convertidor. La escoria se vierte en cubas y, posteriormente, en un foso donde se enfría antes de ser machacada y almacenada.

La cal viva empleada en el proceso puede presentarse en forma de terrones de 5 a 50 mm, o en forma de filler —material que pasa por el tamiz de 0,08 mm de abertura—, dando origen a los procedimientos LD o LD.AC.

En el afino, según las diferentes cantidades de los elementos presentes, por cada tonelada de fundición se consumen de 75 a 80 kg de cal viva o dolomía calcinada, y se producen de 140 a 160 kg de escoria de acería (ref. 1).

## 3. COMPOSICION MINERALOGICA DE LAS ESCORIAS LD Y ENVEJECIMIENTO

Los tres elementos fundamentales en la composición de las escorias LD son CaO, SiO<sub>2</sub> y Fe.

Análisis realizados con difracción por rayos X muestran la presencia de los siguientes compuestos en estas escorias: ortosilicato de calcio SiO<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub> β, ferrita de calcio Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>Ca<sub>2</sub>, wustita FeO y óxidos de calcio, CaO, y de hierro, FeO.

(\*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. División de Firmes y Pavimentos. Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX (MOPT).

(\*\*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. División de Firmes y Pavimentos. Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX (MOPT).

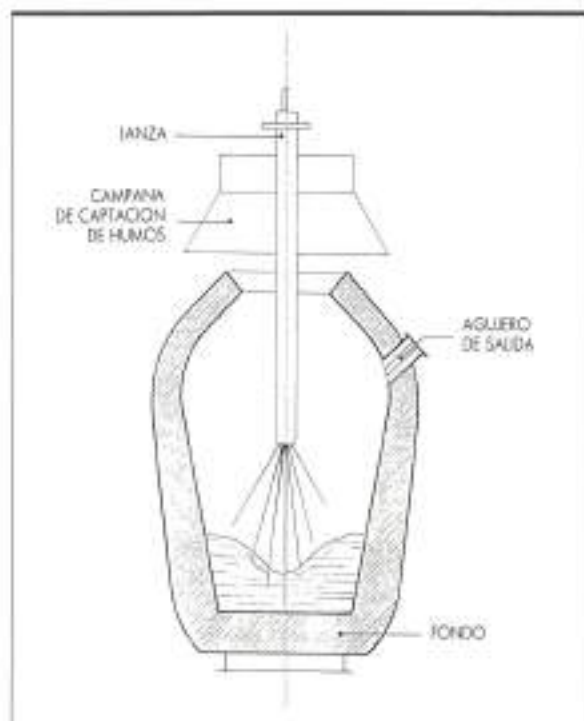


FIGURA 1. Esquema de un convertidor LD de lanza vertical (ref. 1).

La fase  $\beta$  del ortosilicato de calcio está estabilizada a causa del enfriamiento brusco de la escoria y de la presencia de fosfato estabilizante. Por esta razón, no aparece la fase  $\gamma$ , que es termodinámicamente estable, en lugar de la  $\beta$ , metaestable a la temperatura ambiente (ref. 1).

La disolución de la cal viva en la escoria es un fenómeno complejo que depende, fundamentalmente, de la cal —preparación y forma de adición al convertidor— y de las condiciones de contacto con la escoria, temperatura y composición.

La cal viva, que puede llegar a suponer el 12 % de la escoria, se encuentra presente en su interior en dos estados distintos:

- En forma de nódulos, impregnados o no de óxido de hierro y manganeso, rodeados de ortosilicato de calcio. Su tamaño es del orden de 500  $\mu\text{m}$  o más.
- En forma de cristales, de pocas micras de tamaño, uniformemente dispersos en el seno de la escoria.

La cal viva presente en la escoria ha estado sometida a temperaturas superiores a 1.150 °C, por lo que se encuentra cristalizada en forma cúbica, más compacta y densa que la estructura romboédrica normal (900-1.100 °C). La densificación, que es un proceso dependiente de la temperatura, alcanza su valor máximo a 1.740 °C, con una disminución de volumen del 43 % (ref. 2).

Las reacciones de hidratación de la cal viva, transformándose en hidróxido de calcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , se desarrollan lentamente debido a su compacidad. Esta reacción va acompañada de un aumento de volumen que produce la meteorización de los áridos de la escoria de acería. Por tanto, antes de utilizarlos, hay que asegurarse que esta reacción ya se ha producido, al menos, en un porcentaje significativo que nos permita no temer por el comportamiento futuro del firme. Esto se consigue mediante el envejecimiento de la escoria.

El proceso de envejecimiento de una escoria LD consiste en provocar las reacciones de hidratación, que originan la meteorización del árido, antes de su empleo en capas de firmes de carreteras. Para ello, se forman pilas de árido machacado que se mantienen a la intemperie, al menos durante un año. Para acelerar el proceso, se pueden regar las pilas con agua de río o mar.

La experiencia acumulada por el «Centre de Recherches Routières» CRR de Bélgica indica que si el contenido inicial de cal viva es inferior al 4,5 % —determinado según la ref. 3—, y la escoria permanece un año a la intemperie en clima lluvioso, se obtiene un árido suficientemente envejecido para su empleo en mezclas bituminosas y zaborras (ref. 4).

#### 4. METODOS PRACTICOS DE CARACTERIZACION DEL GRADO DE ENVEJECIMIENTO

Los métodos empleados se pueden dividir en dos grupos:

- Métodos indirectos, que estudian la composición y propiedades de la escoria sin envejecer y el tiempo de envejecimiento.
- Métodos directos, que estudian la escoria ya envejecida.

Los métodos indirectos determinan el contenido de CaO presente en la escoria sin envejecer; para ello, existen varios ensayos (ref. 2):

- Determinación del CaO libre por el método del azúcar. Es una variante de la norma NBN B-13-022 «Essais des chaux de construction-Méthodes d'essais-Teneur conventionnelle en oxyde de calcium ou hydroxyde de calcium» (1976).

Este método consiste en la medida de la cantidad de ácido clorhídrico necesario para neutralizar una disolución alcalina de calcio. Ésta se ha formado añadiendo azúcar a una muestra de escoria LD, después de la hidratación del óxido de cal presente (ref. 2).

- Contenido de CaO libre por el método de Franke, por extracción del CaO con acetilacetato de etilo en presencia de isobutanol (ref. 5).
- Contenido de CaO libre por el método del CRM «Centre de Recherches Metallurgiques». Se basa en la extracción de CaO libre en una mezcla caliente de glicerina y etanol seguido de una neutralización alcohólica con acetato amónico (ref. 3).

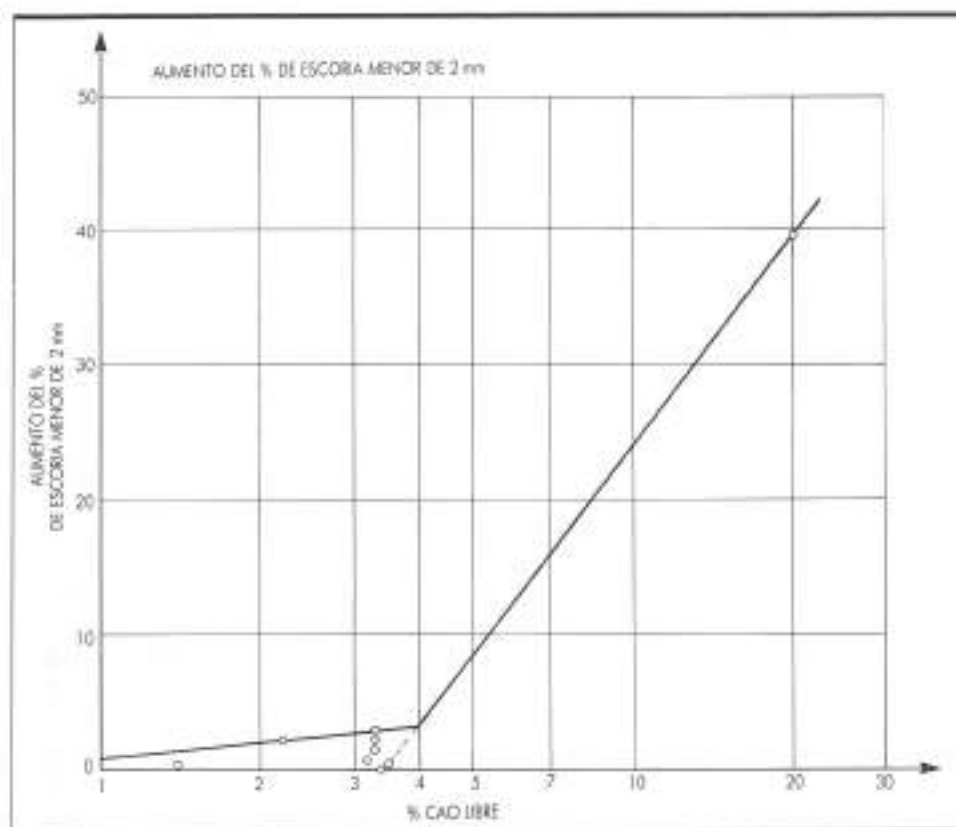


FIGURA 2. Relación entre el aumento del porcentaje de escoria menor de 2 mm después de 14 días de inmersión en agua a 70 °C y el contenido de CaO libre (ref. 4).

Los resultados obtenidos con estos tres métodos son parecidos. De todas formas, el método del CRM proporciona valores ligeramente inferiores a los otros dos.

En estos ensayos, conviene tener en cuenta que si no se emplea un disolvente del CaO muy selectivo, además del CaO, se pueden disolver otros óxidos. Esto puede inducir a error al obtenerse valores de CaO mayores de los reales. Por esta razón, en la referencia 2 se recomienda el método del CRM.

Una alternativa a la determinación del CaO en la escoria sin envejecer es el ensayo de meteorización propuesto por F. Choquet (ref. 2,4). Consiste en someter una muestra de óxido, sin envejecer, a una inmersión en agua a 70 °C durante 14 días. El resultado del ensayo se expresa por el porcentaje de piedras mayores de 2 mm que, tras la inmersión, se transforman en piedras inferiores a dicho tamaño. En la figura 2, se relaciona este porcentaje y el contenido de CaO según el método CRM.

Como valores orientativos, se considera apta una escoria de acería sin envejecer cuyo contenido de CaO sea inferior al 4,5 %, o bien, aquella cuyo porcentaje de meteorización no exceda del 2 ó 3 % (ref. 4).

En los métodos indirectos se determina el tiempo de envejecimiento necesario de forma empírica. El envejecimiento se realiza en pilas a la intemperie, que pueden regarse con agua de río o de mar. Según la intensidad

del riego, la lluvia y la temperatura se necesitan tiempos comprendidos entre 9 meses y un año y medio. La observación de los lixiviados puede, también, ayudar a determinar el tiempo preciso. La experiencia indica que una escoria de acería sin envejecer apta —CaO inferior al 4,5 %— está adecuadamente envejecida si se mantiene un año apilada a la intemperie.

Los métodos directos determinan el hinchamiento potencial de una zahorra con escoria envejecida tras un largo período de inmersión en agua —3 a 6 meses—. Los resultados obtenidos son poco precisos y tienen grandes dispersiones. Además, el tiempo necesario para llevar a cabo el ensayo lo hace poco práctico.

Un método acelerado, propuesto por André Verhasselt (ref. 7), emplea el procedimiento descrito en la referencia 6 para determinar la dilatación volumétrica de probetas de mezcla bituminosa —probeta del ensayo Marshall, compactada al 97 ó 98 % de densidad Marshall— con escoria envejecida. Las probetas se saturan y luego se conservan 7 días sumergidas en agua a 40 °C, midiéndose su aumento de volumen. Se considera que el grado de envejecimiento de la escoria es aceptable si la dilatación volumétrica es menor del 1 %. Evidentemente, cuanto mayor sea este valor, menos envejecida se encontrará la escoria.

Otro método acelerado, propuesto por J. J. Emery (ref. 8), emplea probetas de zahorra realizadas según el

proceso del ensayo Procter Normal. Las probetas se conservan en su molde y se introducen en un baño de agua a 82 °C durante 7 días, midiéndose, después, la expansión longitudinal que han experimentado. Se ha comprobado que la expansión medida en estas condiciones es el doble de la que hubiese experimentado por inmersión en agua a 20 °C durante 500 días. No se indican valores de aceptación, pero los resultados obtenidos oscilan entre el 3 y 6 %, similares a los observados a largo plazo en los firmes.

### 5. METODO DE DETERMINACION DEL GRADO DE ENVEJECIMIENTO DEL C.E.C.

Este método está basado en una propuesta realizada por J. G. Carretero al CENIM (Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas), para la estimación del grado de envejecimiento alcanzado por escorias LD, sin envejecer, sometidas a la acción de aguas aciduladas.

Se trata de un método directo que se realiza sobre escorias de acería envejecidas. Se basa en la idea de provocar una hidratación acelerada de los restos de CaO sin hidratar remanentes en la escoria, determinando, a continuación, la meteorización producida en las piedras. Se obtienen así índices granulométricos que se pueden correlacionar satisfactoriamente con el grado de envejecimiento alcanzado por la escoria. La intensidad del proceso de hidratación es similar al que se produciría durante un año a la intemperie.

En este ensayo, varias muestras de 500 g de escoria de tamaño comprendido entre 5 y 10 mm se introducen en frascos de acero inoxidable que se enrasan con agua. Estos frascos se introducen en un autoclave en cuyo in-

terior se aplica una presión de 2 atmósferas durante 4 horas. Transcurrido este tiempo, se sacan las muestras, realizándose su análisis granulométrico por los tamices UNE 5 mm; 2 mm; 630 µm; 320 µm; 160 µm; y 80 µm. Los porcentajes correspondientes a las fracciones comprendidas entre 2 mm y 80 µm, y 630 µm y 80 µm se toman como índices granulométricos de envejecimiento. Al aumentar el grado de envejecimiento los dos índices disminuyen su valor. A falta de una mayor experiencia, se considera necesario, aunque no suficiente en todos los casos, que una escoria tenga un índice granulométrico de envejecimiento 2 mm/80 µm menor de 1 %, o bien, un índice granulométrico 630 µm/80 µm inferior al 0,5 %.

En la tabla 1, figuran algunos resultados correspondientes a escorias envejecidas en pilas o en laboratorio. En la figura 3, se representa la relación entre los índices propuestos y el tiempo de envejecimiento en autoclave a 1 atmósfera (muestras 1 a 6).

Se ha realizado un ajuste con una parábola de segundo grado para cada índice con resultados excelentes en ambos casos. Las ecuaciones son:

Índice 2 mm/80 µm:

$$I_1 (\%) = -0,296 (\log T)^2 + 0,122 \log T + 2,72 \quad (r^2 = 0,993; T \text{ en minutos})$$

Índice 630 µm/80 µm:

$$I_2 (\%) = -0,133 (\log T)^2 - 0,198 \log T + 2,01 \quad (r^2 = 0,996; T \text{ en minutos})$$

MUESTRA DE ESCORIA LD	ENVEJECIMIENTO	INDICES GRANULOMETRICOS	
		2 mm/80 µm %	630 µm/80 µm %
1	En envejecimiento	4,74	3,23
2	15 minutos en autoclave a 1 atmósfera	2,47	1,58
3	60 minutos en autoclave a 1 atmósfera	1,91	1,25
4	120 minutos en autoclave a 1 atmósfera	1,79	1,06
5	240 minutos en autoclave a 1 atmósfera	1,31	0,73
6	1.200 minutos en autoclave a 1 atmósfera	0,28	0,15
7	Unas semanas al aire	4,10	2,80
8	Más de año y medio a la intemperie	0,60	0,34
9	240 minutos en autoclave a 2 atmósferas (ensayo)	0,73	0,43

TABLA 1. Índices granulométricos de envejecimiento para diversos grados de envejecimiento de la misma escoria LD.

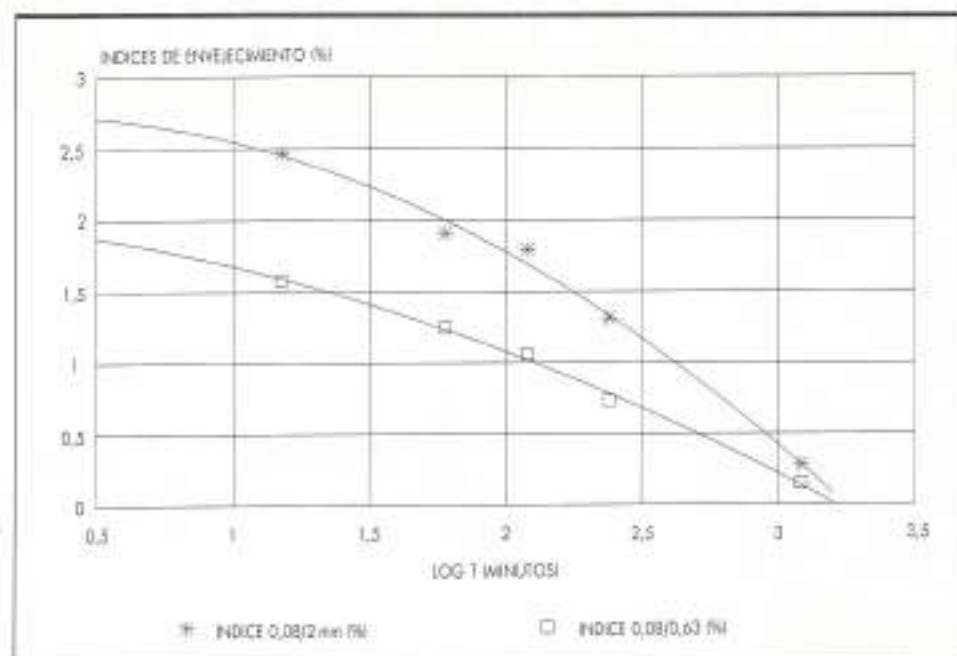


FIGURA 3. Relación de los índices de envejecimiento con el tiempo de envejecimiento en autoclave a 1 atm.

Se puede ver que  $I_1$  e  $I_2$  alcanzan el valor cero para, prácticamente, el mismo tiempo, alrededor de 30 horas.

Los valores de los dos índices, correspondientes a escorias envejecidas a la intemperie (muestra 8), e hidratación rápida, en autoclave, durante 4 horas a 2 atmósferas (muestra 9), son del mismo orden. Esto confirma la equivalencia aproximada de los dos procesos de envejecimiento.

El tiempo necesario para realizar un ensayo es menor de 5 días, necesitándose pocos medios: un autoclave, recipientes de acero inoxidable, tamices, una estufa y balanzas. Un solo operario puede realizar simultáneamente muchos ensayos con gran rendimiento.

## 6. CONCLUSIONES

Los métodos indirectos de valoración del grado de envejecimiento son útiles para el estudio y control de la producción de la escoria LD, pero carecen de interés para el usuario.

Los métodos directos acelerados —obtención de resultados en menos de 10 días—, basados en ensayos de hinchamiento (A. Verhasselt, J.J. Emery), se realizan sobre unidades de obra (mezclas bituminosas o zahorras artificiales), con dosificación ya establecida. Esto es debido a que los resultados de hinchamiento dependen tanto de la dosificación de mezclas y zahorras como de la proporción de árido de escoria presente. Por consiguiente, son muy útiles para estimar si el grado de envejecimiento que posee la escoria de acería es suficiente para el empleo concreto y la dosificación determinada en que se va a emplear.

El método directo del CEC se sitúa entre los dos procedimientos, indirectos y directos de hinchamiento acelerado. Se valora el grado de envejecimiento intrínseco

del material envejecido, independientemente del empleo posterior. El productor de escorias dispone de una herramienta para determinar la homogeneidad y envejecimiento alcanzado en sus stocks, facilitándole la determinación del tiempo de envejecimiento necesario. Además, este procedimiento tiene la ventaja de permitir al usuario comprobar rápidamente la calidad del producto suministrado.

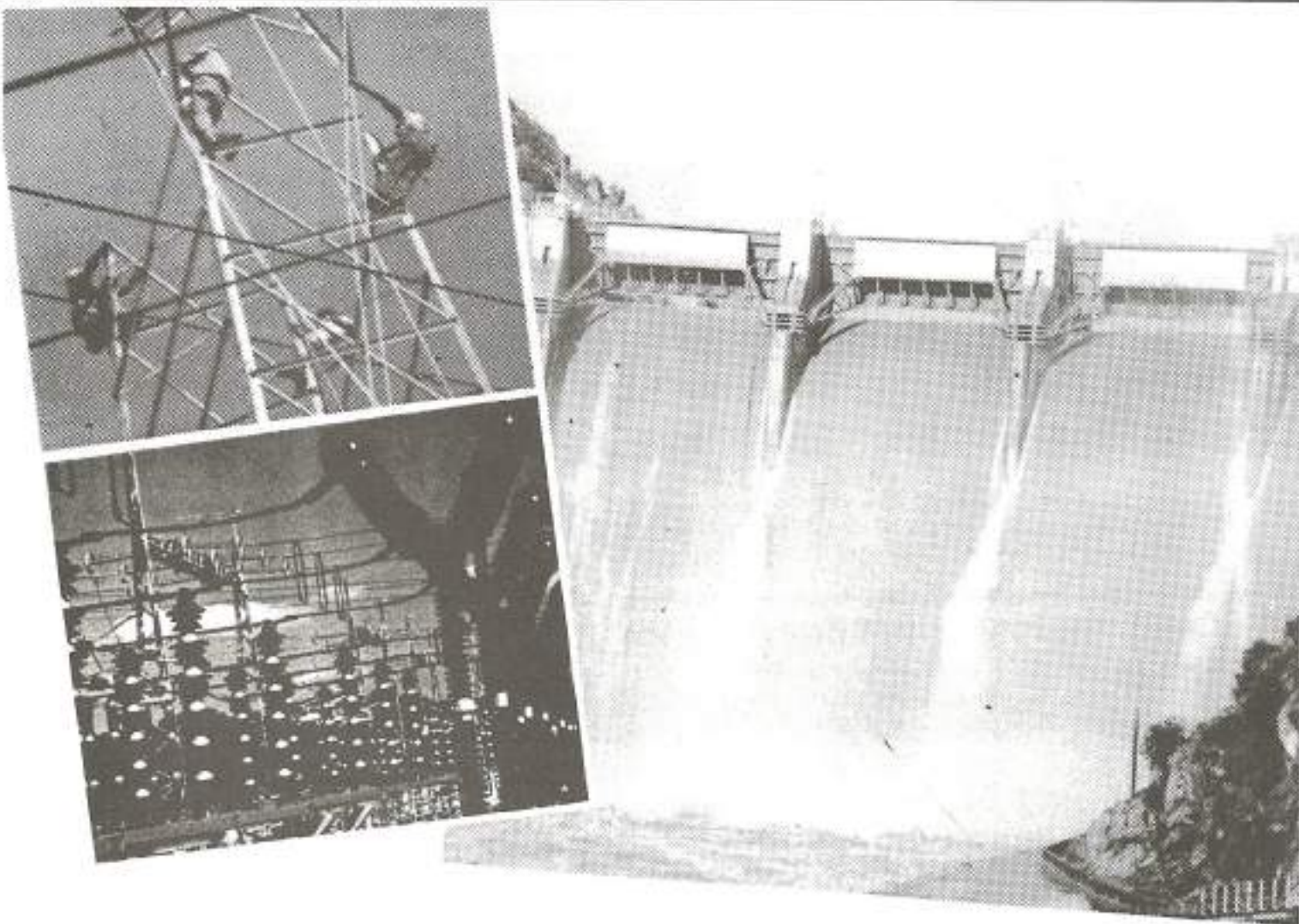
## 7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a don Francisco Pintado su colaboración en el trabajo experimental y sus recomendaciones en la definición del ensayo de determinación del grado de envejecimiento de escorias de acería.

## REFERENCIAS

1. Les escories LD; A. PANIS. Bull. de Liaison Labo. P. et Ch. N.º 83, 1976.
2. Etude en laboratoire des possibilités de valorisation des scories d'aciéries et des laitiers de haut fourneau en construction routière; F. CHOQUET. Centre de Recherches Routières CR 22/84.
3. Cahier des Charges-type 150 de l'Administration des Routes Belgique «Méthode d'essais» 04.07.
4. Stabilité dimensionnelle des scories LD; A. VERHASSELT et F. CHOQUET. La Technique Routière 4/1985 Bruxelles.
5. Investigation of the Franke Method of Determining Free Calcium Hydroxide and Free Calcium Oxide. E. E. PRESSLER, S. BRUNAUER, D. L. KANTRO. Analytical Chemistry, vol. 28, n.º 5/1956.
6. Cahier des Charges-type 150/Méthode d'essais. N 07.05, Ministère de Travaux Publics. Administration des Routes Belgique.
7. Enrobes hydrocarbonés a base de scories LD pour sous-couches. ANDRE VERHASSELT.
8. Slag utilization in Pavement Construction, J.J. EMERY, Extending Aggregate Resources ASTM STP 774 1982.

# Energía para el progreso y desarrollo de España



## *Empresas Eléctricas UNESA*

Las *Empresas Eléctricas* agrupadas en UNESA, se esfuerzan, día a día, por proporcionar un Servicio Eléctrico que contribuya eficazmente al progreso, la modernización, el desarrollo y la calidad de vida de los pueblos de España y de sus habitantes.

La cultura, el arte, el deporte y los grandes acontecimientos del 92 también forman parte de las preocupaciones y esfuerzos de las *Empresas Eléctricas*.

Estaremos con *Expoenergía* en Sevilla en la Expo'92. Y con el *Equipo Olímpico de Remo* en Barcelona'92.



Miembro de EXPOENERGÍA  
Participante Corporativo de





**PRINCIPADO DE ASTURIAS**

**CONSEJERIA DE INFRAESTRUCTURAS  
Y VIVIENDA**

**PLAN REGIONAL DE CARRETERAS**



**UTILIZACION DE ESCORIAS DE ACERIA COMO  
ARIDO EN MEZCLAS BITUMINOSAS**

**TRAMO EXPERIMENTAL**

**JORNADAS SOBRE MEZCLAS  
BITUMINOSAS ESPECIALES**

**Oviedo-24,25,26-Abril-1991**



**EDERSA**

**ESCORIAS Y DERIVADOS, S.A.**

DOMICILIO SOCIAL Y OFICINAS:  
Carretera de Avilés al Faro Peñas, Km. 1,5  
Parque de Lobos - Apartado 447 - 33400-Avilés  
Teléfonos: (98) 554 09 92 - 554 78 19  
Fax: (98) 554 89 45



EMPRESA COMERCIALIZADORA DE LAS ESCORIAS  
PROCEDENTES DE HORNOS ALTOS Y LD.

- Escorias clasificadas (cualquier uso).
- Escorias granuladas.
- Mezclas tratadas (escoria-escoria, grava-escoria, escoria-sosa).
- Escorias de Acería LD  
(para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales).

CENTROS DE PRODUCCION EN:

- Avilés (Parque de Lobos).
- Gijón (Somonte).