

se calcularon 3 revolturas con una granulometría tal que estuviera dentro del área favorable (3) del diagrama de referencia en la Tabla 7. Entre las tres mezclas, aquella que menos vacíos tuvo y que mostró una óptima compactación después de compactada en seco, fue conservada para los ensayos del concreto.

Luego, el concreto con un consumo de cemento-escoria de HF 40 BF de 350 kg sin aditivos, fue comparado con el concreto con un igual contenido de plastificante, pero con un contenido diferente de agente inclusor de aire, a fin de averiguar la cantidad adecuada para lograr un concreto con 4-5% de aire incluido.

La Tabla 8 muestra los detalles completos de esos ensayos preliminares y señala que la mezcla de agregado Núm. 3 con 32% de escoria granulada y pre-triturada produce la misma compactación óptima, que da el concreto con un consumo de cemento de 350 kg con un 0.15% de plastificante y 0.10% de un agente inclusor de aire, que satisface las condiciones impuestas.

Estos ensayos preliminares confirman además, que la resistencia a la compresión del concreto, disminuye a medida que el contenido de aire incluido aumenta, de acuerdo con la resistencia calculada por la razón

$$\frac{\text{agua + aire}}{\text{cemento}} \text{ a cemento}$$

Los ensayos mostraron que la manejabilidad del concreto es mejorada mediante la adición de un plastificante y unos agentes inclusores de aire. (Véase la Tabla TB 8).

La composición exacta de cada mezcla ha sido calculada tomando el peso bruto del concreto fresco, el peso de cada componente de la mezcla y el peso bruto de cada componente, mediante la fórmula clásica:

$$\frac{C}{BW_C} + \frac{A}{BW_A} + W + V = 1,000 \text{ litros}$$

C + A + W representan el peso de un metro cúbico de concreto.

C es el consumo de cemento en kg/m<sup>3</sup> de concreto fresco.

A es el peso volumétrico de los agregados en kg/m<sup>3</sup> de concreto.

W es el agua medida en l/m<sup>3</sup>.

V es el volumen de los huecos en l/m<sup>3</sup>.

BW<sub>C</sub> es el peso del cemento.

BW<sub>A</sub> es el peso de los agregados.

Este método de calcular ha sido aplicado a todas las revolturas de concreto. TB 9a sintetiza las composiciones y los resultados principales.

### 2.3.3.- Ensayes sobre el Concreto

En los ensayos se usó cemento de escoria de alto horno calidad 40 y cemento Portland de hierro núm. 40. Para hacer comparaciones, se fabricaron especímenes cúbicos de concreto sin agente inclusor de aire usando escoria de A.H. y agregados del Mosela, respectivamente.

Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 1-19, los cuales son un resumen de las propiedades del concreto endurecido con resistencia a la congelación y a los agentes químicos de deshielo.

La influencia del tiempo de endurecimiento sobre las propiedades del concreto también aparecen ilustradas por las figuras 1, 2, 9, 10, 11, 12, 16, 17, 18 y 19.

### 2.3.4.- Comentarios sobre los Resultados Obtenidos.

Los resultados indican que el concreto con un contenido de cemento de 325 kg/m<sup>3</sup> y con un contenido de aire incluido de 4-5% no satisface las normas de resistencia impuestas. Por otra parte, el concreto con un contenido de cemento de 350 kg/m<sup>3</sup> alcanza una resistencia de compresión del orden de 55 N/mm<sup>2</sup> para ambos grados de cemento usados, y la manejabilidad del concreto fresco está considerada en la clase C de consistencia.

La resistencia de compresión de los cubos elaborados con cemento Portland de hierro de grado 40, es ligeramente más alto.

La comparación entre el concreto de escoria total (S) y el agregado del concreto del Mosela (M) sin el aditivo, señala hacia una clara ventaja del concreto de escoria, a pesar de una relación agua/cemento menos favorable (S:R<sub>28</sub>=60.5 N/mm<sup>2</sup>).

M: R<sub>28</sub> = 53 N/mm<sup>2</sup>. La resistencia adicional debe, por lo tanto, ser atribuida a la escoria. Este hallazgo es confirmado por el cálculo teórico de la resistencia del concreto elaborado con agregados del Mosela, en función de la relación agua/cemento y de la calidad del cemento.

Considerando la progresión de la resistencia del concreto en función del tiempo, se obtienen los siguientes porcentajes promedio (fraguado R<sub>28</sub> = 100%)

$$R_7 = 75\%, R_{28} = 100\%, R_{90} = 112\%, R_{360} = 120\%. \text{ Figs. 1 + 2.}$$

Los valores de resistencia de flexión obtenidos corroboran los resultados favorables que ya se esperaban con los granulados triturados. Figs. 9 + 10.

La relación  $\frac{\text{Flexión a 28 días}}{\text{Compresión a 28 días}}$  es 0.141 para todos los ensayos.



La contracción medida hasta la edad de 90 días corresponde más o menos al concreto convencional, a pesar de que es ligeramente más alto con cemento de escoria de A.H. que con el cemento Portland de hierro. Fig. 16.

Simultáneamente se practicaron ensayos de resistencia de tensión directa, de módulo de elasticidad, de extracción, de resistencia a la congelación y al deshielo, (3% NaCl) en el Laboratorio de Bruselas del Centro de Investigación de la Industria del Cemento, y en el Laboratorio del Departamento de Puentes y Carreteras de Luxemburgo. Todos los resultados mostraron una buena concordancia Figs. 11 + 12.

Los módulos de elasticidad medidos coinciden (se traslapan) con los valores teóricos calculados obtenidos por la fórmula WALZ (Ver Tabla 9b).

$$E_F = \frac{1,000,000}{1.7 + \frac{300}{R}}$$

con R = resistencia a la compresión en  $N/mm^2$ .

Debe señalarse, al llegar a esta etapa, que los valores de resistencia de tensión directa obtenidos, son superiores por cerca 30% a aquellos que han sido determinados en Bélgica, con el concreto de pavimento de caminos Belgas.

Por una parte, esto es explicable por la presencia de granulados triturados y, por la otra parte, por la alta resistencia de la argamasa formada por el cemento y la escoria granulada y pre-triturada. La resistencia es tal que el punto de ruptura sobreviene en la piedra sin expulsarla completamente. Debe notarse que esto es una indicación obvia de que la calidad del concreto involucra un alto porcentaje de varillas de acero en el refuerzo continuo de los pavimentos de concreto, debido al hecho de que la fuerza de tensión que se necesita para romper el concreto es proporcional a su resistencia y debe ser soportada por las varillas.

El esfuerzo necesario para hacer que la varilla se mueva 0.05 mm dentro del concreto, durante el ensayo de extracción, es ampliamente más alto que el mínimo, es decir, 11,3  $N/mm^2$  en lugar de 7,5  $N/mm^2$ . Fig. TB 11.

Y respecto a los ensayos de congelamiento y deshielo, la pérdida de peso disminuye a medida que el contenido de cemento aumenta. Los resultados son ligeramente mejores con el cemento Portland de hierro que con el cemento de escoria de A.H. (Fig. 17).

Los valores de carbonatación mostrados en la Fig. 19 indican la influencia que tiene la cantidad y la calidad del cemento usado. La carbonatación es menos importante con el cemento Portland de hierro que con el cemento de escoria de A.H.

La ventaja de una inclusión de aire en el concreto es evidente por la

comparación que se ha hecho del concreto con y sin aire incluido, Fig. 17.

La resistencia contra la penetración del agua bajo presión satisface las normas del concreto a prueba de agua (penetración  $\leq 30$  mm) para un consumo de cemento de 350  $kg/m^3$  en adelante. Fig. 18.

### 3.- Aplicaciones Prácticas

#### 3.1.- Sección Experimental de Caminos en las Instalaciones ARBED Differdange

##### 3.1.1.- Características.

Con el propósito de confirmar los resultados de los ensayos de laboratorio mediante un proyecto experimental a gran escala, ARBED decidió construir una sección de carretera dentro de la planta usando la técnica de pavimentación con concreto de refuerzo continuo.

Las características principales de esta carretera son como sigue:

- Longitud	: 780 m
- Ancho	: 10 m
- Espesor de la losa	: 22 cm
- Composición del concreto	

375 kg de Cemento de Escoria de A.H.  
570 kg de escoria granulada y pre-triturada  
280 kg de escoria triturada de 4/8  
350 kg de escoria triturada de 8/12  
185 kg de escoria triturada de 12/16  
440 kg de escoria triturada de 16/32

175 l de agua (agua/cemento = 0.47)  
0.15% (0.563 kg) de plastificante  
0.1% (0.375 kg) de agente inclusor de aire.

- Refuerzo longitudinal "Tempoore" de acero procesado con adherencia mejorada:  $\varnothing 18$  mm, espaciados a cada 15 cm.

Punto de fluencia  $> 500 N/mm^2$

El concreto fue colado por una pavimentadora de cimbra deslizante, seguido por una segunda máquina para el estriado y curado de la superficie para evitar la desecación del concreto.



### 3.1.2.- Resultados de los ensayos sobre el concreto.

#### 3.1.2.1.- Resultado de los ensayos del concreto muestreado de una producción diaria.

Los resultados obtenidos encuadran perfectamente con aquellos obtenidos en el laboratorio: Tabla 10.

	Sitio	Laboratorio
1.- Resistencia a la compresión 28 días	53,7 N/mm <sup>2</sup>	54,5 N/mm <sup>2</sup>
2.- Resistencia a la flexión 28 días	6,4 N/mm <sup>2</sup>	6,9 N/mm <sup>2</sup>
3.- Resistencia a la tensión 28 días	2,8 N/mm <sup>2</sup>	3,05 N/mm <sup>2</sup>

#### 3.1.2.2.- Resultados de los ensayos sobre los núcleos tomados de las losas de la carretera (Véanse la Tabla 02 y las ilustraciones).

Los resultados obtenidos son ligeramente más altos que los resultados del laboratorio y en exceso según los requeridos para la construcción de carreteras de concreto.

### 3.2.- Otros Proyectos realizados

A pesar de que este estudio sólo está interesado en el desarrollo de un tipo de concreto apropiado para ser aplicado a la superficie de las carreteras, todos los demás tipos de concreto que comúnmente se usan en la construcción, o sea, de los grados de B 5 hasta B 45, fueron desarrollados como tipos de escoria total y han sido producidos industrialmente desde 1974.

Debido a la utilización de la escoria granulada y pre-triturada, el concreto con escoria total ha logrado magníficos comportamientos y ha llegado a ser apropiado para el bombeo, lo cual ha hecho posible su uso en una gran variedad de aplicaciones ordinarias del concreto, hasta septiembre de 1978 fueron producidas unos 220,000 m<sup>3</sup> de concreto de escoria total, y han sido usados en los siguientes proyectos importantes:

- 1.- Planta de Clinker para la manufactura de cemento Portland, "Intermo selle, S. A.", Rumelange, Luxemburgo. Cimientos: 9,000 m<sup>3</sup>.
- 2.- Extensión de LD-AC taller de fundición en ARBED, Instalaciones de Esch-Belval, Luxemburgo. Cimientos: 5,000 m<sup>3</sup>.
- 3.- Plantas de Energía, Dupont de Nemours, Instalaciones Contern, Luxemburgo.

4.- Alto Horno "C" 11.20 m de hogar de alto horno diám., Instalaciones ARBED en Esch-Belval, Luxemburgo.

- Cimientos de a.h. tiendas de sistema Cowper, etc.
- Edificios, túneles, carreteras, etc.

Puentes de ferrocarril y de carretera.

Total: 100,000 m<sup>3</sup>

5.- Dos máquinas de colado continuo en las INSTALACIONES ARBED SCHIFF-LANGE, Luxemburgo.

Total: 50,000 m<sup>3</sup>.