

to de la escoria, que es a menudo la capa soportante en las carreteras, y en el cual la escoria granulada reactivada por la piedra caliza opera como cemento.

Además de su uso como cementante hidráulico, la escoria granulada se usa como:

- Agregado para ladrillos y bloques huecos.
- Agregado para mortero y concreto.
- Agregado para trayectorias de drenaje bajo las carreteras y vías del ferrocarril.

En su forma pulverizada, la escoria granulada también se usa como relleno en la carpeta bituminosa de carreteras y como materia prima en la producción de cemento.

2.1.2.- La escoria en el concreto.

La escoria triturada, como agregado del concreto, debe satisfacer criterios de calidad impuestos por ciertas cláusulas técnicas (Materiales pétreos - CR 1/75) que están en vigor en Luxemburgo. Estos criterios son muy rígidos como para hacer imposible el uso de materiales inapropiados.

Entre estos requisitos están:

- La limpieza: Libre de materia orgánica.
 - . Libre de elementos extrafinos tales como la arcilla y otras materias solubles.
 - . Libre de carbón o partículas de madera o residuos.
- La estabilidad química: inalterable por aire, agua o las heladas.
- La forma del grano: Contenido restringido en granos aplanados.
- La composición química: $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} \leq 1.50$
- La absorción del agua: $\leq 4\%$
- El peso volumétrico: $\geq 1.25 \text{ kg/l}$
- La resistencia estática de compresión (por ejemplo, con la fracción 10/12 mm, los 2 mm por abajo no deben exceder, 18% después del ensaye de compresión).

La Tabla Núm. 2 muestra las características mecánicas, físicas y químicas para varias porciones granulométricas de escoria triturada que se han usado. Corresponden a los requisitos de las cláusulas técnicas.

Una vez que se han establecido las condiciones, es imperativo que la escoria triturada sea sujeta a ensayos sistemáticamente, tanto por los productores como por los usuarios.

Escoria granulada y pre-triturada

Desde el punto de vista del agregado del concreto, la escoria granulada presenta varias desventajas:

- Insuficiente porcentaje de finos.
- Formas angulosas del grano.
- Quebradizo, peso volumétrico y composición granular variables.

Todos estos factores constituyen desventajas para la manejabilidad del concreto. A fin de mejorar la calidad de la escoria granulada en vista de su uso en el concreto, la escoria debe ser triturada a un tamaño de 0 a 2 mm con aproximadamente 10% de "finos" más finos que 80 micras. Debido a su gran homogeneidad esta escoria granulada y pre-triturada puede ser trabajada mediante el bombeo.

2.1.3.- El Cemento

El cemento es el elemento activo del concreto. Su calidad y cantidad determinan la resistencia y todas las demás características del concreto: manejabilidad, contracción, resistencia química, generación de calor, carbonatación e impermeabilidad.

El cemento es una mezcla finamente triturada de clinker Portland, de escoria (si se trata de cementos metalúrgicos) y de sulfato de calcio, el cual es agregado como una pequeña dosis de yeso o anhídrido a fin de regular su fraguado.

Tres categorías de cemento que satisfacen las especificaciones de las cláusulas técnicas (cementos C. T2 75) en vigor en Luxemburgo, son producidas en el país:

Cemento Portland	contenido de escoria de 0-20%
Cemento Portland de Hierro	contenido de escoria 20-35%
Cemento de escoria de alto horno	contenido de escoria de 35-80%

Cada uno de estos tipos está disponible en dos diferentes grados de resistencia, los cuales son definidos por la mínima resistencia obtenida por el mortero normal después de 28 días.

De esta manera los cementos Portland vienen en varias clases de resistencia como el 30 N/mm² y el 50 N/mm², el Portland de hierro y los cementos de escoria de A.H. en las variedades de 30 y 40 N/mm².

Debemos preferir aquel cemento que contenga un alto porcentaje de escoria, que esté caracterizado por un fraguado más lento, que presente una menor generación de calor, y una resistencia química superior (resistencia a los sulfatos principalmente).

Las características de los grados de cemento más comúnmente usado, según se señalan en las Tablas 4 y 5, están de acuerdo con las cláusulas técnicas.

2.1.4.- Los Aditivos

Los materiales aditivos son agregados al concreto generalmente en proporciones muy pequeñas y bien proporcionadas a fin de mejorar una o varias características del concreto. Es obvio que ningún aditivo puede al mismo tiempo actuar sobre todas las características. Dentro de este estudio, dos tipos de aditivos han sido considerados, es decir, un plastificante y un agente inclusor de aire.

2.2.- El Acero

Grados de acero utilizados en la construcción con concreto reforzado

Los grados de acero utilizados para concretos reforzados están señalados en la Tabla inferior. Los grados más comunes incluyen el St 42/50 para varillas sencillas y St 50/55 para malla de alambre soldada. Los grados de St 50/58 y 60/70 son para usos especiales tales como refuerzo continuo en pavimentos de concreto.

Características Mecánicas	Grado	Acero 22/34	Acero 42/50	Acero 50/55-50/58	Acero 60/70
Punto de fluencia (0.2) en N/mm ²		220	420	500	600
Resistencia a la tensión en N/mm ²		340	500	550/580	700
Elongación en ruptura (10 d) en %		1,8	1	0,8	0,8

Estos grados de acero que presentan un alto punto de fluencia y que deben tener una buena receptividad a la soldadura, son clasificados en dos categorías principales:

1.- Los aceros semi-endurecidos que son usados como rolados en caliente SIN NINGUN tratamiento adicional. Esos aceros obtienen sus propiedades de la adición del niobio y del vanadio.

2.- Los aceros forjados en frío obtienen sus propiedades mediante torsión, estiramiento en frío o rolado en frío, después del rolado en caliente.

Los dos métodos de fabricación son muy costosos, un nuevo proceso llamado "Tempcore", fue desarrollado por el Centro de Investigaciones Metalúrgicas de Leija, en colaboración con ARBED.

2.2.2.- El Proceso "Tempcore"

Este proceso incluye tres etapas:

1.- Al salir del proceso de acabado, la varilla estriada sufre un endurecimiento de la superficie en un depósito de agua colocado en la línea de producción. La estructura (austenítica), que inicialmente era homogénea, se vuelve heterogénea (superficie martensítica y núcleo austenítico).

2.- Después del depósito de agua la varilla sufre una etapa de homogenización durante la cual la estructura endurecida es recalentada mediante conducción desde el centro (núcleo) y la superficie (periferia) tiende a templarse.

3.- Sobre la rampa de enfriamiento, este proceso lento de enfriamiento en ambiente sereno hace posible una transformación del núcleo de la estructura casi isotérmica, con la austenita cambiándose a una perlita y ferrita de grano fino.

Este proceso permite una producción de acero a bajo costo con un alto punto de fluencia al mismo tiempo que mantiene todas las propiedades que se exigen para las varillas, tales como la receptividad a la soldadura, flexibilidad, resistencia a la fatiga, resistencia a la deformación, etc...

Uso del acero de alto punto de fluencia en refuerzo continuo para pavimentos de concreto.

Las varillas de refuerzo usadas como refuerzo continuo en pavimentos de concreto, lo cual es un franco progreso frente a los pavimentos que consisten de losas discontinuas, puesto que no hay "juntas" y por lo mismo, menos mantenimiento del tipo de alto punto de fluencia, es decir, son iguales o mayores que 500 N/mm². El alto punto de fluencia permite reducir la densidad del acero, por una parte, y el diámetro de la varilla, por la otra, lo cual positivamente mejora la adherencia del acero al concreto.

Considerando estos hechos, la técnica del concreto reforzado continuo fue conservada por este estudio, siendo la intención de los ensayos ejecutados el desarrollo de una fórmula para el "concreto con escoria/acero Tempcore".

Los ensayos que se relacionan directamente con el uso del acero Tempcore incluido, sobre todo el ensayo de la corrosión de las varillas embebidas en el concreto (véase 2.2.4), los ensayos de extracción (véase 2.3.3), y la medición de la resistencia de tensión directa del concreto (véase 2.3.3), han permitido el dimensionamiento del refuerzo.

2.2.4.- Corrosión del Acero en el Concreto.

La corrosión del acero es una oxidación del hierro bajo los efectos de la humedad y el oxígeno de la atmósfera.

Las causas principales de la corrosión pueden ser activadas mediante un tratamiento con agentes químicos de deshielo, mediante sales de cloruro o sulfato, las cuales comúnmente se usan en los caminos durante el invierno.

Las varillas en el concreto no se corroen si han sido "tratadas" en un ambiente alcalino con pH entre 9.5 y 12.5. Este ambiente alcalino favorable existe siempre que haya cal asequible en el concreto.

La cal que ha sido liberada durante el proceso de hidratación del cemento, es neutralizada en la superficie por el gas carbónico de la atmósfera, de acuerdo con la reacción:



El carbonato de calcio así formado, da origen a un medio casi neutral (pH aproxim. 7), en el cual las varillas no están ya protegidos por un "tratamiento".

Este fenómeno está perfectamente explicado en el diagrama electroquímico de POURBAIX (Tabla 6).

La velocidad de propagación de la carbonatación depende primordialmente de la porosidad del concreto y secundariamente del ambiente de su conservación.

En 1973 se practicó una investigación por el Laboratorio del Departamento de Puentes y Carreteras, con la finalidad de examinar la velocidad de carbonatación y el comportamiento de las varillas de acero en todos los medios de concretos de escoria. El estudio fue inspirado por el hecho de que la escoria de alto horno, la cual puede contener hasta un 2% de azufre (en su forma de sulfuro de calcio), a menudo se considera que provoca la corrosión.

Los ensayos fueron ejecutados en cubos de concreto que consistían de escoria triturada y escoria pre-triturada y granulada con cemento de escoria de alto horno de 30 y 40 grados, variando el consumo de cemento desde 220 hasta 350 kg/m³. En cada uno de estos cubos se empotró una varilla respectivamente, con recubrimiento de 1, 2, 3, 4 y hasta 10 cm de concreto sobre el acero. Los cubos fueron conservados:

- En seco, en el Laboratorio (humedad relativa de 50-60%).
- En un ambiente húmedo (humedad relativa de 95-100%).
- En agua (cubos sumergidos en agua hasta 2/3 de su altura).

La profundidad de la carbonatación fue medida por un indicador pH (fenolftaleína) hasta una edad de dos años.

Sin entrar en muchos detalles, el referido estudio ha permitido las siguientes conclusiones:

- Los cubos que fueron puestos en ambiente seco han sufrido una carbonatación hasta una profundidad de dos cm, pero ninguna corrosión apareció, ni en la zona carbonatada ni en el núcleo del concreto, como puede verse en las ilustraciones 1, 2, 3, 4 y 5.
- Los cubos conservados en un ambiente húmedo no mostraron carbonatación alguna. Ninguna corrosión apareció en los refuerzos en el núcleo del concreto, mientras que la parte saliente estaba fuertemente corroída (ver ilustración 6).
- Los cubos que fueron sumergidos en agua hasta 2/3 de su altura no mostraron ninguna carbonatación en la parte sumergida y no hubo ninguna corrosión en esa zona. Sin embargo, en la porción que estuvo fuera del agua, la carbonatación aumentó desde la línea del agua hasta la parte superior del cubo. Toda esa superficie apareció carbonatada hasta un cm. de profundidad. En dicha zona carbonatada, las varillas tenían una ligera mancha de óxido.

De esta manera, la investigación ha mostrado claramente que la escoria de alto horno no promueve la corrosión del concreto.

Estos resultados han sido confirmados por los ensayos de corrosión electroquímicos practicados por el Prof. Scimar en la Universidad de Leija.

2.3.- El Concreto

2.3.1.- Generalidades y Objetivos

La finalidad de esta investigación fue desarrollar un concreto de escoria total de la clase de resistencia B 45, es decir, que el concreto endurecido proporcione una resistencia a la compresión promedio de más de 50 N/mm² después de 28 días, y de más de 55 N/mm² después de 90 días. Estas condiciones son recomendadas por las cláusulas técnicas (concreto C.T. 7/75) en vigor en Luxemburgo.

La manejabilidad del concreto fresco (ensayo de revenimiento) era para la consistencia de clase C 2 (consistencia plástica). Otra condición impuesta sobre el concreto fresco fue un porcentaje de aire incluido entre 4-5%, a fin de mejorar la resistencia contra la escarcha y los agentes de deshielo.

2.3.2.- Ensayos preliminares para determinar la composición óptima.

Después de determinar la granulometría y las características de los agregados que son considerados para la fabricación del concreto de escoria total,