

EL CEMENTO DE ESCORIAS EN EL HORMIGONADO DE PRESAS

Por ENRIQUE SANCHEZ CONDE,
Ingeniero de Caminos.

Presenta el autor una información muy completa sobre la fabricación y empleo del cemento de escorias en el hormigonado de la gran presa francesa de Bort-les-Orgues, que resolvió el problema de la escasez de cemento Portland en Francia en aquella época.

Las grandes cantidades de cemento que absorbe una obra hidráulica han llevado, desde hace largo tiempo, a intentar su sustitución parcial por otros agregados que abarataran el hormigón resultante.

La escasez de cemento que padecemos en la actualidad hace aconsejable la continuación de estas pruebas, cuyos resultados podrían ser aplicados, aun cuando el producto obtenido tuviera el mismo precio que los hormigones hechos únicamente con cemento artificial, pues siempre se obtendrá de esta forma una economía de aglomerante que podría ser aplicado en otras necesidades.

Entre las diferentes formas de ahorro de cemento, son conocidos por todos el hormigón ciclópeo y el *sond-cement*, pero menos frecuente ha sido el empleo del cemento de escorias de altos hornos, que constituye el objeto del presente artículo, en el que trataremos de describir cómo se hace y las cualidades que tiene, tomando como ejemplo los trabajos efectuados en la presa francesa de Bort-les-Orgues, sobre el río Dordogne, por el Ingeniero M. Mary.

Se atribuye a Lorient, a mediados del siglo pasado, el descubrimiento de propiedades hidráulicas en las escorias de altos hornos, pero fué Langens, en 1861, el que descubrió que, enfriando bruscamente la ganga en fusión, de los minerales que se emplean para la siderurgia, se granulaba, obteniéndose un producto de

marcadas propiedades hidráulicas al ser mezclado con cal grasa.

Actualmente esta granulación se obtiene proyectando sobre la ganga fundida un fuerte chorro de agua fría, constituyendo este proceso el llamado "templado de las escorias", por el cual el producto cristalino de estructura esponjosa que se obtenía con el enfriamiento lento adopta la forma de granos, de algunos milímetros de diámetro en estado amorfo, sin cristalizar, pero en los cuales la parte vitrificada está, generalmente, en proporción superior al 95 %.

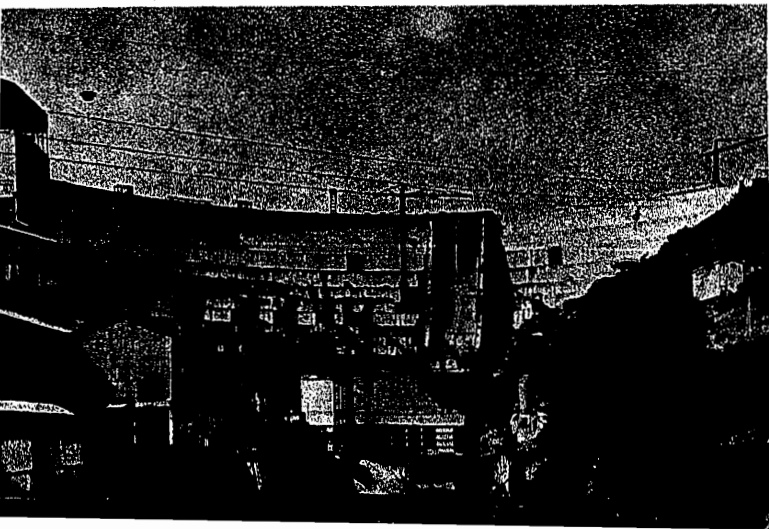
Las cualidades hidráulicas de las escorias dependen de su granulación y de la composición química, y siendo la primera el mejor índice sobre la marcha de los altos hornos para el operador que dirige la colada, buscará siempre que las escorias salgan con propiedades físicas constantes, proporcionando inconscientemente un producto de calidades fijas para la fabricación del cemento.

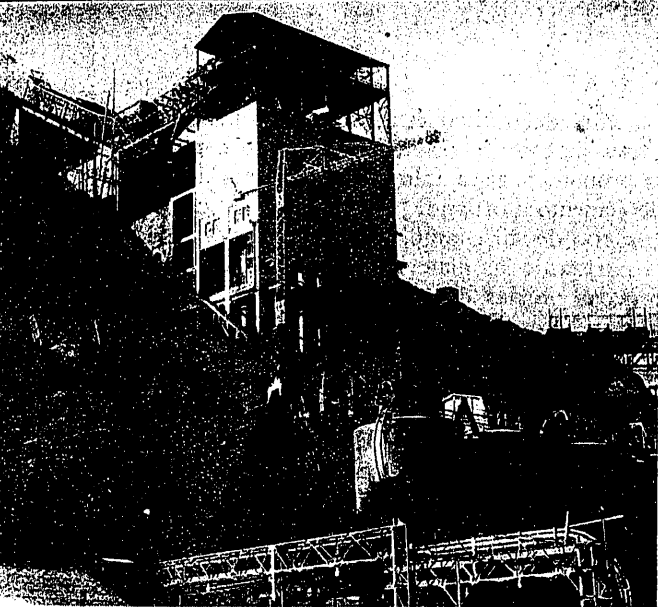
Según la temperatura de elaboración seguida en el alto horno, es diferente el granulado de las escorias, que se clasifican con arreglo a ella en varios grupos. La mayor parte de la producción siderúrgica está formada por la fundición Thomas para aceros, que por la temperatura de elaboración corresponde a una marcha del alto horno llamada "fría". Sus escorias se granulan en forma de escamas, con densidad cercana a la unidad, y son las que se emplean para la fabricación de cemento.

Otras fundiciones, en las que los óxidos de silicio y manganeso exigen temperaturas mucho más elevadas para su reducción, se llaman, en contraposición con la primera, "de marcha caliente" y producen escorias en forma pulverulenta, de muy poca densidad (0,5) y más ricas en cal y sílice.

Existen, finalmente, otras escorias "de marcha muy caliente", refractarias y con un gran porcentaje de alúmina, que se granulan difícilmente y no poseen cualidades hidráulicas apreciables.

La composición química de las escorias es muy variable. Entran en ella cuerpos muy parecidos a los del cemento, entre los cuales se encuentran la cal, sílice, alúmina, óxidos de hierro y manganeso, anhí-





drido sulfúrico y magnésia. Tetmajer recomienda como mejores para la fabricación de cementos aquellas escorias en las que

$$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Si}_2\text{O}_2} > 0,47 \text{ y } \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} > 1,$$

pues ha sido comprobado que las escorias ricas en cal se pulverizan al enfriarse, proceso que se atribuye, como en los cementos, al aumento de volumen en un 10 % que experimenta el silicato bicálcico al pasar de la forma β a γ .

Parece ser que las escorias de altos hornos llegan a dar, por hidratación, productos finales iguales a los que da el cemento Portland, pero, teniendo en su composición menos cal que aquél, la formación del aluminato tetracálcico es mucho más lenta, de forma que siempre que se encuentra cal libre en el hormigón hecho con ellas, durante el endurecimiento, se puede asegurar que éste no ha terminado y que quedan todavía aluminatos tricálcico y dicálcico aptos para fijarla y convertirse en aluminato tetracálcico como forma más estable.

Por esta razón se añade, generalmente, a las escorias cuerpos que les puedan proporcionar la cal que les falta inicialmente.

Uno de los procedimientos más usados es mezclar en frío escorias pulverizadas y cal apagada, añadiendo un sulfato como acelerador del fraguado. Otras veces se prepara el cemento partiendo de la escoria de alto horno, en lugar de la arcilla o de la caliza, siguiendo un proceso análogo a la fabricación del Portland para la preparación de los crudos. El *klinker* resultante se muele con un máximo de un 30 % de escoria básica granulada. También se obtiene un buen cemento moliendo juntos *klinker* de Portland y escoria básica granulada, añadiendo pequeñas cantidades de yeso.

Cada uno de estos procedimientos han dado lugar

a cementos conocidos por diferentes nombres: cemento de escorias de altos hornos, Portland siderúrgico, Portland de altos hornos, etc.

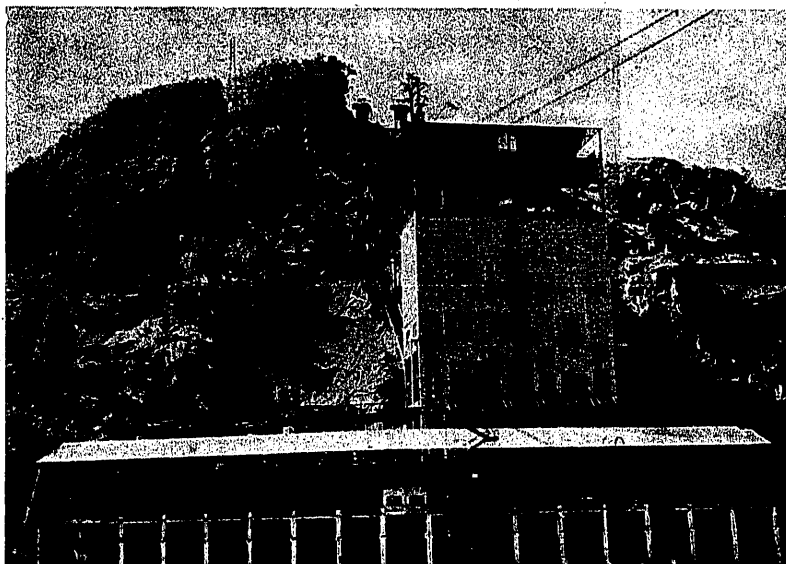
En Francia eran ya conocidas, antes de la última guerra mundial, las propiedades hidráulicas de las escorias de altos hornos, habiéndose llegado a la conclusión de que se pueden obtener cementos de alta resistencia si las escorias que se emplean en su fabricación están finamente molidas, que son especialmente aptos para el hormigonado de presas, por ser menor su calor de hidratación que el de los cementos corrientes, al mismo tiempo que dan al hormigón una gran manejabilidad, permitiendo obtener altas impermeabilidades.

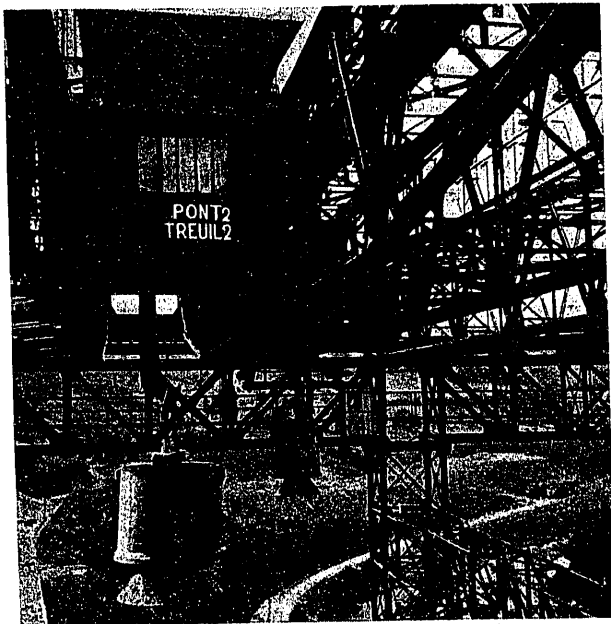
Al terminar la guerra, Francia se hallaba en una mala situación respecto a la producción de energía eléctrica. Debido a múltiples causas, no sólo no la había aumentado, sino que había pasado de producir 22 000 millones de Kw.-h., en 1939, a 16 000 millones en 1944, habiendo disminuido aproximadamente en un 25 % la de origen hidráulico y en un 30 % la de origen térmico.

No vamos a entrar en los detalles que ocasionaron la creación del plan Monnet, ni enumerar las obras previstas para llevarlo a cabo. Solamente diremos que se trató de hacer frente a un consumo de 27 000 millones de Kw.-h. para el año 1947 y de 39 000 para el 1951.

Este incremento enorme de la demanda y su deseo de servirla, llevaron a poner en marcha un gran número de centrales térmicas e hidráulicas, ocasionando, juntamente con otra serie de circunstancias, una escasez de cemento en todo el país, que se intentó solucionar de diversas formas, una de las cuales, que parece ha tenido un gran éxito, es el hormigón de escorias, cuya elaboración se planteó de nuevo al tratarse del hormigonado de la presa de Bort-les Orgues, donde la puesta en obra de 600 000 m.³ de hormigón hubiera necesitado un suministro mensual de 15 000 toneladas de cemento, cantidad que las fábricas suministradoras no estaban en condiciones de poder servir.

Se planteaba, por tanto, el problema de renunciar





a ejecutar la obra en el plazo previsto, ajustándose al cupo mensual que se les pudiera enviar de cemento, o bien sustituir éste en alguna forma

Se estudió entonces el hormigón obtenido empleando como aglomerante una mezcla de cemento Portland y escorias de altos hornos, a la que se añadió, como acelerador de fraguado, sal común.

Sobre este aglomerante se han hecho gran número de pruebas para determinar las principales variables; es decir, el grado de finura de molido de las escorias, la proporción en que éstas deben entrar en la mezcla y, sobre todo, la clase de las escorias que debía ser empleada.



Para determinar ésta se hicieron pruebas con diez clases de escorias diferentes de marcha fría, tomando la proporción para fabricar el cemento, de 20 por 100 de cemento Portland, 78,5 por 100 de escorias y 1,5 por 100 de sal común, y procurando estar seguro de la pureza de las materias a mezclar, se hicieron unas pruebas previas de que el cemento recibido no tenía mezcla alguna de escorias de altos hornos.

Con todas las escorias se llegó a resultados satisfactorios a los veintiocho días, en probetas cúbicas de 5 cm. de lado con morteros 1/3, oscilando las resistencias obtenidas entre 270 y 390 Kg./cm.², a pesar de que alguno de los tipos de escorias empleados eran de apariencia negra, insuficientemente templado, y hubiera sido rechazado a simple vista.



Esta prueba da gran confianza en los resultados a obtener de las escorias, ya que, una vez examinadas sus condiciones hidráulicas, basta un examen superficial para poder rechazar las que no presenten buenas características, sin tener que recurrir a ensayos químicos, puesto que sus condiciones, tanto químicas como de temple, son prácticamente invariables, debido a la marcha constante del horno.

A pesar de los buenos resultados obtenidos con las escorias de marcha fría, se intentó también hacer pruebas con escorias de marcha caliente, obteniéndose resultados negativos. Algunas no pudieron ser molidas durante el tiempo previsto, a causa de su gran dureza, en tanto que otras fraguaron al ser sacadas de los molinos. Efectivamente, siendo en ellas el porcentaje de cal superior al que tienen las escorias de marcha fría, constituyen verdaderos cementos al adquirir una cierta finura de molido y, por consiguiente,

no son aptas para ser molidas, según el procedimiento empleado, por vía húmeda.

Molturación.

Fué ésta una de las variables más importantes a considerar. Cuando se intentó aplicar el cemento de escorias a la presa de Bort-les-Orgues, no había fábricas de cemento de escorias en Francia capaces de dar a éstas una molienda lo suficientemente fina para que sus propiedades hidráulicas fueran óptimas. Se abordó el problema de la misma obra, según un procedimiento por vía húmeda, ya empleado con éxito en Bélgica hacía algunos años (procedimiento Trief), que consiste, en esencia, en moler las escorias, adicionando un 30 por 100 de agua, en un molino de bolas. Las pruebas se hicieron en un molino en el que las bolas, de 40 mm. de diámetro en el primer cilindro, ocupaban el 36 por 100 de su volumen, decrecían en tamaño en el segundo, del cual ocupaban el 38 por 100, y eran de 60 gr. en el tercero, ocupando de nuevo el 38 por 100.

Se pudo comprobar, mediante estos ensayos, en los cuales se variaba también el porcentaje de cemento Portland añadido, que la resistencia, en probetas cúbicas de 5 cm. de lado, aumenta con la finura de molido de las escorias empleadas en la fabricación de los morteros utilizados para hacerlas según una ley

prácticamente lineal, cuyo coeficiente angular aumenta en función de la proporción del cemento que se mezcla con la escoria.

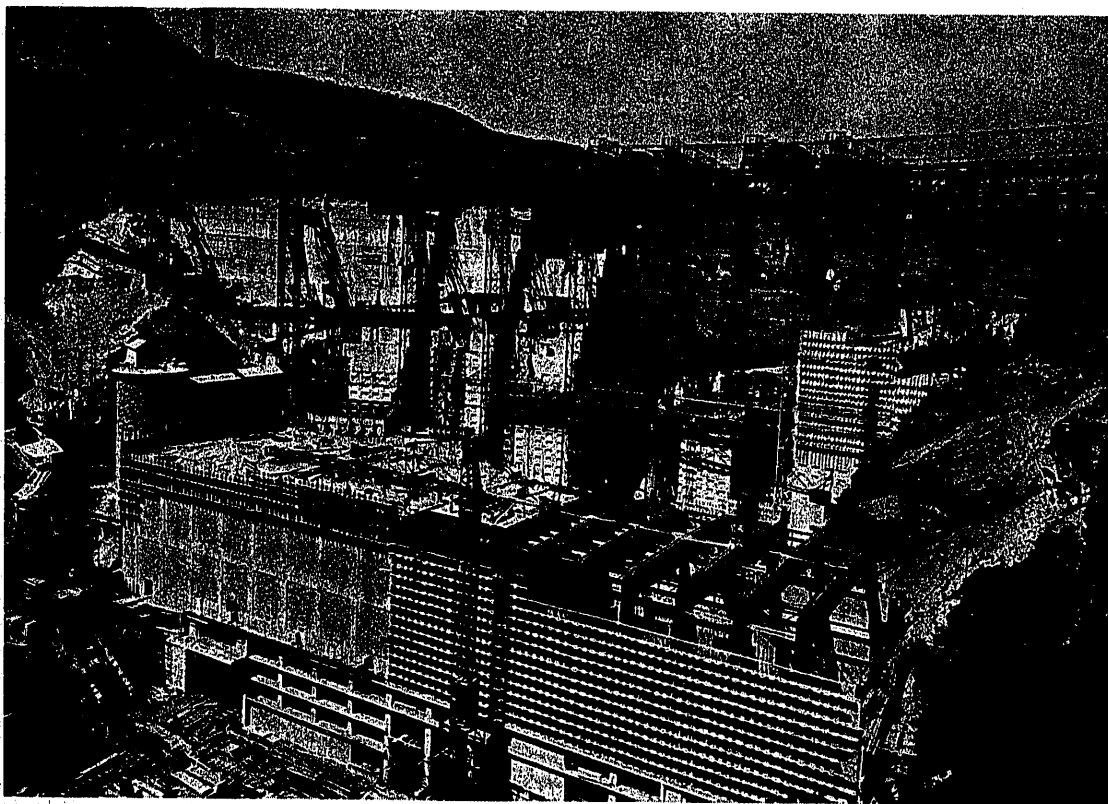
Era, pues, necesario fijar una resistencia mínima al hormigón que se quería obtener, la que nos proporcionaría la finura de molido, en tanto que la proporción de cemento sería más sencillo determinarla por métodos químicos, teniendo en cuenta, según queda expuesto, la cal libre que debe existir para la formación total del aluminato tetracálcico, pues, como veremos a continuación, los resultados experimentales no aclaran este punto.

Resistencia del cemento de escorias, en función del porcentaje de cemento.

Para su estudio se trazaron curvas con varios tipos de escorias, añadiendo cantidades del 5, 10, 15, 20, 30 y 50 por 100 de cemento sobre pruebas molidas con un rechazo inferior al 10 por 100 en el tamiz de 10 000 mallas y con un tanto por ciento de sal del 1,5 por 100.

Se dibujaron las curvas, llevando en abscisas el tanto por ciento de cemento, y en ordenadas la resistencia a noventa días, dado que se iba a emplear en el hormigonado de una presa, no llegando con ellas a conclusiones definitivas.

Entre los porcentajes extremos del 5 y del 50 por



100, los resultados son bastante concordantes, pero entre los porcentajes del 10 al 30 por 100, que se consideraban como los límites óptimos de la mezcla, los resultados están muy poco agrupados, lo que se quiso explicar teniendo en cuenta que, encontrándonos en una zona en la que la variación de resistencia es muy rápida en función del porcentaje de cemento artificial, influían grandemente las imperfecciones inevitables en la homogeneidad del mortero.

Estos ensayos sirvieron, sin embargo, para determinar que, con esta finura de molido, era necesario añadir a las escorias un tanto por ciento de cemento comprendido entre el 23 y el 42 por 100, para obtener a noventa días una resistencia de 370 Kg./cm.².

Fueron, por tanto, los procesos químicos de formación del aluminato tetracálcico como cuerpo más estable a partir del alúminaferrito cálcico y de los aluminatos bi y tricálcico que contienen las escorias, los que sirvieron para fijar los porcentajes definitivos a emplear, teniendo en cuenta que si el porcentaje de cemento artificial añadido es pequeño (del 5 al 10 por 100) se libera una cantidad insuficiente de cal para la formación del aluminato tetracálcico, y la resistencia obtenida es débil, en tanto que si el porcentaje de cemento es fuerte (superior al 42 por 100), el exceso de cal es mayor que el que necesita la escoria para la formación del aluminato tetracálcico, y la mezcla obtiene lentamente las resistencias del cemento artificial.

Se ha llegado a la conclusión de que una proporción óptima para la mezcla empleada es de 30 por 100 de cemento, 68,5 por 100 de escoria y 1,5 por 100 de cloruro sódico, debiendo ser tenido en cuenta que cuando la temperatura ambiente es inferior a 7 u 8° conviene aumentar la dosificación de cemento, ya que, si no, se retarda el comienzo del endurecimiento, aunque a los noventa días alcance las mismas resistencias.

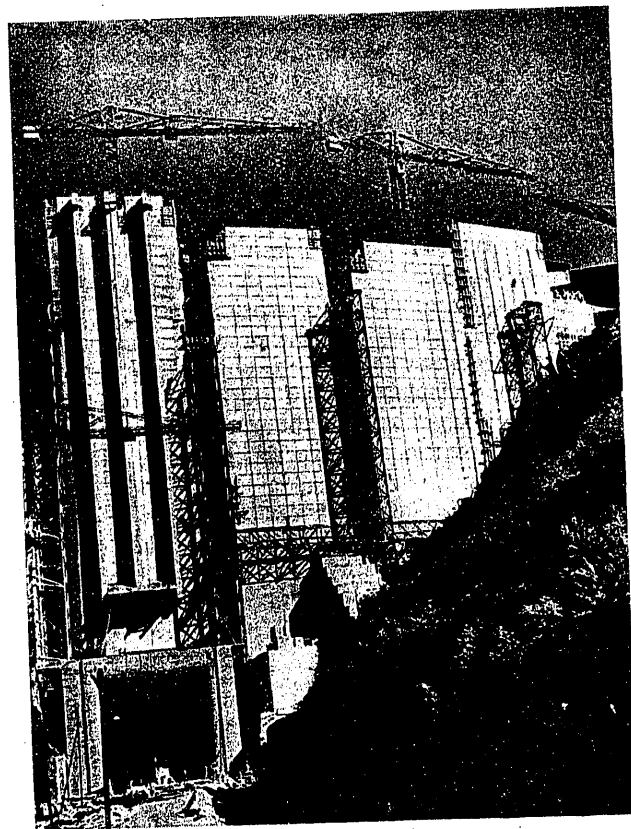
De las diferentes pruebas llevadas a cabo se dedujeron asimismo los ensayos de recepción que debían ser hechos con las escorias.

Desechadas las pruebas químicas, poco seguras y que hubieran exigido una cuidadosa atención, se pensó desde el primer momento en las pruebas físicas.

Métodos físicos de recepción de las escorias.

Aunque la recepción de las escorias se podría hacer a simple vista por sus características físicas, obteniéndose resultados satisfactorios, se examinan también por rayos ultravioletas, que permiten discernir las partes cristalizadas, que presentan un color azul oscuro o azul eléctrico, de las partes amorfas con coloración rosa.

Se compara la fluorescencia dada por la escoria a ensayar con escorias tipo que sirven de patrón, cuyas propiedades hidráulicas son bien conocidas. Es de advertir, sin embargo, que la comparación no puede hacerse más que entre escorias correspondientes a una



misma marcha del alto horno, de forma que habiendo sido empleadas en nuestro caso escorias de "marcha fría" como patrones tipo, escorias que presentarán el mismo aspecto bajo los rayos ultravioletas, pero de "marcha caliente", pudieran no ser aptas para la fabricación de cementos por vía húmeda, y que aun entre escorias de la misma marcha las diferencias de coloración no son muy precisas.

Un segundo método está basado en calentar las escorias a ensayar hasta temperaturas de 1000°, enviando al horno que se emplea para la prueba un flujo térmico constante. Se observa en las curvas de recalentamiento una perturbación entre los 737° y los 870°, estando ligadas las propiedades hidráulicas de las escorias con la temperatura a que comienza el fenómeno y su intensidad.

Parece ser que no ha sido posible en Bort establecer esta relación, suponiendo que este resultado ha sido debido a no poder disponer de un amperaje constante, lo que ha enmascarado el fenómeno.

Ensayos de recepción por sosa.

No habiendo dado resultados plenamente satisfactorios los procedimientos físicos de recepción de escorias, a pesar de lo cual el de rayos ultravioletas ha sido empleado durante toda la obra por su carácter

de exclusión, y aunque el parque de almacenamiento en la presa de Bort era suficientemente grande para poder hacer pruebas con las escorias recibidas rompiendo las probetas fabricadas con ellas a los veintiocho días, se trató de utilizar un método más rápido de recepción, consistente en amasar la escoria molida con sosa en una proporción del 3 por 100, que, por ensayos previos, había sido determinada como la proporción óptima a mezclar con la escoria seca.

Se hicieron probetas cúbicas de 5 cm. de lado con morteros mezcla de cemento y de escorias, y otros de sosa y escorias. Las primeras fueron rotas a los 2, 7, 28 y 90 días, en tanto que las segundas a los 6, 24, 48 y 96 horas, sacándose una correlación entre los diagramas de endurecimiento que permite asegurar que si la curva de endurecimiento de los morteros de sosa presenta resistencias cercanas a los 100 kilogramos/cm.² a las veinticuatro horas, la del mortero de cemento será superior a los 315 Kg./cm.² a los veintiocho días.

Para estos ensayos con sosa es preciso hacer notar que la sosa debe ser anhídrica y que las probetas deben ser conservadas a una temperatura constante de unos 18°, ya que la curva de endurecimiento es muy sensible a las bajas temperaturas.

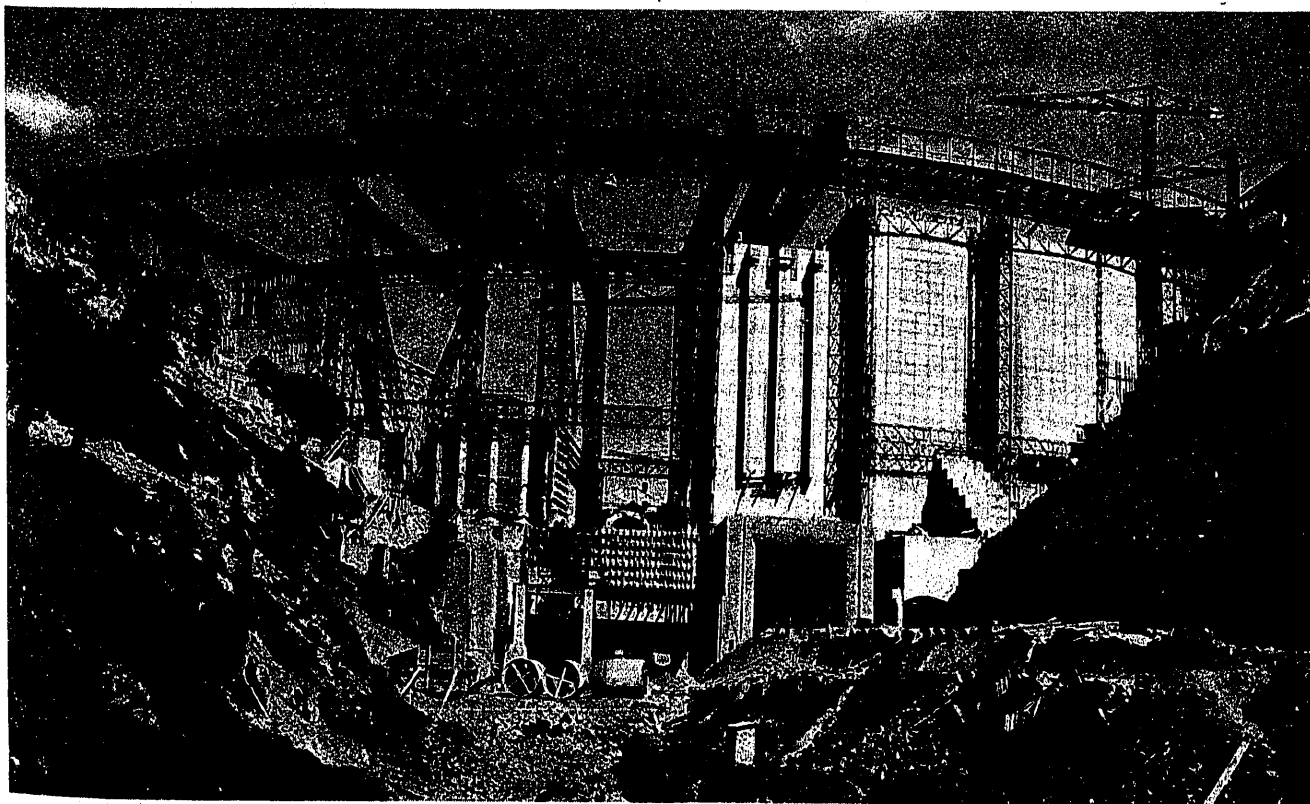
Disposición general de la estación de hormigonado.

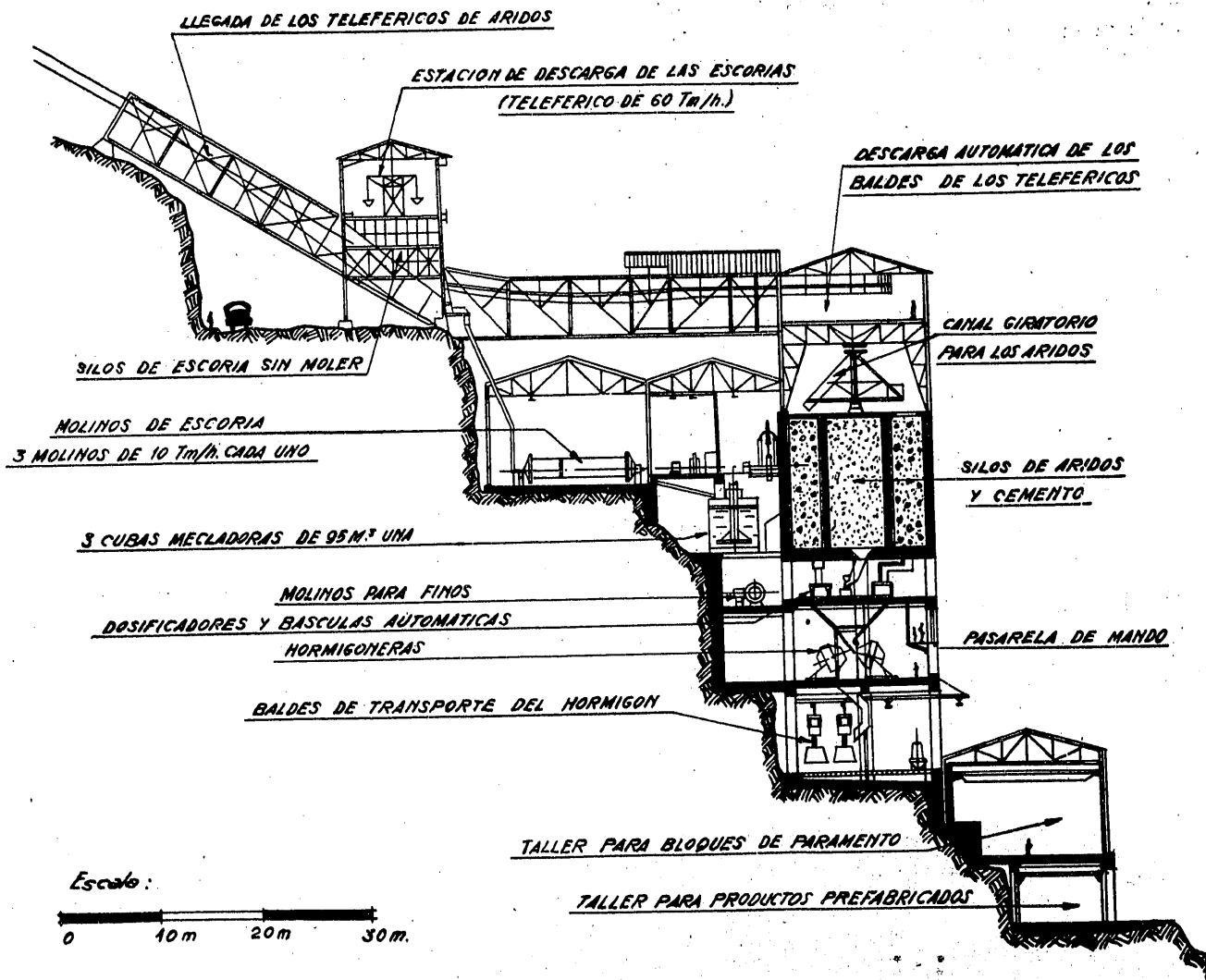
En el croquis de la página siguiente se puede ver claramente la disposición dada a la estación de hormigonado, algo más complicada que una estación corriente, por la fabricación del cemento de escorias.

Las escorias se transportan hasta ella desde el parque de almacenamiento por medio de un teleférico que descarga directamente en los silos y desde éstos pasan a tres molinos capaces de moler 10 Tm./h. cada uno, desde los que van a cubas, donde son mezcladas con el cemento. Esta mezcla pasa a las hormigoneras por dosificadores de peso y en ellas se reúne con los áridos, ensilados en seis tamaños diferentes, para la fabricación de hormigón discontinuo.

Resumen.

Como resumen de los trabajos efectuados en la presa de Bort, podemos indicar que las escorias de altos hornos, finamente molidas, pueden proporcionar cementos de alta calidad al ser mezcladas con cemento Portland.





Siendo prácticamente constante la marcha de los altos hornos, las escorias presentan granulación y composición química prácticamente invariables, y su recepción se puede hacer, en gran número de casos, a simple vista o utilizando los rayos ultravioletas. La recepción diaria se puede llevar a cabo también con morteros hechos de escoria y sosa, que deben dar, a las veinticuatro horas, resistencias de 100 Kg./cm.², para que los morteros de escoria y Portland tengan resistencias de 300 Kg./cm.² a los veintiocho días. Con una mezcla del 30 por 100 de cemento

Portland, 68,5 por 100 de escorias y 1,5 por 100 de sal común, se obtiene un cemento con el que se pueden hacer morteros de resistencia superior a los 300 Kg./cm.², cuando la finura de molido de las escorias corresponde a un rechazo del 10 por 100 en el tamiz de 10 000 mallas, y con el cual los hormigones, para una dosificación de 225 Kg. alcanzan resistencias superiores a los 250 Kg./cm.² a los noventa días, siendo más manejables y de menor calor de fraguado con el análogo fabricado con cemento Portland únicamente.