

686-28

Control de calidad por métodos estadísticos

RAD NOBLE

**Construction Research and Development Journal (CONRAD), n.º 3
octubre 1970, págs. 113-121**

La firma del autor ha estado fabricando durante unos 20 años hormigón pretensado, siendo uno de sus principales productos un sistema de forjados de pisos consistente en una gama de vigas de hormigón pretensado y bloques de hormigón ligero sin finos (fig. 1). Las viguetas se fabrican en dos factorías, una en Liverpool al norte de Inglaterra y la otra en St Neots al sur, empleando el sistema de gran longitud (fig. 2). Se emplea cemento aluminoso, lo cual permite enmoldar y desmoldar las viguetas en un ciclo diario.



Fig. 1.—Suelo de vigas de hormigón pretensado y bloques de hormigón sin finos en construcción.

Para que la vigueta sea aceptable para el cliente, es esencial una gran calidad en el hormigón. Se requiere elevada resistencia en las primeras edades para destensar a las 16 horas, y, a causa de su efecto adverso sobre la flecha, debe reducirse a un mínimo la fluencia. Esto significa que, por ambos conceptos, debe conservarse lo más baja posible la relación agua/cemento. Además, el hormigón debe estar cuidadosamente compactado para obtener viguetas perfectas y de buena apariencia.

La reducida sección de estas piezas y los hilos de alambre muy próximos sugiere una

mezcla relativamente rica, de buena trabajabilidad, pero el costo del cemento aluminoso es unas tres veces el del portland y debe emplearse la menor cantidad posible. Desgraciadamente, una combinación de relación agua/cemento baja y un bajo contenido de cemento es característica de una mezcla agria intrabajable y estas mezclas tienden a producir viguetas rechazables. Es evidente, pues, que las exigencias obligan a un balance óptimo entre ambas circunstancias. Esto es así para cualquier hormigón, pero donde hay un margen estrecho la balanza es más crítica. El contenido de agua es particularmente crítico, pero no se ha encontrado un método mejor para controlarlo que el juicio de un operador experimentado. Debido a todas estas razones es fundamental el control de calidad efectivo, tanto para la utilidad como para los costos de producción de las viguetas.



Fig. 2.—Fabricación de vigas pretensadas en la factoría de St Neots.

El sistema de control original era importante porque se basaba en el ensayo de elementos reales más que en el ensayo de cubos y en la medida de la relación agua/cemento del hormigón. Se describió en un excelente trabajo (1), empleándose todavía hoy los ensayos originales sin haberse proyectado otras alternativas más útiles o simples. El control se ejercía tomando una acción reparadora, siempre que el resultado de un ensayo individual excedía un límite de aviso. Tales resultados pueden no tener ninguna significación estadística y tomarse acciones correctoras aun en ausencia de cualquier tendencia adversa. Como resultado de ello, el nivel general de la calidad tendía a ser más alto que el realmente necesario.

LOS ENSAYOS DE CONTROL

Las viguetas se ensayan a flexión, utilizando una máquina de ensayo especial diseñada por la compañía (fig. 3). La vigueta de ensayo se coloca invertida y sujeta en ambos extremos, aplicándose la carga en puntos situados a $1/4$ de longitud de dichos extremos, a través de un anillo de tarado y una viga de reparto, con un gato hidráulico. Un puente de acero colocado en la cima de la porción central de la vigueta mide la flecha a lo largo del puente con un comparador.

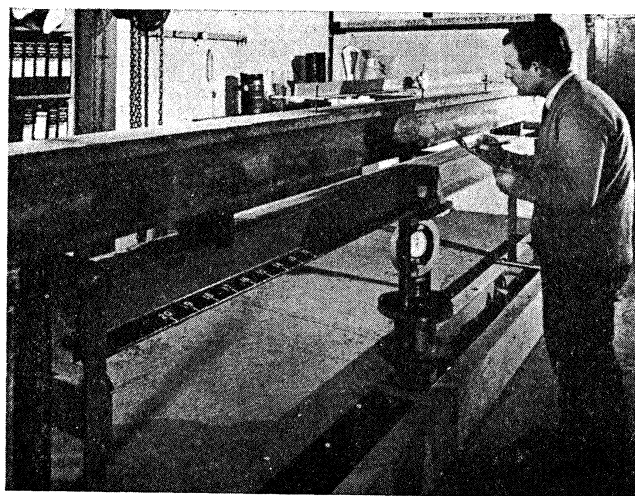


Fig. 3.—Vigueta pretensada bajo ensayo a flexión en un control de calidad rutinario.

En primer término, se calcula el módulo de Young para el hormigón midiendo la diferencia de flecha entre dos cargas diferentes en la zona elástica (fig. 4), eligiéndose, como carga más alta, la calculada para reducir el pretensado en la fibra extrema de la viga a cero.

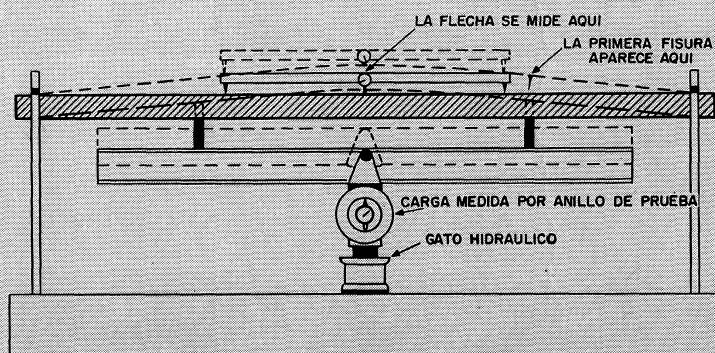


Fig. 4.—Ensayo de flexión para medir el módulo de Young y la resistencia a flexión aparente del hormigón en tensión en la viga de ensayo.

Más tarde, se mide la resistencia a flexión del hormigón en tensión, aumentando la carga en pequeños incrementos, hasta que aparece la primera fisura. La resistencia a flexión medida es un valor aparente, puesto que, si el pretensado real difiere del valor teórico

debido a errores en el esfuerzo, el aumento se mide desde un punto de partida falso. Un operador experimentado puede realizar el ensayo completo en unos 15 minutos.

Los valores mínimos exigidos para este ensayo de flexión son un módulo de Young de $34,5 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ y una resistencia a flexión aparente de $4,14 \text{ N/mm}^2$, a la edad de 24 horas. Si ambos valores son bajos, es probable que el hormigón sea de baja calidad. Si sólo es baja la resistencia a flexión, la vigueta está probablemente poco tensada. De este modo, este simple ensayo sobre un producto real comprueba tanto la calidad del hormigón como la efectividad del pretensado.

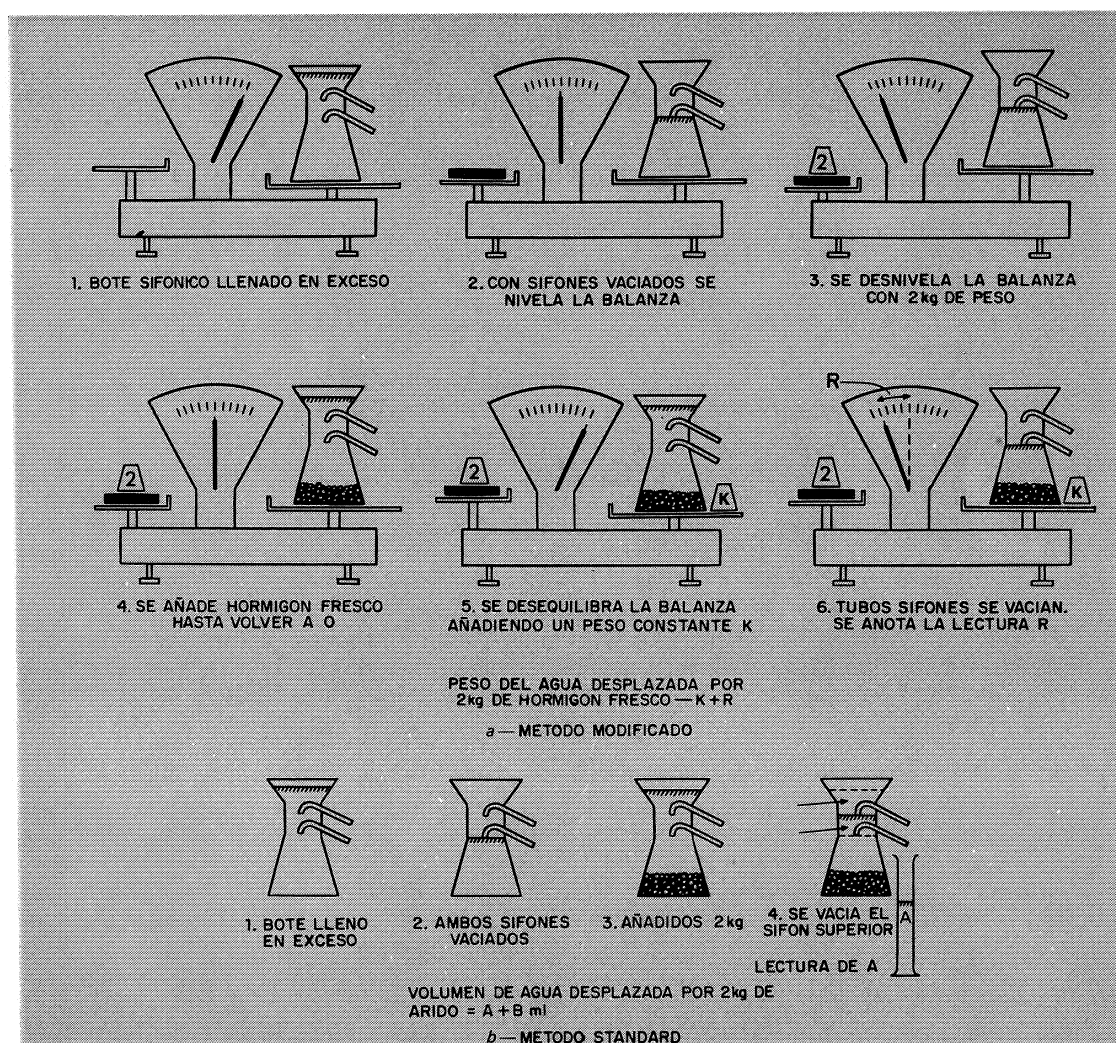


Fig. 5.—Comparación del método Pierhead para medir la cantidad de agua, desplazada por una cantidad de hormigón fresco (empleando el tubo sifónico junto con una balanza exacta) con el método volumétrico standard para áridos empleando una probeta graduada.

La relación agua/cemento del hormigón se señala por medio del ensayo del bote sifónico ("siphon-can") que se emplea normalmente para buscar el contenido de humedad de una muestra de árido midiendo la cantidad de agua desplazada por un peso dado.

El ensayo se ha modificado para encontrar la cantidad de agua en una muestra de hormigón fresco de proporciones de mezcla conocidas y, por tanto, la relación agua/cemento.

El método es muy exacto, y como juega un papel vital en el sistema de control, se compara, en la figura 5, con el método normal. El ensayo puede llevarse a cabo en 5 minutos.

También se hacen cubos del hormigón y se ensayan a 24 horas.

Para el hormigón pretensado hecho con cemento aluminoso, la British Code of Practice (2) especifica una relación agua/cemento proyectada no superior a 0,4 y una resistencia del hormigón mínima, ensayado en cubos a un día, de 51,7 N/mm².

Además de estas pruebas, los áridos se ensayan regularmente, las condiciones de curado están prefijadas y se hace mucho uso del martillo de rebote para comprobar que se ha alcanzado la resistencia de destensado. Hay también inspección de calidad de moldeo, tensado, moldes y planta.

CODE OF PRACTICE 116: 1965 Y CONTROL DE CALIDAD

El Código de buena práctica para el hormigón pretensado hace particular énfasis sobre el control de calidad y reconoce que el hormigón producido en una planta de amasado se gobierna por las leyes de la estadística, y que la resistencia en cubos del hormigón resultante tiende a distribuirse de acuerdo con una curva de distribución normal, representando la resistencia media la calidad media, y dando la desviación standard una medida de la variabilidad.

Dicho Código especifica que la resistencia media debe exceder la especificada en dos desviaciones standard (4), lo que significa que una pequeña proporción de resultados de ensayos (aproximadamente el 2,5 %) pueden caer por debajo de la resistencia especificada y tales resultados no deben considerarse como fallidos (fig. 6a).

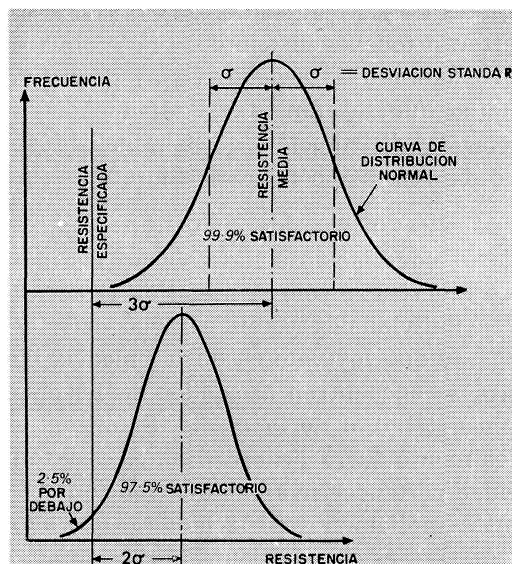


Fig. 6a.—Reducción en la resistencia media y desviación standard que produce economías con un 2,5 % aceptable de resultados fallidos.

caer por debajo de la resistencia especificada y tales resultados no deben considerarse como fallidos (fig. 6a).

También establece el principio de hacer cubos de ensayo al azar y analizar los resultados en grupos de cuatro para encontrar el intervalo entre el más alto y el más bajo y la media. Esto da una indicación de la variabilidad y la calidad media del hormigón. Los grupos se inspeccionan en series y, si se exceden ciertas condiciones limitadas, se calcula la desviación standard de todos los resultados para determinar si es necesaria alguna acción correctora (4).

El análisis diario del ensayo de cubos (que se lleva a cabo unas cuatro veces al año) se emplea para mostrar una proporción extremadamente baja de fallos, siendo la resistencia media de 3 a 4 veces la desviación standard sobre la resistencia especificada.

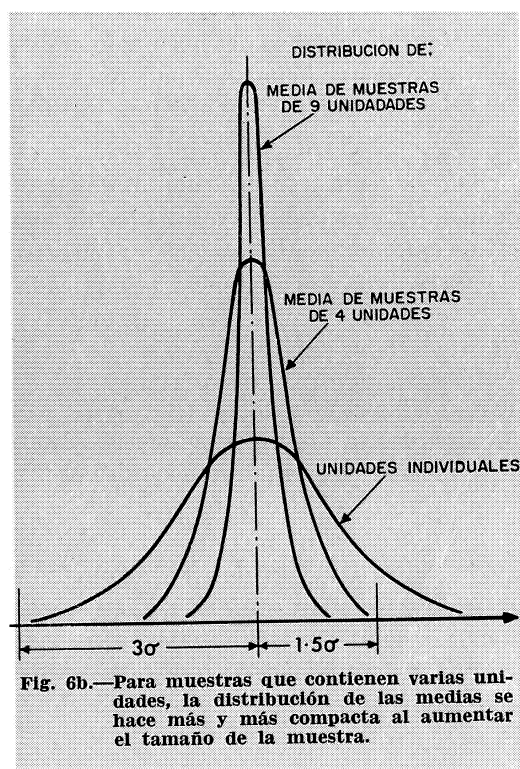
Parece que este nuevo acercamiento puede emplearse para optimizar las proporciones de mezcla en el hormigón, reduciendo la desviación standard mediante un control más posi-

tivo y rebajando la resistencia media mediante economías en el cemento hasta que la frecuencia de ensayos fallidos alcance el 2,5 % (fig. 6a).

Para ser utilizable, cualquier procedimiento de control debe detectar rápidamente cualquier deterioro de la calidad y ser tan simple que pueda seguirse por el tipo de personal empleado en los ensayos de rutina. Desgraciadamente, el procedimiento del Código es relativamente complejo y el cálculo de la desviación standard puede llevar consigo demoras. Los cubos no pueden ensayarse hasta que han madurado y, en cualquier caso, el más importante es el ensayo de la vigueta. Por esto, se ha de inventar un sistema simple, comprensivo e inmediato si se ha de realizar un control efectivo.

GRAFICOS DE CONTROL

El principio de encontrar el valor medio y el intervalo de grupos de resultados de ensayo es la base de los gráficos de control de calidad estadístico, que se basan en la teoría del muestreo y que se usa ampliamente en otras industrias de transformación (5).



Si en un proceso se efectúa un gran número de ensayos individuales, la distribución de los resultados normalmente se aproxima a la curva de distribución normal y casi todos ellos se encontrarán dentro de tres desviaciones standard alrededor del valor medio.

Si, en lugar de hacer ensayos individuales, se llevan a cabo muestras de varios ensayos, los valores de las medias de cada muestra se encontrarán todavía distribuidos normalmente, pero habrá una dispersión más pequeña. A medida que se aumenta el tamaño de la muestra, la distribución de las medias se hace cada vez más compacta (fig. 6b).

Para muestras hechas de cuatro ensayos separados, la desviación standard para las medias de muestra es sólo la mitad de la de los ensayos individuales y, en consecuencia, es de esperar que los valores de las medias de muestra se encuentren alrededor de 1,5 desviaciones standard de la media. Si un valor cae realmente fuera de este límite, casi con seguridad pertenecería a una distribución mucho más ampliamente dispersada, lo que sig-

nificaría que el proceso ha quedado fuera de control. De este modo, un gráfico puede establecerse con límites de control, dentro de los cuales deben de caer todos los valores (fig. 6c).

De modo similar, los intervalos entre el valor más alto y más bajo en cada muestra varían entre límites preestablecidos y puede establecerse una carta de control para intervalos de muestra, con objeto de controlar la variabilidad del proceso —lo mismo que el gráfico de medias controla el valor medio—. Para una serie de muestras, la media de los intervalos

de muestras da una estimación directa de la variabilidad del proceso. Se llama "intervalo de muestra media". Esto puede usarse con el fin de establecer la desviación standard para las series y fijar los correspondientes límites en la carta de control. Si hay cuatro ensayos en cada muestra, el intervalo de muestra media es, aproximadamente, dos veces la desviación standard. Esta es justamente la cantidad que el Código requiere de la resistencia media de los cubos en exceso de la resistencia especificada.

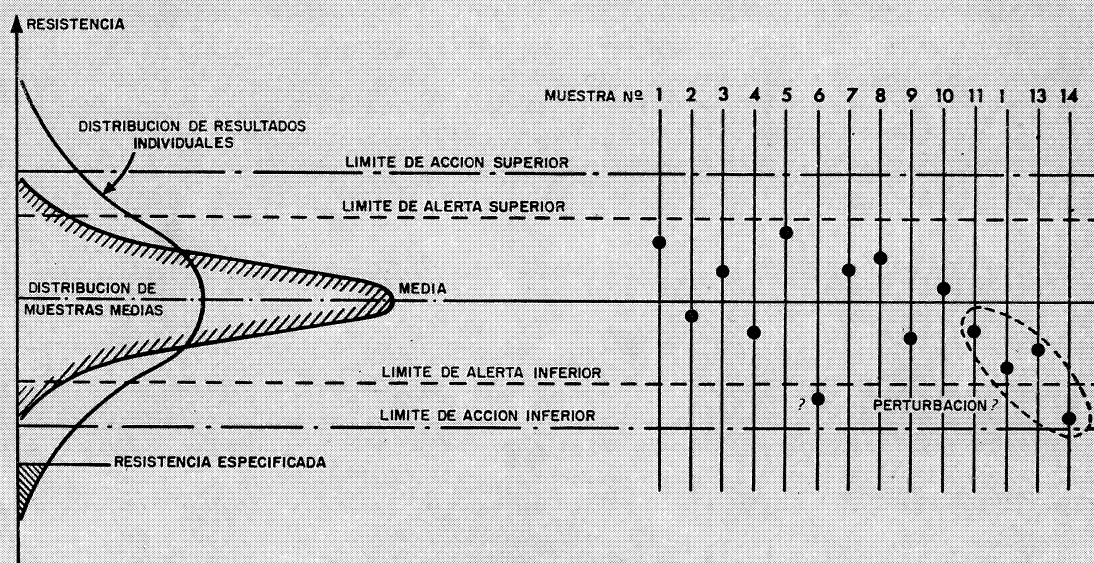


Fig. 6c.—Puede establecerse un gráfico con unos límites de control dentro de los que cabe esperar entren casi todos los valores de muestras medias.

Sobre la base de estos principios, el hormigón se muestrea tomando muestras de cuatro amasadas distintas cada día. El ensayo del "bote sifónico" se hace en cada una de las muestras y, a la vez, se prepara un cubo para ensayar al día siguiente. Se establecieron los gráficos de control para las medias y para las dispersiones, tanto para el ensayo del "bote sifónico" como para el ensayo de cubos.

La figura 7 muestra los gráficos de control para un período de varios meses en la factoría de St Neots, durante 1969. Un aspecto notable de estos gráficos es la similitud de tendencias en ambos ensayos. Esto es de esperar, puesto que la principal variable que afecta los resultados en ambos ensayos es la relación agua/cemento. La lectura también se afecta, pero en menor escala, por las variaciones en las cantidades de cemento y áridos.

Realizado el gráfico de esta forma se encontró que el ensayo del "bote sifónico" dio una inmediata y exacta indicación de las tendencias adversas en la planta de amasado del hormigón, lo que podría investigarse a las pocas horas de encontrarse el proceso "fuera de control".

El valor de la resistencia media y, en menor grado, la dispersión de la muestra media, puede calcularse en unos pocos minutos y, si el resultado cae por debajo de la resistencia requerida, puede tomarse la acción correctora correspondiente.

Este procedimiento resultó ser extremadamente simple de operación y los gráficos tienen además la ventaja de presentar los resultados de los ensayos de una forma visual que puede entenderse rápidamente, tanto por el encargado de los ensayos como por el encargado de la amasadora.

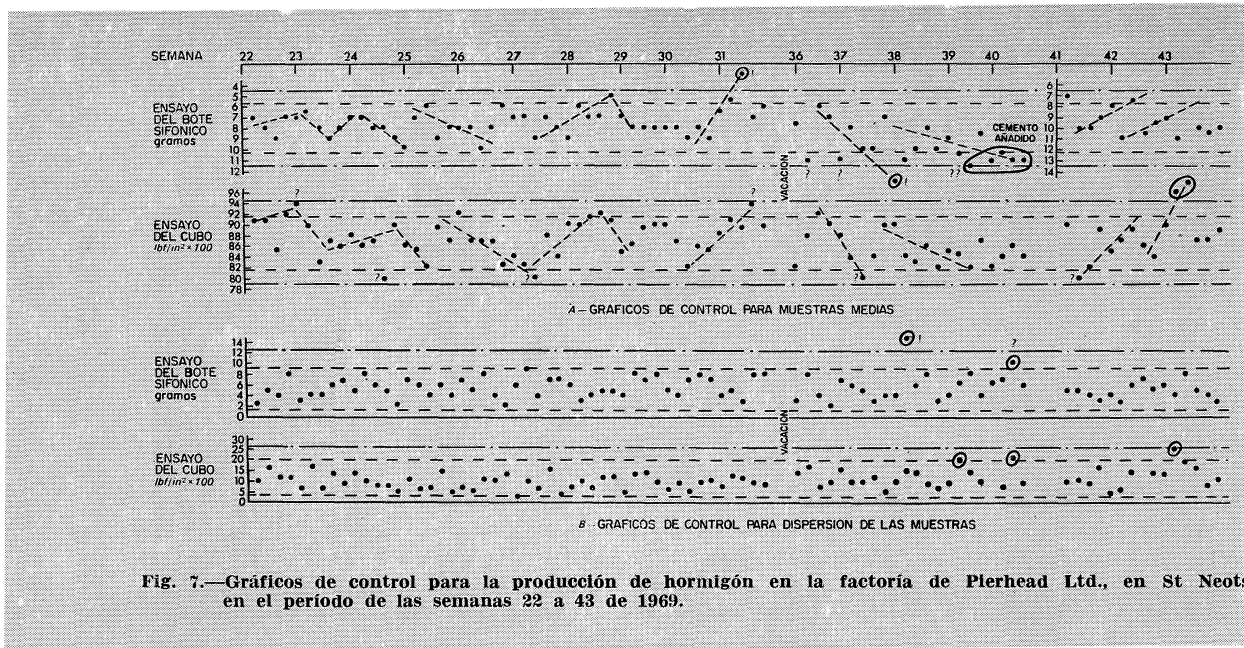


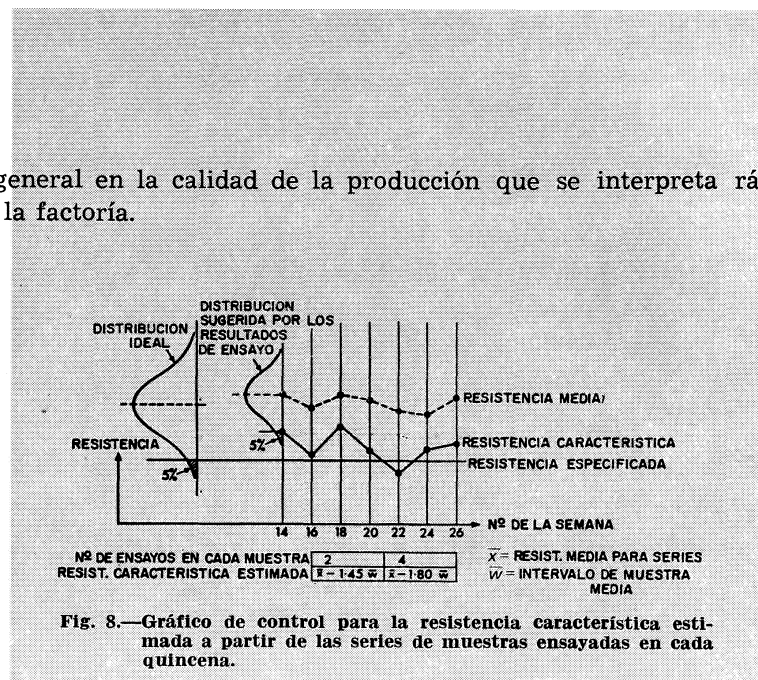
Fig. 7.—Gráficos de control para la producción de hormigón en la factoría de Pierhead Ltd., en St Neots en el periodo de las semanas 22 a 43 de 1969.

RESISTENCIA CARACTERISTICA

En las recomendaciones del Comité Europeo del Hormigón para un Código de buena práctica para el hormigón se introdujo el concepto de “resistencia característica”, a través del cual las resistencias proyectadas se definen en términos de una probabilidad estadística más que de un valor mínimo. En Inglaterra, un nuevo esquema del Código define la resistencia característica como “el valor por debajo del cual no más del 5 % de los ensayos resulten fallidos”. Para un gran número de resultados viene dada por la resistencia media menos 1,64 desviaciones standard. Este concepto se ha adoptado recientemente en las factorías Pierhead y aplicado tanto a los ensayos de cubos como a los ensayos de flexión con la idea de optimizar la producción de viguetas y de conservar los valores característicos de los resultados de los ensayos lo más cerca posible de los valores especificados.

Las viguetas se ensayan en muestras de dos por día y, cada 15 días, se establecen rápidamente valores característicos aproximados para el módulo de Young, la resistencia a flexión y la resistencia en cubos a partir de los valores medios y de los intervalos de muestra medios para las series de muestras. Se ha ideado un gráfico de control (fig. 8) sobre el que se representan estos valores característicos junto con las resistencias medias. Si se amplía el espacio entre la resistencia media y la resistencia característica, hay un aumento en la variabilidad. Si la resistencia característica cae por debajo de la línea base que se establece en la resistencia especificada, puede anticiparse una velocidad de caída por encima del 5 %. Los gráficos resultantes presentan un esquema muy valioso de

la tendencia general en la calidad de la producción que se interpreta rápidamente por el director de la factoría.



EL SISTEMA EN OPERACION

Día a día se ejerce un control de la planta de amasado de hormigón tomando medidas si se detectan tendencias adversas en los gráficos de control del "bote sifónico" o si se reciben quejas de los operarios que encuentran dificultades en el manejo del hormigón. El control total se basa en el gráfico de control de factoría que se actualiza cada 15 días.

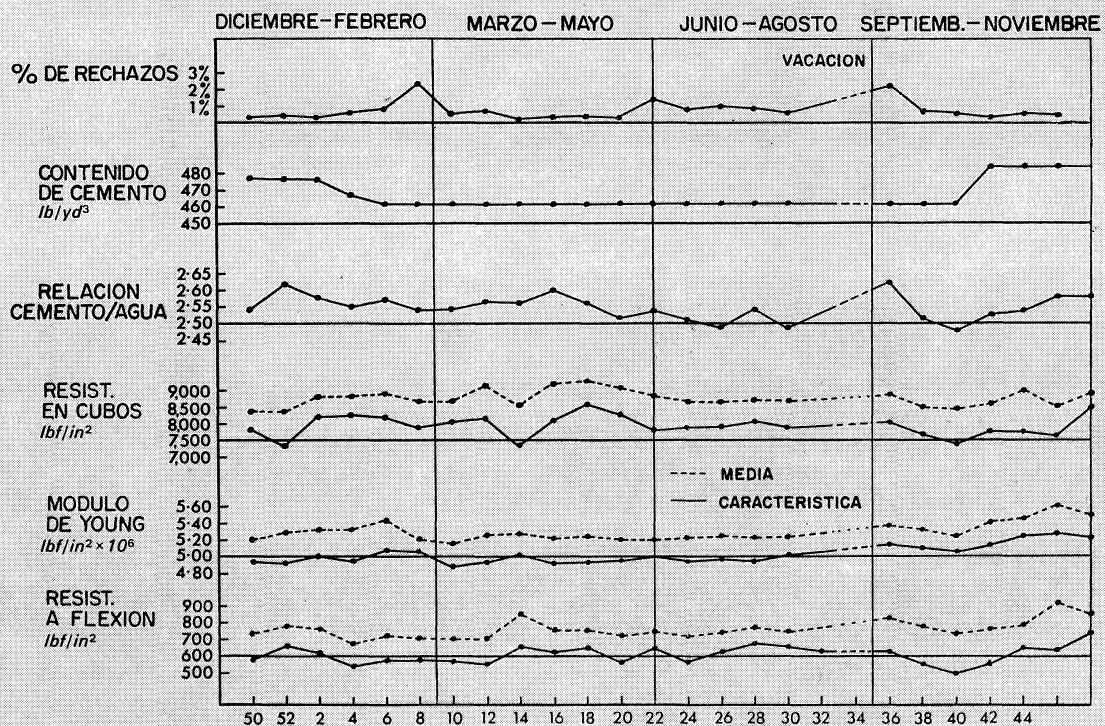


Fig. 9.—Gráfico de control para la factoría de Pierhead en St Neots para el período 1968-1969.

La figura 9 es el gráfico para el primer año completo de operación del sistema en la factoría de St Neots. Además de las resistencias, se representan los valores para el porcentaje de rechazos, puesto que éste tiende a aumentar a medida que el hormigón se hace más difícil de compactar, y para la cantidad de agua y cemento en la mezcla, ya que estos dos son los factores principales que controlan la resistencia y la compactación. La relación cemento/agua se emplea con preferencia a la relación agua/cemento porque todas las curvas tienden a elevarse al aumentar la resistencia. De esta forma el gráfico da una representación visual de todos los factores importantes que determinan el provecho de la producción y la utilidad del producto.

Los siguientes ejemplos de las varias decisiones tomadas por la dirección de la fábrica sobre la base de las tendencias mostradas en el gráfico sirven para ilustrar el sistema en operación.

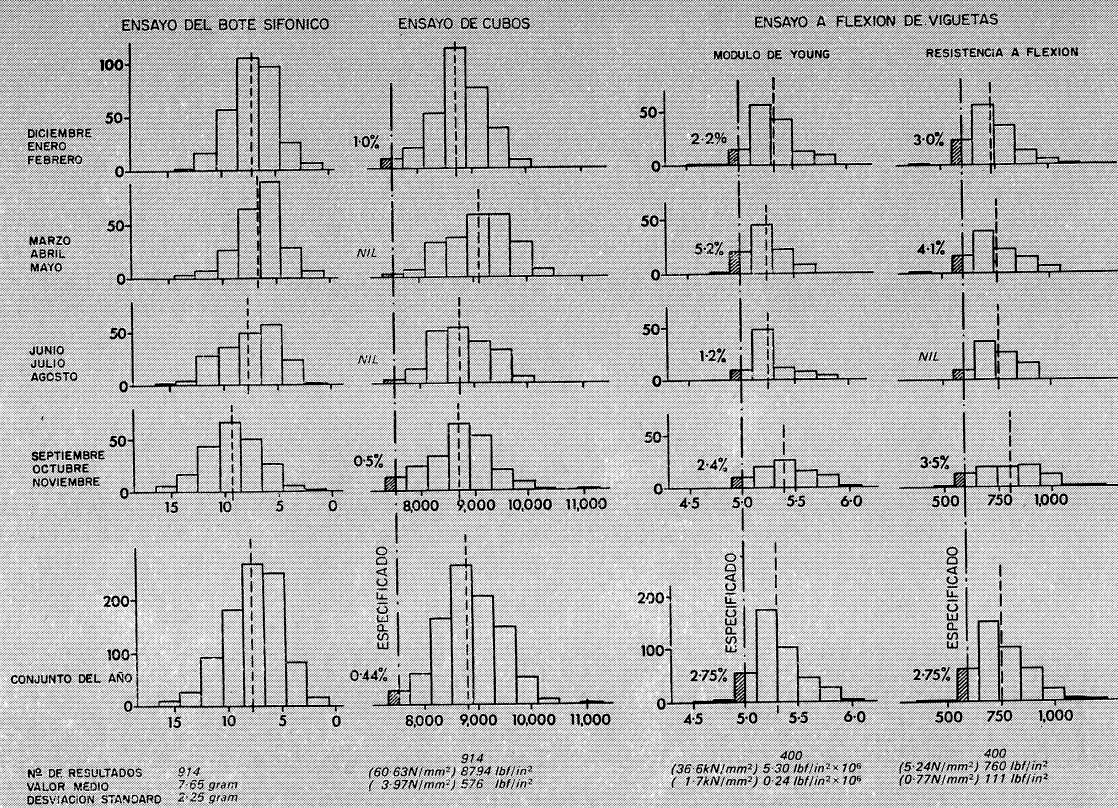


Fig. 10.—Análisis de los resultados de los ensayos recogidos desde diciembre de 1968 a noviembre de 1969 de la factoría Pierhead en St Neots.

Como resultado del rápido aumento en la resistencia de los cubos al final de la segunda semana, se hicieron economías de cemento en las cuatro siguientes semanas que fueron contrapesadas por un brusco aumento en los rechazos motivado por la disminución concomitante en la trabajabilidad. También había una caída en la resistencia a flexión. Se estrechó la vigilancia para reducir los deshechos, pero entre las semanas seis y diez

surgió una caída en el módulo de Young, acompañada de algunos resultados bajos. Para corregir esto, los esfuerzos se concentraron en reducir la variabilidad, aumentando el contenido de agua en la esperanza de que esto también aumentaría el módulo al conseguir una mejor compactación. Esta situación se ha alcanzado hacia la semana 22.

El segundo aumento brusco en los rechazos después de las vacaciones de verano, motivado por el tiempo caluroso, tuvo un efecto desafortunado sobre la bonificación pagada a los operarios. En estas circunstancias el operario de la amasadora producía hormigón más húmedo, más fácilmente compactado, para corregir la situación. Esto se detectó inmediatamente por el gráfico de control del “bote sifónico” mostrada en la figura 7A. Sin embargo, al final de la semana 38 la situación era aún satisfactoria. Desgraciadamente, la tendencia continuó hasta el final de la semana 40 cuando el gráfico de control de la factoría mostró resultados adversos para la relación cemento/agua, resistencia de cubos y resistencia a flexión, lo que, finalmente, impulsó a la dirección a aumentar el contenido de cemento.

Para conseguir los histogramas mostrados en la figura 10 se ha hecho uso del análisis por computador de todos los resultados de los ensayos en cada trimestre y en todo el año. Es interesante señalar que la única vez que los ensayos fallidos superaron el límite aceptable del 5 % para el módulo elástico ocurrió en el segundo trimestre, época en que la resistencia de los cubos fue la más alta del año.

CONCLUSIONES

De la evidencia de los resultados de los ensayos de control de calidad rutinarios, recogidos durante este primer año, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- 1) El número de resultados que caen por debajo de los niveles especificados se han conservado generalmente bien dentro de la frecuencia aceptable del 5 %, lo cual confirma que las técnicas aplicadas han permitido mantener un control efectivo, logrando simultáneamente una considerable economía en el consumo de cemento.
- 2) La buena correlación entre las lecturas del “bote sifónico” y las resistencias de los cubos, tanto en los gráficos de control como en los histogramas para los cuatro trimestres del año, confirma la utilidad del ensayo del “bote sifónico” para hacer medidas directas sobre la calidad del hormigón fresco.
- 3) La mala correlación entre la resistencia de los cubos y el módulo elástico en los cuatro trimestres del año es un resultado inesperado y confirma el punto de vista, mantenido por la compañía durante muchos años, de que los ensayos de cubos no dan necesariamente una buena indicación de la calidad de los componentes hechos con el mismo hormigón.

Es de esperar que el sistema de ensayo de control descrito en este trabajo haya demostrado la utilidad de las técnicas estadísticas y el valor de los ensayos directos sobre el producto actual con preferencia al ensayo de control por cubos. Es de esperar también que se reconozca el uso del ensayo del “bote sifónico” como método para controlar la producción del hormigón fresco. Por su experiencia, la firma Pierhead Limited tiene pocas dudas de si se adoptarán éstas u otras técnicas similares más ampliamente en la industria de la construcción para conseguir considerables economías y mejores calidades.

RESUMEN

Las técnicas de control de calidad estadísticas se emplean hoy ampliamente para mantener la calidad de artículos producidos en masa a un nivel que es, además de económico, aceptable. En la fabricación de componentes de hormigón pretensado la resistencia del hormigón se encuentra quizás en exceso del mínimo requerido y, con frecuencia, se toleran variaciones considerables tanto en el hormigón como en el pretensado. Puesto que se dispone de poderosas técnicas de control estadístico, es sorprendente que no se empleen en mayor extensión en la industria del hormigón preamasado y que cuando se usen se haga a un nivel tan rudimentario. Este artículo se basa en un trabajo presentado en el último congreso de la FIP en Praga.

BIBLIOGRAFIA

- (1) MASTERMAN, O. J.: "Quality Control in Prestressed Concrete Production". *Magazine of Concrete Research*. Vol. 10, núm. 29, August 1958, pp. 57-62.
- (2) McINTOSH, J. D.: "The siphon-can test for measuring the moisture content of aggregates". *London Cement and Concrete Association*. July 1955, p. 12. Technical Report TRA/198.
- (3) BRITISH STANDARDS INSTITUTION. CP116:1965: *The Structural Use of Precast Concrete*. London, p. 129, clause 703.
- (4) BRITISH STANDARDS INSTITUTION. CP116:1965: *The Structural Use of Precast Concrete*. London, pp. 28-29, clause 210.
- (5) SHEWHART, W. A.: *The economic control of quality of a manufactured product*. New York. D. Van Nostrand Co., 1931.
- (6) BRITISH STANDARDS INSTITUTION: *Draft British Standard Code of Practice for the Structural Use of Concrete*. London, 1969, p. 22, clause 3.2.
- (7) FEDERATION INTERNATIONALE DE LA PRECONTRAINTE/COMITE EUROPEEN DU BETON: *Practical recommendations for the design and construction of prestressed concrete structures*. London FIP. Provisional Edition 1969, p. 81.
- (8) HUITSON, A., and KEEN, J.: *Essentials of quality control*. London. William Heinemann Ltd., 1965 p. 128.