

Bondad de los criterios del ACI para calificar la calidad de un hormigón

Se analizan los criterios de aceptación de un hormigón por resultados de resistencia, bajo el punto de vista de las curvas características de operación (Curvas O-C), se concluye que los criterios del ACI dan al consumidor de hormigón un riesgo alto de aceptar un producto que no cumpla con las especificaciones.

J. GABRIEL GOMEZ CORTES.
Ingeniero Civil
Profesor asistente depto. ingeniería civil
Laboratorio de Ensayo de Materiales
Universidad Nacional

Pag. 10 — 16
Ingeniería e Investigación
Volumen 3 Nº 2
Trimestre 1 — 1985

El sistema más acogido en el país, por no decir que el único, para aceptar la calidad del hormigón suministrado a una obra, es el planteado por el Instituto Americano del Concreto (ACI). No obstante, esos criterios de aceptación y la eficacia con que califican el hormigón suministrado, han demostrado no ser los más eficientes, especialmente porque implican un riesgo relativamente bajo para el suministrador del hormigón, pero uno alto para el consumidor, por lo cual han sido cuestionados crecientemente en los últimos tiempos.

VARIABILIDAD DE RESULTADOS EN LOS ENSAYOS SOBRE HORMIGON

Dada la gran cantidad de factores que afectan las propiedades del hormigón, entre ellas su resistencia, es natural que los resultados de pruebas que evalúen esas características sean variables, en un mayor o menor grado. Esa variabilidad, que debe tenerse en cuenta cuando se especifica una resistencia y se diseña una mezcla para satisfacer esa resistencia, debe ser analizada mediante métodos estadísticos.

Se considera que, bajo circunstancias sensiblemente iguales y contando con un adecuado número de muestras (generalmente un mínimo de 30 según criterios estadísticos), la distribución de frecuencias de esas propiedades toma una forma gaussiana, tendiendo a centrarse en un valor medio (promedio) y siendo más o menos achatada según la variabilidad, evaluada esta última mediante la desviación standard. Resulta evidente que si una mezcla es dosificada para que el valor promedio de la resistencia obtenida (f_{cr}) sea igual al valor de la resistencia especificada para la obra (f'_c), se tendrá un 50% de probabilidades de tener valores menores que ésta, lo cual es inadmisibles desde el punto de vista de la seguridad. En consecuencia, la mezcla debe diseñarse para obtener un valor promedio mayor que la resistencia especificada ($f_{cr} > f'_c$). Qué tan excesivo deba ser ese valor depende básicamente de dos cosas: 1) El grado de dispersión que se estima presentará los resultados y que está íntimamente ligado con el grado de control que se tenga en la obra. 2) El porcentaje de resultados de pruebas que se esté dispuesto a admitir por debajo de esa resistencia especificada y que está acorde con los requisitos de seguridad. Generalmente este porcen-

taje oscila entre 5% y 10% para el hormigón, siendo más aceptado el primero. Imponer un porcentaje menor implicaría unos sobrecostos enormes en la fabricación de mezclas así dosificadas sin un aumento apreciable en la seguridad, mientras que aumentar ese porcentaje apunta en el sentido contrario: no hay una economía apreciable pero sí una disminución grande en la seguridad de las obras hechas con ese hormigón. Si la distribución es del tipo normal o gaussiano, ese valor que deja por debajo un porcentaje dado de los resultados (o un porcentaje dado del área bajo la curva, pues los intervalos deben ser iguales) está dado por la expresión:

$$f_k = f_{cr} - tS \quad \text{ó} \quad f_k = \bar{X} - tS$$

donde:

- f_k**: Resistencia característica de la mezcla. Aquella que garantiza que sólo un porcentaje dado de resultados está por debajo de ese valor;
- f_{cr}**: Resistencia de diseño de la mezcla. Promedio de los resultados obtenidos;
- S**: Desviación standard.
- t**: Constante cuyo valor depende del porcentaje de resultados por debajo de **f_k** que se esté dispuesto a aceptar (1.64 si se acepta el 5% y 1.28 si se acepta el 10%).

Naturalmente, una dosificación será adecuada si se obtiene una resistencia característica (**f_k**) igual a la especificada para la obra (**f'_c**), será antieconómica si es mayor que la especificada y será insegura si es menor que la especificada.

CRITERIOS DE ACEPTACION

La mayoría de los códigos o especificaciones para construcción tienen en cuenta dos valores para establecer el cumplimiento de los requisitos de calidad exigidos en el hormigón: el promedio de los resultados de un cierto número de pruebas y el menor de los valores obtenidos. Básicamente, existen dos criterios que incluyen límites para valores bajos del promedio y del menor valor, así (Ref. 1):

Criterio I

$$\begin{aligned} \bar{X}_3 &\geq f_k + k_1 \\ X_1 &\geq f_k - k_2 \end{aligned}$$

Criterio II

$$\begin{aligned} \bar{X} - tS &\geq f_k \\ X_1 &\geq f_k - k_2 \end{aligned}$$

donde:

- \bar{X}_3** : Promedio de tres valores, sin superposición;
- X₁**: Menor valor obtenido en los ensayos;
- K₁, K₂**: Constantes que dependen del nivel de producción;
- \bar{X}** : Promedio de una serie de por lo menos 15 muestras;
- t**: Constante que depende del porcentaje de resultados admisibles por debajo de **f_k**;
- S**: Desviación standard.

Como se examinará más adelante, en cuanto mayor sea el número de muestras, menor será la probabilidad de aceptar un hormigón que no cumpla especificaciones, independientemente del criterio seguido. No obstante, es reconocido que el criterio N° II es más sensible a las variaciones del promedio y la desviación, aunque tiene, naturalmente, el inconveniente de requerir mayor número de muestras para establecer el juicio de aceptación.

El Instituto Americano del Concreto, por medio de su comité 214 establece los siguientes criterios de aceptación, los dos últimos recogidos por la norma colombiana Icontec 2000 y el Código Colombiano de Construcciones sismo-resistentes:

- 1) Una probabilidad menor de 1 en 10 de que una prueba individual de resistencia tomada al azar sea más baja que la resistencia especificada **f'_c**
- 2) Una probabilidad de 1 en 100 de que el promedio de tres pruebas consecutivas de resistencia sea menor que la resistencia especificada **f'_c**
- 3) Una probabilidad de 1 en 100 de que una prueba individual de resistencia esté en más de 35 kg/cm² por debajo de la resistencia especificada **f'_c**

Expresando estas recomendaciones en forma de ecuación con los valores de **t** recomendados por el mismo comité 214, se tiene lo siguiente (Ref. 5):

$$\begin{aligned} f_{cr} &= f'_c + 1.282 S && \text{(Criterio 1)} \\ f_{cr} &= f'_c + 1.343 S && \text{(Criterio 2)} \\ f_{cr} &= f'_c - 35 + 2.326 S && \text{(Criterio 3)} \end{aligned}$$

Como puede observarse, los criterios 1 y 2 muestran directamente que el coeficiente **t** es menor del 1.64 requerido para obtener 5% de resultados por debajo. El criterio 3 implícitamente también lo es, pues para alcanzar ese valor de 1.64 la desviación standard debe ser del orden de 50 kg/cm², valor muy alto para una obra corriente. El mismo ACI menciona que el máximo valor de la resistencia de diseño de la mezcla debe exceder cuando mucho en 85 kg/cm² a la resistencia de diseño del calculista, pues de lo contrario resultan mezclas antieconómicas y debe buscarse disminuir la desviación, mediante un control más riguroso de la mezcla. Estos tres criterios muestran incluso porcentajes diferentes de resultados por debajo de la resistencia especificada, cuyos valores oscilan entre 3.4 y 9.2 para el primer criterio, 0.1 y 1.0 para el segundo y 0.02 y 1.0 para el tercero (Ref. 2). En otras palabras, el nivel de resistencia requerido no es un valor único, cambia de acuerdo con el grado de control de la producción.

CURVAS CARACTERISTICAS DE OPERACION (CURVAS O-C)

La tecnología del hormigón debe recurrir frecuentemente a la ayuda de las técnicas de control de calidad, que han mostrado un importante avance en otros campos. Una de las más eficaces herramientas de estas técnicas es la curva característica de operación (Operational Characteristic u O-C), que

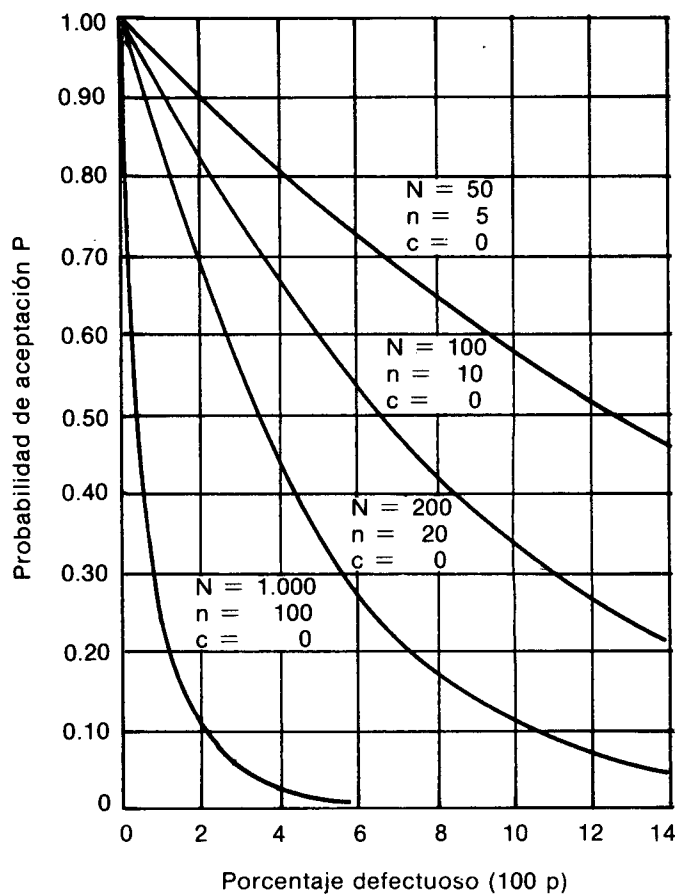


FIGURA 1. Curvas de operación característica para cuatro planes de muestreo con diferente tamaño de lote y tamaño de la muestra 10% el tamaño del lote.

muestra el porcentaje de probabilidad de aceptación de un lote de productos de acuerdo con el porcentaje de productos defectuosos presentes en el mismo.

La aceptación de la calidad del hormigón debe basarse en resultados de muestras tomadas al azar, dado que sería imposible la inspección 100%. Un plan de muestreo debe definirse mediante tres números: el número de artículos (o volumen en el caso de hormigón) que compone el lote y del cual se van a sacar unos cuantos para la muestra (tamaño del lote, N); el número de artículos (o cilindros en el hormigón) que son sacados al azar del lote (tamaño de la muestra, n) y el número de aceptación (máximo número de artículos defectuosos permitidos en la muestra, c).

Al evaluar la calidad del hormigón suministrado existe probabilidad en dos sentidos: la probabilidad de que un concreto que cumple con la resistencia no sea calificado como satisfactorio y la de que uno que incumpla sea calificado como satisfactorio. La primera probabilidad se denomina "riesgo del fabricante" y la segunda "riesgo del consumidor".

Para una mejor comprensión del significado e importancia de las curvas O-C es conveniente hacer algunas precisiones:

La protección dada por los sistemas de muestreo no es constante cuando la relación tamaño de la muestra/tamaño de lote es constante ($n/N = cte$).

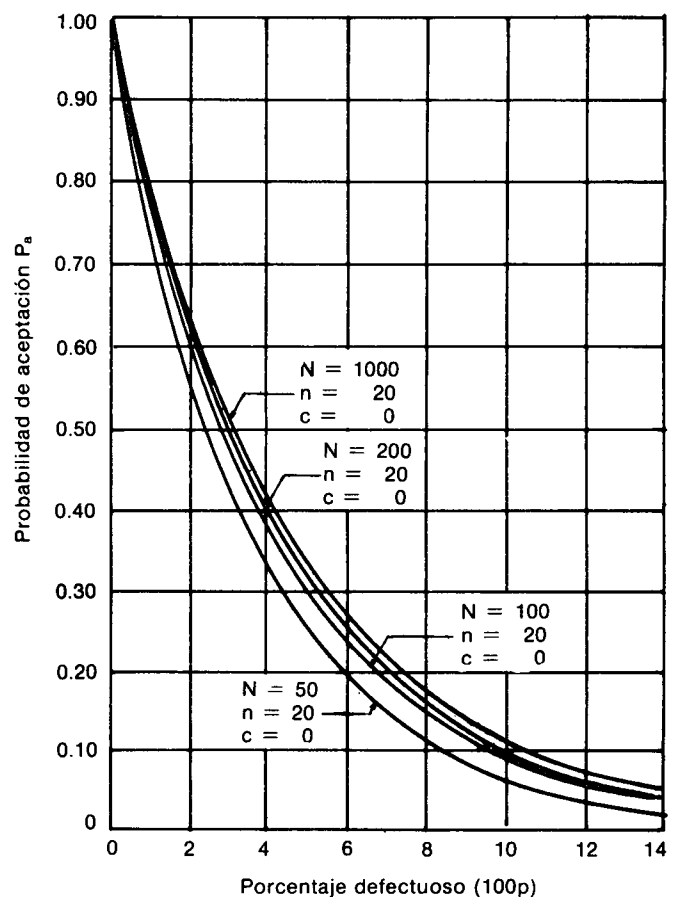


FIGURA 2. Curvas O-C para cuatro planes de muestreo con igual tamaño de la muestra y diferente tamaño del lote.

Esto se aprecia claramente en la figura N° 1 (Ref. 3). Allí se observa, por ejemplo, que los lotes que presentan 5% de defectuosos tienen diferente probabilidad de ser aceptados, tomando en todos los casos n como el 10% de la muestra, así: un 77% si el tamaño del lote (N) es de 50; un 57% si N es de 100; un 35% si N es de 200 y apenas un 1% si N es de 1.000. Naturalmente, cualquier suministrador estará inclinado a tratar de que su hormigón sea inspeccionado en lotes pequeños más que en lotes grandes.

Es más importante el tamaño absoluto de una muestra que su valor relativo comparado con el tamaño del lote, es decir, es el tamaño absoluto de la muestra el que determina la protección de la calidad dada por un plan de muestreo. Esto se ilustra en la Fig. N° 2 que muestra las curvas O-C para cuatro planes diferentes de muestreo que tienen el mismo tamaño de muestra (n), pero con tamaños de lote (N) de 50, 100, 200 y 1.000 (Ref. 3). Se observa que las curvas muestran mucha semejanza, aun cuando el tamaño de la muestra respecto al lote varía del 20% al 2%. En otras palabras, existe una probabilidad de aceptación muy parecida si un determinado número de muestras califica a lotes de tamaño grande o pequeño. De la fig. se deduce que v. gr., la probabilidad de aceptación de un lote con 5% de muestras defectuosas es del 36% cuando el tamaño del lote es de 1.000; de 35% cuando es de 200; de 32.5% cuando es de 100 y de 28% cuando es de 50.

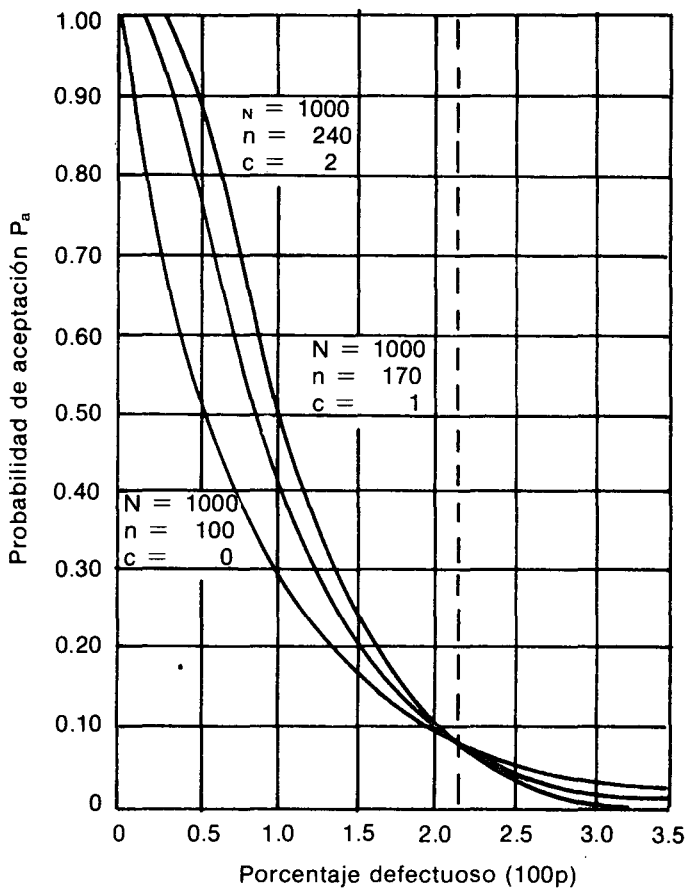


FIGURA 3. Curvas O-C para tres planes de muestreo con 10% de probabilidad de aceptación de un lote con 2.2% de defectuosos.

Evidentemente, resulta más económico examinar 20 muestras para calificar un lote de 1.000 que examinar el mismo número para calificar un lote de apenas 50.

Los planes con tamaño de muestra más grande (n) tienen mayores posibilidades de discriminar entre lotes aceptables y no aceptables. En estricta teoría, una curva O-C ideal de pruebas sería aquella que fuese una recta vertical, como la indicada a trazos en la Fig. N° 3: cualquier lote con un porcentaje de defectuosos menor del especificado sería siempre aceptado y uno con un porcentaje mayor del especificado sería siempre rechazado. Desafortunadamente, esto se logra únicamente mediante un plan de pruebas con un número infinito de muestras, pero es claro que cuanto más se aproxime una curva O-C a esta situación ideal (mayor pendiente), mayor será su eficacia para discriminar entre lotes aceptables y no aceptables.

La figura N° 3 (Ref. 3) presenta tres curvas O-C con el mismo tamaño de lote pero diferente tamaño de muestra y número de aceptación, con una probabilidad de aceptación del 10% de un lote con 2.2% de defectuosos: la que posee un n mayor presenta una mayor pendiente en una buena parte de la curva. Además muestra que los planes concebidos con un mayor número de aceptación dan al productor mejor protección contra el rechazo de lotes satisfactorios; por ejemplo, lotes con 0.5% de defectuosos

tendrán probabilidad de ser rechazados el 41% de las veces con c 0; el 20% con c 1 y el 8% con c 2, naturalmente, a costa de tener que examinar un mayor número de muestras (100, 170 y 240) para calificar el mismo lote, lo que significa mayor inspección y consecuentemente mayores costos. De otro lado, los modernos procedimientos de muestreo aceptan una relativa ventaja psicológica de permitir por lo menos un defectuoso en una muestra, máxime si se tiene en cuenta que, como lo muestran las Figs. 1 y 2, una muestra perfecta ($c = 0$) no garantiza un lote perfecto.

En resumen, desde el punto de vista consumidor de un producto (hormigón en este caso), es más favorable examinar lotes de tamaños grandes (mayor volumen de hormigón) con el consecuente mayor tamaño de la muestra (mayor número de ensayos); es más importante el tamaño absoluto de de la muestra (número de muestras), que el valor relativo respecto al tamaño del lote; y es más adecuado trabajar con números de aceptación mayores. En tecnología del hormigón estos con-

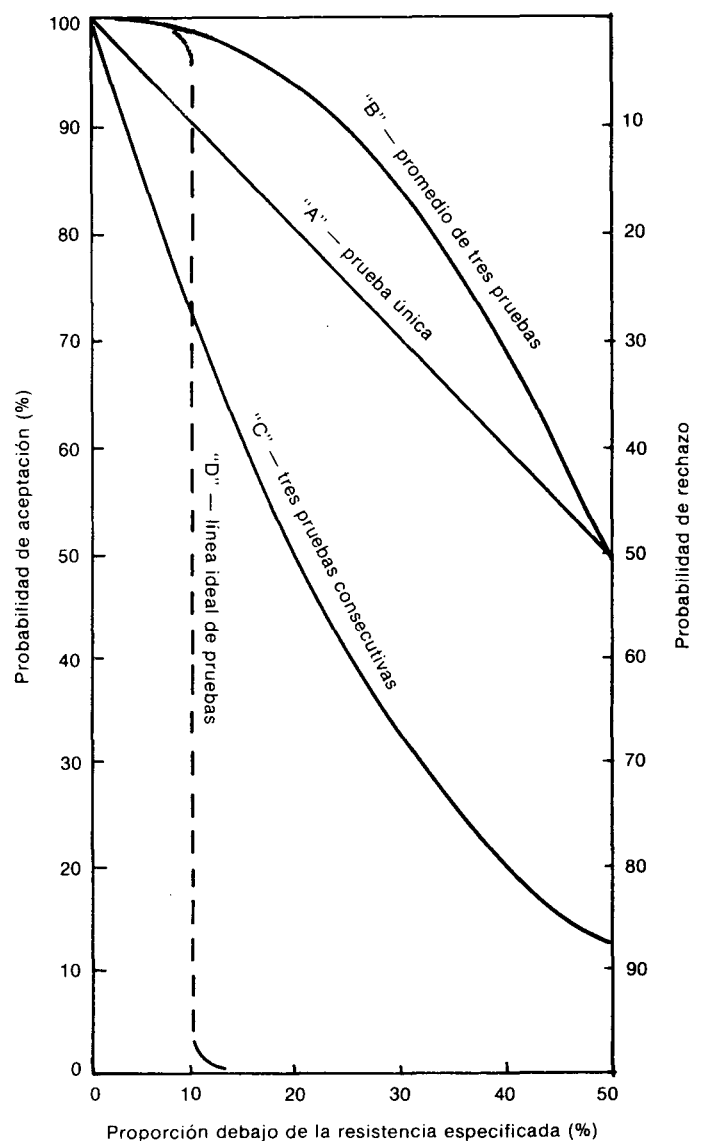


FIGURA 4. Curvas O-C para criterios de aceptación en hormigón.

ceptos se ven matizados por el hecho de que se evalúan mezclas preparadas en días diferentes, con la variación de condiciones ambientales y de otros tipos y lo que esto implica en la uniformidad del producto.

CRITERIOS DE ACEPTACION DEL ACI

Las curvas O-C para los criterios de aceptación más usados se muestran en la Fig. Nº 4 (Ref. 2), así:

- 1) El criterio de que ningún resultado de prueba individual debe ser menor que la resistencia especificada f_c , está representado por la curva A. Es claro que existe, desde el punto de vista de este criterio, un alto riesgo para el consumidor, pues con un hormigón con 50% de muestras que caen por debajo de la resistencia especificada, hay aún 50% de probabilidades de aceptar.
- 2) El promedio de tres pruebas de resistencia no deberá ser menor que la resistencia especificada. Este criterio está representado por la curva B. Ella muestra un riesgo aún más alto para el consumidor.

- 3) El tercer criterio "ninguna de las tres pruebas consecutivas de resistencia deberá ser menor que la resistencia especificada, está representado por la curva C. Esta favorece un poco más al consumidor. Recordemos que la curva O-C ideal sería aquella vertical, para la cual bastaría que se incrementase levemente el porcentaje de muestras defectuosas o que no cumplen con la resistencia especificada para que el lote no tuviese ninguna probabilidad de aceptación, o que fuese levemente inferior para que tuviese 100% de probabilidades de aceptación.

La curva característica para los criterios combinados de aceptación 2 y 3 del ACI anteriormente enumerados se muestra en la Fig. Nº 5 (Ref. 2); considerando para el tercer criterio una desviación de 35 kg/cm². El permitir 1% de posibilidad de obtener resultados más de 35 kg/cm² por debajo de f_c hace remota esa posibilidad, pues dentro de las dispersiones comúnmente obtenidas, es raro encontrar estos resultados. Del examen de ella es claro las probabilidades favorables de aceptación para el fabricante, aún con altos porcentajes de muestras por debajo de la resistencia especificada.

TABLA 1. Algunos criterios de aceptación de normas nacionales.

Referencia a la figura 7	Norma nacional	Número de ensayos	Desviación típica	t	Criterio de aceptación	Observaciones
A	República Federal Alemana	35	estimada por S_{35}	1.65	$\bar{x}_{35} - 1,65 S_{35} \geq f_c$	
B		15	σ conocida	1.65	$\bar{x}_{15} - 1,65 \sigma \geq f_c$	
C		3	σ desconocida	—	$\bar{x}_3 - 50 \geq f_c$ $x_1 \geq f_c$	(1) (2) (3)
D		9	desconocida	—	$\bar{x}_9 - 5,0 \geq f_c$ $x_1 \geq 0,8f_c$	(1) (2) (3)
E	Holanda	12	estimada por S_{12}	1.52	$\bar{x}_{12} - 1,52 S_{12} \geq f_c$	
F		6	σ conocida	1.52	$\bar{x}_6 - 1,52 \sigma \geq f_c$	
G	Reino Unido	4	σ conocida	0.82	$\bar{x}_4 - 0,82 \sigma \geq f_c$	(1)
H	España	12	desconocida	—	$2 \cdot \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_5}{5} - x_4 \geq f_c$	(4)
I		6	desconocida	—	$x_1 + x_2 - x_3 \geq f_c$	(4)
J	U.S.A.	3	desconocida		$\bar{x}_3 \geq f_c$ $x_1 \geq f_c - 3,5$	(1) (2) (3)
K	Francia	30	estimada por S_{30}	1.69	$\bar{x}_{30} - 1,69 S_{30} \geq f_c$	(5)

OBSERVACIONES A LA TABLA 1.

- (1) \bar{x}_n es aquí una media encadenada, referida a cualquier conjunto de n resultados consecutivos
- (2) Unidades en N/mm².
- (3) x_1 es el más bajo de los valores de la serie.
- (4) Los n resultados de ensayo se colocan en orden creciente de magnitud de x_1 a x_n . La mitad más baja de la serie, x_1, x_2, \dots, x_m se utiliza en la función:

$$Z(x) = 2 \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{m-1}}{m - 1} - x_m;$$

donde:
 $m = n/2$ para valores pares de n; y $m = (n - 1)/2$ para valores impares de n.

- (5) Se ha incluido este criterio como representativo de un conjunto de criterios aplicables a 30 ó más resultados de

ensayo y que se utiliza en «control normal» de obras de hormigón pretensado en Francia. Pueden aplicarse también otros criterios de «control atenuado» cuando hay menos de 30 resultados, pero no menos de 6. Por sencillez, no se ha intentado representar estos otros criterios.

El ejemplo K forma parte de un criterio dual, ya que también se exige que $x_3 \geq f_c$. El efecto de este componente es difícil de cuantificar y no se ha tenido en cuenta al dibujar la curva O-C para $\bar{x}_{30} - 1,69 S_{30} \geq f_c$ que aparece en la figura 4. Cualitativamente, el efecto sería aumentar la pendiente de la recta y hacerla moverse hacia la izquierda.

Además, debe observarse que los 30 resultados de ensayo se obtienen haciendo 3 probetas procedentes de 10 amasadas diferentes. Este caso no es directamente comparable con el caso en que se obtiene una sola probeta por amasada, utilizando 30 amasadas diferentes.

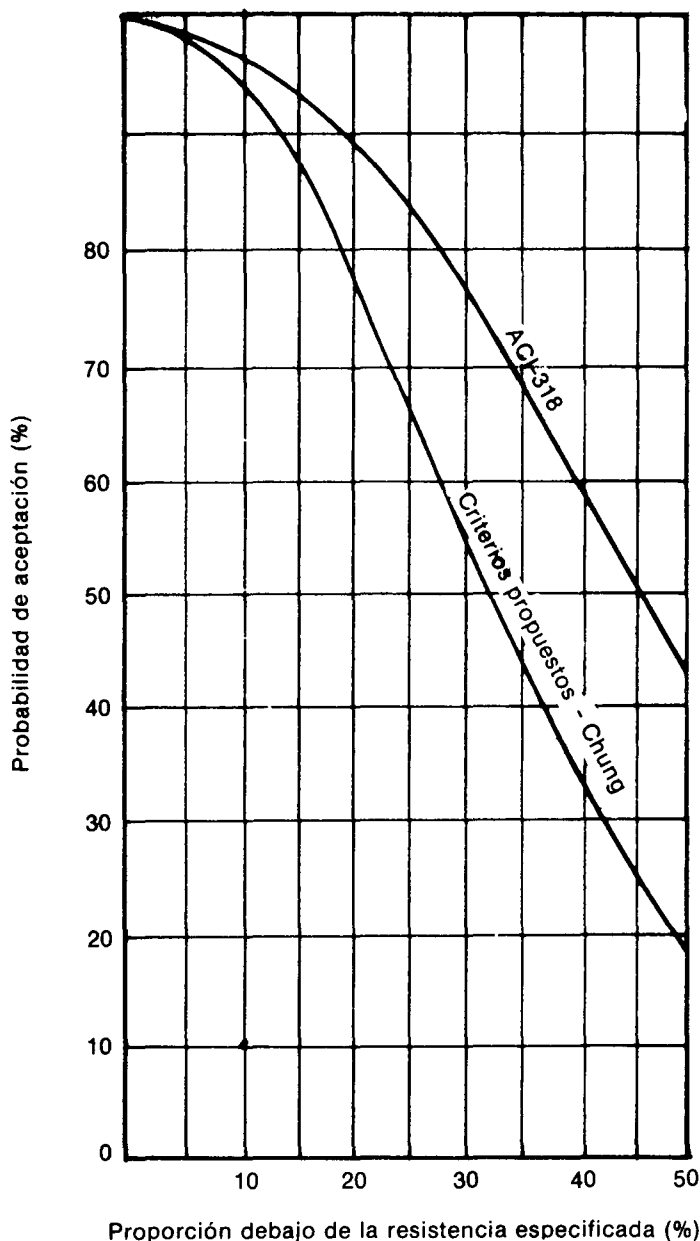


FIGURA 5. Curva O-C para los criterios combinados de aceptación 2 y 3 del ACI.

El comité conjunto CEB-FIP-CIB-RILEM en su documento "Principios recomendados para el control de calidad del hormigón y criterios para su aceptación o rechazo" (Ref. 4) propone unas fronteras para las curvas O-C correspondientes a criterios de aceptación de la forma

$$\bar{X}_n - ts \geq f'_c$$

las cuales se muestran en la Fig. Nº 6. Si la curva se sitúa a la izquierda de la zona definida por las fronteras, puede resultar antieconómica y si se sitúa a la derecha, puede resultar afectada la seguridad de la estructura.

El mismo documento presenta los criterios de aceptación de algunas normas nacionales (tabla Nº 1) y los recoge en forma de curvas O-C, como se muestra en la Fig. Nº 7. De allí se deduce que los criterios del ACI son los que proporcionan mayor riesgo para el consumidor y a partir del 5% de defectuosos coloca la obra construida con ese

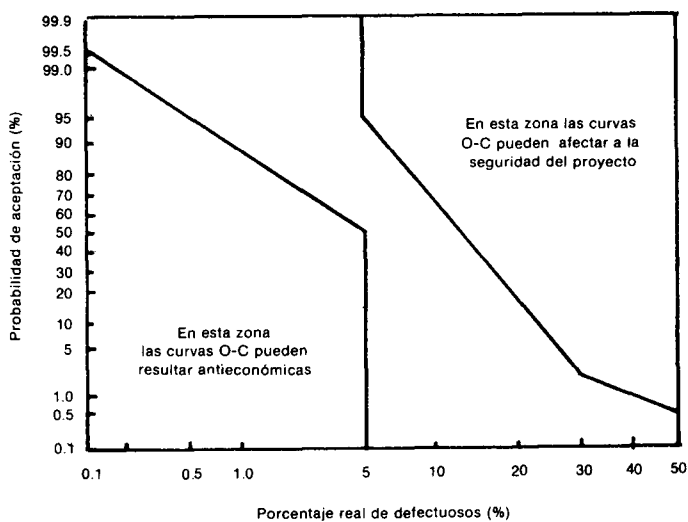


FIGURA 6. Fronteras propuestas para las curvas O-C según el Comité Europe del Hormigón.

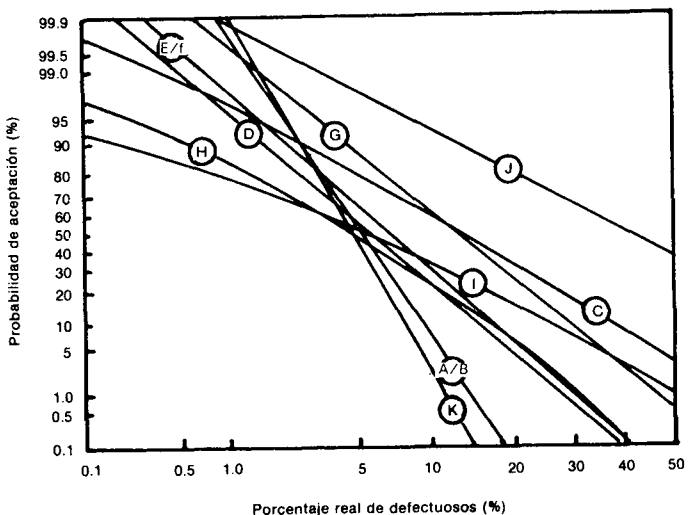


FIGURA 7. Curvas O-C para algunos criterios de aceptación de normas nacionales.

hormigón en la zona donde la seguridad puede resultar comprometida, de acuerdo con los límites propuestos por ese comité.

Para mejorar esa situación H. W. Chung (Ref. 2) ha propuesto una modificación a esos criterios de aceptación con el fin de dar mayor protección al consumidor, equilibrando más los riesgos de éste con los del fabricante. Recordando lo planteado en el numeral 3 en el sentido de que mayor número de pruebas (mayor tamaño de la muestra o n) disminuye la posibilidad de tomar una decisión errada, sugiere utilizar *cuatro* pruebas consecutivas en lugar de un conjunto de tres pruebas. Si se especifica que la resistencia promedio obtenida no debe ser inferior a $f'_c + 0.4S$, el fabricante tiene un riesgo del 5%. Menciona que la desviación standard (S) puede ser reemplazada por el rango del conjunto con lo cual, para un grupo de cuatro resultados, el rango suele ser del orden de dos veces la desviación standard, pudiendo tomarse la resistencia límite como:

$$f = f'_c + 0.2 R$$

donde:

- f:** Resistencia límite o de aceptación
f'_c: Resistencia especificada para el hormigón
R: Rango de cuatro resultados consecutivos de pruebas.

El criterio de posibilidad de 1 en 100 de tener resultados de pruebas por debajo de $f'_c - 35$ trata de detectar el hormigón altamente variable y proporciona los medios para juzgar un solo lote de hormigón, por lo cual considera que debe conservarse. La curva O-C para estos criterios modificados se muestra en la misma Fig. N° 5, en la cual resulta evidente la mejoría respecto a los criterios del ACI.

CONCLUSIONES

- 1) Las curvas características de operación (O-C) constituyen un valioso instrumento para juzgar la calidad de un hormigón suministrado al comparar las posibilidades de aceptación de éste con la proporción de muestras con resistencia por debajo de la especificada. En otras palabras, muestra los riesgos del productor y del consumidor de un hormigón.
- 2) En la medida en que aumenta el tamaño del lote (**N**), mayor es la probabilidad de rechazar un hormigón que no cumple especificaciones, es decir, mayor es la garantía para el consumidor del hormigón. Y más importante que el tamaño relativo de la muestra respecto al lote (N^o de elementos muestreados/ N^o de elementos del lote) es su tamaño absoluto. Planes con tamaño de muestra más grande tienen mayor posibilidad de discriminar entre lotes satisfactorios y no satisfactorios. Es decir, desde el punto de vista de las curvas O-C es preferible tener un alto número de muestras para calificar un también alto volumen de hormigón que poco número de muestras para calificar un bajo volumen de hormigón. Debe tenerse en cuenta que se parte del supuesto que las condiciones de producción son sensiblemente iguales, lo cual, desafortunadamente, no siempre ocurre en el hormigón.
- 3) Las curvas operacionales para los criterios del ACI con los cuales se juzga la calidad de un hormigón muestran que éstos no son precisamente los que más favorecen al consumidor de un hormigón, pues permiten una elevada probabilidad de aceptación de hormigones que presentan un elevado porcentaje de resultados por debajo de la resistencia especificada; llegan incluso a caer durante un buen trecho en la zona que el Comité Europeo del Hormigón considera peligrosa porque puede resultar comprometida la seguridad de la obra.

REFERENCIAS

- Taryal, M. Said. "Analysis of various compliance criteria for compressive strength of concrete". ACI Journal, March-April/82.
- Chung, H. W. "El dilema de la aceptación de pruebas de concreto". Journal del ACI Agosto/78. Traducido por Revista IMCYC, Vol. 18 N° 111, Julio/80.
- Grant, Eugene. "Control de Calidad estadístico" CECSA Comité conjunto CEB-CIB-FIP-RILEM. "Principios recomendados para el control de calidad del hormigón y criterios para su aceptación o rechazo". Revista Informes de la Construcción Nos. 329 y 330. Instituto Eduardo Torroja. Madrid 1981.
- Instituto Americano del Concreto. "Reglamento de las construcciones de concreto reforzado ACI 318-77 y comentarios". Traducción del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto IMCYC. México 1977.
- Sociedad Colombiana de Ingenieros. "Código Colombiano de Construcciones Sismo-resistentes". Decreto 1400 de 1984.