

CAPÍTULO 5 –

ESPECIFICACIÓN Y CONTROL DE CONFORMIDAD DE LA RESISTENCIA

Alberto Giovambattista

ÍNDICE

- 5.1. La naturaleza probabilística de la resistencia del hormigón
 - Histograma de frecuencias y Curva de Gauss
 - Algunas consideraciones sobre la aplicación del modelo de Gauss a la evaluación de la resistencia del hormigón
- 5.2. Resistencia especificada
 - Edad de diseño del hormigón
 - Implicancias tecnológicas y económicas de los valores adoptados para las resistencias especificadas
- 5.3. Resistencia potencial y resistencia efectiva
- 5.4. Criterios de conformidad de la resistencia potencial
- 5.5. Errores en la estimación de la resistencia de un lote.
 - Curvas de operación características (Curvas OC)
 - Líneas de equiprobabilidad
- 5.6. Control de conformidad y criterios de conformidad en el Reglamento CIRSOC 201-2005
 - 5.6.1. Conformidad con la resistencia especificada. Cantidad de ensayos y dimensiones de los lotes
 - 5.6.2. Criterios de conformidad de resistencia para el Modo 1 de Control
 - 5.6.3. Criterios de conformidad para el Modo 2 de Control

- 5.7. La resistencia media a utilizar para el diseño de la mezcla (dosificación) y la resistencia especificada
- 5.8. Evaluación del desarrollo de la resistencia efectiva
 - 5.8.1. Método del ensayo de probetas moldeadas
 - 5.8.2. Método de la madurez del hormigón
 - 5.8.3. Ejemplo de aplicación del método de madurez del hormigón
 - 5.8.4. Un ejemplo que ilustra sobre la información aportada por el método de madurez
- 5.9. Verificaciones a realizar cuando un lote no posee la resistencia potencial especificada
- 5.10. Referencias*

* Las referencias se indican de la siguiente forma:

- () citas de artículos de este mismo Libro
- [] citas bibliográficas
- { } citas de artículos del Reglamento CIRSOC 201-2005

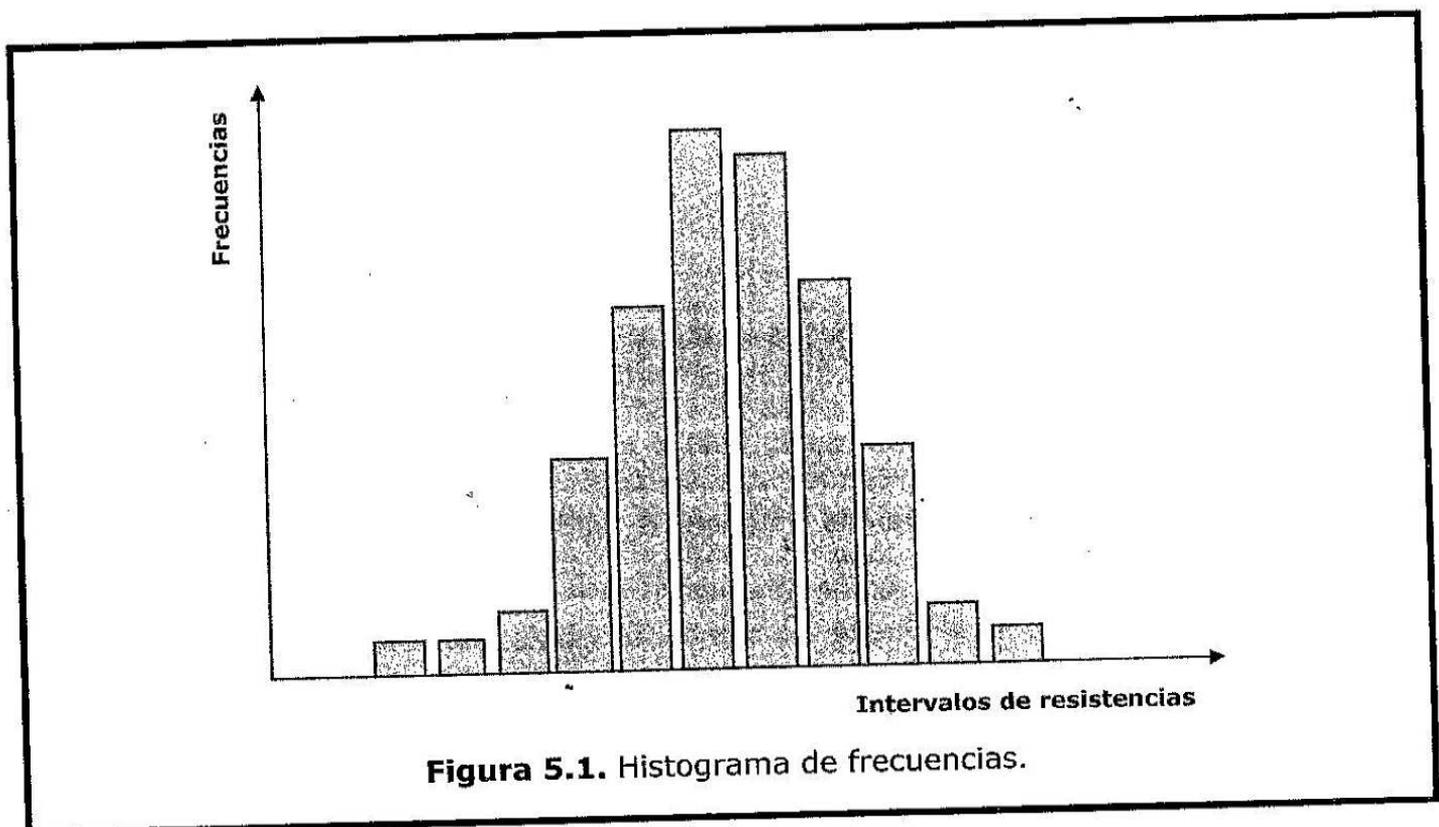
5.1. La naturaleza probabilística de la resistencia del hormigón

En el Proyecto de una estructura, y también en los trabajos de laboratorio, es habitual asignar al hormigón una resistencia nominal, a partir de la cual se establecen las tensiones que se utilizarán en los diseños.

En una primera aproximación podría pensarse que de esa manera queda definida en forma determinística la resistencia del material con el cual se construirá la estructura o se trabajará en el laboratorio. Esa suposición es errónea.

En este Capítulo se verá que las propiedades del hormigón varían de manera probabilística, y a partir de la comprensión de dicho fenómeno se explicará como se define la resistencia de diseño de una estructura, como se establece la resistencia para dosificar la mezcla, como se controla la resistencia del hormigón que se colocará en los encofrados y como se determina si dicho material satisface los requerimientos del Proyecto Estructural.

Asumamos como esquema de razonamiento que durante la operación de una planta elaboradora de hormigón se utiliza todo el material producido en moldear probetas, se cura a todas de igual manera y se ensayan a la compresión a una misma edad. Todo ello siguiendo un mismo procedimiento o norma de ensayo. Encontraremos que los resultados de resistencia a compresión difieren entre sí. Podemos entonces dividir el rango de resistencias obtenidas en intervalos iguales, contar el número de ensayos cuyos resultados caen en cada intervalo y representar las resistencias en un gráfico o histograma de frecuencias como el de la Figura 5.1.



Si también calculamos el promedio de todos los ensayos veremos que los valores se distribuyen alrededor de dicho valor medio, aunque en general con alguna asimetría. Podemos realizar la experiencia con producciones de distintas plantas y encontraremos que el fenómeno se repite, aunque los valores podrán estar más o menos agrupados alrededor del valor medio. El primer caso corresponde a una producción con menor dispersión de los valores de resistencia y el histograma será más puntiagudo. El segundo caso corresponde a una producción con mayor dispersión y el histograma será más achatado.

En los casos planteados podemos considerar que conocemos la resistencia de todo el material producido, a la que llamaremos *población o universo*.

Para caracterizar una determinada población necesitamos dos parámetros que nos indiquen, respectivamente, un valor de referencia y un indicador de cómo se distribuyen los resultados de ensayo individuales alrededor de aquel valor de referencia.

En el caso del hormigón se toma como valor de referencia al promedio de todos los ensayos o valor medio o media de la población μ :

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_1^n x_i \tag{5.1}$$

siendo:

N el número de individuos o valores individuales de la población y

x_i cada uno de esos valores individuales.

Existen distintos evaluadores de la dispersión de los valores individuales. En una producción de hormigón es habitual hacerlo con el *desvío estándar de la población* σ , definido por la expresión:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{(N - 1)}} \tag{5.2}$$

La resistencia de una población queda entonces definida por su valor medio o media μ y por su desvío estándar σ .

Sin embargo, lo expuesto no se puede realizar en la práctica. El hormigón está destinado a la construcción de una estructura y sólo podremos extraer cantidades reducidas o muestras del material para realizar los ensayos. Con los resultados correspondientes a una serie de ensayos o muestras podemos desarrollar un tratamiento similar al expuesto para la población y tendremos los siguientes parámetros que caracterizan a la resistencia de la muestra:

Valor medio de la serie de ensayos o muestra

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.3)$$

Desviación estándar de la serie de ensayos o muestra

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (5.4)$$

siendo:

- s** la desviación estándar.
- x_i** el resultado de un ensayo.
- \bar{x}** el promedio de (n) resultados de ensayos.
- n** el número de resultados de la serie de ensayos o muestra.

Se puede demostrar que si la muestra tiene la dimensión adecuada y está integrada por individuos tomados al azar, entonces la media \bar{x} y el desvío estándar **s** de dicha muestra serán buenos estimadores de los valores μ y σ de la población. En consecuencia, podremos tener una valoración de la resistencia del hormigón de la estructura mediante los parámetros \bar{x} y **s** medidos en una muestra.

Histograma de frecuencias y Curva de Gauss

Si conociéramos el histograma de frecuencias de toda la población podríamos determinar la cantidad de ensayos, en este caso equivalente a la cantidad de hormigón de la población que posee menor resistencia que la utilizada para el diseño. Para ello tendríamos que contar la cantidad de ensayos que están ubicados a la izquierda de la abscisa correspondiente al valor de diseño. Pero no conocemos a la población y por lo tanto no tenemos su histograma de frecuencias.

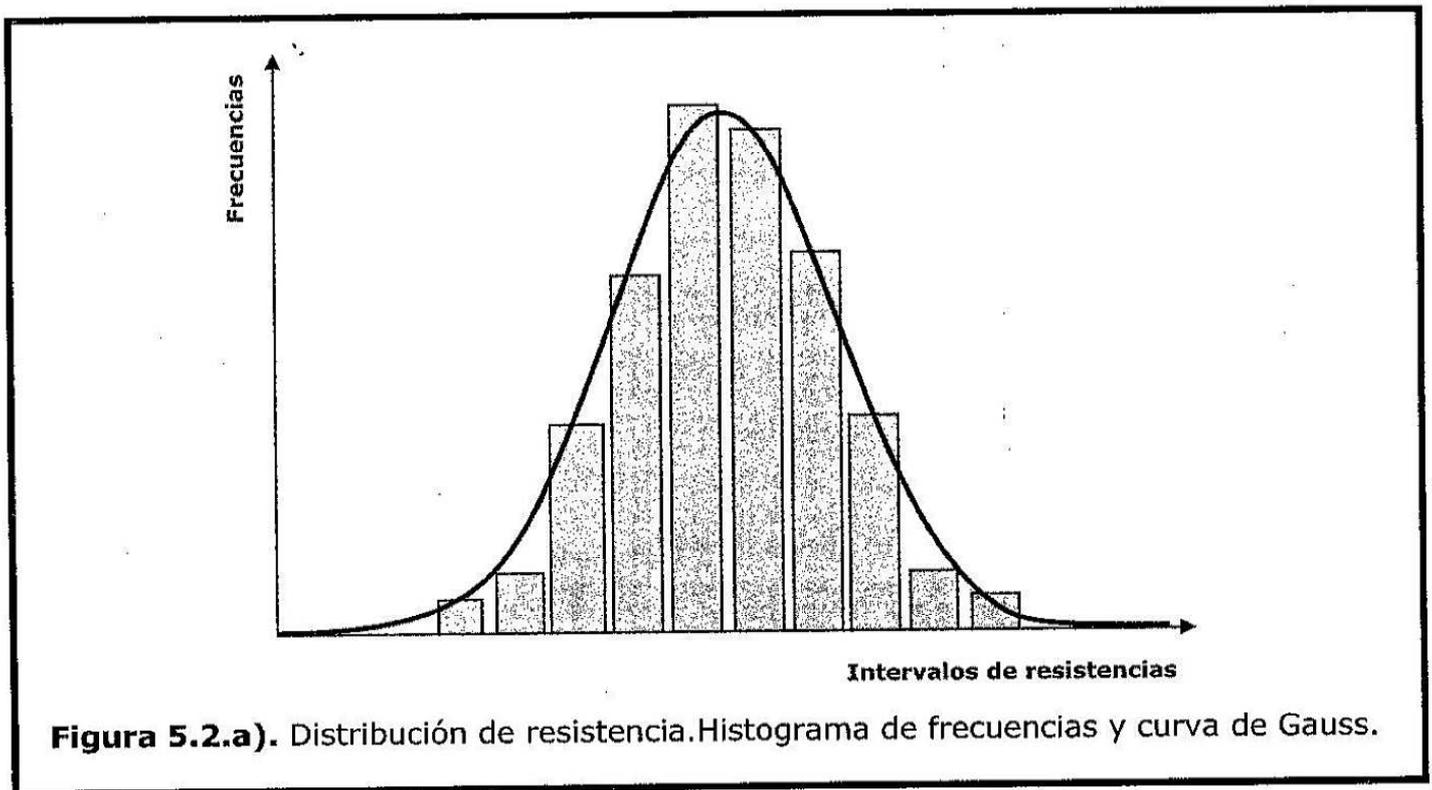
La teoría de las probabilidades nos facilita la solución del problema anterior. Está demostrado con muchas mediciones de series de ensayos, pertenecientes a diferentes poblaciones que, cuando la producción de hormigón se puede considerar "estable", el histograma de frecuencias o distribución de frecuencias de las resistencias del hormigón se ajusta muy bien y puede ser descrito por el *Modelo estadístico de Gauss* conocido como *curva de Gauss* o *curva normal*, que responde a la siguiente expresión:

$$f(x) = N(\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left[\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right]} \quad (5.5)$$

siendo:

- x los valores que pueden tomar los individuos de la población, que se distribuyen en forma continua según la función **f(x)**, llamada función de densidad o distribución.
- μ la media de la población.
- σ el desvío estándar de la población.

La Figura 5.2.a) muestra un histograma de frecuencias y la correspondiente curva de Gauss calculada con los valores μ y σ del histograma.



La curva de Gauss tiene la forma de una campana. Sus valores extremos tienden en forma asintótica al eje de las abscisas. Pero no lo cortan. Integrando la curva de Gauss entre $-\infty$ y un determinado valor x_i podemos conocer la cantidad de individuos con valores menores que x_i .

Por lo expuesto hasta aquí, sabemos y podemos asumir que la distribución de frecuencias de las resistencias a compresión de una producción (población) de hormigón se ajusta a la curva de Gauss. Asimismo, la media μ y el desvío estándar σ de la población pueden ser

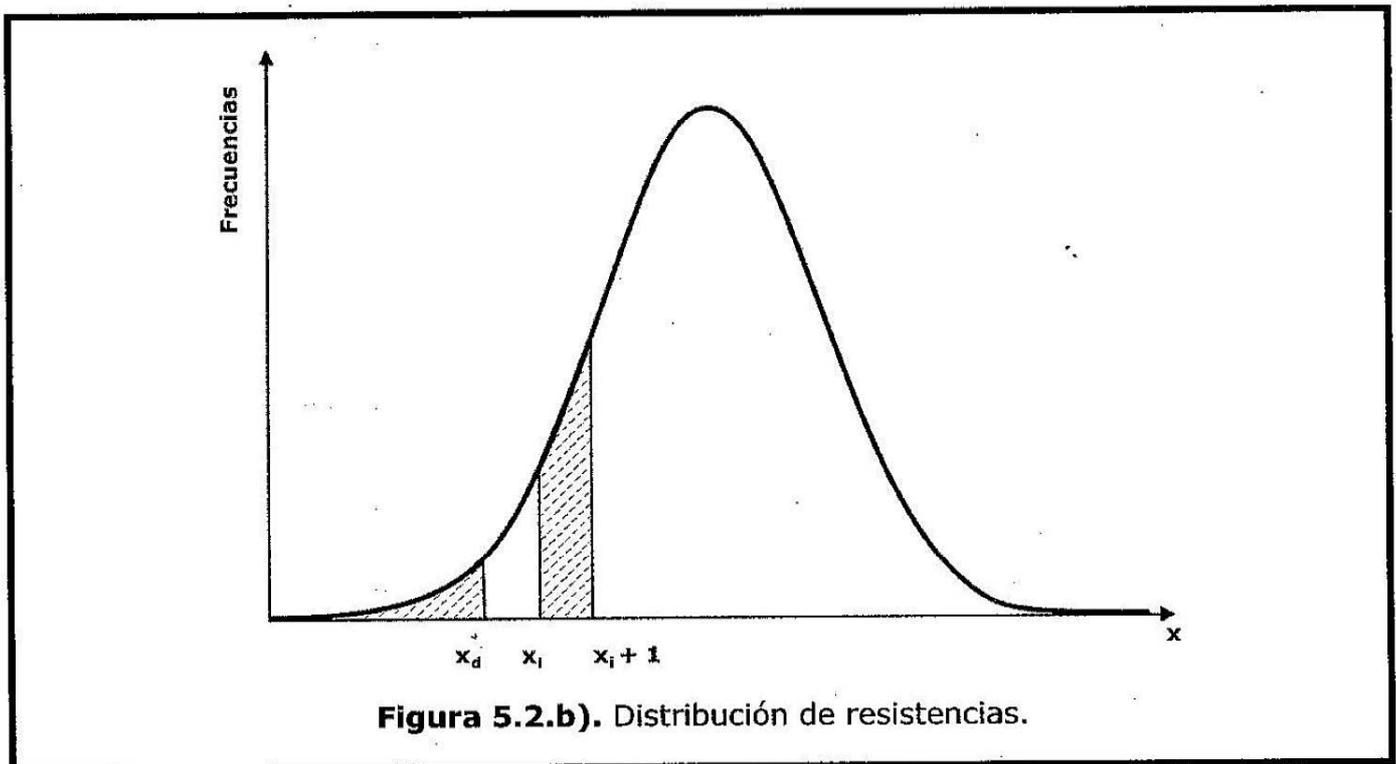
estimados, respectivamente, con la media \bar{x} y el desvío estándar s de una muestra de dimensión adecuada, tomada de dicha población.

En consecuencia, nuestro problema de inferir la cantidad de valores menores que x_i , que en adelante llamaremos *defectuosos*, se resuelve integrando la curva de Gauss correspondiente a los parámetros \bar{x} y s de la muestra. La integración está resuelta y tabulada y su utilización facilita el trabajo.

Es importante señalar que lo expresado en el párrafo anterior no es un cálculo determinístico. En rigor, estamos calculando la cantidad probable de individuos defectuosos, aplicando la teoría de las probabilidades.

Cuando analizamos una distribución de resistencias (Figura 5.2.b), la superficie bajo la curva de Gauss delimitada por las abscisas x_i y x_{i+1} nos da la cantidad probable de valores comprendidos entre dichas abscisas. Asimismo, la probabilidad de tener valores menores de x_d , o lo que es lo mismo, valores entre $-\infty$ y x_d , es igual a la superficie bajo la curva a la izquierda de x_d .

Lo explicado hasta aquí es de aplicación a cualquier proceso cuya distribución de frecuencias pueda asimilarse al modelo de Gauss.



Por otra parte, si en este tipo de proceso deseamos determinar el valor x_d para el cual existe la probabilidad de tener un d (en %) de defectuosos, podemos aplicar la expresión:

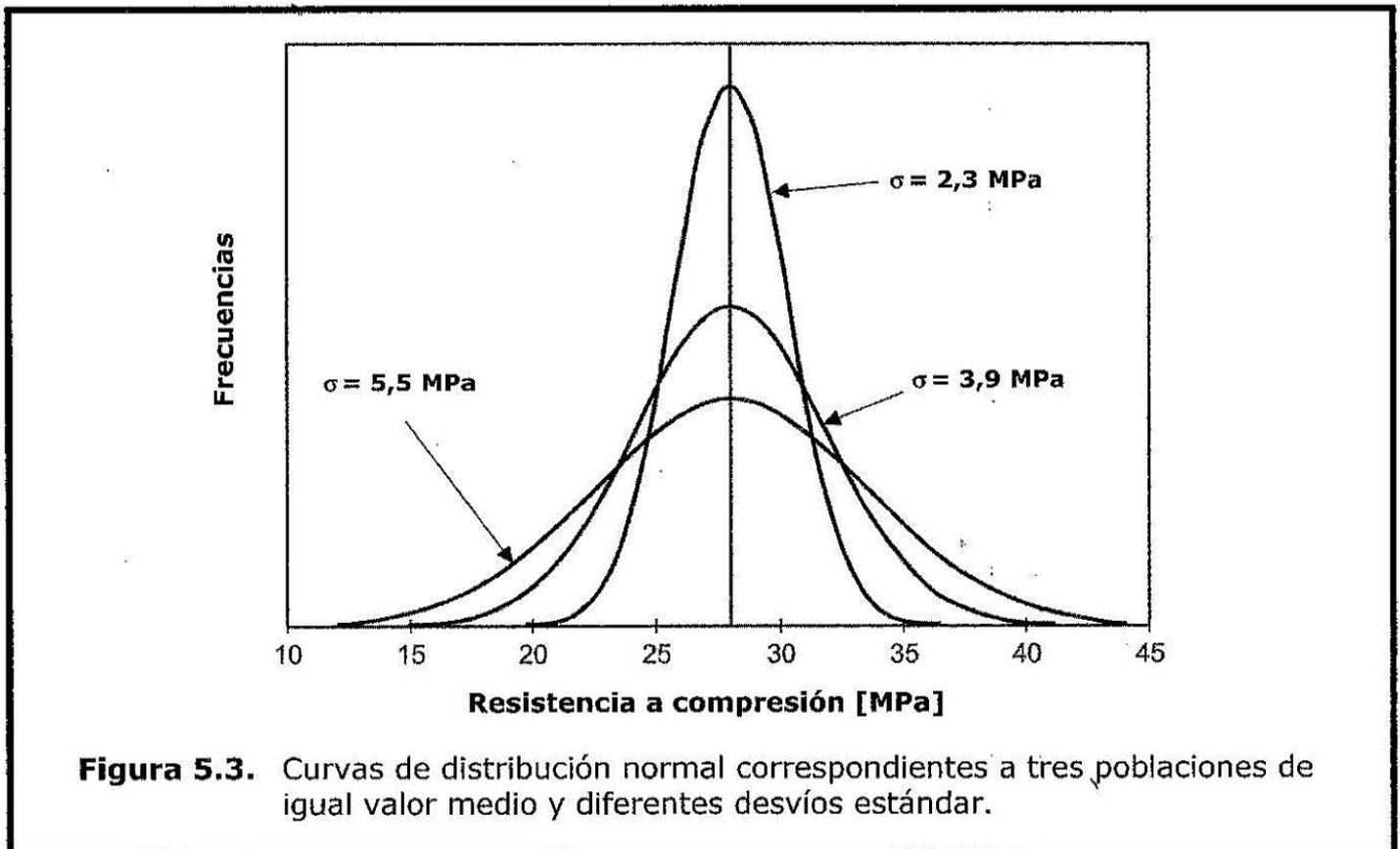
$$x_d = \bar{x} - k_d s \quad (5.6)$$

donde k_d es un coeficiente que resulta de la curva de Gauss para un determinado d (%) de defectuosos.

Algunas consideraciones sobre la aplicación del modelo de Gauss a la evaluación de la resistencia del hormigón

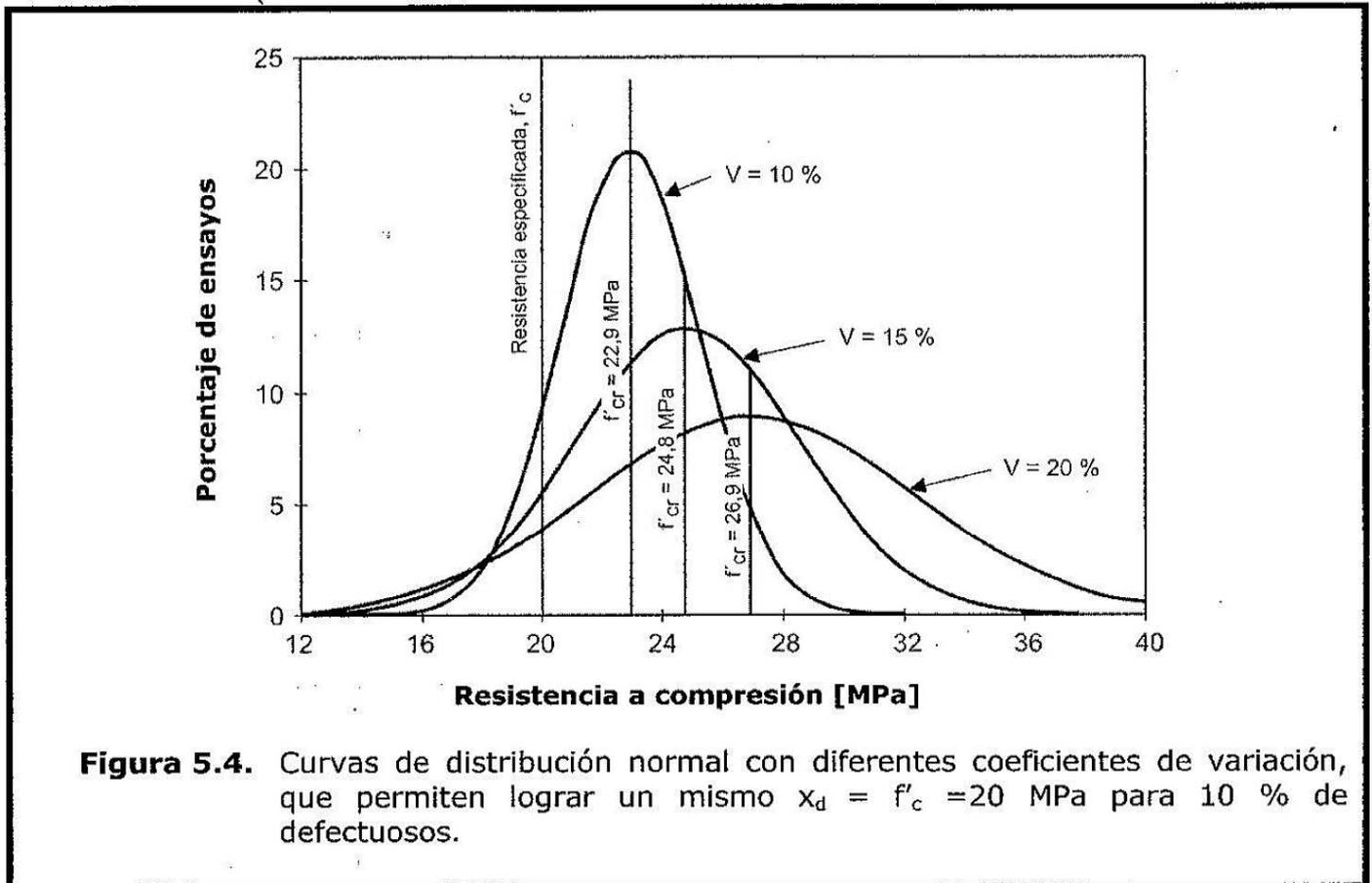
Las Figuras 5.3. y 5.4. están tomadas del ACI 214 [506] e ilustran sobre los conceptos que hemos expuesto precedentemente. Ambas corresponden a distribuciones de resultados de ensayos de resistencia que se ajustan a la expresión (5.5).

La Figura 5.3. muestra distribuciones de diferentes poblaciones, todas con igual valor medio pero con diferente desvío estándar. De sus respectivas curvas es fácil deducir que el valor x_d que corresponde a un 10 % de defectuosos es menor cuanto mayor es el desvío estándar. También resulta claro que definir a una población por su valor medio no es un criterio suficientemente seguro ya que los valores más bajos estarán alejados de la media según sea la dispersión de resultados. Esta última refleja la variación de calidad durante la producción del hormigón.



En la Figura 5.4. se muestran curvas de tres distribuciones normales correspondientes a sendas poblaciones con diferentes valores medios y coeficientes de variación. Pero en los tres casos, las poblaciones tienen el mismo valor de $x_d = f'_c = 20$ MPa que deja a la izquierda el 10 % de defectuosos. En este caso se ha utilizado el coeficiente de variación (V %) como medida de la dispersión, siendo: $V \% = (s/\bar{x}) \cdot 100$

Se puede apreciar que cuanto menor es la calidad de la producción, mayor será la dispersión, y se necesitará un hormigón de mayor resistencia media para obtener un mismo valor de x_d . También es evidente que mayor resistencia media no equivale a mejor hormigón. Esto último queda definido por el valor de x_d que se considera en el artículo 5.2. como resistencia especificada o resistencia característica.



5.2. Resistencia especificada

El Proyecto de una estructura requiere definir y adoptar la resistencia del hormigón con la cual se hará dicho Proyecto. Esa resistencia deberá luego obtenerse durante la construcción de la estructura y los responsables de dicha construcción deberán controlar y verificar que así ocurra.

La resistencia del hormigón no puede definirse con el valor medio de los resultados de los ensayos, pues en ese caso estaríamos asumiendo que el 50 % del material tendría una resistencia menor que la de diseño. Tampoco podemos utilizar al valor mínimo y considerar que todo el material está por encima de la resistencia de diseño; el hormigón tiene una distribución normal y siempre existe la probabilidad de resistencias menores que cualquier valor que fijemos como referencia. Consecuentemente debemos establecer en forma arbitraria la cantidad de material defectuoso que estamos dispuestos a admitir en una estructura. O lo que es lo mismo, la probabilidad de defectuosos admisible. Dicha probabilidad también se llama fractil de defectuosos.

En los reglamentos y en la literatura especializada, la resistencia del hormigón utilizada para el proyecto y construcción de estructuras, definida para un determinado fractil de defectuosos, se denomina resistencia de diseño o resistencia característica (f'_{ck} en el Reglamento CIRSOC 201-1982) o resistencia especificada f'_c en el Reglamento CIRSOC 201-2005). Los tres términos son equivalentes. En forma explícita o implícita, los códigos admiten que existe una determinada cantidad de hormigón por debajo de f'_c . En términos de control de producción y de recepción, ello equivale a admitir un determinado porcentaje de valores de ensayo por debajo de f'_c (porcentaje de defectuosos).

Actualmente, todos los reglamentos modernos de estructuras definen la resistencia especificada en términos probabilísticos. El EUROCODIGO 2 utiliza el fractil del 5 % siguiendo el criterio de su antecedente, el Código Modelo de la F.I.B (ex CEB-FIP). En U.S.A y Canadá emplean el fractil del 10 % para las estructuras de edificios y similares. Para diques de hormigón, el Bureau of Reclamation de U.S.A. (USBR) emplea el fractil del 20 %.

En la Tabla 5.1. se resumen las cantidades de defectuosos que admiten distintos reglamentos. También se indican los valores de k_d para estimar las correspondientes resistencias de diseño con la expresión (5.6).

Tabla 5.1. Defectuosos admisibles y valores de k_d para estimar la resistencia de diseño de distintos reglamentos

Reglamento/Norma	Defectuosos admitidos	Valor de k_d
	%	Nº
Eurocódigo 2	5	1,65
PRAEH 1964, CIRSOC 201-1982 y 201M-1996	5	1,65
ACI, CSA	10	1,28
CIRSOC 201-2005	10	1,28
Normas Suizas	16	1,00
USBR	20	0,84

En la Argentina, a partir del año 1964 los reglamentos para estructuras de hormigón definieron la resistencia característica para el fractil del 5 %, siguiendo la tendencia del Código Modelo CEB-FIB del año 1977 y revisiones posteriores. Así está establecido en los reglamentos PRAEH 1964, CIRSOC 201-1982 y CIRSOC 201M-1996. También en Argentina, para algunos diques de hormigón, como por ejemplo Piedra del Águila, la resistencia característica se definió para 20 % de defectuosos en coincidencia con el USBR y otros organismos de USA.

El Reglamento CIRSOC 201-2005, basado en el ACI 318-2005 considera que la resistencia especificada de rotura a compresión f'_c es aquella superada por el 90 % de los valores de ensayo. Expresado en otros términos, equivale a admitir un 10 % de ensayos no conformes o defectuosos. El valor de f'_c se puede obtener con la expresión (5.6), deducida de la curva de Gauss y expresada como se indica en la expresión (5.7) y en la Figura 5.5., siendo f'_m el valor medio de los ensayos de resistencia.

$$f'_c = f'_m - 1,28 s \quad (5.7)$$

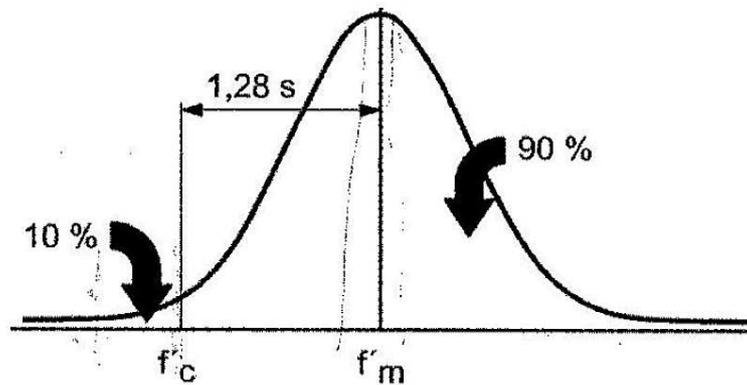


Figura 5.5. Histograma de frecuencias y curva de Gauss.

El Reglamento CIRSOC 201-2005 adoptó el fractil del 10 % para poder mantener los coeficientes de seguridad del Código ACI 318 sin modificar la probabilidad de falla global de las estructuras. Así definida, el Reglamento estableció los valores de f'_c {2.3.2} que se pueden utilizar en el Proyecto de las estructuras de hormigón, los que se indican en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Hormigones y resistencias especificados en el Reglamento CIRSOC 201-2005

Clase de hormigón	Resistencia especificada a compresión f'_c (MPa)	A utilizar en hormigón
H - 15	15	Simple
H - 20	20	Simple y armado
H - 25	25	Simple, armado y pretensado
H - 30	30	
H - 35	35	
H - 40	40	
H - 45	45	
H - 50	50	
H - 60	60	

Debe quedar claro que la resistencia especificada o resistencia característica de rotura a compresión es una medida estadística de la resistencia potencial del hormigón colocado en la estructura, que puede ser alcanzada a la edad de diseño bajo condiciones de curado normalizadas.

Edad de diseño del hormigón

Para completar la definición de la resistencia especificada es necesario precisar las condiciones que deben aplicarse para realizar los ensayos. La resistencia especificada es siempre una resistencia potencial que se puede alcanzar en condiciones de curado de laboratorio (Humedad relativa superior al 95 % y 23°C de temperatura) a una edad de diseño establecida por el Proyectista de la estructura. Esa edad dependerá de los siguientes factores:

- El tipo de estructura
- El momento de puesta en servicio de la estructura
- El cemento a utilizar en la construcción de la estructura
- El tipo de aditivos y/o adiciones minerales activas que puedan modificar el desarrollo de la resistencia del cemento utilizado

En general, la resistencia especificada se debe alcanzar a la edad de 28 días. Sin embargo, hay situaciones en que ella se necesita a edades menores. Eso ocurre cuando se aplican cargas de servicio importantes a edades tempranas, y en el caso de las estructuras prefabricadas y de hormigón pretensado.

Algunos tipos de cemento poseen un crecimiento de resistencia importante después de los 28 días. Esa ganancia de resistencia se puede aprovechar siempre que se alcance f'_c antes de la puesta en carga del elemento estructural y se prolongue adecuadamente el período de curado. En algunos casos, la tipología estructural facilita el curado prolongado. Esto último ocurre en las estructuras que estarán sumergidas. También se da en las estructuras masivas donde es habitual adoptar 90 días como edad de diseño.

El Reglamento deja a criterio del Proyectista Estructural la fijación de la edad de diseño. Pero requiere que ella conste en los Documentos del Proyecto. La edad de diseño se debe adecuar al tipo de estructura, al momento de su puesta en servicio y al cemento a utilizar en la construcción. Cuando el Proyectista Estructural no la establece, el Reglamento la fija, por defecto, en 28 días {2.3.3.1}.

Implicancias tecnológicas y económicas de los valores adoptados para las resistencias especificadas

En un medio habituado a trabajar con resistencia especificada para un 5 % de defectuosos, surgen inquietudes cuando el nuevo Reglamento las define para el 10 % de defectuosos. Las preocupaciones se refieren principalmente a las resistencias mínimas que se pueden utilizar con cada Reglamento. El Reglamento CIRSOC 201-1982 admite el uso de 17 MPa y 5 % de defectuosos. El Reglamento CIRSOC 201-2005 requiere como mínimo 20 MPa con 10 % de defectuosos. Las inquietudes incluyen aspectos como la posibilidad de obtener la resistencia mínima y el costo de la misma.

Para tratar de aclarar este tema, en la Tabla 5.3. se hacen algunos análisis comparativos. Para ello se consideró la situación de tres plantas de hormigón que están operando, respectivamente, con desvíos estándar de 2,5; 5,0 y 7,0 MPa. Cada una de esas plantas debe elaborar un hormigón Clase H-20 ($f'_c = 20$ MPa) según el Reglamento CIRSOC 201-2005. Para lograrlo deben trabajar con mezclas cuyas resistencias medias dependen de los

respectivos desvíos estándar, según se indica en la Tabla 5.3. para el fractil del 10 %. Si esas mismas mezclas se utilizaran con el Reglamento CIRSOC 201-1982 les corresponderían las resistencias características que se indican en las líneas de la Tabla correspondientes al fractil del 5 %. Los resultados también se grafican en la Figura 5.6. a), b) y c), utilizando curvas de Gauss calculadas con los respectivos desvíos estándar.

Cabe agregar que un desvío estándar igual a 2,5 MPa corresponde a una planta que opera con un sistema de calidad excelente y más de 5,0 MPa a un sistema pobre [501] [502]. Puede resultar un desvío de 7,0 MPa si la planta opera sin control [503].

Tabla 5.3. Comparación de resistencias especificadas en hormigones H-20

Desviación estándar (s)	Fractil	Resistencia especificada o resistencia característica a compresión $f'_c = f'_m - k \cdot s$
MPa	%	MPa
2,5	10	20 MPa = 23,2 MPa - 1,28 x 2,5 MPa
	5	19 MPa = 23,2 MPa - 1,65 x 2,5 MPa
5,0	10	20 MPa = 26,4 MPa - 1,28 x 5,0 MPa
	5	18,2 MPa = 26,4 MPa - 1,65 x 5,0 MPa
7,0	10	20 MPa = 28,9 MPa - 1,28 x 7,0 MPa
	5	17,4 MPa = 28,9 MPa - 1,65 x 7,0 MPa

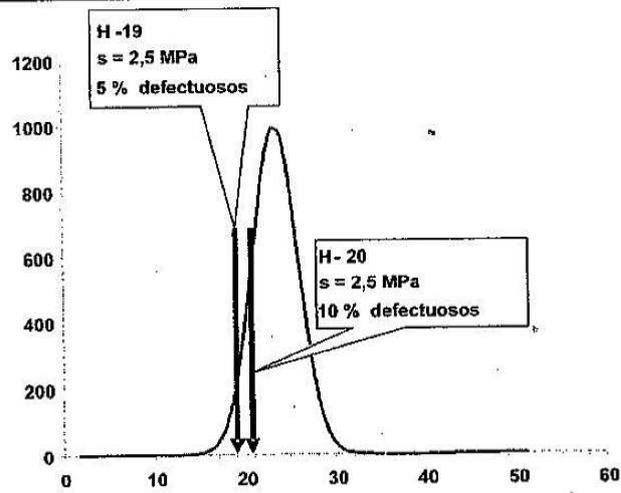
La evaluación del caso anterior permite ver que, para un hormigón con 7 MPa de desvío estándar, una resistencia especificada de 20 MPa con 10 % de defectuosos (CIRSOC 201-2005) equivale a 17 MPa con 5 % de defectuosos (CIRSOC 201-1982).

Por el contrario, cuando se produce en condiciones excelentes de control, con desvío estándar igual a 2,5 MPa, las resistencias resultantes para 5 % y 10 % de defectuosos se aproximan significativamente.

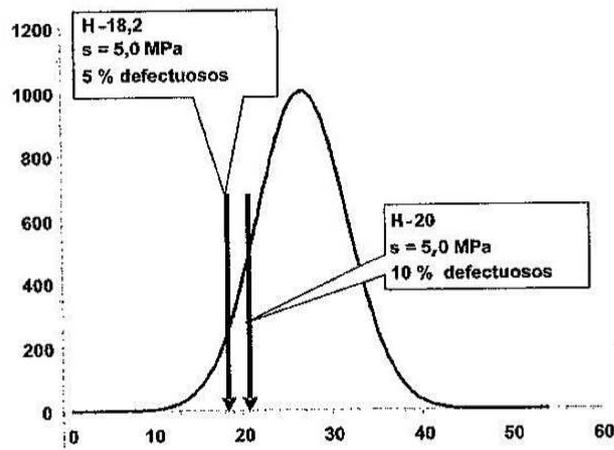
Debemos recordar que el Reglamento prioriza la protección del usuario. En ese contexto, del análisis anterior se concluye que, para condiciones precarias de producción de hormigón las resistencias especificadas definidas en las dos versiones del Reglamento CIRSOC 201 se obtienen con la misma mezcla de hormigón.

Por otra parte, para condiciones excelentes de control de producción, la mezcla de un hormigón que permite obtener H-20 con 10 % de defectuosos también es apta para lograr una resistencia especificada significativamente mayor que 17 MPa con 5 % de defectuosos. Podría entonces pensarse que, para condiciones excelentes de producción, el cambio de criterio implicaría un mayor costo del hormigón. Pero ello no es válido si hacemos un análisis global del hormigón que incluya la vida en servicio requerida para una estructura.

a)



b)



c)

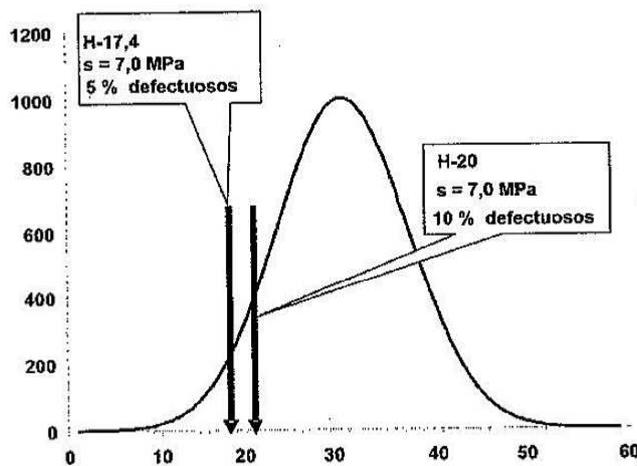
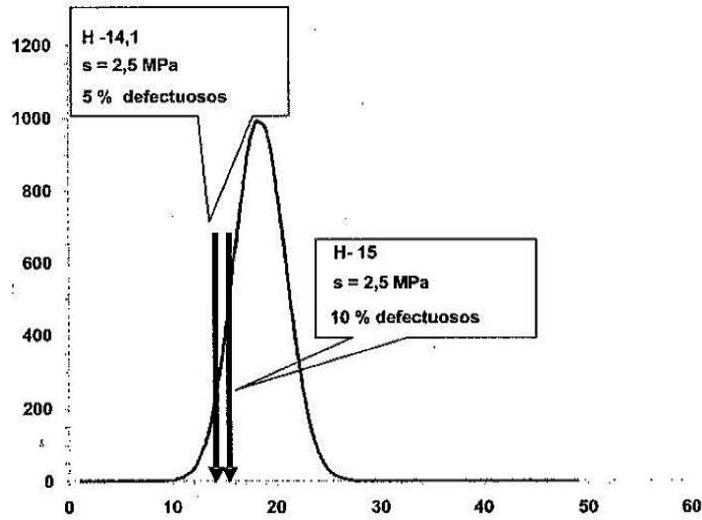
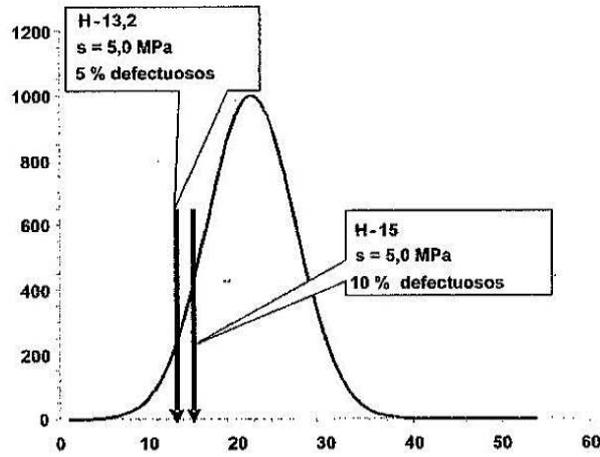


Figura 5.6. Comparación de resistencias especificadas en hormigones H-20.

a)



b)



c)

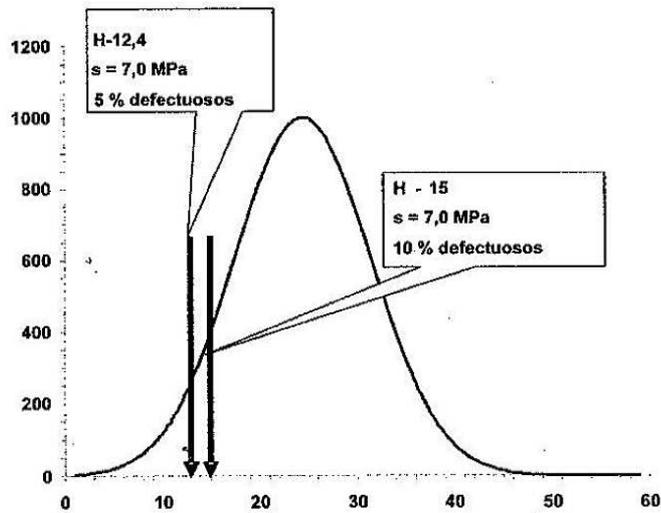


Figura 5.7. Comparación de resistencias especificadas en hormigones H-15.

En ese caso, la razón agua/material cementicio máxima admisible es igual a 0,60 {2.2.2.4 y Tabla 2.5.}. Para dicha a/mc, cumpliendo todo lo establecido en el Reglamento CIRSOC 201-2005 y condiciones excelentes de control de producción, el hormigón resultante seguramente será un H-20 con 10 % de defectuosos.

Para abundar más en la comparación de las resistencias especificadas mínimas, repetiremos el trabajo anterior tomando como referencia un H-15 con 10% de defectuosos. Los resultados se muestran y representan en la Tabla 5.4. y en la Figura 5.7.a), b) y c).

Tabla 5.4. Comparación de resistencias especificadas en hormigones H-15

Desviación estándar (s)	Fractil	Resistencia especificada o resistencia característica a compresión $f'_c = f'_m - k \cdot s$
MPa	%	MPa
2,5	10	15 MPa = 18,2 MPa - 1,28 x 2,5 MPa
	5	14,1 MPa = 18,2 MPa - 1,65 x 2,5 MPa
5,0	10	15 MPa = 21,4 MPa - 1,28 x 5,0 MPa
	5	13,2 MPa = 21,4 MPa - 1,65 x 5,0 MPa
7,0	10	15 MPa = 23,9 MPa - 1,28 x 7,0 MPa
	5	12,4 MPa = 23,9 MPa - 1,65 x 7,0 MPa

Se aprecia que el H-15 con 10 % de defectuosos, obtenido en condiciones de elaboración y control precarios, resulta equivalente a un H-12 con 5 % de defectuosos, hormigón que no era admitido para estructuras de hormigón armado en el Reglamento CIRSOC 201-1982.

Sintetizando, al elaborar el Reglamento CIRSOC 201-2005 se consideró que:

- a) Para condiciones excelentes de control de producción; respetando la razón agua/cemento máxima y el contenido mínimo de cemento establecidos en el Reglamento, debe resultar naturalmente una $f'_c = 20$ MPa.
- b) Para plantas que operan sin control de producción, el H-20 del Reglamento CIRSOC 201-2005 se obtiene con la misma mezcla que el H-17 del Reglamento CIRSOC 201-1982.
- c) Para proteger al consumidor de una planta que opera sin control de producción, el Reglamento CIRSOC 201-2005 estableció que en las estructuras de hormigón armado se debe utilizar un hormigón H-20, como mínimo.

5.3. Resistencia potencial y resistencia efectiva

En el Capítulo 1 se explicó que el hormigón desarrolla su resistencia en el tiempo. En el Libro **Hormigón - Elaboración y puesta en obra**, se explicará que la velocidad y magnitud con que se produce dicho desarrollo dependerá de las condiciones de curado.

La resistencia que el hormigón es capaz de desarrollar en condiciones de curado de laboratorio, a 23 °C y más de 90 % de humedad relativa, se denomina **resistencia potencial**. Es la que se adopta como resistencia de referencia de un hormigón y la que deseamos alcanzar en condiciones ideales de curado. La **resistencia especificada** es una resistencia potencial a la edad de diseño que se establece en el Proyecto de la estructura.

En la obra, el hormigón de la estructura desarrollará una resistencia que será función del curado que efectivamente ha tenido. O lo que es lo mismo, de la maduración del hormigón in situ {4.3.3} (ver también el artículo 5.8.2.), a la que denominaremos **resistencia efectiva**.

El Projectista adopta una resistencia especificada para el Proyecto y la hace constar en los planos y demás documentos del Proyecto. A partir de ella dimensiona los distintos elementos estructurales utilizando valores de resistencia minorados con coeficientes de seguridad. Esa minoración tiene en cuenta distintos factores, entre los cuales está incluido el riesgo de que la resistencia efectiva resulte menor que la especificada. Esto último puede ocurrir por deficiencias de curado, pero también por problemas propios de la mezcla como una excesiva exudación y por defectos de colocación y compactación.

El Reglamento exige que el hormigón que se coloca en la estructura tenga la resistencia especificada y ella debe ser verificada con los procedimientos que se dan en el artículo 5.4. Pero cuando se verifica la resistencia efectiva en la forma que se especifica en el artículo 5.8., el Reglamento acepta que dicha resistencia es satisfactoria si resulta mayor o igual que el 85 % de la resistencia especificada {4.4}. Ello obedece a que en la resistencia efectiva han desaparecido todas las incertidumbres debidas al proceso productivo, incluidos la protección y el curado del hormigón.

5.4. Criterios de conformidad de la resistencia potencial

En el artículo 5.1. se analizó la variación que experimenta el hormigón durante su elaboración. A partir de la comprensión de ese fenómeno, en el artículo 5.2. definimos a la resistencia del hormigón que utilizamos en el Proyecto de una estructura o resistencia especificada.

Corresponde ahora analizar como se verifica que el material que se coloca en la estructura posee la resistencia especificada en el Proyecto. Para ello, en una primera aproximación es de aplicación lo expuesto en los artículos 5.1. y 5.2. Si tenemos una serie de ensayos (muestra) de todo el material elaborado, podemos aplicar las expresiones derivadas del modelo de Gauss y calcular el valor de resistencia que corresponde a un determinado fractil de defectuosos.

En el Reglamento CIRSOC 201-1982 la expresión (5.6) se convierte en el criterio de aceptación:

$$f_{5\%} = f'_{cm} - 1,65 s \geq f'_{ck \text{ especificada}} \quad (5.8)$$

En el caso del Reglamento CIRSOC 201-2005 tendríamos que aplicar la expresión:

$$f_{10\%} = f'_{cm} - 1,28 s \geq f'_{c \text{ especificada}} \quad (5.9)$$

siendo:

- $f_{5\%}$ la resistencia que corresponde al fractil del 5% del hormigón colocado en la estructura.
- $f_{10\%}$ la resistencia que corresponde al fractil del 10% del hormigón colocado en la estructura.
- f'_{cm} el valor medio de los ensayos de la muestra.
- s el desvío estándar de la muestra.

Las estimaciones anteriores son válidas siempre que la muestra sea representativa del hormigón colocado, estemos seguros de que todo el hormigón pertenece a una misma población y la muestra esté compuesta de submuestras tomadas al azar. Se requiere también que el número de ensayos sea suficientemente grande, aceptándose que ello se cumple siempre que se disponga de un mínimo de 30 ensayos. Si se dan todas estas condiciones, el CIRSOC 201-2005 considera que el hormigón elaborado por una planta cumple con la resistencia especificada si $f_{10\%}$ es igual o mayor que f'_c . No obstante, el Reglamento utiliza esta verificación como un control de producción de la planta {4.2.3.4}, la exige como una condición para la recepción del hormigón en el Modo 1 {4.2.3.5}, pero no la aplica en los criterios de conformidad {4.2.3.5}, {4.2.3.6}.

Este tipo de verificación se puede realizar en una planta que produce volúmenes grandes de hormigón y es de aplicación como uno de los controles de producción o como verificación del hormigón colocado cuando la planta esté dentro del recinto de la obra.

En la construcción de estructuras de edificios aislados, donde la planta elaboradora está fuera del recinto de obra, el hormigón se recibe al pie de la estructura y se coloca en volúmenes que en general son inferiores a 100 m³ y difícilmente superen los 250 m³. Esta operación se hace en forma secuencial. En cada hormigonado sólo podemos realizar unos pocos ensayos de probetas y a partir de sus resultados tendremos que **estimar** si el hormigón colocado tiene la resistencia especificada. Los reglamentos modernos dividen a la estructura en lotes, que comprenden uno o dos niveles del edificio. Cada lote se recibe en forma separada con los ensayos de resistencia de probetas extraídas del hormigón colocado en ese mismo lote.

Para determinar si el hormigón de un lote cumple o es conforme con la resistencia especificada, todos los reglamentos para estructuras de edificios recurren a criterios de conformidad que emplean expresiones del tipo:

$$\bar{x}_n \geq a \qquad f'_{cm} \geq f'_c + \Delta_1 \qquad (5.10)$$

$$x_i \geq b \qquad f'_{ci} \geq f'_c - \Delta_2 \qquad (5.11)$$

siendo:

\bar{x}_n el promedio de n ensayos consecutivos o media móvil,

f'_{cm} el valor medio de los ensayos de la muestra,

x_i (f'_{ci}) cada valor de ensayo,

a y b los valores límites a cumplir o valores de corte,

Δ_1 y Δ_2 cantidades que se suman o restan a f'_c .

En la Tabla 5.5. se resumen los criterios de conformidad adoptados por las diferentes versiones del Reglamento CIRSOC y por los principales reglamentos de referencia en el ámbito internacional.

Tabla 5.5. Criterios de conformidad por resistencia en distintos reglamentos (*)

Reglamento	$x_n \geq a$	$x_i \geq b$	n
CIRSOC 201-1982 (**)	$f'_{cm} \geq f'_c + 0,865 s$	$f'_{ci} \geq 0,85 f'_c$	4
CIRSOC 201M-1996 (***)	$f'_{cm} \geq f'_c + k_1$	$f'_{ci} \geq 0,85 f'_c$	3
CIRSOC 201-2005 (****)	M1: $f'_{cm} \geq f'_c$ M2: $f'_{cm} \geq f'_c + 5$	$f'_{ci} \geq f'_c - 3,5$ $f'_{ci} \geq f'_c$	3
ACI 318-2005	$f'_{cm} \geq f'_c$	$f'_{ci} \geq f'_c - 3,5$	3
EUROCÓDIGO 2	$f'_{cm} \geq f'_c + 1,48 s$	$f'_{ci} \geq f'_c - 4$	≥ 15
(*)	Los criterios han sido homogeneizados en MPa y la resistencia especificada se expresa como f'_c . En el texto de los Reglamentos CIRSOC 201 anteriores a 2005 y en el Eurocódigo 2 la resistencia especificada se denomina resistencia característica y se expresa como f'_{ck} .		
(**)	Los criterios transcritos en esta Tabla son de aplicación cuando el lote de hormigón evaluado se compone de 6 o más pastones.		
(***)	$k_1 = 3$ si los materiales se miden en masa y la relación entre la cantidad de pastones de una misma clase de hormigón y el número de muestras extraídas para dicha clase está comprendida entre 1 y 4; si esa razón es mayor que 4 se debe adoptar $k_1 = 5$. Cuando el cemento se mide en masa y el resto de los materiales en volumen se debe adoptar $k_1 = 7$.		
(****)	Este Reglamento establece criterios diferentes a aplicar según sean los modos de producción y control de producción del hormigón.		

5.5. Errores en la estimación de la resistencia de un lote

Si volvemos al planteo inicial del artículo 5.1. y se adopta la hipótesis de que ensayamos todo el hormigón producido, podríamos determinar la resistencia que tiene esa producción sin cometer ningún error de estimación. Ya dijimos que esta hipótesis es absurda.

También planteamos, al comienzo del artículo 5.4., que en una producción continua podemos extraer un número grande de probetas y estimar la resistencia del hormigón aplicando herramientas probabilísticas basadas en Gauss. En este caso tendremos una buena estimación si la muestra es adecuada y n es suficientemente grande.

Desafortunadamente, en la práctica de la construcción de estructuras de edificios la colocación de hormigón es secuencial y sólo disponemos de unos pocos ensayos por lote. A esos resultados le aplicamos criterios de conformidad para estimar si el hormigón del lote tiene la resistencia especificada. Como contrapartida, la estimación con un número reducido de ensayos puede ocasionar dos tipos de errores, que son:

- Rechazar por malo a un hormigón con resistencia superior a la especificada. Se lo llama error de tipo I y es el riesgo α del productor.
- Dar por bueno y aprobar un hormigón que no tiene la resistencia especificada, es decir, no es conforme. Se lo llama error de tipo II y es el riesgo β del consumidor.

Hemos planteado precedentemente que un Código de seguridad estructural debe privilegiar al usuario. Consecuentemente tiene que preocupar el error de tipo II y hay que tratar de reducirlo sin un aumento importante del costo de la estructura. Un buen criterio de conformidad de resistencia debe reducir y balancear los riesgos del consumidor y del productor.

Curvas de operación características (Curvas OC)

La bondad de un criterio de conformidad se analiza calculando la probabilidad de cometer cada uno de los errores de estimación mencionados precedentemente.

Para ello, se asume que la resistencia de la población tiene una distribución normal, con media μ y desviación estándar σ . La probabilidad de que aceptemos a ese hormigón, considerándolo conforme con la resistencia especificada aplicando los criterios de conformidad de las expresiones (5.10) y (5.11), es una función de los parámetros estadísticos de esa población $L(\mu, \sigma)$. A ese respecto recordemos que μ y σ son estimados con la media y el desvío estándar de la muestra. Podemos plantear entonces que la probabilidad de aceptación $L(\mu, \sigma)$ es igual a la probabilidad de que se verifique que $(\bar{x}_n \geq a; x_i \geq b)$.

$$L(\mu, \sigma) = P(\bar{x}_n \geq a; x_i \geq b) \tag{5.12}$$

Cuando la desviación estándar σ es conocida, la probabilidad de aceptación L de una muestra, expresada según (5.12), es función de la resistencia media μ de la población. Asimismo, la función L puede expresarse en función del porcentaje p de valores de resistencias individuales menores que f'_c , que hemos llamado valores defectuosos o simplemente defectuosos.

Las gráficas de las expresiones matemáticas resultantes $L(\mu)$ ó $L(p)$ nos dan las curvas de operación característica o curvas OC, que permiten valorar el grado de efectividad del criterio de aceptación.

Los criterios de aceptación del Reglamento CIRSOC 201-2005 serán definidos y justificados en el artículo 5.6.; sus expresiones matemáticas, en MPa, se indican a continuación.

Modo 1

$$\bar{x}_n \geq a \qquad f'_{cm} \geq f'_c \qquad (5.13)$$

$$x_i \geq b \qquad f'_{ci} \geq f'_c - 3,5 \qquad (5.14)$$

Modo 2

$$\bar{x}_n \geq a \qquad f'_{cm} \geq f'_c + 5 \qquad (5.15)$$

$$x_i \geq b \qquad f'_{ci} \geq f'_c \qquad (5.16)$$

Como ejemplo de aplicación de los criterios de conformidad, hemos supuesto que una planta elaboradora debe entregar un hormigón H-20. El hormigón se recibe con los criterios de conformidad del Reglamento CIRSOC 201-2005 y 5 ensayos por lote. El desvío estándar es igual a 3 MPa y se mantiene constante pues es propio de la planta. Las curvas OC correspondientes a los criterios de aceptación de los Modos 1 y 2 aplicados a un hormigón H-20 se representan en las Figuras 5.8. y 5.9.

