

**Un nuevo método para la estimación on-line de valores característicos
en la fabricación de acero estructural**

R. Romero Villafranca
Real Academia de Cultura Valenciana
Sección de Ingeniería

© Copyright: R. Romero Villafranca

E-mail: romero@eio.upv.es

RECEPCIÓN: 22-09-2014

APROBACIÓN: 01-10-2014

Un nuevo método para la estimación on-line de valores característicos en la fabricación de acero estructural

R. Romero Villafranca¹
Real Academia de Cultura Valenciana
Sección de Ingeniería

RESUMEN

Se desarrolla un procedimiento original para la obtención on-line para cada colada de los valores característicos de los parámetros de calidad en la fabricación de acero estructural. Estos valores, que son de gran utilidad para el control de la producción y la garantía de calidad a los clientes, no pueden calcularse mediante el procedimiento clásico para la obtención de valores característicos. El nuevo procedimiento se basa en combinar, mediante técnicas de Estadística Bayesiana, la información histórica sobre el proceso con la facilitada por los ensayos realizados en la colada. El procedimiento se viene utilizando de forma satisfactoria en todas las fábricas en posesión de la marca N de AENOR para acero corrugado

Palabras clave: Control de Calidad; Valores característicos; Estadística Bayesiana; Industria del acero

ABSTRACT

We develop an original procedure for online obtaining the characteristic values of quality parameters for each cast in structural steelwork factories. These values, which are very useful to improve production control and to ensure quality to the clients, cannot be calculated using the traditional procedure for obtaining characteristic values. The new procedure uses a Bayesian approach to combine the historical records about the process with the data collected when the cast is being manufactured. The procedure is being successfully used in all the factories that produce corrugated steel with the AENOR N quality mark.

Keywords: Quality control; Characteristic values; Bayesian Statistics; Steel industry

1. INTRODUCCIÓN

Las normas que regulan los requisitos que deben satisfacer los productos de acero utilizados en estructuras de hormigón, exigen para los parámetros de calidad más relevantes - como el límite elástico (R_e), la carga de rotura (R_m) o el alargamiento bajo carga máxima (A_{gt}) - el cumplimiento de unos *valores característicos* mínimos.

¹ Catedrático de Estadística. Universidad Politécnica de Valencia

La Norma EN 10080 "Acero para el armado de hormigón", en su Punto 7.2.1 define el concepto de *valor característico* como sigue: "En el contexto de esta norma europea, el valor característico es el límite inferior del intervalo estadístico de tolerancia para el que existe un 90% de probabilidad de que el 95% de los valores obtenidos² no sean inferiores a dicho límite inferior. Esta definición se refiere al nivel de calidad a largo plazo de la producción."³

El concepto de valor característico no se refiere, por tanto, a una unidad individual, sino que implica una exigencia a nivel del conjunto de unidades que constituyen la población a evaluar. El *valor característico* definido en dicha norma, coincide con el concepto estadístico de límite de confianza unilateral para el percentil $z_{0,05}$ de la distribución de la variable analizada (por ejemplo el R_e) en la población considerada.

En un lenguaje más ingenieril, el valor característico del límite elástico R_e en un población de barras corrugadas, para un nivel de confianza estadístico γ (0.90 en nuestro ejemplo) y un nivel de seguridad β (0.95 en el ejemplo) es el valor $vc_{\gamma\beta}$ para el que puede afirmarse con un nivel de confianza estadística del 90% que al menos el 95% de las barras de la población tienen un R_e superior a $vc_{\gamma\beta}$.

Si se dispone de una muestra aleatoria simple de n unidades de la población, y siendo \bar{x} y s la media y la desviación típica de dicha muestra calculadas de la forma habitual, un resultado clásico de Estadística avanzada, que se demuestra con relativa facilidad, indica que $vc_{\gamma\beta}$ puede obtenerse mediante la expresión

$$vc_{\gamma\beta} = \bar{x} - ks \quad (e.1)$$

siendo

$$k = \frac{t_{\delta, n-1}^{\gamma}}{\sqrt{n}}$$

donde $t_{\delta, n-1}^{\gamma}$, que puede obtenerse en las tablas correspondientes o mediante el software adecuado, es el percentil $1-\gamma$ de una distribución t no central con $n-1$ grados de libertad y parámetro de no centralidad $\delta = z_{\beta}\sqrt{n}$, donde z_{β} es el percentil β de la distribución Normal tipificada.

La EN 10080 postula la utilización de este procedimiento para la obtención de los valores característicos a largo plazo, que son los contemplados en dicha norma.

Sin embargo, y tal como se discute más adelante, este procedimiento no es adecuado cuando el objetivo es evaluar valores característicos a corto plazo, en particular para la obtención on-line de los valores característicos correspondientes a las sucesivas coladas

² Se sobreentiende: "en la población considerada"

³ En los casos del A_{gt} y del ratio R_m/R_e la exigencia es del 90% en vez del 95%. La Norma da también una definición equivalente para aquellos parámetros, como el ratio $R_{e_real}/R_{e_nominal}$ en los que se exige no rebasar un determinado nominal

que se van laminando en una factoría, cuyo conocimiento es fundamental para el control del proceso productivo.

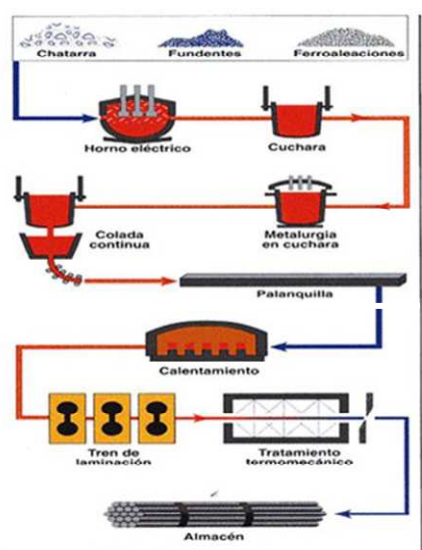
En este artículo se expone un procedimiento original que hemos desarrollado con este objetivo y que viene utilizándose para el control interno de producción en las fábricas en posesión de la marca N de AENOR para acero corrugado.

Tras este primer apartado introductorio, el artículo se estructura en 4 apartados adicionales. En el Apartado 2 se analiza la naturaleza estadística de las variables que aparecen en el proceso de fabricación de acero corrugado. En el Apartado 3 se presentan los conceptos de valor característico a largo plazo y valor característico para una colada, discutiéndose las limitaciones del primero a efectos del control on-line de la producción y de garantizar unos determinados niveles de calidad a los clientes. También se constata las limitaciones del procedimiento recogido en la EN 10080 para la obtención de valores a largo plazo, cuando el objetivo es la obtención del valor característico para una colada. En el Apartado 4 se expone y justifica el procedimiento original que hemos desarrollado con este último objetivo; el fundamento de dicho procedimiento es la utilización de técnicas de Estadística Bayesiana para combinar la información histórica disponible sobre el proceso analizado con la información adicional proporcionada por los ensayos realizados en la colada en cuestión. Finalmente, en el Apartado 5 se expone la operativa que se está siguiendo en la marca de N de AENOR para acero corrugado para implementar este nuevo procedimiento en el control interno de producción de las fábricas en posesión de dicha marca, con el objetivo de garantizar a los clientes niveles de calidad superiores a los que implicaría el simple cumplimiento de las exigencias de la EN 10080.

2. NATURALEZA ESTADÍSTICA DE LAS VARIABLES EN LA FABRICACIÓN DE ACERO CORRUGADO

Tal como se esquematiza en la Figura 1, la fabricación de barras de acero corrugado es un proceso que consta de dos fases sucesivas claramente diferenciadas.

Figura 1: Esquema del proceso de fabricación de acero corrugado



En la acería, la chatarra se funde y procesa en el horno eléctrico, en un proceso “batch” que genera coladas de unas 120 t cada una. Una acería típica en plena producción puede producir hasta 20 coladas diarias. Para la variable X en cuestión, por ejemplo el R_e final de las barras de acero, las diferentes causas de variabilidad en este proceso hacen que finalmente exista una varianza (σ^2_{entre}) entre los resultados promedios μ_i de las barras que se obtendrán de las diferentes coladas. Por lo tanto, las medias μ_i de las distintas coladas, fluctúan normalmente en torno a una media general μ con una varianza σ^2_{entre} .

Posteriormente, las palanquillas de cada colada pasan por los trenes de laminación, donde se transforman en las barras corrugadas que constituyen el producto final del proceso. Las causas de variabilidad existentes en este proceso de laminación, hacen que la variable X para las barras procedentes de una misma colada fluctúe alrededor de la media μ_i de ésta con una varianza (σ^2_{dentro}). Se asume generalmente, como una simplificación razonable del problema, que los valores de σ^2_{dentro} son similares en las diferentes coladas.

En estas condiciones, la pauta de variabilidad de la variable analizada X viene caracterizada por 3 parámetros: μ , σ^2_{entre} y σ^2_{dentro}

Sea X la variable aleatoria de interés (por ejemplo, el R_e), definida en la población formada por todas las barras laminadas procedentes de todas las coladas producidas en un determinado periodo en una fábrica. Si se selecciona al azar una colada “i” y, de las barras de esa colada, se toma al azar una barra j, el modelo para definir el valor X_{ij} de la variable en dicho individuo de la población es:

$$X_{ij} = \mu + c_i + b_{ij} \quad (\text{e.2})$$

donde:

μ : es la media general de X en el total de la población

c_i : es el “efecto” de la colada i, definido como la diferencia entre la media μ_i de todas las barras de esa colada y μ . Esta c_i es el valor de una variable Normal de media 0 y varianza σ^2_{entre}

b_{ij} : es la diferencia entre X_{ij} y la media de la colada i. Esta b_{ij} es el valor de una variable Normal, independiente de c_i , de media 0 y varianza σ^2_{dentro}

De acuerdo con (e.2) la variable X se distribuye, en la población total, como una Normal de media $= \mu$ y de varianza total $\sigma^2_{\text{total}} = \sigma^2_{\text{entre}} + \sigma^2_{\text{dentro}}$

Una cuestión importante a resaltar es que en una muestra formada por un conjunto de valores x_{ij} , los datos correspondientes a diferentes coladas son independientes, pero los datos correspondientes a una misma colada no son independientes, siendo el coeficiente de correlación entre dos de ellos igual a $\sigma^2_{\text{entre}} / (\sigma^2_{\text{entre}} + \sigma^2_{\text{dentro}})$

3. VALORES CARACTERÍSTICOS A LARGO PLAZO Y VALOR CARACTERÍSTICO DE UNA COLADA

3.1 Concepto de valor característico a largo plazo

Como hemos indicado el concepto de valor característico no se refiere a un unidad individual, sino que implica una exigencia a nivel del conjunto de unidades que constituyen la población a evaluar.

La norma EN 10080 precisa en sus exigencias que el valor característico debe calcularse semestralmente, considerando los resultados de todos los ensayos realizados en la fábrica sobre un determinado producto⁴ en los últimos 6 meses⁵.

La población a evaluar mediante dicho valor característico estará compuesta, por tanto, de un número elevado de coladas. En cada colada la Norma prescribe que se realice, al menos, un ensayo cada 30 t, con un mínimo de 3 ensayos por colada, aunque este número puede variar de unas coladas a otras en función de las incidencias que puedan presentarse en el proceso.

Debemos hacer notar incidentalmente que, tal como se expuso al final del apartado anterior, la muestra a analizar para obtener los valores característicos a largo plazo no es una muestra aleatoria simple, al no ser independientes los valores correspondientes a una misma colada. Este hecho hace que sea incorrecto aplicar, tal como postula la EN 10080, la expresión (e.1) para obtener el valor característico, que exige que los datos de la muestra sean tomados independientemente⁶. Un análisis de las consecuencias prácticas de este error, que conduce a sobreestimar los niveles reales de calidad en las poblaciones consideradas, será objeto de un próximo artículo en esta misma revista.

3.2 Limitaciones de los valores característicos a largo plazo

El conocimiento del valor característico a largo plazo es útil para valorar el nivel global de calidad en la producción y, en particular, constatar si ésta va a ser capaz de satisfacer los requisitos exigidos por una determinada normativa. Sin embargo, su utilización para el control on-line de la producción y para garantizar la calidad de las partidas que reciben los clientes presenta serias limitaciones.

En el primer aspecto, para el control on-line de la producción, cuyo objetivo fundamental es la detección precoz de las anomalías que puedan presentarse en el proceso, es obvia la escasa utilidad de un indicador que se conoce sólo con una periodicidad semestral.

⁴ Un producto viene definido por un determinado tipo de acero (e.n España hay 4 posibles: B400S, B400SD, B500S y B500SD) y un determinado diámetro.

⁵ Si el número de ensayos en el semestre ha sido inferior a 200, el periodo a evaluar debe ampliarse hasta incluir los 200 últimos ensayos.

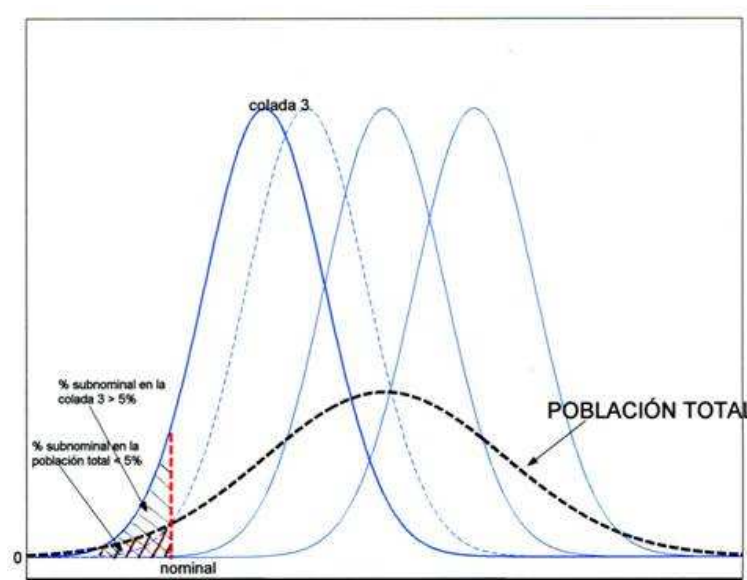
⁶ Una propuesta original estadísticamente correcta para obtener valores característico en estas situaciones de muestreo bietápico desequilibrado puede consultarse en Romero-Villafranca *et al* (2008)

Respecto a la segunda cuestión, la garantía (aunque sea con carácter retrospectivo) de la calidad de las partidas suministradas a los clientes, la utilidad del valor característico a largo plazo es también limitada, como se justifica a continuación.

El hecho de que en el total de una producción el valor característico (por ejemplo, del R_e) sea superior al nominal exigido garantiza, con el nivel de confianza prescrito, que la proporción de barras que no cumple el nominal en dicho total no supera el 5%.

Sin embargo, y tal como se ilustra en la Figura 2, ello no implica que en todas las coladas que forman parte de dicha producción total dicha proporción se mantenga inferior a dicho límite.

Figura 2. Ejemplo: el porcentaje de subnominal en una colada puede ser muy superior al existente en el total de la población



Un ejemplo numérico aclara esta idea:

Sea una población en la que $\mu=530$, $\sigma_{\text{entre}}=15$ y $\sigma_{\text{dentro}}=10$. La σ_{total} de la población será $\sqrt{15^2 + 10^2} = 18.02$, y el percentil $z_{0.05}$ de la distribución será $530 - 1.645 \times 18.02 = 500.4$, que es superior al nominal 500. En la población total, la proporción de unidades subnominales será $P(N(530, 18.02) < 500) = 0.048$, inferior por tanto al máximo de 5% permitido por la Norma.

Sin embargo, en todas las coladas cuya media μ_i sea inferior a $500 + 1.645 \times 10 = 516.45$ la proporción de unidades subnominales será superior al 5%. Como $P(N(530, 10) < 516.45) = 0.088$, resultará que, pese que en el total de la población haya menos de un 5% de unidades subnominales, en el 8.8% de las coladas laminadas la proporción de barras por debajo del nominal sería superior a dicho límite.

La EN 10080, en sus disposiciones sobre el control interno de producción, también exige que para que una colada sea aceptable los resultados de todos los ensayos

realizados en la misma deben ser superiores al nominal. Sin embargo, tampoco esta exigencia garantiza con un nivel de confianza suficiente que una colada aceptada cumpla el requisito de tener menos de un 5% de unidades subnominales. Por ejemplo, una colada que tuviera un 20% de barras fuera de especificación (el cuádruple de lo exigido) y en la que se realizaran 4 ensayos, tendría una probabilidad de $0.8^4 = 0.41$ de ser declarada aceptable.

3.3 El problema de la obtención on-line de valores característicos a nivel de coladas.

Las consideraciones anteriores ponen de manifiesto el interés práctico de la obtención de los valores característicos correspondientes a cada colada laminada, utilizando la información disponible cuando termina su proceso de laminación. Estos valores, además de posibilitar un control on-line del proceso al estar disponibles en el momento que finaliza cada colada, también permitirían garantizar a los clientes, con el nivel de confianza deseado, que en todas y cada una de las coladas la proporción de unidades subnominales es inferior al máximo permitido.

Sin embargo, la obtención de estos valores característicos a partir exclusivamente de los resultados de los ensayos realizados en la colada y utilizando el procedimiento clásico expuesto en el Apartado 1, presenta un inconveniente importante que limita seriamente el llevarla a cabo.

La raíz del problema reside en el escaso número de datos disponibles para cada colada. Como hemos indicado, la Norma prescribe al menos un ensayo cada 30 t, siendo lo más frecuente el disponer de 3 o 4 datos por colada.

En la expresión (e.1) el logro un nivel de confianza estadístico elevado (90%) a partir de un número reducido de datos conduce a valores elevados del coeficiente k , que penaliza mucho el resultado obtenido para el valor característico. Así, en el caso por ejemplo del R_e , cuando $n=4$ el valor a utilizar de k es 3.95.

Sin embargo, este procedimiento no utiliza toda la información disponible en situaciones, como las contempladas en este artículo, en las que la población a controlar es una colada que ha sido producida de forma controlada mediante un proceso sobre el que se dispone de mucha información previa.

El interés práctico de poder obtener on-line los valores característicos correspondientes a cada colada, y el problema que plantea la utilización del procedimiento clásico para la obtención de dichos valores característicos al no utilizar toda la información disponible, nos llevó a elaborar un nuevo método, cuyo desarrollo es el objeto del siguiente apartado.

4. UN NUEVO MÉTODO PARA LA OBTENCIÓN ON-LINE DE LOS VALORES CARACTERÍSTICOS

4.1 Fundamento

El motivo básico por el que el procedimiento clásico conduce a una estimación tan “pesimista” del valor característico, es la necesidad de garantizar un nivel de confianza elevado (90%) cuando sólo se dispone sobre la colada de la información proporcionada por 4 datos. En principio esta limitación parece imposible de superar.

Sin embargo, en el contexto en el que plantea nuestro problema, ¿no es cierto que esos 4 datos sean la única información disponible sobre la colada!

En efecto, la colada se ha producido en la fábrica mediante un proceso establecido y estable que ha generado ya en el pasado reciente numerosas coladas del mismo producto y sobre las que se dispone de información.

La idea básica del nuevo procedimiento que proponemos, radica en obtener conclusiones sobre la colada en cuestión combinando la información histórica disponible a prior sobre el proceso en cuestión con la información específica sobre la colada facilitada por los ensayos realizado en al misma.

La combinación de ambas fuentes de información se lleva a cabo recurriendo a planteamientos de Estadística Bayesiana. Para ello, y tal como se expone en los siguientes apartados, hay que estimar, en primer lugar, los parámetros que definen el comportamiento estadístico global del proceso analizado. Cuando se dispone de los resultados de los ensayos de una colada debe constatarse si ésta ha sido generada bajo control estadístico. Una vez confirmada esta situación, la información suministrada por dichos ensayos se combina con la información previa sobre el proceso, para obtener el valor característico garantizable para la colada. En los siguientes apartados se expone la operativa a seguir en cada uno de estos pasos.

4.2 Estimación de los parámetros del proceso

Para la estimación de los parámetros que definen el comportamiento global del proceso de fabricación del producto en cuestión en la factoría considerada se utiliza toda la información recogida sobre el mismo en los últimos seis meses⁷.

Como hemos indicado, el comportamiento estadístico de la variable X en cuestión (por ejemplo, el límite elástico R_e) viene definido por los tres parámetros μ , σ^2_{entre} y σ^2_{dentro}

Sean:

x_{ij} : valor observado para la variable estudiada en el ensayo j de la colada i , donde
 $j = 1 \dots n_i$ siendo n_i el número de ensayos en la colada i
 $i = 1 \dots N_C$ siendo N_C el número de coladas laminadas durante el periodo estudiado

$$N_T = \sum_i n_i \text{ número total de ensayos}$$

⁷ Si en dicho periodo se han laminado menos de 50 coladas del producto en cuestión, el periodo se amplía hasta comprender los datos de las 50 últimas coladas

$$\bar{x}_i = \sum_j x_{ij} / n_i \quad \text{media de los valores en la colada } i$$

$$m_a = \sum_i \sum_j x_{ij} / N_T \quad \text{media aritmética de todas las observaciones}$$

$$\bar{\bar{X}} = \sum_i \bar{x}_i / N_C \quad \text{media de las medias de las coladas}$$

La media global μ del proceso se estima mediante $\bar{\bar{X}}$

Las desviaciones típicas entre coladas s_{entre} y dentro de coladas s_{dentro} se estimarán a partir de un Análisis de la Varianza de los datos. Dado que el valor de n_i puede diferir de unas coladas a otras, se utilizarán las expresiones siguientes, correspondientes a modelos desequilibrados con efectos aleatorios:

$$SC_{\text{colada}} = \sum_i n_i (\bar{x}_i - m_a)^2 \quad CM_{\text{coladas}} = SC_{\text{coladas}} / (N_C - 1)$$

$$SC_{\text{ensayos}} = \sum_i \sum_j (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \quad CM_{\text{ensayos}} = SC_{\text{ensayos}} / (N_T - N_C)$$

$$s_{\text{dentro}} = \sqrt{CM_{\text{ensayos}}}$$

$$s_{\text{entre}} = \sqrt{\max\left(0, \frac{CM_{\text{coladas}} - CM_{\text{ensayos}}}{N_0}\right)} \quad \text{donde} \quad N_0 = \frac{N_T - \sum_{i=1}^{N_C} n_i^2}{N_C - 1}$$

Nota: si resulta $s_{\text{entre}}=0$, se tomará para s_{entre} el valor obtenido para el producto en el semestre anterior

Dado el elevado número de observaciones en los que se basa la estimación, cabe esperar que $\bar{\bar{X}}$, s_{entre} y s_{dentro} resulten muy próximos a los verdaderos valores poblacionales, μ , σ_{entre} y σ_{dentro} , por lo que en el resto del análisis se utilizarán en sustitución de dichos valores desconocidos.

Antes de dar como válidas estas estimaciones hay que constatar que el proceso ha estado operando bajo control estadístico durante el periodo analizado. Para ello se utiliza el procedimiento descrito en el siguiente apartado para comprobar que todas las coladas analizadas se fabricaron bajo control.

4.3 Comprobación de que la colada ha sido producida bajo control

Como hemos indicado, el fundamento del proceso propuesto para obtener el valor característico garantizable para una colada, radica en combinar la información histórica disponible a prior sobre el proceso en cuestión con la información específica sobre la colada facilitada por los ensayos realizados en la misma.

Para aplicar este procedimiento es necesario constatar previamente que la colada ha sido obtenida en las condiciones habituales, no habiéndose producido salidas de control originadas por causas especiales de variabilidad.

Según se ha expuesto, el proceso funcionando bajo control genera una población de coladas cuyos valores medios μ_i fluctúan normalmente en torno a una media global μ (estimada por \bar{X}) con una desviación típica σ_{entre} (estimada por s_{entre}); en cada colada de dicha población los valores observados x_{ij} fluctúan normalmente en torno a μ_i con una desviación típica σ_{dentro} (estimada por s_{dentro}). A partir de los valores x_{ij} obtenidos en los ensayos de una colada concreta, hay que constatar si puede asumirse que la misma es un miembro de dicha población de coladas.

La operativa que proponemos para comprobar que la colada en cuestión ha sido obtenida bajo control se basa en el establecimiento un esquema de control estadístico del proceso⁸.

Nuestra propuesta consiste en utilizar un gráfico de medias individuales, llevando un punto a los gráficos tras la toma de la última muestra de cada colada. En un gráfico se lleva el valor medio \bar{x}_i de los n_i ensayos realizados en la colada, mientras que en otro se grafica la desviación típica s_i obtenida en esos n_i ensayos.

El límite de control (superior) para la desviación típica de los n_i ensayos de una colada se calcula de la forma habitual como $LCS_{s_i} = B_4 s_{\text{dentro}}$, donde B_4 se obtiene en función de n_i en las tablas estándar de gráficos de control⁹.

Sin embargo, los límites de control para las medias \bar{x}_i no pueden calcularse mediante las expresiones que se utilizan en los gráficos estándar, porque en nuestro caso dichas medias se obtienen a partir de un muestreo bietápico. Se deduce fácilmente a partir de (e.2) que la varianza de las \bar{x}_i es $\sigma_{\text{entre}}^2 + \sigma_{\text{dentro}}^2/n_i$, por lo que los límites de control correctos para dichas medias deben ser:

$$LC_{\bar{x}_i} = \bar{X} \pm 3 \sqrt{s_{\text{entre}}^2 + \frac{s_{\text{dentro}}^2}{n_i}}$$

Para simplificar el gráfico, de forma que los límites no varíen de unas coladas a otras en función de n_i , es posible sustituir en la expresión anterior n_i por su valor promedio o más frecuente

4.4 Obtención del valor característico para la colada

Una vez constatado que la colada ha sido procesada bajo control, su media desconocida μ_i es a priori el valor de una variable normal de media μ (estimada por \bar{X}) y desviación típica σ_{entre} (estimada por s_{entre}).

La información adicional que proporciona el valor medio \bar{x}_i obtenido en los n_i ensayos realizados en la colada, puede combinarse con la información existente a priori utilizando resultados conocidos de Estadística Bayesiana (Box y Tiao 1973), en los que

⁸ Por otra parte, la Norma EN 10080, prescribe que las fábricas de acero corrugado para armaduras de hormigón deben implantar un sistema de control continuo de su producción, aunque no precisa la forma en la que éste debe llevarse a cabo

⁹ Para el caso más frecuente $n_i = 4$ el valor de B_4 es 2.28

se demuestra que, a posteriori de haber observado el mencionado valor de \bar{x}_i en la muestra, μ_i puede considerarse como una variable aleatoria distribuida como una Normal con media m_1 y desviación típica S_1 dadas por las siguientes expresiones:

$$m_1 = \frac{s_{dentro}^2 \bar{X} + n_i \times s_{entre}^2 \bar{x}_i}{s_{dentro}^2 + n_i \times s_{entre}^2} \quad S_1 = \sqrt{\frac{s_{dentro}^2 \times s_{entre}^2}{(s_{dentro}^2 + n_i \times s_{entre}^2)}} \quad (e.3)$$

Nota: obsérvese que μ_1 no es más que una media ponderada del valor a priori \bar{X} y el valor obtenido en los ensayos, en la que, como resulta intuitivo, el peso del valor observado en los ensayos es tanto mayor cuanto mayor es el número n_i de éstos y la s_{entre}^2 , y tanto menor cuanto mayor es la s_{dentro}^2 .

Habrà, por lo tanto una probabilidad del 90% de que μ_i resulte mayor que $m_1 - 1.282S_1$, dado que -1.282 es el percentil $z_{0.10}$ para la variable Normal tipificada, y, en consecuencia, habrá una probabilidad del 90% de que en el 95% de los ítems de la colada la variable X considerada sea mayor que $(m_1 - 1.282S_1) - 1.645s_{dentro}$

Por lo tanto el valor característico garantizable para la colada, con un nivel de confianza γ del 90% y un nivel de seguridad β del 95% es:

$$vc_{colada} = m_1 - 1.282S_1 - 1.645s_{dentro} \quad (e.4)$$

donde m_1 y S_1 vienen dadas por las expresiones recogidas en (e.3).

Nota: En el caso, como sucede con el A_{gt} , en los que el nivel de seguridad β exigido en la Norma es el 90%, se deduce inmediatamente que el valor característico viene dado por $m_1 - 1.282S_1 - 1.282s_{dentro}$

5. UN EJEMPLO DE IMPLANTACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO

La Marca N de AENOR para barras corrugadas de acero para armado de hormigón es una marca de conformidad de estos productos con la vigente Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) y las correspondientes normas de producto

La marca N de AENOR para barras corrugadas de acero, ofrece un nivel adicional de seguridad para los clientes de la marca, garantizando el cumplimiento de los valores característicos, con un 90% de confianza, a nivel de todas las coladas individuales, y no sólo para la producción a largo plazo (que es lo que exige la EHE-08 de acuerdo con la EN 10080).

Para obviar la dificultad que supone garantizar con un 90% de confianza un valor característico a partir de un tamaño muestra pequeño, sin que se obtengan estimaciones muy pesimistas del valor real de $z_{0.05}$, desarrollamos el planteamiento estadístico original que se ha expuesto en este artículo. Dicho procedimiento, que se incorporó a los correspondientes Reglamentos que regulan la Marca, debe seguirse obligatoriamente por todas las fábricas en posesión de la misma.

En la actualidad las fábricas en posesión de la Marca N de AENOR de acero corrugado utilizan de forma rutinaria el procedimiento que hemos propuesto para la evaluación on-line de los valores característicos de los parámetros de calidad más relevantes en cada una de las coladas que laminan¹⁰.

Trimestralmente las fábricas envían al órgano responsable del control de la marca los resultados de todos los ensayos de control interno realizados a lo largo del trimestre, con el fin de que éste constate que se ha aplicado correctamente las exigencias del Reglamento de forma que los valores característicos de todas las coladas amparadas por la Marca cumplen los nominales exigidos en la EHE-08.

Adicionalmente se utiliza la información proporcionada por cada fábrica para actualizar las estimaciones \bar{X} , s_{entre} y s_{dentro} para los distintos parámetros en todos los productos laminados en la misma, y obtener y facilitar a cada fábrica los límites de control a utilizar en el siguiente trimestre.

Con el fin de simplificar la operativa cotidiana en las fábricas y obviar la necesidad de que realicen para cada colada los cálculos algo laboriosos implicados en (e.3) y (e.4), una vez estimados \bar{X} , s_{entre} y s_{dentro} y para cada posible valor de n_i , el órgano responsable del control de la marca calcula a partir de dichas expresiones el valor mínimo que debe tener \bar{x}_i para que el valor característico resultante de aplicar (e.4) cumpla las exigencias de la EHE-08, y facilita esta información a cada fábrica. De esta forma, las fábricas en el día a día lo único que tienen que comprobar en cada colada, una vez que disponen de los resultados de los ensayos realizados en la misma, que \bar{x}_i está bajo control y que supera dicho valor mínimo.

La utilización de este nuevo procedimiento ha permitido a las fábricas en posesión de la Marca N de AENOR para acero corrugado, un mejor control de la calidad de sus productos y el poder garantizar a sus clientes unos niveles de calidad superiores a los exigidos en las normas oficiales y a los garantizados por sus competidores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AENOR (2011) “Reglamento particular de la marca AENOR para barras corrugadas” RP 17.01
- AENOR (2011) “Reglamento particular de la marca AENOR para barras corrugadas con características especiales de ductilidad” RP 17.10
- Box G.E.P. y Tiao G.C. *Bayesian Inference in Statistical Analysis* New York Ed. Wiley 1973
- EN 10080 *Steel for the reinforcement of concrete - Weldable reinforcing steel – General European Committee for Standardization, Bruselas 2005.*

¹⁰ Los parámetros de calidad cuyos valores característicos se controlan a nivel de coladas son el límite elástico, la carga de rotura, el alargamiento bajo carga máxima y el alargamiento a la rotura.

Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) Ministerio de la Presidencia. Real Decreto 1247/2008 BOE

Romero-Villafranca R., Zúnica L.R., Romero-Zúnica R., Pagura A.J. " One-Sided Tolerance Limits for Unbalanced Random Effects Models: A Mee-Owen Generalized Procedure" Journal of Statistical Computation and Simulation (Ed. Taylor & Francis) Vol. 78 N° 12 (2008) pp 1213 – 1225