

PITRA

Programa de Infraestructura del Transporte

Boletín técnico

31



Vol 3. N° 31 / Agosto 2012



Filosofía de Control de Calidad de Obras Viales

Ing. Víctor Hugo Cervantes Calvo

*Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica*

En décadas pasadas, la filosofía y técnicas de control y aseguramiento de la calidad, implementación de sistemas de calidad, la valoración estadística de la variabilidad o incluso la determinación de pago en función de la calidad no eran conceptos de uso común en las obras viales que se desarrollaban en Costa Rica. Tanto la mezcla asfáltica, así como muchos otros materiales empleados en las obras de pavimentación, no eran considerados por la Administración o las industrias propiamente como productos cuya fabricación debiera ser realizada mediante un proceso controlado que

permita garantizar las características óptimas para el proyecto específico.

En esa época prevalecía un empirismo considerable, en donde solo se evaluaba la apariencia de la mezcla asfáltica (brillante o seca) como criterio productivo de aceptación. Los laboratorios de ensayos de calidad para control de la producción en planta eran prácticamente inexistentes, y casi no se practicaba el control metrológico de equipos (calibración o verificación). Aunque esta situación ha mejorado sustancialmente en

**Comité Editorial
del boletín
2012**

Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, PhD.
Coordinador General PITRA, LanammeUCR

Bach. Lionela López Ulate
Unidad de Capacitación y Transferencia Tecnológica

Daniela Alpizar Gutiérrez
Diseñadora Gráfica. Unidad de Capacitación y Transferencia Tecnológica

los últimos años, aún en la actualidad algunos materiales no se consideran productos cuya variabilidad pueda ser adecuadamente controlada, tanto en la planta de producción, así como en el proceso constructivo.

Este boletín pretende abordar algunos de los conceptos más importantes del control estadístico de calidad, con el ánimo de promover su aplicación a los materiales que se utilizan en los procesos constructivos de Obras Viales y no solo en la producción particular de mezcla asfáltica, tal como habitualmente se realiza hoy en día.

1. Conceptos generales

Los materiales que se utilizan en la mayoría de los procesos constructivos civiles o viales deben de cumplir con un valor determinado, establecido normalmente mediante una especificación constructiva o contractual, ya sea que se trate de una construcción pequeña o de gran magnitud. Es por eso que podemos encontrar que se fabrica un concreto hidráulico con una resistencia a la compresión de 110 kg/cm² ó uno con resistencia de 700 kg/cm², el primero cumple especificaciones para concretos de uso general y el segundo, se especifica para proyectos que requieren concretos de alta resistencia. ¿Pero cómo determinar si el proceso productivo cumple con la calidad requerida?

a. Proceso productivo

La precisión de la maquinaria, la pericia del operador, las propiedades de la materia prima y el control del sistema operativo influyen, entre otros tantos factores, en las características del producto final y por ende en el cumplimiento de las especificaciones establecidas. Es a partir de este punto donde los conceptos estadísticos nos permiten determinar el nivel de cumplimiento de un producto final, el cual se denomina normalmente como “nivel de calidad” o “factor de calidad” o incluso proveer criterios para escoger entre distintos materiales.

Cuando el producto tiene un valor especificado que alcanzar (valor meta), las variaciones propias impiden obtener un producto final con un único valor, sin embargo se espera que los resultados se encuentren cercanos a este valor, lo cual en términos estadísticos se conoce como un comportamiento normal, en donde existe la probabilidad que el 50% de los valores se ubiquen por encima y el restante 50% por debajo del valor meta (Figura N°1), derivándose de esta manera la curva normal.

Al analizar la cercanía o lejanía de los valores del producto final con respecto al valor meta, podemos tener información relacionada con la variabilidad del proceso, la eficiencia y eficacia para que el producto final tenga el valor meta (Figura N°2); por lo tanto si la nube de valores se encuentra cercana a este valor, se está ante un proceso de baja variabilidad, si al contrario la nube se encuentra dispersa (alejada del valor meta) el proceso tendrá una variabilidad evidente (Figura N°4).

b. Límites de especificación y de control

Las especificaciones se definen para cada material de acuerdo con los resultados de estudio del desempeño y las condiciones para las cuales será utilizado, estableciéndose especificaciones más rigurosas para cuando el material va a estar sometido a condiciones más severas. Como resultado se definen límites extremos aceptables a nivel general, (máximos, mínimos o ambos) los que se denominan límites de especificación y se expresan como: valor meta ± límite de especificación, estableciendo un rango de valores dentro de los cuales la calidad del producto es aceptable. Como se mencionó, estos límites representan valores extremos, adicionalmente cada proceso o producto tiene sus límites de control, que definen la homogeneidad del producto, la cual es indispensable para asegurar un comportamiento esperado del mismo.

Por la importancia de la homogeneidad del producto -como parámetro de calidad o aceptación- es que

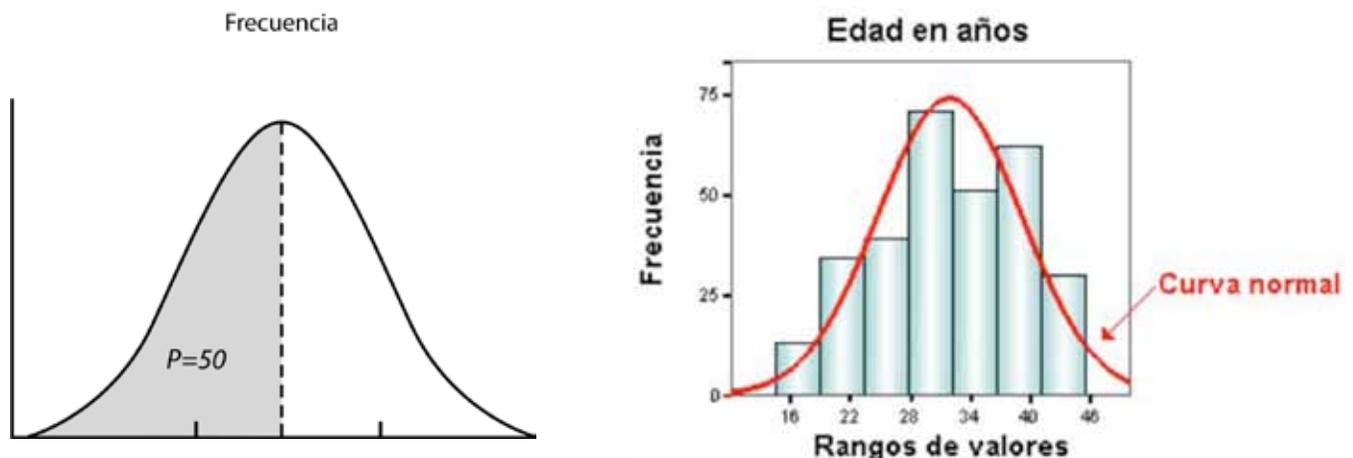


Figura N°1: Curva Normal

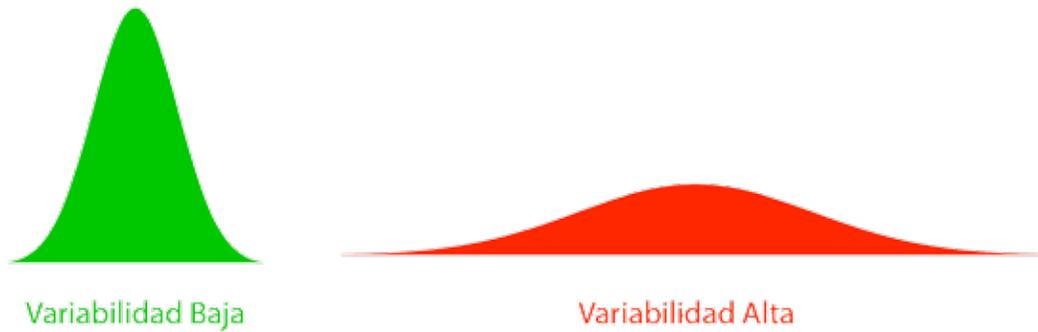


Figura N°2: Curva normal con diferente variabilidad

se utilizan técnicas estadísticas para contrastar la variabilidad del proceso contra los límites de especificación y determinar el nivel de cumplimiento de un producto final, con el fin de determinar si la probabilidad de que cumpla con las especificaciones es satisfactoria o si por el contrario la probabilidad de que se sobrepasen estos límites reduce la confiabilidad del producto. En caso que se sobrepasen los límites de especificación, el proceso productivo debe ser analizado, para definir si sucede por alguna causa específica, y el proceso debe ser ajustado, o si el proceso productivo no es capaz de manufacturar un producto final con tales especificaciones.

c. Muestreo

Durante un proceso constructivo de obra vial se produce una cantidad finita (magnitud conocida) o infinita (cantidad desconocida) de un material o producto terminado, siendo la mayoría de las veces cantidades considerables, por lo que sería prácticamente imposible o poco práctico -y económico- analizar en su totalidad. A esta magnitud total se le denomina “población”, siendo su tamaño el total de la magnitud.

Es por este motivo que se analiza una porción de observaciones de la población para hacer inferencias con respecto a la población total, esta porción es lo que se designa como “muestra” (Figura 3).

Para que la inferencia a partir de la porción de observaciones, sea válida, las muestras obtenidas deben ser representativas de la población. Por eso cualquier procedimiento de muestreo que produzca inferencias que sobreestimen o subestimen alguna característica de la población será sesgado. Con el fin de eliminar cualquier posibilidad de sesgo, el procedimiento de selección de muestras (concepto de muestreo) debe ser aleatorio, de modo que cada una de las observaciones sea escogida al azar y que tenga opción de ser seleccionada de manera independiente. Por otro lado, hay que tener en cuenta que un mal proceso de muestreo puede llegar a invalidar los análisis de laboratorio; incluso la escogencia del método de ensayo debe estar acorde con la variable analizada, para que los análisis -de laboratorio o estadísticos- sean válidos.

En el ámbito de construcción de carreteras, comúnmente participan dos partes que se involucran en un programa

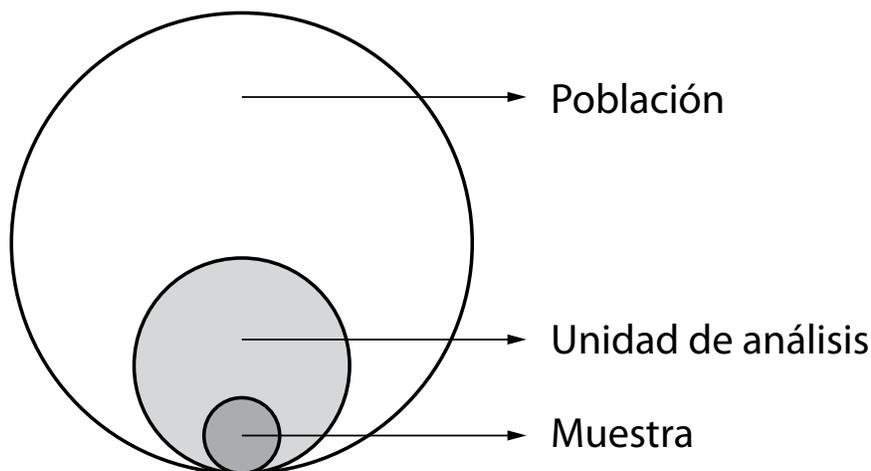


Figura N°3: Representación del concepto de muestra

de muestreo para control de la calidad de los materiales y del proceso productivo; por un lado se establece el control aplicado por parte del fabricante del producto, denominado "control de calidad" y como contraparte existe el control que ejerce el dueño de la obra (usualmente el Estado o la Administración) denominado "verificación de la calidad".

2. Análisis de datos de control de un proceso productivo

Una práctica frecuentemente malinterpretada, en el medio de construcción de carreteras, es la aplicación de un análisis efectivo y funcional de los datos derivados de actividades de control llevadas a cabo en un proceso productivo, debido a que tradicionalmente los criterios de análisis que se aplican consisten en determinar únicamente el promedio, la desviación estándar y representar los datos en una gráfica comparados contra los límites establecidos. Estas actividades están distantes a la implementación de herramientas estadísticas de control aplicadas habitualmente en la mayoría de los procesos industriales, tales como: gráficas de control estadístico (promedios, recorridos, atributos), habilidad y desempeño de los procesos (C_p , C_{pk} , C_k , concepto de 6σ), entre otras metodologías, lo cual origina dos maneras diferentes de interpretar los datos y por ende los procesos productivos.

El análisis convencional puede llevar a conclusiones generales tales como: la cantidad de datos que no alcanzan los requisitos requeridos del producto (ej: 5 de 20 datos, el 18% de los datos), dejando de lado información relevante del proceso productivo. Sin embargo un análisis estadístico efectuado utilizando herramientas estadísticas de control de procesos faculta conocer en qué magnitud el proceso se acerca o se aleja de los requisitos necesarios o valor meta del producto (exactitud del proceso. Figura 4), además permite determinar con cuanta precisión se manufactura el

producto (la variabilidad del producto). De modo que a partir de la información que se genere, el productor pueda hacer los ajustes adecuados y oportunos, para corregir cualquier deficiencia durante el proceso productivo.

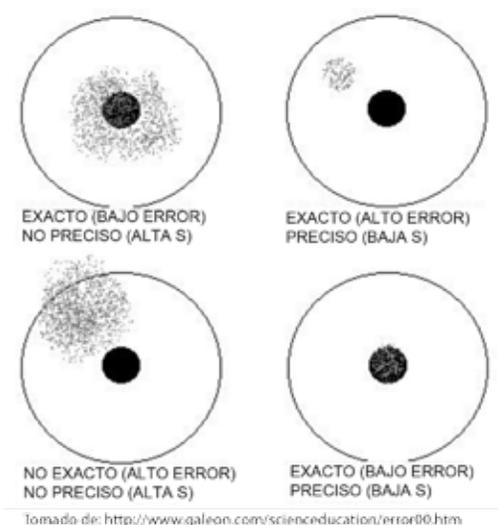
Por tanto, con el análisis tradicional se logra determinar si el proceso cumple con los requisitos establecidos, sin embargo una evaluación integral del proceso productivo mediante análisis estadístico determina tanto, si el proceso está logrando los requisitos establecidos, pero además se puede determinar si se encuentra cercano o alejado del valor meta y con cuanta variabilidad, lo cual permitiría finalmente mejorar el producto. Por ello es esencial mantener un historial del proceso, con el fin de aplicar herramientas estadísticas para conocer y proyectar el comportamiento del mismo.

3. Estimadores de calidad final de un proceso productivo

Una de las herramientas estadísticas disponibles, consiste en la determinación de estimadores o índices de calidad de un proceso, los cuales se denotan como Q_s o Q_i , en donde los sufijos "s" e "i" se refieren a requisitos superiores o inferiores al valor meta, respectivamente. Estos son indicadores de la exactitud y precisión de un proceso productivo (cercanía al valor meta y dispersión del proceso), altos valores de Q provienen de procesos con alta variabilidad o lejanos al valor meta, por otro lado valores bajos de Q reflejan un proceso con mucha exactitud y baja variabilidad.

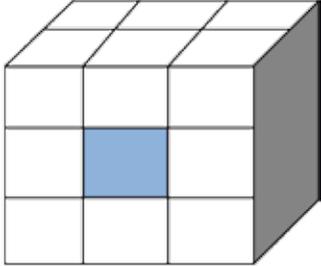
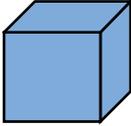
4. Valoración estadística de cumplimiento de requisitos

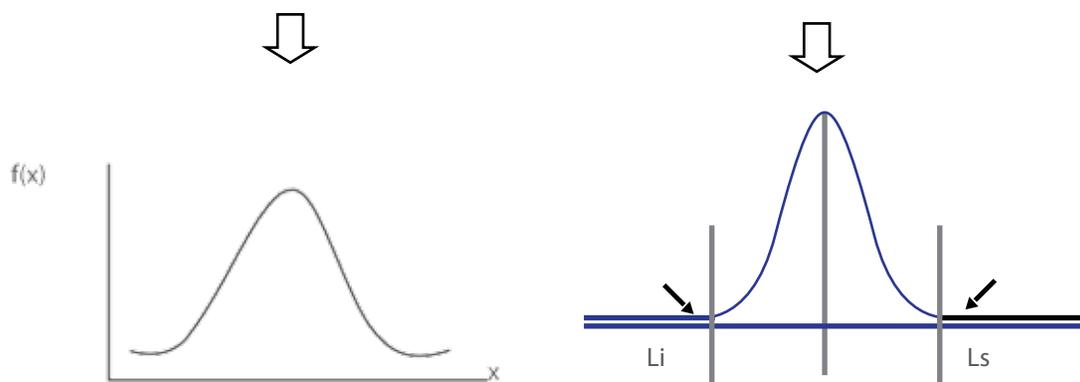
Las distribuciones de análisis estadístico (normal ó t-student) representan una generalización simplificada



En una diana de tiro al blanco, cuando la nube de puntos se ubica en el centro, se asocia con gran exactitud y buena precisión, si la nube de puntos se encontrara densa en un borde de la diana, se asocia con baja exactitud y buena precisión. En caso de que se encuentre dispersa alrededor de la diana, se concluye

Figura N°4: Exactitud y precisión de resultados

| Población | Sub grupo (muestra) |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $Z = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (1)$ <p>μ= media σ=desviación estándar</p> | $Q_s = \frac{L_s - \bar{x}}{s} \quad \text{ó} \quad Q_s = \frac{\bar{x} - L_i}{s} \quad (2)$ <p>\bar{x}= promedio s=desviación estándar L = Límite superior o inferior</p> |
|  |  |



del universo de probabilidades factibles de cada variable analizada en un proceso, debido a que representa de manera normalizada (estandariza las mediciones) mediante el estimador Z un proceso con media $\mu=0$ y desviación estándar $\sigma=1$, con el cual se pueden describir todas las probabilidades de resultados de las variables de dicho proceso.

De manera similar el índice o estimador de calidad Q es una normalización de la información proveniente de un proceso productivo, correlacionándose directamente con la distribución de análisis estadístico permitiendo inferir a través del subgrupo o lote, el comportamiento de la totalidad del material de construcción (población).

De la ecuación 2 se determina la separación del límite con respecto al valor meta (numerador) y mediante la desviación estándar (denominador), relaciona el índice de calidad con la variabilidad. De esta manera, se normaliza la información del proceso, obteniendo el índice de calidad Q con el que se aplican los conceptos de distribución estadística para inferir el comportamiento referido anteriormente.

5. Porcentaje permisible de producción fuera de los Límites de Especificación

A nivel productivo, idealmente se requiere que todo el producto final se encuentre ubicado dentro de los límites de especificación, sin embargo algunos aspectos propios del proceso productivo, podrían provocar que la variabilidad del producto final, sea mayor a la requerida, de manera tal que un pequeño porcentaje se encuentre fuera de los límites de especificación, sin que esto signifique un perjuicio del desempeño final del material.

Internacionalmente se permite que el proceso productivo tenga una variabilidad en el producto final, de 5% ó 10% con respecto a los límites de especificación (porcentaje fuera de los límites), y se estima que dicha variación en el producto no perjudica la calidad ni el desempeño final, por lo cual se considera un producto totalmente aceptable o con un nivel de calidad de 100%. Variaciones mayores en el porcentaje fuera de los límites de especificación, pueden aminorar la calidad del producto final por debajo del 100%,

estimándose aún como un producto aceptable pero sujeto a penalización por tener una calidad inferior a la aceptable, llegando a permitir una variación máxima de 20%-25% aproximadamente, en donde en definitiva el producto final no es aceptado.

6. Situación Actual

En la última década los contratos de proyectos viales han incorporado el modelo de pago en función de la calidad para la mezcla asfáltica, analizando principalmente las propiedades denominadas “parámetros de calidad”: vacíos de la mezcla, contenido de asfalto y algunos tamaños granulométricos (mallas N°4, N°30 y N°200), sin embargo no se han incluido dentro de cualquier tipo de análisis estadístico los “parámetros de aceptación”: vacíos en el agregado (vma), vacíos llenos de asfalto (vfa) y la relación polvo-asfalto, propiedades volumétricas fundamentales de la mezcla asfáltica.

El cumplimiento de las especificaciones establecidas para estos parámetros, así como la variabilidad existente, deben ser determinadas en el rango de contenido de asfalto indicado en el diseño de mezcla (habitualmente, óptimo

$\pm 0.5\%$) mediante análisis estadístico para determinar la posible afectación en el desempeño final de obra realizada o ajustes al proceso productivo de mezcla asfáltica -proceso más riguroso- para minimizar la probabilidad de incumplimientos.

De igual manera, la mayoría de los restantes materiales utilizados en la construcción de obras viales no han sido evaluados mediante análisis estadístico.

7. Reflexión final

Tal como se practica en las obras constructivas en ingeniería, todos los materiales tienen magnitudes que cumplir para ser aceptables (especificaciones de uso o contrato) para el fin para el que serán utilizados, sean estos agregados, concretos, varillas de construcción, asfaltos ó suelos, por tanto mediante la aplicación de herramientas estadísticas -relativamente sencillas- se puede determinar el nivel de calidad y variabilidad que tiene el proceso productivo, producto final o proceso constructivo, según sea el caso que se evalúe, de manera tal que permita controlar el proceso productivo y por ende valorar la variabilidad existente.

Referencias Bibliográficas

- Walpole, Ronald E. Probabilidad y estadística para ingenieros. 6ª ed. Prentice-Hall, México, 1999.
- Burati, Weed et Al. Optimal Procedures for Quality Assurance Specifications. FHWA-RD-02-095.
- Huges, Charles. State Construction quality Assurance Programs. NCHRP-346. 2005

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Coordinador General:
Ing. Luis Guillermo Loría, PhD.

Subcoordinador:
Ing. Fabián Elizondo, MBA.

Unidades:

Unidad de Auditoría Técnica
Coordinadora: Ing. Jenny Chaverri, MScE.

Unidad de Materiales y Pavimentos
Coordinador: Ing. José Pablo Aguiar, PhD.

Unidad de Evaluación de la Red Vial
Coordinador: Ing. Roy Barrantes

Unidad de Gestión Municipal
Coordinador: Ing. Jaime Allen, MSc.

Unidad de Capacitación y Transferencia Tecnológica
Coordinadora: Bach. Lionela López Ulate

Unidad de Desarrollo y Actualización de Especificaciones Técnicas
Coordinador: Ing. Jorge Arturo Castro

Unidad de Puentes
Coordinador: Ing. Rolando Castillo, PhD.