

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA ESTADÍSTICA PARA ENSAYOS DE PRODUCTO TERMINADO EN CEMENTOS EL CAIRO S.A.

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A STATISTICAL METHODOLOGY FOR REHEARSALS OF FINISHED PRODUCT IN CEMENTS EL CAIRO S.A

ALEXANDER CORREA

Escuela de Ingeniería de la Organización, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, alcorrea@unal.edu.co

CATALINA M. BURGOS

Ingeniería Industrial, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, psig@grupoargos.com

Recibido para revisar 13 de Julio de 2004, aceptado 17 de Enero de 2005, versión final 11 de Septiembre de 2006

RESUMEN: Este artículo tiene como finalidad difundir los estudios de repetibilidad y reproducibilidad de la medida, conocidos como Estudios R&R, a partir del diseño experimental. Con su aplicación se busca identificar y disminuir la variabilidad presente en las mediciones de los ensayos que se realizan en los laboratorios de control de calidad. La efectividad de este tipo de estudios radica principalmente en el control que se haga de las variables que intervienen en los procesos de medición, estas variables son el medio ambiente en que son desarrolladas, el estado de los equipos e implementos utilizados, la capacitación que tiene el operario, el uso de material homogéneo y la aplicación de un método normalizado. El artículo describe una secuencia ordenada de los pasos que se deben seguir antes y durante la realización de un Estudio R&R, además muestra la aplicación de esta metodología en la empresa Cementos El Cairo, donde fueron realizadas dos corridas del método a la prueba finura de cemento, en la primera se identifica la variabilidad presente en los ensayos, de este primer acercamiento surgen algunos ajustes que son implementados rápidamente por la empresa y con el afán de mejorar estos procesos es planeada la segunda corrida, terminado este segundo ciclo se obtiene, aunque en poca proporción, una variabilidad menor a la del primer ciclo.

PALABRAS CLAVE: Estudios R&R, diseño experimental, control de variables, mejoramiento de los procesos, control estadístico de procesos.

ABSTRACT: This article has the purpose to present the studies of repeatability and reproducibility of the measure known as the R & R, Studies based on the experimental design with the help of Statistics Package called Statgraphics. In this application, the intention is to identify and diminish the variability that is present in the measurement of tests that are made in the laboratories of the quality control. The effectiveness of this type of studies is based in the control to be done in the variables that intervene in the process of measurement.

These variables are; the environment in which are developed, the condition of the equipment, and the tools used in the experiment, the training of the worker, and also the use of the homogenous material and the application of the standardized method. The article describes an organized sequence of steps that must be followed before and during the study R & R. The research shows the application of this methodology in the Company Cairo Cement, where two tests were done to test the texture of the cement. In the first one the variability is being identified in the previous tests. From the first test, the company implements some adjustments and the purpose of improve the processes the second trial is planned. At the end of the second cycle, a variation of the first cycle in a small proportion was obtained.

KEYWORDS: Studies R&R, design of experiments, control of variables, improvement of the processes, Statistical process control.

1. INTRODUCCIÓN

Este artículo presenta el diseño e implementación de una metodología estadística, denominada estudios de repetibilidad y reproducibilidad (R&R), basada en el diseño experimental, con lo cual se pretende mostrar una aplicación práctica de esta técnica a los ensayos de producto terminado (cemento hidráulico) realizados en el laboratorio de control calidad en Cementos El Cairo S.A.

En este estudio el objetivo que se pretende, es plantear alternativas que permitan obtener mejoras en las prácticas de laboratorio. En este caso disminuir la influencia que ejerce el medio ambiente, la mano de obra, los equipos, la medición, el método y el material en la variabilidad de los resultados de las pruebas realizadas.

Se busca que este trabajo sirva como una guía metodológica para estudios posteriores, incluso a ensayos no sólo del producto terminado, sino también de materiales y productos en proceso y materias primas.

La metodología desarrollada en este trabajo comprende una secuencia ordenada de los pasos que se deben seguir antes y durante la realización de un estudio R&R, partiendo de una base teórica. Los pasos son los siguientes:

- PASO1: Planteamiento del problema e identificación de fenómenos y variables aleatorias.
- PASO 2: Determinación del modelo estadístico.
- PASO 3: Determinación del tamaño muestral.
- PASO 4: Planeación del estudio.
- PASO 5: Ejecución del estudio.
- PASO 6: Toma y registro de datos.
- PASO 7: Validación del modelo.
- PASO 8: Análisis de resultados.
- PASO 9: Documentación y difusión de conclusiones y recomendaciones.
- PASO 10: Ajuste y repetición del ciclo.

Este estudio es un punto de partida para aumentar la confiabilidad en los resultados de las mediciones de los ensayos, pero mantenerla en el tiempo depende de la continuidad que se haga de su aplicación a todas las pruebas que se realizan en el laboratorio.

2. ESTUDIOS R&R

La variación de un proceso es el resultado de la influencia de cinco factores conocidos como las cinco M (máquina, material, medio, mano de obra, método). Cuando se estudia la variación natural de un proceso, se tiene en cuenta la influencia de todos estos factores. Pero si bien es cierto, también existe otro tipo de variación, denominada variación en las mediciones, en esta última centraremos nuestra atención.

El sistema de medida, que integra el instrumento, el método y el medio en que se efectúa la medición (medición definida como la determinación y resultado de una prueba o ensayo), es la sexta M que influye en el establecimiento del control de un proceso.

Si la precisión de una medida no es satisfactoria, puede tener sobre los datos recogidos un impacto más importante que la dispersión natural del proceso. Es necesario entonces, saber apreciar la dispersión instantánea de la medida, la cual es conocida como repetibilidad y está relacionada con las mediciones de un mismo operario; además cuando se efectúan mediciones a intervalos regulares de tiempo, debe tenerse en cuenta la *reproducibilidad* de la medición entre un operador y otro. A partir de estos dos conceptos se diseñan los estudios R&R; los cuales buscan medir la variabilidad de la medida debida tanto a la repetibilidad como a la reproducibilidad bajo un ambiente de condiciones controladas.

3. DISEÑO EXPERIMENTAL

Un experimento diseñado es una prueba o serie de pruebas en las cuales se inducen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida.

El diseño experimental es una herramienta de importancia crítica en el medio de la ingeniería para mejorar el rendimiento de un proceso de manufactura. También se emplea extensamente en el desarrollo de nuevos procesos. La aplicación de técnicas de diseño experimental en

una fase temprana del desarrollo de un proceso puede dar por resultado:

- a. Mejora en el rendimiento de un proceso.
- b. Menor variabilidad y mayor apego a los requerimientos nominales u objetivo.
- c. Menor tiempo de desarrollo.
- d. Menores costos globales.

Para el caso particular de este trabajo, el resultado que se espera es el que enuncia el numeral b, es decir, con el diseño del experimento se busca obtener una menor variabilidad y mayor apego a los requerimientos nominales u objetivo.

Esta alternativa del diseño experimental es una metodología muy completa y además estructurada ya que comprende una serie de pasos ordenados que guían la marcha de este tipo de estudios de variabilidad debida a la repetibilidad y reproducibilidad de la medida, en otras palabras, los estudios R&R no son más que una de las tantas aplicaciones del diseño experimental, y por tanto así se consideran de aquí en adelante.

4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

La metodología estadística es el único enfoque objetivo para analizar un problema que involucre datos sujetos a errores experimentales. Así que hay dos aspectos en cualquier problema experimental: el diseño del experimento y el análisis estadístico de los datos.

En este trabajo no sólo es interesante el diseño del experimento y el análisis estadístico de los datos, además de eso el mejoramiento continuo cumple un papel importante dentro de éste, a esto se debe que se especifique cada una de las etapas del ciclo PHVA (Planear, Hacer, Verificar y Actuar) a medida que se describen cada uno de los pasos que comprende el diseño experimental.

A continuación se describen cada una de las etapas y su aplicación en el laboratorio de control calidad del Cairo S.A.

4.1 PLANEAR: PASO 1: Planteamiento del problema e identificación de fenómenos y variables aleatorias.

Plantear el problema que se pretende resolver conduce a una visión y comprensión global del estudio a realizar y crea bases sólidas para el logro de su objetivo; por esto es necesario estructurarlo en forma clara. Es necesario entonces, considerar tres elementos básicos, el objetivo de la investigación que indica la finalidad que se pretende alcanzar con el tema a desarrollar, las preguntas de la investigación que son inquietudes que surgen y que buscan ser resueltas posteriormente mediante la solución del problema, y la justificación de la investigación que indica el por qué de su realización.

Finalmente, con estos tres elementos bien definidos se plantea el problema que se pretende resolver en forma conjunta.

Cuando se realiza un diseño experimental, identificar el fenómeno que está presente en el estudio es muy importante. El fenómeno puede ser aleatorio o determinístico.

El fenómeno es determinístico cuando al repetirse el experimento bajo las mismas condiciones se obtiene siempre el mismo resultado.

El fenómeno es aleatorio cuando al repetirse el experimento bajo las mismas condiciones, se obtienen resultados diferentes y su distribución puede ser descrita mediante la teoría de probabilidades. El diseño experimental obedece a fenómenos aleatorios.

Como veremos en la aplicación de este trabajo en las experimentaciones se presentan variaciones en los resultados, esto ocurre debido a que las condiciones cambian de un ensayo a otro. Y aunque estos cambios se presenten irremediamente, es necesario además garantizar el control de todas aquellas condiciones que puedan afectar en una u otra forma el resultado del experimento. Controladas las condiciones, un objetivo importante dentro

de esta metodología es entrar a disminuir dichas variaciones.

Cuando se realizan experimentos o ensayos de laboratorio se presentan factores que tienen algún efecto sobre los resultados y variabilidad del estudio, dichos factores son llamados variables.

Conocer las variables que están presentes en la experimentación implica identificar las variables presentes en el estudio, seleccionar aquellas que son de interés y luego clasificarlas en variables independientes y variable respuesta, variables controlables e incontrolables, variables cuantitativas y cualitativas, y en variables discretas y continuas.

Conocidos en detalle los elementos que componen este paso se pueden identificar las razones que motivaron este estudio en el laboratorio de control calidad en Cementos El Cairo S.A.

Al realizar las pruebas de producto terminado en el laboratorio de control de calidad existen fuentes importantes de variación en los ensayos como son: el método y habilidad de los operarios, el equipo utilizado, el medio ambiente dentro del laboratorio, el material a analizar y las mediciones. De las anteriores se eligió la habilidad del operario, ya que es la fuente de mayor peso de acuerdo a estudios previos realizados por la empresa. Se quiere entonces determinar el efecto de esta variable sobre los resultados de las mediciones de los ensayos, cuando se mantienen controladas las demás fuentes, de este modo no sólo es conocida la variabilidad en los resultados de las mediciones, sino también la confiabilidad en ellas.

Ahora se determina el fenómeno presente en el estudio. El fenómeno es aleatorio ya que cumple las condiciones de multiplicidad, variabilidad y distribución de probabilidad.

Las variables de interés en el estudio son la destreza del operario y finura de cemento, donde la primera es una variable independiente, controlable y cualitativa, y tiene seis niveles: O1,

O2, O3, O4, O5 y O6. La segunda es la variable respuesta, es cuantitativa y continua.

4.2 PLANEAR: PASO 2: Determinación del modelo estadístico

Con el fin de identificar el modelo que se ajusta mejor a las necesidades experimentales, en este caso la variación en las mediciones debida a la repetibilidad y reproducibilidad de la medida, se establece según la información primaria y secundaria recolectada que bajo un ambiente de condiciones controladas, se tiene sólo una variable controlable o factor a considerar.

Por tanto el modelo unifactorial se caracteriza por la presencia de una variable controlable en el experimento y la ausencia de manipulación de variables incontrolables en la toma de datos. Los niveles del factor controlable son elegidos por el investigador, con el fin de bosquejar la variabilidad de los diferentes tratamientos.

El modelo unifactorial de efectos aleatorios desarrollado para las pruebas de producto terminado en el laboratorio considera el factor controlable habilidad del operario y la variable respuesta finura de cemento. Ver la figura 1.

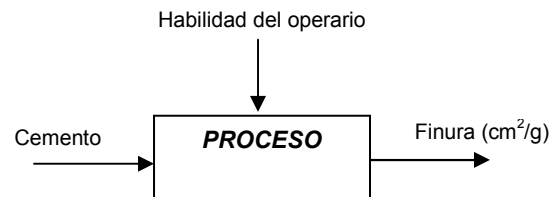


Figura 1. Representación del modelo

Figure 1. The model's representation

Este modelo también puede ser representado mediante la siguiente expresión:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad \text{con } i=1,2,\dots,a \text{ y } j=1,2,\dots,n$$

Donde:

Y_{ij} : Representa la j -ésima réplica correspondiente al i -ésimo nivel de la variable controlable habilidad del operario.

μ : Es la finura media general de la población.

τ_i : Es el efecto del i-ésimo nivel del factor controlable habilidad del operario sobre la variable respuesta finura de cemento.

ε_{ij} : Es el error experimental en los datos.

4.3 PLANEAR: PASO 3: Determinación del tamaño muestral

La selección del tamaño muestral es una decisión importante en el diseño experimental, y consiste en la determinación del número de réplicas que deben hacerse en el estudio. Con la ayuda de las siguientes actividades se determina el tamaño muestral:

Actividad 1: Determinar la probabilidad de error tipo I y tipo II

El investigador definió una confiabilidad del 95% para el estudio, es decir, $\alpha = 0.05$ y una potencia del 90%, es decir, $\beta = 0.1$.

Actividad 2: Determinar la componente de varianza (σ_1^2)

La variabilidad que es importante detectar entre tratamientos se considera igual a la variabilidad dentro de cada tratamiento para efectos de este estudio, por tanto, la desviación estándar que se especifica en la actividad 3 permite estimar la componente de varianza σ_1^2 .

Actividad 3: Determinar desviación estándar de los tratamientos (σ)

Este dato se obtiene a partir del error admitido para la prueba, según la experiencia de los operarios la desviación estándar es aproximadamente de 25 cm²/g.

Actividad 4: Suponer un tamaño muestral inicial (n)

El investigador considera que un tamaño muestral inicial puede ser n = 6.

Actividad 5: Determinar los grados de libertad del numerador (a - 1) y denominador (a(n - 1))

Los grados de libertad del numerador son:

$$a - 1 = 6 - 1 = 5$$

Los grados de libertad del denominador son:

$$a(n - 1) = 6(6 - 1) = 30$$

Actividad 6: Determinar el parámetro λ

La expresión utilizada para hallar el parámetro λ es la siguiente:

$$\lambda = \sqrt{1 + \frac{n\sigma_1^2}{\sigma^2}} = \sqrt{1 + \frac{(6)(625)}{625}} = 2.65$$

Actividad 7: Utilizar la curva característica de operación

Después de buscar la curva característica [Montgomery, 1991] e identificar β con los datos recopilados, se obtiene que el β de la tabla es 0.20, esto quiere decir que para obtener una potencia del 90%, 6 réplicas son insuficientes por cada operario, y es necesario aumentar el tamaño muestral inicialmente propuesto para alcanzar la potencia deseada. Ver tabla 1.

Tabla 1. Cálculo del tamaño muestral según la potencia requerida

Table 1. Calculation of the sample size according to the required power

n_0	λ	$a(n - 1)$	β	$(1 - \beta)$
6	2.65	30	0.20	0.80
7	2.83	36	0.16	0.84
8	3	42	0.08	0.92

Aunque el número mínimo de réplicas requerido para garantizar las condiciones del estudio es 8, se decidió realizar cuatro réplicas más por operario, buscando obtener una mayor potencia, sin que por esta razón se vean aumentados los costos para el experimento

4.4 PLANEAR: PASO 4: Planeación del estudio

La planeación de un estudio R&R es un factor determinante al momento de evaluar la veracidad de los resultados que se obtengan del mismo, es decir, una buena planeación conduce a una buena ejecución del método y garantiza que la variabilidad obtenida con el estudio sea debida a causas aleatorias y no a causas del proceso de

medición que han podido ser controladas previamente.

Dentro de la planeación se encuentra la recolección de información, ésta se obtiene principalmente de las Normas Técnicas Colombianas y por observación directa al método.

Mediante observación directa es posible detectar tendencias o formas de proceder inadecuadas en los operarios que aunque no afectan directamente los resultados, modificarlas puede proporcionar comodidad y agilidad al operario en la ejecución de la prueba, esto es permitido siempre y cuando el método que trae la norma no sufra alteraciones.

Con el estudio de métodos se obtienen mejoras en la calidad de realización de un ensayo. Tales como un ritmo adecuado de trabajo del ejecutante, se eliminan movimientos innecesarios y se incrementa la seguridad en el trabajo. Estos son algunos de los beneficios que trae el hecho de aplicar mejoras a los métodos de trabajo.

A continuación se describe cada una de las condiciones que es necesario verificar antes de la ejecución del estudio:

- Chequeo de las condiciones de mantenimiento, calibración y/o verificación de equipos
- Verificación de implementos utilizados durante la realización de la prueba
- Verificación del método aplicado en la prueba
- Identificación de las unidades experimentales y aleatorización del orden en que se van a realizar las observaciones en el estudio
- Homogenización y almacenamiento de muestras para la ejecución del estudio
- Verificación de las condiciones ambientales del laboratorio.

Al llevar las acciones recomendadas para este paso se identificaron las siguientes situaciones:

Los equipos de esta prueba cumplían con las condiciones requeridas por la norma desde que se hizo el chequeo con lista de verificación, por lo que no quedaron acciones pendientes de ejecutar.

Igualmente, los implementos fueron revisados, el material en que está hecho el émbolo, generó una acción a tomar que quedó pendiente por ejecutar y que no se pudo llevar a cabo antes de dar inicio al estudio R&R.

La verificación del método se hizo sólo a uno de los operarios, con base en él se corrigió el método y se reunió a los demás operarios para que las acogieran como observaciones.

Además del método que trae la norma, existen otros aspectos que también es necesario observar y corregir, éstos son los que tienen que ver con la mejora de procesos; y para esta prueba se propuso lo siguiente:

- La lectura que se hace en el permeabilímetro que consiste en medir el tiempo en que desciende un líquido de una marca a otra en el manómetro en U debe hacerse al nivel de los ojos, como los mesones del laboratorio están a un nivel bajo se recomendó que el operario tomara la lectura sentado.
- La balanza utilizada tiene un error permisible que debe conocerse para hacer una medición más precisa del peso de un material.

Para el proceso de aleatorización se determina el número de observaciones, que en este caso son 72 (6 operadores x 12 réplicas), el paso siguiente es tomar la tabla de números aleatorios, y con una lectura de izquierda a derecha, buscar números de dos cifras (de 01 a 72), sin repetición, hasta obtener los 72 números. Es necesario considerar que el orden en que son encontrados en la tabla, indica el orden en que son analizadas cada una de las muestras por cada operario. Los primeros doce números corresponden al primer operario, los doce siguientes al segundo y así sucesivamente hasta el último operario.

En cuanto a las condiciones ambientales durante la planeación del estudio el aire acondicionado presentaba un buen funcionamiento, manteniendo la temperatura del laboratorio entre 20°C y 27.5°C [Norma Técnica Colombiana NTC 220].

4.5 HACER: PASO 5: Ejecución del estudio

El objetivo que se pretende con la realización de un estudio de repetibilidad y reproducibilidad basado en el diseño experimental es precisamente la posibilidad de repetir un resultado bajo condiciones constantes y reproducirlo variando condiciones preestablecidas. Para lograr esto es necesario crear un panorama de condiciones controladas antes y durante su ejecución.

Como un primer paso en la ejecución del estudio se establece la motivación y orientación que debe brindarse a los operarios participantes, el investigador o persona encargada de realizar el estudio debe esforzarse por exponer bien el mensaje que quiere transmitir, porque de una buena comprensión por parte de los operarios acerca de la importancia de este tipo de estudios depende el compromiso que ellos adquieran.

Como segundo paso es necesario establecer que antes de cada medición el operario tenga los implementos listos y al alcance de la mano y que las condiciones ambientales sean verificadas.

El tercer y último paso es establecer que durante cada medición el investigador debe verificar el método y cada operario registrar el resultado de la medición.

En particular estos tres pasos pueden ser descritos para el laboratorio de la siguiente manera:

El estudio consiste en la realización de la prueba un número repetido de veces, cada operario hace 12 mediciones y por tanto le son entregadas 12 bolsas con la cantidad necesaria de cemento para cada medición de la prueba. Los operarios participantes en este estudio fueron 6 auxiliares.

Cada operario invirtió 3 horas en las 2 semanas de ejecución del estudio. Debido al corto tiempo que requiere cada medición de la prueba y por facilidad en la distribución del tiempo, cada auxiliar define el momento adecuado para realizar las mediciones según el turno en que se encuentre y las actividades rutinarias que le corresponde hacer cada día.

Antes de dar inicio a cada medición de la prueba los operarios colocan en su puesto de trabajo (área física del laboratorio) todos los implementos que va a necesitar durante su ejecución y registran en el formato Registro de resultados y condiciones ambientales, la temperatura de la sala de trabajo y de la muestra de cemento antes de dar inicio a cada una de las mediciones de la prueba.

4.6 HACER: PASO 6: Toma y registro de datos

Este paso hace referencia a algunos documentos y observaciones necesarias para la toma y registro de datos como el formato de registro de resultados que utiliza cada operario durante la ejecución del estudio, el formato contiene el orden de realización de las mediciones, el número de la muestra, la fecha, hora de inicio y finalización, el registro de temperaturas, humedades y el resultado de cada medición.

Una vez realizados los ensayos, los formatos de los operarios fueron recolectados y todos los datos fueron organizados en una tabla de Excel, en la cual se registraron los operarios participantes, las doce mediciones de cada uno y los promedios respectivos, información base que es necesaria para construir la tabla de análisis de varianza.

4.7 VERIFICAR: PASO 7: Validación del modelo estadístico

En este paso se describe la forma de validar el modelo estadístico estableciendo el cumplimiento de tres supuestos fundamentales: Los errores deben tener una distribución normal, deben ser independientes y las varianzas de los tratamientos deben ser iguales. Esta actividad de

validación debe hacerse siempre como un paso previo al análisis de resultados.

El primer supuesto considerado es el de normalidad. Este supuesto siempre se cumple para ensayos de laboratorio, por lo cual no aparece justificado.

El segundo supuesto considerado es la independencia de los errores. A continuación se presenta el gráfico de los residuales obtenidos con el programa estadístico Statgraphics.

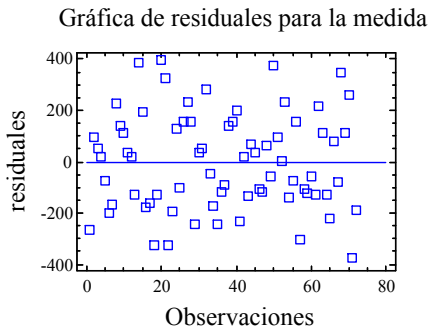


Figura 2. Gráfica de residuales vs observaciones para el estudio 1

Figure 2. Graph of residual vs observations for the study 1

En la figura 2 se observa una nube de puntos que no tienen una tendencia definida, los residuos se encuentran distribuidos en forma aleatoria, esto indica independencia de los residuos y por tanto independencia en las observaciones.

El tercer supuesto es el de igualdad de varianzas. A continuación se muestra el dato arrojado por el Statgraphics para la prueba de Bartlett.

Bartlett's test: 1.11776
p-value = 0.213

Con esta prueba se busca comprobar la siguiente hipótesis:

$$H_0: \sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_6$$

$$H_a: \text{algún } \sigma_i \neq \sigma_j \text{ con } i, j = 1, 2, \dots, 6.$$

El estadístico utilizado es

$$x_0^2 = 2.3026 \frac{q}{c} = 1.12$$

y el estadígrafo es

$x_{\alpha, a-1}^2 = x_{0.05, 5}^2 = 11.07$. Si $x_0^2 \geq x_{\alpha, a-1}^2$ se rechaza la hipótesis nula [2].

Por lo tanto si $1.12 < 11.07$, entonces se acepta la hipótesis nula, es decir, se cumple el supuesto de igualdad de varianzas.

4.8 VERIFICAR: PASO 8: Análisis de los resultados

El análisis de los resultados permite obtener información concreta y de gran utilidad, a partir de la cual se pueden sacar conclusiones del estudio realizado.

La tabla de análisis de varianza y el planteamiento de pruebas de hipótesis actúan como una buena herramienta para la toma de decisiones acerca de la significancia del efecto del factor A sobre la variable respuesta.

El primer paso para elaborar pruebas de hipótesis, es precisamente plantear las hipótesis de interés dentro del estudio. En cada modelo se plantean hipótesis diferentes, para modelos de efectos aleatorios y en particular para el modelo unifactorial, se plantean hipótesis para probar variabilidad entre niveles del factor controlable A. Específicamente, cuando se trata de un estudio R&R como el desarrollado en este trabajo, es interesante analizar la variabilidad existente entre los diferentes operarios y su efecto sobre la variable respuesta.

Después de realizar todos los pasos de la prueba de hipótesis, sólo se llega a una conclusión: se acepta o rechaza la hipótesis nula. Para el primer caso el análisis no se extiende más, pero en caso de rechazarla resulta interesante además de descubrir que existe diferencia significativa entre las varianzas, saber su rango de variabilidad. Para esto se realiza un intervalo de confianza que permita encontrar el porcentaje en que oscila dicha variabilidad.

El uso de gráficos facilita el análisis de la información y la interpretación de los resultados. En la aplicación de este trabajo se utilizan dos tipos de gráficas.

La primera es la grafica de residuales que muestra el comportamiento de la variabilidad en cada uno de los tratamientos de modelo.

La segunda gráfica es el diagrama de caja y bigote que describe al mismo tiempo varias características importantes de un conjunto de datos, tales como el centro, la dispersión, la desviación de la simetría y la identificación de observaciones que se alejan de manera poco usual del resto de los datos. Los diagramas de caja y bigotes son muy útiles al hacer comparaciones gráficas entre niveles del factor por ejemplo, ya que tienen gran impacto visual y son fáciles de comprender [2].

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos del análisis de varianza mediante el Statgraphics para el modelo unifactorial de efectos aleatorios.

Tabla 2. Tabla de análisis de varianza
Table 2. Chart of variance análisis

Fuente de variac.	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados (MS)	F ₀
Factor A	1.52 x 10 ⁶	5	304293	7.99
Error	2.51 x 10 ⁶	66	38075	
Total	4.03 x 10 ⁶	71		

De la tabla 2, el factor A considera mediante el MS_A la variabilidad debida a las mediciones entre operarios y el error considera mediante el MS_E la variabilidad debida a las mediciones de un mismo operario, de estos dos valores es notable que la variabilidad entre tratamientos, es elevada con respecto a la variabilidad dentro de los tratamientos. Una variabilidad tan grande se puede deber a diferencias en el desempeño de cada uno de los operarios, causadas posiblemente por la falta de un programa de capacitación adecuado, una supervisión ineficiente del proceso de medición, entre otras.

Con el intervalo de confianza se concluye que el factor operario con un nivel de confianza del 95% afecta la variabilidad en la medición de la finura del cemento producido.

Se espera que con esta misma confiabilidad, al realizar pruebas de medición bajo las mismas condiciones, la habilidad del operario genere entre el 13% y 80% de la variabilidad de la medición.

En cuanto al análisis de gráficas, la grafica de residuales (ver figura 3) muestra el comportamiento de la variabilidad en cada uno de los operarios, en la cual se observa un intervalo de variabilidad amplio en los operarios B, E y F (2, 5 y 6), además en los mismos operarios se observan un poco dispersos los residuales.

Gráfica de residuales para la medida

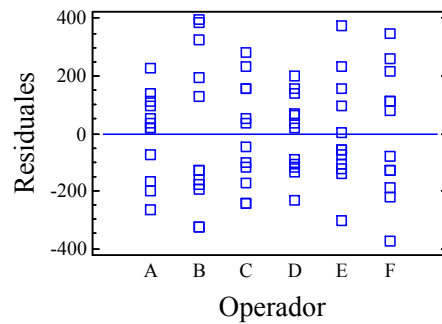


Figura 3. Gráfica de residuales vs operarios para el estudio 1

Figure 3. Graph of residual vs operatives for the study 1

Adicionalmente de la gráfica de residuales, también se considera el diagrama de caja y bigote comparativo que ilustra la figura 4. Este diagrama revela que existe mucha variabilidad en el operario 2 (operario B), ya que tanto la longitud de la caja como la del bigote es muy amplia, además la distribución de la finura es poco simétrica con respecto al valor central debido a que la longitud de ambos rectángulos alrededor de la mediana es muy diferente. Del operario 3 (operario C) se observa un alejamiento de la finura promedio en relación con los demás operarios.

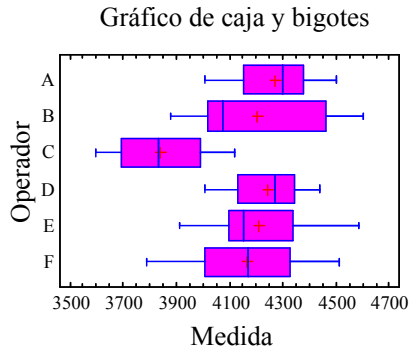


Figura 4. Diagrama caja y bigote comparativo
Figure 4. Diagram box and comparative mustache

Como análisis complementario se presenta la tabla 3. Ésta presenta el rango, el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación, datos arrojados por el paquete estadístico Statgraphics.

Tabla 3. Cuadro resumen para análisis descriptivo con base en los operarios del estudio 1

Table 3. Square summary for descriptive analysis with base in the operatives of the study 1

OPERARIO	Rango	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de variación (%)
1	491	4272.25	147.38	3.45
2	725	4201.67	271.08	6.45
3	525	3838.83	180.67	4.71
4	433	4241.67	134.86	3.18
5	677	4212	184.89	4.39
6	723	4167	219.62	5.27
Total	1004	4155.57	238.37	5.74

4.9 ACTUAR: PASO 9: Documentación y difusión de conclusiones y recomendaciones

La documentación de conclusiones y recomendaciones del estudio en una forma clara y concisa, permite posteriormente una retroalimentación y mejoramiento continuo mediante la ejecución de nuevos estudios. Debido a esto, el documento debe estar bien estructurado.

Los documentos deben tener consignada información relevante, información que realmente sea útil para quien la consulte, debe contener lo siguiente:

- El planteamiento del problema.
- La metodología empleada para su solución.
- Una breve descripción de los pasos seguidos.
- Una exposición de los resultados más destacables.
- Las conclusiones y recomendaciones generales.
- Anexos, en caso de ser necesarios.

Existen muchos métodos de difusión, en forma escrita se pueden utilizar por ejemplo carteles o boletines informativos y en forma oral se pueden programar conferencias, reuniones o exposiciones. Lo importante es resaltar los conceptos y resultados fundamentales del estudio y hacerlo en una forma clara, no es recomendable utilizar terminología muy técnica, al contrario debe elegirse un lenguaje sencillo y que sea comprensible.

El informe final del estudio se presentó de forma resumida, con los aspectos más relevantes. Este fue difundido inicialmente mediante una reunión del encargado del estudio y jefe de área con los operarios participantes, y posteriormente fue ubicado en la cartelera del laboratorio. En el se profundizó en aspectos como las conclusiones y recomendaciones, y la importancia de la realización de una nueva aplicación del método.

4.10 ACTUAR: PASO 10: Ajuste y repetición del ciclo

La realización de un primer estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) basado en el diseño experimental, puede ser una herramienta muy útil, ya que proporciona información sobre el proceso de medición de una prueba, específicamente establece la variabilidad en las mediciones de cada operario y entre operarios. Pero no es suficiente quedarse con un primer acercamiento, los estudios R&R y en general el diseño experimental obedecen a una búsqueda permanente del mejoramiento continuo de un proceso, por esto es importante dejar en forma escrita y de una manera clara los ajustes que surgen del primer estudio como un anexo del informe final, algunos de ellos pueden haber sido mencionados en las recomendaciones del paso

anterior, pero es conveniente dejar constancia de ellos por separado.

Debe anotarse como observación final la programación del próximo estudio, debe quedar definida la fecha de inicio según la frecuencia en que se quiera que se realice. Es recomendable programarlo en un período de tiempo no superior a un año, ya que los ajustes planteados pueden perder vigencia o pueden requerirse otros nuevos.

A continuación se presentan algunas conclusiones generales del primer ciclo, buscando identificar causas potenciales de variabilidad con el fin de realizar los ajustes respectivos:

Entre las situaciones descritas que generaron acciones correctivas y que fueron consideradas contribuyentes a la variabilidad en los resultados se destacan: el material del émbolo, ya que se estaba incumpliendo un requisito de la norma y el uso de lista de verificación para cada medición de la prueba, ya que no se tuvo adecuado control de la variable método. Como estas dos situaciones incumplen políticas adoptadas en el estudio se procedió a programar un segundo ciclo del estudio R&R, al cual se daría inicio después de terminados todos los ajustes correspondientes.

Los ajustes fueron hechos rápidamente, por lo tanto se realizó el segundo estudio.

A continuación se muestran los aspectos más destacables del segundo estudio realizado.

5. ASPECTOS MÁS DESTACABLES

Las condiciones en que fue realizado este segundo estudio fueron iguales al anterior, por lo cual no son presentadas de nuevo.

Después de recolectar los datos de este segundo estudio, se validaron los supuestos del modelo.

Para la validación del modelo, se procedió de igual forma que en el primer estudio y los tres supuestos (normalidad, independencia de los

errores y homogeneidad en varianza) también se cumplieron para este nuevo estudio.

El diagrama de caja y bigote comparativo se ilustra en la figura 5. Este diagrama muestra que la distribución de la finura es simétrica con respecto al valor central promedio debido a que la longitud de ambos rectángulos alrededor de cada mediana es aproximadamente igual en la mayoría de los operarios. Se observa consistencia en los resultados arrojados por los diferentes operarios.

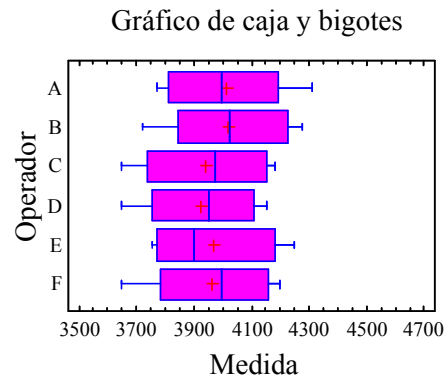


Figura 5. Diagrama de caja y bigote comparativo para el estudio 1

Figure 5. Box diagram and comparative mustache for the study 1

Como análisis complementario se presenta la tabla 4, ésta presenta el rango, el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación, datos arrojados por el paquete estadístico Statgraphics.

Tabla 4. Cuadro resumen para análisis descriptivo con base en los operarios del estudio 2

Table 4. Square summary for descriptive analysis with base in the operatives of the study 2

OPERARIO	Rango	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de variación (%)
1	534	4014.83	210.44	5.24
2	555	4020	214.88	5.34
3	533	3942.08	217.72	5.52
4	502	3925	199.88	5.09
5	489	3969.92	206.83	5.21
6	549	3962.25	216.68	5.47
Total	657	3972.35	206.62	5.20

En la tabla 4 se muestra el promedio obtenido por cada uno de los operarios, no se observa una

tendencia diferente en ninguno de ellos, lo que indica que el método aplicado a las mediciones de la prueba es el mismo en todos los operarios. Con respecto al rango, desviación estándar y coeficiente de variación se percibe una disminución en la variabilidad, de 1004 a 657, de 238.37 a 206.62 y de 5.74 a 5.20 respectivamente en relación a los dos estudios. Aunque la variabilidad disminuyó en forma poco considerable, se logró estabilizar la media con el segundo estudio realizado. Lo que supone mejora tanto del método como de la habilidad de los operarios al realizar los ensayos.

6. CONCLUSIONES

- El proceso de medición no es un proceso que se presente siempre constante, lo que hoy no parece ser una fuente de variación mañana probablemente si lo sea, esto conduce a un tratamiento diferente en cada caso presentado. Por esto es importante aplicar metodologías como el diseño experimental, en el cual puedan ser considerados estos cambios, donde se pueda actuar a medida que éstos se presenten. Los pasos de la metodología que se presentan en este trabajo son genéricos a muchas situaciones que se presentan en los procesos de las empresas, no es sólo aplicable a estudios R&R.
- Cuando esta metodología es aplicada a otros procesos se pueden obtener mejoras en su rendimiento, lo importante es entonces, conocer ampliamente el proceso productivo del cemento y detectar los puntos críticos del mismo, ya que estos dos aspectos constituyen el punto de partida para hacer un buen uso del diseño experimental
- La aplicación de estudios de repetibilidad y reproducibilidad de la medida basados en el diseño experimental permiten estudiar la variabilidad debida al factor operario que está presente en los resultados de los ensayos bajo condiciones controladas del medio ambiente, el método, el material, las máquinas y la medición.
- La variabilidad en las mediciones se analiza a partir del diseño experimental con el modelo de efectos aleatorios, ya que éste permite un análisis con respecto a las varianzas y no a las medias como ocurre con los modelos de efectos fijos.
- Con la utilización de herramientas como el estudio de métodos, se obtienen mejoras en los procesos, ya que observar detalladamente el ritmo del operario y los movimientos que ejecuta puede conducir, mediante algunos cambios sencillos de operación, a una mejor utilización del tiempo y contribuir a la realización de un trabajo más cómodo y seguro para el operador.
- Realizar una primera aplicación del método permite además de estimar la variabilidad presente en las mediciones, identificar acciones correctivas que permitan ajustar el método, en el caso de la prueba de cemento de este trabajo, el cambio de émbolo, la agitación de la muestra y el uso de lista de verificación por cada medición, fueron algunas de las acciones implementadas para dar inicio a una segunda aplicación del método.
- Controlar y estimar variabilidad en un primer estudio, ajustar y de nuevo controlar y estimar para disminuir variabilidad en un segundo estudio, evidencia un mejoramiento continuo en el proceso de medición de una prueba, sin embargo una reducción poco considerable de la variabilidad como la presentada en el segundo estudio, puede indicar la presencia de fuentes de variabilidad que no han sido consideradas en el modelo.
- El compromiso adquirido por los operarios fue el punto de partida para que los dos estudios se realizaran adecuadamente, y para que las políticas adoptadas antes y durante su realización se cumplieran sin que ellos pusieran algún tipo de resistencia.

REFERENCIAS

- [1] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS ICONTEC. Método para determinar la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm de lado. Bogotá, ICONTEC. (Norma Técnica Colombiana NTC 220).

[2] MONTGOMERY, DOUGLAS C. Diseño y análisis de experimentos. Grupo Editorial Iberoamérica: México, 1991, 589p.

[3] URIBE, ANA Y VARGAS, SANDRA. Manual metodológico para el manejo y análisis de datos en experimentaciones realizadas en los laboratorios y centros de investigación de la Facultad de Minas-Universidad Nacional.

Medellín, 2000, 309p. Trabajo Dirigido de Grado (Ingeniería Industrial). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Departamento de Administración y Sistemas.

[4] VACHETTE, JEAN LUC. Mejora continua de la calidad. Ediciones CEAC: Perú, 1992, 307p.