



## **DISEÑO EXPERIMENTAL PARA INGENIEROS CIVILES**

■ Guillermo Bonilla  
Ing. Civil. Facultad de Ingeniería –UCAB  
Correo: gbonilla@ucab.edu.ve

■ Yelitza Sirit  
TSU. Construcción Civil.  
Laboratorio de Materiales – UCAB  
Correo: Ysirit@ucab.edu.ve

La Universidad Católica Andrés Bello con apoyo del Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología, desarrolla en el área de la Ingeniería Civil una Investigación cuyo objetivo es zonificar los métodos para diseño de mezclas de concreto fresco a nivel nacional, utilizando como referencia el método para diseño de mezclas propuesto en el Manual de Concreto Estructural (antiguo Manual de Concreto Fresco).

Al revisar Trabajos Especiales de Grado, previo a la ejecución del Proyecto, así como al contactar profesores y alumnos de diferentes universidades, a lo largo de la geografía nacional; resaltaron dos aspectos: El uso no adecuado de la Metodología de Investigación y, la breve aplicación de herramientas estadísticas. En consecuencia resulta difícil establecer comparaciones entre tan variada información existente.

Bajo este contexto, los responsables de la Investigación que se desarrolla en la UCAB, consideran conveniente exponer de forma sucinta el método aplicado, que pudiera servir de referencia para elaborar proyectos con igual objetivo. También se aprovecha la oportunidad para introducir algunos tópicos relativos al Diseños Experimental, a los que usualmente el estudiante de ingeniería no tiene acceso.

# 1. EL DISEÑO EXPERIMENTAL

## Principios necesarios

La finalidad de los diseños de experimentos es determinar como la variación de un grupo de factores denominados variables, afectan el comportamiento de un sistema que es ensayado bajo condiciones controladas.

Ahora bien, como los experimentos se realizan sobre muestras y no sobre la totalidad de la población que compone un universo, se requiere cumplir con condiciones específicas para asegurar, dentro de un nivel de probabilidad aceptable, que el universo del material en estudio cumplirá con los resultados obtenidos si se mantienen las condiciones establecidas durante la experimentación.

Entonces, desarrollar un experimento exige conocer tópicos relacionados con teorías de Probabilidad y Estadística, en conjunto con otros aspectos que en parte se citan a continuación:

### 1.1. Planificación adecuada

La planificación adecuada obliga a tener conocimiento previo y claro de los objetivos específicos junto a la manera de alcanzarlos; para llevarla a cabo hay que identificar aquellas variables que serán consideradas en la fase experimental.

Así mismo, se debe tener conceptos precisos de lo que será evaluado, métodos específicos a ser utilizados y los recursos, tanto necesarios como los disponibles.

### 1.2. Tres principios básicos

Es imposible llevar a cabo actividades de experimentación sin la presencia de errores; por esta razón resulta imprescindible manejar conceptos básicos como media, desviación, varianza o límites de confianza. Entre otros, de manera de poder estimar y controlar la magnitud del error.

Por otra parte, tres principios básicos son necesarios para limitar dicho error dentro del experimento; éstos son: La ejecución de réplicas, aplicación aleatoria y formación de bloques (Montgomery, 2002).

La ejecución de réplicas (repetibilidad) es la acción de repetir el experimento por un mismo operador bajo condiciones similares; la repetibilidad permite

establecer la varianza del error experimental incrementando la certidumbre del valor encontrado; por lo que es necesario repetir los ensayos para obtener un promedio que represente una cifra cercana al parámetro real del universo en estudio.

No obstante, como se verá posteriormente incrementar sin control el número de repeticiones es poco práctico, innecesario y contraproducente porque además de consumir recursos generará errores de distinta índole. Por esta razón, el número de réplicas deberá ser relativamente pequeño, dependiendo en especial del tipo de ensayo, las características de la muestra a ser ensayada y de la experiencia del laboratorista.

La aplicación aleatoria o aleatorización busca asegurar que cualquier elemento de la población en estudio cuente con igual probabilidad de ser evaluado; de esta manera se procura que determinadas muestras con propiedades similares no estén seleccionadas repetidas veces, lo que generaría sesgo en los resultados.

En realidad la aplicación aleatoria es parte de lo que se puede llamar Manejo de Muestra, que se inicia mediante un Plan de Muestreo que contempla aspectos que van desde el número de muestras, tamaño y método de extracción, hasta transporte y conservación.

La formación de bloques consiste en agrupar las unidades en estudio de manera que su variabilidad dentro de cada grupo sea menor que entre las unidades antes de agruparse (Kuehl, 2001); en otras palabras, al formar bloques se reduce el error experimental porque se homogenizan los elementos a evaluar; esto se entiende mejor con un ejemplo: Suponga que se tiene la siguiente información resultados de ocho ensayos:

1345, 1335, 1354, 1340, 1375, 1358, 1360, 1370

Cuya media ( $\bar{X}$ ) es 1355 la desviación estándar (S) es 14. Si

agrupa los resultados en dos bloques se obtendrá:

<b>Bloque A:</b> 1345, 1335,	1354,	1340	X=1343	S=8
<b>Bloque B:</b> 1375, 1358,	1360,	1370	X=1366	S=8

Observe que la desviación total entre los ocho valores es 14; mientras que al agrupar por bloques, la desviación disminuyó a 8 en cada grupo.

### 3.3. Métodos validados y confiables junto a resultados precisos y exactos.

Para que una investigación experimental tenga carácter científico tiene que sustentarse en métodos que cuenten con validez y confiabilidad. Además los resultados deben asegurar precisión y exactitud.

La validez, en el caso de investigaciones experimentales de Ingeniería Civil, se alcanza desarrollando ensayos conforme a las normas COVENIN, ASTM y AASHTO, entre otras. Pero la confiabilidad está relacionada con un término probabilístico relativo al intervalo que contiene la media " $\mu$ " del universo en estudio, dentro de una probabilidad definida.

La precisión expresa la cercanía entre los resultados de las réplicas de un mismo ensayo y la exactitud indica si efectivamente se está obteniendo el valor debido. En este sentido, un experimento puede ser preciso pero no exacto, lo que significa que presenta sesgo; exacto pero no preciso, entonces tendrá gran dispersión entre los resultados; no preciso ni exacto y preciso y exacto. Entonces, durante la ejecución de los ensayos se debe buscar, dentro de ciertos límites, que el experimento sea preciso y exacto.

La figura N°1 es un ejemplo gráfico de la distinción entre ambos términos; imagine los resultados de seis réplicas de un experimento expresado mediante cuadrados y triángulos, cuya media real  $X$  es el valor  $X_M$ .

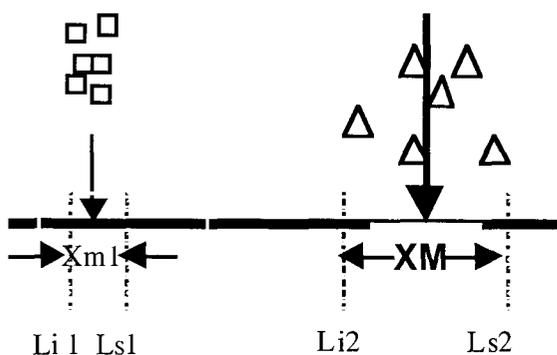


Figura N°1- Precisión y Exactitud

La media obtenida por los ensayos indicados con cuadrados es  $X_{m1}$ ; observe que los resultados de este grupo se ubican dentro de un entorno pequeño delimitado por los límites inferior "Li1" y superior "Ls1 "; sin embargo, el valor de la media  $X_{m1}$  se encuentra alejado del valor real  $X_M$ ; estos resultados son precisos, pero no exactos.

Por su parte, la media del grupo representado por los triángulos, coincide con el valor real  $X_M$ , pero los resultados de cada ensayo se ubican dentro de un intervalo de mayor amplitud que está definido por los límites  $Li2$  y  $Ls2$ . Estos resultados son exactos pero poco precisos.

La precisión se incrementa con las réplicas; de hecho, es proporcional a la raíz cuadrada del número de repeticiones y sigue una curva como la que se muestra en la figura N° 2.

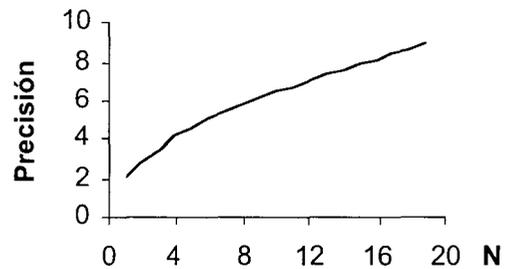


Figura N°2- Influencia de réplicas en la precisión

En consecuencia desde el punto de vista estadístico sería recomendable incrementar los ensayos a un número alto de veces; pero razones de tipo práctico limitan esta realidad a un máximo que varía según el experimento, obligando a manejarse dentro de intervalos de confianza.

#### 1.4. La media $\bar{X}$ y la desviación $S$ no son suficientes

La media " $\bar{X}$ " es considerada el valor más representativo cuando se concentra la data de los resultados de ensayos; no obstante, la media por si sola es un valor que transmite poca información; por esta razón se completa con otros elementos como la desviación estándar " $S$ " que es una medida de la amplitud de la curva de distribución de los datos; al cuadrado de la desviación estándar se le conoce como varianza " $S^2$ ".

Por otra parte, también es necesario hacer uso del error estándar  $\sigma$  de la media EEM, representado por el valor  $S/\sqrt{N}$ , siendo  $N$  el número de datos Empleados para la obtención de la media.

### 3.5. Límites de Confianza

Si se pudiera evaluar la totalidad de los elementos que conforman una población, se obtendría el estimador exacto de la Media "R" de ese universo; pero en vista que lo anterior es imposible, es necesario recurrir a valores que delimiten el intervalo donde se encuentra  $\mu$  con una probabilidad determinada; estos extremos, se conocen como Límites de Confianza.

Dicho de otra forma los Límites de Confianza

muestra ;  $\bar{X}$ , donde se ubica  $\mu$ ; dicho intervalo se define mediante la siguiente expresión:

establecen un intervalo alrededor de la media de las

$$\bar{X} - \mathfrak{R} \times \frac{S}{\sqrt{N}} < \mu < \bar{X} + \mathfrak{R} \times \frac{S}{\sqrt{N}}$$

Siendo  $\mathfrak{R}$

un factor que depende de la función de probabilidad a la cual se adapta la distribución en estudio; a nivel práctico se obtiene mediante tablas que dependen del número de ensayos "N" y el nivel de confianza deseado. Ver La tabla N°1

Deteniéndose en la expresión anterior, destaca que la amplitud del intervalo de confianza se incrementa al aumentar la desviación "S" o el factor  $\mathfrak{R}$  y decrece con el aumento de N.

Las funciones de probabilidad son curvas continuas que responden al comportamiento de variables aleatorias; de hecho existen curvas específicas para cada problema y se puede dar el caso de que varios estudios de índole diferente, respondan a la misma función de probabilidad (Centeno, 1982). Sin embargo, los ensayos relativos a concretos y materiales cumplen con la Curva Normal (Porrero, Ramos, Grases y Velazco, 1992).

Sobre esto, hay que considerar que la Curva Normal, es aplicable cuando el número de datos es mayor que 30; de lo contrario la t de Student resulta apropiada. En la tabla N°1 se aprecian los valores correspondientes a esta función para 3, 4, 6 y 10 repeticiones, con nivel de confianza de 90% y 95%.

N	3	4	6	10
90%	4.3027	3.1825	2.5706	2.2622
95%	6.2053	4.1765	3.1634	2.6850

Tabla N°1- Valores de  $\mathfrak{R}$  para confiabilidad de 90% y 95% con  $N < 30$

Es de notar que a medida que aumenta la confiabilidad también se amplía el intervalo de confianza, lo que es fácil de observar en la misma

tabla N°1, donde el valor  $\mathfrak{R}$  aumenta al pasar el nivel de confianza del 90% a 95%.

### 1.6. Conozca las variables en estudio

Conocer las variables en estudio exige determinar con antelación los elementos dependientes e independientes, junto a la posible relación entre ellos; por otra parte, requiere definir aquellos valores a mantener constante.

Cada variable dependiente agregará más esfuerzo de ensayos y relaciones a ser analizadas que no necesariamente mejoran el aspecto científico. Por esta razón en se presentan casos donde conviene mantener algunos parámetros constantes.

### 1.7. Verificación de recursos

Toda Investigación consume recursos de distintas índole que se transforma en tiempo y dinero; usualmente se cuenta con laboratorios de las instalaciones universitarias, pero eventualmente se necesitará materiales y suministros menores que disponer.

Los recursos son limitados, por lo que pueden limitar el alcance de la investigación, una verificación previa de recursos determinará lo que se puede hacer y obligará a establecer criterios de prioridad.

## 2. APLICACIÓN

### Caso: Regionalización de coeficientes para diseño de mezclas de concreto

Para ilustrar lo expuesto, a continuación se exponen los criterios que rigen el proyecto en estudio; por razones didácticas se ofrecen sólo aspectos básicos, por lo que la investigación que se ejecuta en la UCAB incluye elementos no considerados en este material.

#### 2.1. Objetivo general

Regionalizar el método del Manual de Concreto Fresco.

## 2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los agregados gruesos en zonas en estudio
- Caracterizar los agregados finos en zona en estudio
- Desarrollar validando estadísticamente los coeficientes de diseño de mezclas regionalizados para las zonas en estudio.

## 2.3. Variables dependientes

Asentamiento "S" evaluado mediante Cono de Abrams.

Resistencia "Rcc" a los 28 días de cilindros normalizados.

## 2.4. Variables independientes

Relación agua/cemento " $\alpha$ "

Tipo de agregado

Cantidad de cemento

Tiempo de ensayo (28 días)

## 2.5. Elementos a mantener constante

Marca de cemento

Tipo de cemento

Tamaño máximo del agregado grueso

Rango de Granulometría de agregados

Combinados ([3])

## 2.6. Relación entre variables

La relación agua/cemento "a" y la resistencia a compresión a una edad "t" días, está regida según la Ley de Abrams y tiene una expresión del tipo:

$$R_t = \frac{M}{N^\alpha}$$

Donde: R representa la resistencia media esperada a los t días; M y N son constantes que dependen de los agregados componentes de las mezclas y la edad del ensayo.

El asentamiento "S", la relación agua/ cemento "a" y la dosis de cemento "C" están gobernados por la Ley Triangular:

$$C = \frac{K * S^n}{\alpha^m}$$

donde: C se expresa en Kg/mt<sup>3</sup> y K, m, n son constantes dependientes de los agregados

## 2.7. Criterios de validación

Los ensayos a ejecutar están normalizados y se indican en la tabla siguiente:

Agregados Gruesos

ENSAYO	COVENIN
Granulometría	255
P. específico y absorción	268
P. U. Suelto y compacto	263
Desgaste de los Ángeles	267
Cociente dimensión máx/mín.	264
<u>Contenido de humedad total</u>	1357

Agregados Finos

ENSAYO	COVENIN
Granulometría	255
P. específico y absorción	268
P. U. Suelto y compacto	263
Determinación de Impurezas	256
<u>Contenido de humedad total</u>	1357

Además

ENSAYO	COVENIN
Muestreo de agregados	
Elaboración de probetas cilíndricas	340
Asentamiento mediante Cono de Abrams	339
Diseños de mezclas en laboratorio	354

## 2.8. Criterios estadísticos

Se estableció que debido a que se efectúan menos de 30 ensayos por muestra, el estadístico a utilizar es la t de Student, para un nivel de confiabilidad del 95%.

Las varianzas se evalúan mediante el Test de Barlett (Valcárcel-Ríos, 1982) y la verificación de extremos mediante Test de Q de Dixon (Centeno 1982).

**2.9. Réplicas por muestra**

## Agregados Gruesos

ENSAYO	N
Granulometría	3
P. específico y absorción	3
P. U. Suelto y compacto	6
Desgaste de los Ángeles	0
Cociente dimensión máx/mín.	6
Contenido de humedad total	6

## Agregados Finos

ENSAYO	N
Granulometría	3
P. específico y absorción	3
P. U. Suelto y compacto	6
Determinación de Impurezas	2
Contenido de humedad total	6

Además, para ejecución de cilindros

ENSAYO	N
Elaboración de probetas cilíndricas	3
Asentamiento mediante Cono de Abrams	0

**3. PARA FINALIZAR**

Cuando se condensa mucha información en pocas líneas resulta imposible profundizar en tantos aspectos importantes; en este sentido, los autores recuerdan que la intención del artículo fue ofrecer un marco referencia) para desarrollar Trabajos Especiales de Grado en el área de Ingeniería Civil; por lo que invitan a los interesados a comunicar vía correo electrónico sus dudas o sugerencias.

Además, aprovechan la oportunidad para agradecer a los Ingenieros Roberto Centeno, Gilberto Velazco, Mario Paparoni y Diego Calvo, asesores del Proyecto; por el tiempo dispuesto para que aprendamos el arte de llevar a cabo experimentos.

Centeno, Roberto. Inspección y Control de obras. Ed. Vega. Año 1979

Kuehl, R. Diseño de Experimentos. Ed. Thomson Learning. Año 2000

Montgomery Douglas. Diseño y Análisis de Experimentos. Ed. Limusa Wiley. Año 2002

Normas: Comisión de Normas Venezolanas. COVENIN.

Porrero Joaquín; Ramos Carlos; Grases José; Velazco, Gilberto. Manual de Concreto Fresco. Editorial Sidetur. Año 1995

Valcárcel, M; Ríos, A.. La Calidad en los laboratorios Analíticos. ED. Editorial Reverté S.A. Año 1992