

DISEÑO FACTORIAL APLICADO A UN EXPERIMENTO DE MAQUINADO

Luis SARACHE
Escuela de Ingeniería Mecánica
Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela

RESUMEN

Se determina como o en que medida afectan el acabado superficial de piezas planeadas con limadura: la velocidad, avance y profundidad de corte, se utiliza la técnica estadística del diseño factorial como elemento básico en la evaluación de los efectos individuales y de interacción entre las variables. Se obtienen las condiciones que se consideran significativas y que afectan directamente el acabado superficial de la pieza, lográndose de ésta manera controlar y optimizar las condiciones del corte.

ABSTRACT

Factorial design applied to a shaper test. This paper presents an optimizing method to set the working conditions of a shaper.

Using the Factorial Design Method, it has been posible to determine the influence of the working variables on the surface finish or rugosity of the work piece; these variables can be studied one, two or three at a time.

As a result, it has been possible to obtain the ranges where the cutting variables significantly affect surface finish.

INTRODUCCION

En los procesos de manufactura de las plantas industriales dedicadas al maquinado de piezas las operaciones deben satisfacer ciertas condiciones, a fin de obtener una producción eficiente, se debe conocer el comportamiento de la máquina herramienta con el objeto de que realice su trabajo garantizando un acabado superficial acorde con las especificaciones del diseño. Para lograr esto se hace un estudio que consiste en un diseño experimental que considera las características de los ensayos. El análisis e interpretación de los resultados se hace desde el punto de vista estadístico aplicando el diseño factorial.

Con el auxilio de esta técnica estadística experimental se analiza el efecto individual de una variable y/o el efecto cruzado de interacción de dos o mas variables en el proceso.

Como resultado de la aplicación de este experimento sobre el planado de una superficie con una limadura se concluye que: el efecto individual del

avance resulta ser altamente significativo sobre la velocidad y profundidad de corte, la interacción de velocidad y avance tiene importancia colectiva sobre el acabado superficial dado a la pieza.

PROCEDIMIENTO

Este experimento estudiará el acabado superficial de una pieza maquinada con una limadura, analizando el efecto de tres factores o variable de importancia <1>: velocidad, avance y profundidad de corte.

Primero se plantea la necesidad de indentificar los niveles de variación de cada factor o variable, es decir, delimitar la capacidad de trabajo dada por la máquina herramienta. Para la velocidad dispone del siguiente rango: 20, 28, 40, 56, 80 y 112 golpes/min.; para el avance 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1.0 mm/golpe; la profundidad de corte puede ser variada a voluntad. Al diseñar el experimento se optó por dos valores para cada variable, la velocidad con un nivel bajo de 20 y uno alto de 40 Gpmin <2>, el avance con 0.2 y 0.6 mmpg. En este caso se abarca toda la gama de posibilidad de operación de la máquina; la profundidad se fija siguiendo la pauta dada por el avance de forma tal de trabajar con secciones de viruta cuadrada, para ello el nivel bajo será de 0.2 mm y el alto 0.6 mm. Llamando K los factores o variables y por L los niveles se tiene un diseño factorial: $L^K = 2^3$; donde las variables son tres y cada variable posee dos niveles <3>, tabla 1.

TABLA 1.-VARIABLES Y NIVELES DEL DISEÑO FACTORIAL

Variable	Nivel bajo	Nivel alto
Velocidad de corte (v) Gpmin	20	40
Avance de corte (a) mmpg	0,2	0,6
Profundidad de corte(p)mm	0,2	0,6

Para simplificar se introducen variables llamadas codificadas que indican los niveles bajo y alto (-1) y (+1) respectivamente o simplemente por (-) y (+). Se sustituye V, a y p por X_1 , X_2 y X_3 y se tienen las siguientes relaciones.

$$x_1 = \frac{v - \bar{v}}{\Delta v/2} = \frac{v-30}{10} ; \quad x_2 = \frac{a - \bar{a}}{\Delta a/2} = \frac{a-0,4}{0,2} ; \quad x_3 = \frac{p - \bar{p}}{\Delta p/2} = \frac{p-0,4}{0,2} \quad (1)$$

EJEMPLO:

$$x_1 = \frac{20 - 30}{10} = -1 \text{ (NIVEL BAJO)}$$

A través de esta transformación o estandarización, cada variable posee rangos que cubren dos unidades de longitud, de -1 a +1 con ocho condiciones de prueba que representan las ocho esquinas de un cubo, las cuales pueden apreciar como el orden estandar que aparece en la tabla 2 y que a la vez incluyen los resultados de tres corridas experimentales hechas al azar.

TABLA 2.-CONDICIONES EXPERIMENTALES Y RESULTADOS OBTENIDOS EN EL DISEÑO FACTORIAL 2^3

Orden estandar	Variables codificadas			Variables reales			Resultados Re, μm			Valor Promedio
	x_1	x_2	x_3	v (G/min)	a (mmHg)	p (mm)	Ensayo N°			$\bar{v}_i$
1	-	-	-	20	0,2	0,2	2,3	2,0	2,0	2,1
2	+	-	-	40	0,2	0,2	3,5	4,2	2,5	3,5
3	-	+	-	20	0,6	0,2	7,5	7,0	6,8	7,1
4	+	+	-	40	0,6	0,2	7,3	7,5	7,1	7,3
5	-	-	+	20	0,2	0,6	2,1	2,5	1,4	2,0
6	+	-	+	40	0,2	0,6	4,7	4,4	4,1	4,4
7	-	+	+	20	0,6	0,6	8,4	8,0	8,2	8,2
8	+	+	+	40	0,6	0,6	4,9	4,6	4,9	4,8

El orden estandar de las condiciones experimentales para cada una de las esquinas del cubo mostrado en la figura 1 es designado por un número encerrado en un círculo; además, se aprecia un número cercano a cada una de las esquinas que corresponde al valor promedio de los resultados.

EFECTOS PRINCIPALES

Para determinar el efecto principal de una variable sobre una respuesta la comparación individual puede ser hecha de cuatro combinaciones de otras dos variables como lo muestra la tabla 3, según como establece este tipo de estudio <4>, el efecto de la velocidad de corte, $E(X_1)$ es estimada por el promedio de las diferencias de cuatro comparaciones individuales.

$$E(X_1) = \frac{1}{4} \{ (\bar{Y}_2 - \bar{Y}_1) + (\bar{Y}_4 - \bar{Y}_3) + (\bar{Y}_6 - \bar{Y}_5) + (\bar{Y}_8 - \bar{Y}_7) \} \quad (2)$$

El promedio del efecto principal de la velocidad de corte, aplicando la ecuación 1, da:

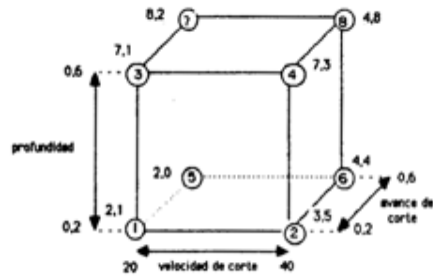


FIG. 1.- REPRESENTACION GEOMETRICA DEL DISEÑO EXPERIMENTAL Y DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

TABLA 3.-COMPARACION INDIVIDUAL DEL EFECTO PRINCIPAL DE LA VELOCIDAD DE CORTE.

Comparación individual de los resultados $R_a \mu m$	a mm/g	p mm
$(\bar{Y}_2 - \bar{Y}_1) = (3.5 - 2.1) =$	1.4	0.2
$(\bar{Y}_4 - \bar{Y}_3) = (7.3 - 7.1) =$	0.4	0.6
$(\bar{Y}_6 - \bar{Y}_5) = (4.4 - 2.0) =$	2.4	0.2
$(\bar{Y}_8 - \bar{Y}_7) = (4.8 - 8.2) =$	-3.4	0.6

$$E(X_1) = \frac{1}{4} \{ (1.4 + 0.2 + 2.4 - 3.4) \} = 0.15 \mu m$$

Si los datos obtenidos experimentalmente son sustituidos en la ecuación 2 se obtiene el mismo valor del efecto estimado para la variable X_1 .

En general, los efectos principales de una variable X_1 pueden ser estimados por:

$$V(X_1) = \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N (+ \text{Columna de } X_1) \cdot (\bar{Y}_j) \quad (3)$$

$$E(X_2) = \frac{1}{4} (-\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3 + \bar{Y}_4 - \bar{Y}_5 - \bar{Y}_6 + \bar{Y}_7 + \bar{Y}_8) = 3.85 \mu m \quad (4)$$

$$E(X_3) = \frac{1}{4} (-\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2 - \bar{Y}_3 - \bar{Y}_4 + \bar{Y}_5 + \bar{Y}_6 + \bar{Y}_7 + \bar{Y}_8) = -0.15 \mu m \quad (5)$$

INTERACCION DE EFECTOS PRINCIPALES

Cuando el estudio se efectúa por el método de una variable las demás se mantienen constantes. El diseño factorial proporciona una indicación sea o no que las otras variables actúen. El efecto de interacción de dos factores individuales puede ser analizado utilizando diagramas de dos vías, Figura 2,

se apreciaba: ¿cómo o en qué medida la velocidad de corte y el avance actúan sobre el acabado superficial?; los valores de las cuatro esquinas son los promedios de dos pruebas.



FIG 2 - REPRESENTACION DE DOS FACTORES DE INTERACCION ENTRE LA VELOCIDAD Y EL AVANCE DE CORTE.

La notación $E(X_1 X_3)$ representa el estimado de la interacción de $X_1 X_3$

$E = \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N$ (+ La columna de interacción de elementos. $(\bar{Y}_j)$); de lo cual resulta:

$$E(X_1 X_3) = \frac{1}{4} (\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3 - \bar{Y}_4 - \bar{Y}_5 + \bar{Y}_6 - \bar{Y}_7 + \bar{Y}_8) = - 0.65 \text{ } \mu\text{m} \quad (6)$$

$$E(X_1 X_2) = \frac{1}{4} (\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2 - \bar{Y}_3 + \bar{Y}_4 + \bar{Y}_5 - \bar{Y}_6 - \bar{Y}_7 + \bar{Y}_8) = - 1.75 \text{ } \mu\text{m} \quad (7)$$

$$E(X_2 X_3) = \frac{1}{4} (\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 - \bar{Y}_3 - \bar{Y}_4 - \bar{Y}_5 - \bar{Y}_6 + \bar{Y}_7 + \bar{Y}_8) = - 0.55 \text{ } \mu\text{m} \quad (8)$$

De estas ecuaciones se obtiene la tabla 4 de matriz de diseño factorial, omitiendo la interacción de las 3 variables:

$$E(X_1 X_2 X_3) = \frac{1}{4} (-\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3 - \bar{Y}_4 + \bar{Y}_5 - \bar{Y}_6 - \bar{Y}_7 + \bar{Y}_8) = - 1.15 \text{ } \mu\text{m} \quad (9)$$

Como resultado de lo obtenido en cada uno de los valores de las ecuaciones anteriores se establece la tabla 5 para calcular el error experimental de las 8 pruebas.

TABLA 4.-GENERACION DE LAS COLUMNAS DE INTERACCION DE LA MATRIZ DEL DISEÑO FACTORIAL.

Efectos principales			Efectos de interacción				Promedio
x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	$\bar{y}_i$
-	-	-	+	+	+	-	y_1
+	-	-	-	-	+	+	y_2
-	+	-	-	+	-	+	y_3
+	+	-	+	-	-	-	y_4
-	-	+	+	-	-	+	y_5
+	-	+	-	+	-	-	y_6
-	+	+	-	-	+	-	y_7
+	+	+	+	+	+	+	y_8

TABLA 5.-CALCULO DE LOS VALORES PARA OBTENER LA VARIANZA Y EL ERROR.

y_i	$\sum y_i^2$	$(\sum y_i)^2 / A$	s_i^2	v_i
2,1	13,29	39,69	0,06	2
3,5	38,33	110,25	1,58	2
7,1	151,49	453,69	0,26	2
7,3	159,95	479,61	0,08	2
2,0	12,62	36,00	0,62	2
4,4	58,26	174,24	0,18	2
8,2	201,80	605,16	0,08	2
4,8	69,18	207,36	0,06	2

El error experimental se calcula <5> de la fórmula de la desviación y error estandard:

$$s^2 = \frac{v_1 \cdot s_1^2 + v_2 \cdot s_2^2 + \dots + v_g \cdot s_g^2}{v_1 + v_2 + v_3 + \dots + v_g} = 0.365 \quad (10)$$

g: representa el número de experimentos y V el grado de libertad, si son tres corridas el grado de libertad será: $V = 3 - 1 = 2$, el error estandard se calcula de la fórmula siguiente:

$$s' = s^2 ; \quad s' = 0.365 = 0.6042 \quad (11)$$

Los efectos principales y la interacción de dos efectos serán significativos si y sólo si el valor obtenido por ellos es mayor que dos veces el error estandard, siendo significativo por el hecho de tener una probabilidad de ocurrencia muy baja y sin embargo ocurre durante el experimento.

Se concluye que solamente existen dos factores que inciden significativamente en el acabado superficial ya que sus valores sobrepasan los valores obtenidos por el error y son mayores que dos veces éstos como lo demostramos a continuación.

$$E(a) > 2.S' \quad 3.83 > 1.2084 \mu m$$

$$E(v.a) > 2.S' \quad -1.75 > 1.2084 \mu m$$

CONCLUSIONES

En la tabla 6 se aprecia que existen dos condiciones cuyos efectos son

TABLA 6.-EFECTOS ESTIMADOS DEL DISEÑO FACTORIAL 2^3
Y SUS CORRESPONDIENTES ERRORES ESTÁNDAR.

Efectos principales	Efecto + - error
Velocidad,(v),G/min.	0,15 + - 0,6042 μm
Avance,(a), mm/g.	3,85 + - 0,6042 μm
Profundidad,(p),mm.	-0,15 + - 0,6042 μm
Interacción de dos factores	
v a	-1,75 + - 0,6042 μm
v p	-0,65 + - 0,6042 μm
a p	-0,55 + - 0,6042 μm
Interacción de tres factores	
v a p	-1,15 + - 0,6042 μm

significativos: principal del avance (a) e interacción entre velocidad y el avance (va). Considerando solamente el avance se observa que existe una relación directa con la calidad de la superficie, se confirma <6> así, que sea cual sea el medio de lubricación el avance ejerce siempre una acción que se traduce en la formación de las micro-irregularidades superficiales.

La interacción velocidad y avance de corte es claramente otro indicativo de que el efecto de profundidad en el acabado superficial no representa un factor determinante, asegura sin embargo que la velocidad en forma aislada no debe ser interpretada como agente formador de irregularidades superficiales. La velocidad asociada con el avance ratifica <7> el atribuir a la velocidad un efecto modificador de las micro-irregularidades superficiales, tanto en la pieza como en la herramienta.

REFERENCIAS

- <1> BOOTHROYD, G., "Fundamentos del Corte de Metales y de las Máquinas, Herramientas", Mc Graw Hill, USA. pag 127-143 (1976)

- <2> SARACHE, L. "Influencia de Tres Variables en el Corte de Metal con Limadora", Universidad de Los Andes, Mérida (1981)
- <3> WANG, K.K. "Investigation of Manufacturing Processes By Statistical Experimental Desing Techniques", Technical paper, pp. 1-13 (1980)
- <4> BOX, P.E., HUNTER, W.G. and HUNTER, J.S. John Wiley, New York, pag 307 (1978)
- <5> HINES, W.W. and MONTGOMERY Douglas, C. "Probability and statistics in Engineering and management, Science", John Wiley, pag 209 (1980)
- <6> ARSHINOV, V. and ALEKSEEV, G. "Metal Cutting Theory and Cutting Tool Design", Mir Publishers, Moscow, pag 75-87 (1979)
- <7> TRENT, E.M. "Tool Wear and Machanibility, The Production Engineer", Londres, Voi 38, N° 3 Pag. 105 (1959)