

# Estudio Multifactorial del Consumo de Energía Eléctrica y el Acabado Superficial de un Acero 1020 en una Limadora

## Multifactor Study of the Electrical Consumption and the Surface Finish on a 1020 Steel Normson a Milling Machine

Chacón, Rubén\*<sup>1</sup>; Díaz, Miguel<sup>1</sup>; Andueza, Luis<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Grupo DIMMA  
Mérida 5101, Venezuela

<sup>2</sup>Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Arquitectura y Diseño, Escuela de Diseño  
Santiago7500514, Chile

[\\*rdchacon@ula.ve](mailto:*rdchacon@ula.ve)

### Resumen

*Este trabajo hace una evaluación y análisis multifactorial sobre el acabado superficial en un proceso de fresado en el mecanizado de un acero ASTM A36 utilizando un Diseño Experimental Factorial, se consideran las variables profundidad de corte, velocidad de avance y el uso o no de Fluido de Corte. Los valores de los resultados se obtuvieron a por medio de una tarjeta de adquisición de datos y los cálculos sobre significancia se efectuaron utilizando el software SEMPRO II que permite el análisis multifactorial, la superficie de respuesta y la ecuación de las variables. Se concluye y verifica que el avance de mesa en interacción con las otras variables, en el caso de lubricante disminuye hasta 6, 25  $\mu\text{m}$  y para la profundidad logra disminuir a 6,62  $\mu\text{m}$ , que concuerda con experimentos anteriores pero logra mediante esta nueva metodología reducir los esfuerzos, tiempos y costos de experimentación.*

**Palabras clave:** Manufactura, Corte de Material, Diseño Factorial, Análisis Multifactorial, Evaluación de Acabado Superficial.

### Abstract

*This paper makes an assessment and multi factor analysis on the surface finish in a milling process of machining steel ASTM A36 using a factor experimental design, variables considered are: cutting depth, feed rate and the use or not of Cutting Fluid. The values of the data acquisition card and significance calculations were performed with the use of the software SEMPRO II that allows a multivariate analysis, the response surface and the equation of the variable. It is concluded and verified that the feed table in interaction with the other variables, in the case of lubricant decreases up to 6, 25  $\mu\text{m}$  and for the depth achieves a 6.62  $\mu\text{m}$ , consistent with previous experiments but achieves by this new methodology to reduce the effort, time and cost of experimentation.*

**Keywords:** Manufacturing, Material Cut, Factor Design, Multi factor Analysis, Surface Finish Evaluation.

### 1 Introducción

Este trabajo hace una evaluación y análisis multifactorial sobre el acabado superficial en un proceso de fresado en el mecanizado de un acero ASTM A36, utilizando un Diseño Experimental Factorial Básico (DFB). También se realiza el desarrollo de una nueva

metodología de acción experimental que utiliza el Programa Sistema para Evaluar Multifactorialmente Procesos, Productos y Organizaciones (SEMPRO) Versión 2 (Sarache y col., 2004); en esta metodología se consideran las variables profundidad de corte, velocidad de avance y el uso o no de Fluido de Corte. En esta primera fase se pretende

obtener información tal como lo plantea (Cheng 2004) y contrastarla con otras a fin de darle validez a los resultados experimentales. El fresado es un proceso de mecanizado que está constituido por una herramienta llamada fresa con aristas cortantes dispuestas simétricamente alrededor de un eje. La pieza sobre la cual se hará el trabajo es fijada a una mesa que controla el operario; el movimiento de la pieza va vinculado al movimiento rotativo de la fresa, las virutas tienen un espesor variable. Se realizó un análisis multifactorial sobre las variables de la operación de planeado en la fresadora que mayor influencia ejercen en el acabado superficial del acero al carbono ASTM A36. Se evaluó la textura superficial o rugosidad de la superficie, la cual está influenciada por muchos factores de los cuales se evaluarán: Velocidad de corte, según (Krar y col., 2002) se determina por su velocidad periférica o superficial. El movimiento de la pieza con respecto a la fresa no interviene en este cálculo. La velocidad de corte puede expresarse por la siguiente ecuación:

$$V.C = \frac{\pi.D.N}{1000} \rightarrow N = \frac{1000.V.C}{\pi.D} \quad (1)$$

Donde: V.C: Velocidad de Corte. D: Diámetro del cortador y N: rpm., para la velocidad de corte se considera: el tipo de material que se va a trabajar, material de la fresa, el acabado superficial requerido, profundidad de corte, rigidez de la máquina y montaje de la pieza.

Velocidad de avance, según (Tandon y col., 2003) es aquella en la cual la herramienta y la pieza se desplazan una con respecto a la otra, de modo que se arranque una nueva porción de metal con la herramienta por cada diente y en cada revolución, y (Casillas 1982) define los avances como: en concordancia y oposición. En el primero, el esfuerzo de arranque va creciendo desde cero hasta su valor máximo hacia el final del trabajo, y se anula bruscamente cuando el diente abandona la pieza. Esta forma de trabajar perjudica la fresa, porque el frotamiento entre el diente y la pieza endurece el material y el aumento de temperatura en el filo reduce su vida. En el segundo, se realiza el corte en forma más racional, pues el diente incide repentinamente sobre el metal e inicia el corte sin deslizarse sobre la pieza; en consecuencia se facilita el arranque de la viruta, y se obtiene un mejor acabado superficial, condición ésta sumida para la experimentación. La velocidad de avance se calcula mediante:

$$S_m = S_z \cdot Z \cdot N \quad (2)$$

$$S_v = S_z \cdot Z \rightarrow S_z = \frac{S_v}{Z} \quad (3)$$

Donde:  $S_z$ : Avance por diente, Z: Número de dientes y  $S_v$ : Avance por vuelta, el cual está tabulado en (Casillas 1982).

El material que se corta según (Krar y col., 2002)

define la dureza Brinell de un material como la guía excelente para facilitar el mecanizado, para la duración del corte se establece que deben usarse las menores velocidades de corte, igualmente para la profundidad de corte, se cree que para obtener un acabado superficial bajo o ligero se debe trabajar con un valor por lo menos 0.4 mm. Si se escogen cortes más ligeros y avances excesivamente finos la viruta producida será muy delgada y la fresa rozará la superficie mas no la penetrará. Para un acabado fino se debe reducir el avance en lugar de incrementar la velocidad de la fresa. Refrigerante, según (Krar y col., 2002), las altas velocidades de corte generan calor que debe disiparse para proteger tanto a la herramienta como al material. Por lo que ambos deben ser roseados con un líquido refrigerante como aceite soluble, azufrado o mineral, en este caso mineral, este trabajo experimental genera valores que concuerda con experimentos anteriores pero logra mediante esta nueva metodología reducir los esfuerzos, tiempos y costos de experimentación y resultados válidos.

## 2 Fase Pre-Experimental

El experimento se realizó utilizando como herramienta computacional el Programa (SEMPRO 2) para el manejo de los datos y cálculos sobre la base de todas las mediciones para el análisis; se utilizaron barras de acero al carbono ASTM A36 con dimensiones de 2.5 cm. X 2.5 cm. X 9 cm. las cuales fueron mecanizadas tal y como vienen del proceso de fabricación, sin proceso previo; con una Fresa Frontal de seis dientes de diámetro 80 mm, de Carburo de Tungsteno; La fresadora está ubicada en el Laboratorio de Tecnología de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes, marca JafJarocin. Para medir rugosidad de las piezas mecanizadas se utilizó un rugosímetro que trabaja con un palpador de aguja marca TAYLOR- HOBSON, éste realiza mediciones de longitudes de recorrido de 2.5; 5; 8; 12; 16 mm. Disponiendo de varias escalas de medición en micropulgadas (3, 30, 100, 300 y 1000) y en micrometros (0.1; 0.3; 1; 3; 10; 30) y apreciación analógica de 0.1  $\mu$ m.

Luego de aplicar la técnica de grupo nominal como complemento a lo planteado por (Oliveira y col., 2004) se determinó que se consideran relevantes en el proceso. la Profundidad de Corte, Avance de la Mesa y el uso o no del Refrigerante. Lo anterior coincide con los trabajos de (Lee y col., 2005), en el que algunos de los factores que afectan el acabado superficial son: Refrigerante, Profundidad de Corte, Avance de la Mesa, Velocidad de Corte, Procesos Cinemáticas y Ángulo de la Herramienta; y el de (Aguilera y col., 2004) quienes determinan que uno de los factores que afecta la rugosidad es el Avance de la Mesa, solo que éste se experimentó en Pino (*Pinus radiata*).

El cálculo del valor mínimo y máximo del Avance de la Mesa se presenta a continuación, apoyado en (Casillas, 1982) la velocidad de corte en m/min., está entre 40-60 y el avance por diente 0.05 – 0.15, sustituyendo en las

ecuaciones anteriores, se tiene para una VC = 40 m/min. N = 159,15 rpm. Como se debe ajustar a los valores en rpm al de la máquina fresadora, el valor más cercano es N = 180 rpm., y por lo tanto utilizando la ecuación (2) S = 56 mm/min., de igual manera para VC = 60 m/min. N = 238,73 rpm., se ajusta a los valores de la máquina y el valor más cercano es N = 280 rpm., por lo tanto S = 90 mm/min. Igualmente para la Profundidad de Corte que se tienen 1 y 2 mm, que respectivamente corresponde a los señalados en (Casillas 1982), para el caso del refrigerante utilizado tiene la siguiente proporción 5 litros de agua en 2,5 litros de aceite lo cual sirve para configurar la siguiente tabla:

Tabla 1 Rango Experimental para Evaluar rugosidad del Diseño Experimental Factorial (DBF 2<sup>3</sup>)

Variables a ser estudiadas	Nivel	
	Bajo (-)	Alto (+)
Profundidad de Corte [V1] en mm.	1	2
Uso de Refrigerante [V2] Adimensional	No	Si
Avance de la Mesa [V3] en mm./min	56	90

Tabla 2 Generación de las columnas de signos para los efectos principales de las variables

Corrida Experimento y Valor Aleatorizado	Diseño de la Matriz Variables		
	1	2	3
1 (2) (5)	+	+	+
2 (5) (3)	-	+	+
3 (8) (7)	+	-	+
4 (1) (6)	-	-	+
5 (6) (8)	+	+	-
6 (7) (1)	-	+	-
7 (3) (2)	+	-	-
8 (4) (4)	-	-	-

### 3 Hipótesis

El mejor acabado superficial de una pieza utilizando un proceso de fresado se alcanza cuando la profundidad de corte y el avance de la mesa son mínimos y además se hace uso de refrigerante.

### 4 Fase Experimental

Se realiza el proceso de mecanizado plano de las piezas y se mide el acabado superficial con el rugosímetro, en una escala de 0 a 30 μm. y con un error del instrumento de 0.2μm. que genera como resultado los valores observados en la siguiente tabla.

### 5 Fase Post-Experimental

Realizada la experimentación y tabulados los datos, se calcula la varianza y el error del efecto tanto independiente como de interacción de las variables estudiadas, utilizando los valores de la Tabla 4 y las siguientes ecuaciones (Walpole y col., 1998).

$$S^2 = \frac{\sum dif^2}{2 \cdot g} \quad (4)$$

Donde g = 8 son los grados de libertad; equivalente al número de pruebas realizadas

$$S^2 = \frac{0.698}{2 \times 8} = 0.046306 \mu m^2$$

$$\text{Error Normal} = \sqrt{S^2} = 0.2075 \mu m \quad (5)$$

$$\text{Varianza del Efecto: } V(\text{efecto}) = \frac{S^2}{4} \quad (6)$$

$$V(\text{efecto}) = \frac{0.04306}{4} = 0.01076 \mu m^2$$

Entonces, el Error del efecto de las variables es:

$$\text{Error}_{(\text{efecto})} = \sqrt{V(\text{efecto})} = 0.1037 \mu m \quad (7)$$

Para calcular el efecto de cada variable y de las variables de interacción, se utiliza la ecuación planteada por Yates y col., 2003.

$E(x) = \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N$  (Rugosidad media por signo +/- de la columna en estudio) donde N=8 pruebas básicas

### 6 Discusión

Se comprueba en esta experimentación el trabajo realizado por (Jensen y col., 1999, parte I) quienes consideran que los aspectos más relevantes en el proceso de fresado para lograr un mejor acabado superficial son: Avance de la Mesa y Profundidad de Corte, sin embargo, en el experimento hay otra variable determinante en el acabado superficial y es el uso de Refrigerante.

Según los resultados de los valores promedios de rugosidad obtenidos en la experimentación, presentados en la Tabla 3, se pueden hacer algunas observaciones: El mínimo valor promedio de rugosidad es 6.00μm, prueba N° 8 resultado del mecanizado a 1 mm de profundidad de corte, sin el uso del refrigerante y con un avance de la mesa de 56 mm./min., y el máximo valor promedio de rugosidad prueba N° 1 es 9.41 μm, resultado del mecanizado a 2 mm

de profundidad de corte, uso del refrigerante y avance de la mesa de 90 mm./min.; para obtener un análisis más detallado de la experimentación, se determina la varianza y el error del experimento y de los efectos. Los resultados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 2 Matriz y Resultados del Diseño Experimental para analizar el acabado superficial

Ensayo	Corrida 1 ( $\mu\text{m}$ )	Corrida 2 ( $\mu\text{m}$ )	Promedio ( $\mu\text{m}$ )
1	9.33	9.5	9.41
2	8.66	8.33	8.49
3	8.00	8.33	8.16
4	7.33	7.00	7.16
5	8.00	8.33	8.16
6	6.67	6.33	6.50
7	7.67	8.00	7.83
8	6.00	6.00	6.00

Tabla 3 Valores Utilizados para la determinación de la Varianza y el Error

Ensayo	Corrida 1 ( $\mu\text{m}$ )	Corrida 2 ( $\mu\text{m}$ )	Promedio ( $\mu\text{m}$ )	Dif ( $\mu\text{m}$ )	Dif <sup>2</sup> ( $\mu\text{m}^2$ )
1	9.33	9.5	9.41	0.17	0.0289
2	8.66	8.33	8.49	0.33	0.1089
3	8.00	8.33	8.41	0.33	0.1089
4	7.33	7.00	7.16	0.33	0.1089
5	8.00	8.33	8.16	0.33	0.1089
6	6.67	6.33	6.50	0.34	0.1156
7	7.67	8.00	7.83	0.33	0.1089
8	6.00	6.00	6.00	0	0

Tabla 4 Resultados del cálculo de la Varianza, Error del Experimento y Error de los Efectos

Estadísticos	Resultados
Varianza de la Experimentación	0.043060 $\mu\text{m}^2$
Error Normal de la Experimentación	0.02075 $\mu\text{m}$
Varianza del Efecto	0.01076 $\mu\text{m}^2$
Error del Efecto	0.1037 $\mu\text{m}$

Los niveles de significancia de cada variable y de la interacción entre ellas, se obtienen al comparar sus resultados con el valor del doble del error de la desviación del efecto, considerando significativos aquellos que superen éste valor (Sarache 2001). El objetivo de la investigación es el determinar en que medida las variables independientes o en interacción disminuyen la rugosidad superficial del acero al carbono ASTM A36 en el fresado; en tal sentido, solo se consideran los efectos que poseen signo negativo.

Al comparar los efectos de las variables con el doble del error (0.2075), la interacción de las variables Profundidad de Corte (V1) y Avance de la Mesa (V3) y la interacción Uso de Refrigerante (V2) y Avance de la Mesa (V3), son las significativas y esto permite el control estadístico de dos variables simultáneamente.

Tabla 5 Resultados de los efectos individuales y de interacción

Efectos Principales	Efecto	+/- 2* Error
V1	1.36	0.2075
V2	- 0,08.5	0.2075
V3	1.19	0.2075
Efectos de Interacción		
V1V2	0,0625	0.2075
V1V3	<b>-0,395 E-01</b>	0.2075
V2V3	<b>-0,438 E-01</b>	0.2075
V1V2V3	-2.25 E-02	0.2075

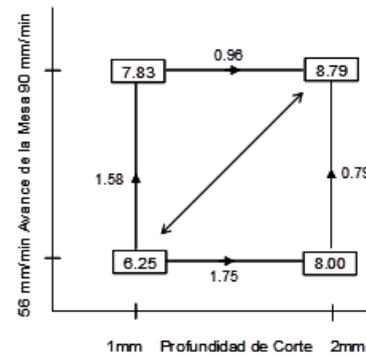


Figura 1 Diagrama de dos vías de la interacción Profundidad de Corte (V1) y Avance de la Mesa (V3)

La ausencia de significancia en la interacción de las tres variables, Profundidad de Corte, Avance de la Mesa y Uso o no de Refrigerante, hace pensar que existe una variable que no ha sido tomada en cuenta para el estudio y que puede estar afectando el proceso. El efecto cruzado de las variables, se estudia mediante el diagrama de dos vías, los diagramas generados se muestran a continuación:

En los diagramas de dos vías generados, se pueden observar las condiciones más favorables para conseguir un mejor acabado superficial, las cuales coinciden con trabajos realizados anteriormente (Kornienko y col., 2003), se pueden identificar situaciones como lo planteado por (Aguilera y col., 2004) donde el aumento del Avance de la Mesa genera mayor rugosidad por lo tanto un acabado superficial de menor calidad.

Se tiene como variable significativa individual el uso de refrigerante, obteniéndose mejores resultados en el acabado superficial si se hace uso del mismo, coincidiendo con la literatura consultada (Lee y col., 2005) quienes señalan que el uso de medios refrigerantes adecuados se traduce en mejora de la calidad superficial. Como efectos significativos de interacción se tiene que con la Profundidad de Corte y Avance de la Mesa en sus valores mínimos se logra un mejor acabado superficial, lo cual concuerda con la hipótesis planteada en este trabajo y con la literatura

consultada en (Jensen y col.,1999, parte I y II); otro efecto significativo de interacción se tiene con el avance de la mesa y uso de refrigerante, los cuales logran un mejor acabado superficial con valores mínimos para el avance y máximo para el refrigerante que coincide con valores planteados por (Lam y col., 2003).

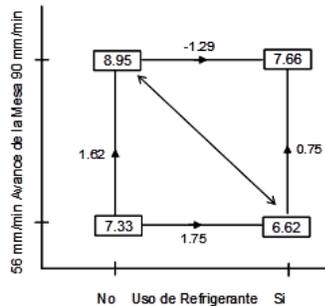


Figura 2 Diagrama de dos vías de la interacción Uso de Refrigerante y Avance de la Mesa.

## 7 Conclusiones

Claramente se aprecia que la variable avance de mesa es el factor a controlar para los procesos de mecanizado, ya que el mismo está asociado de manera colectiva con la profundidad del corte y en otra dirección con el uso del refrigerante, pero de manera individual su efecto no es significativo.

El mejor acabado superficial que involucra las tres características de corte de manera asociada es con: una profundidad de corte de 1 mm., un avance de la mesa de 56 mm./min. y con el uso del refrigerante, obteniéndose una rugosidad de 6  $\mu\text{m}$ .

En el caso de interacción de variables, el mínimo valor de rugosidad en la experimentación, ver figura 1, es de 6.25  $\mu\text{m}$ , con un avance de la mesa de 56 mm./min. y una profundidad de corte de 1 mm. Igualmente, se aprecia en la figura 2, que el menor valor de rugosidad 6.62  $\mu\text{m}$ , corresponde al mismo valor de avance de la mesa anterior pero ahora asociado con el uso del refrigerante.

El poder corroborar los valores de rugosidad en procesos de fresado con estudios previos, demuestran la efectividad de la aplicación del SEMPRO 2, como herramienta que ayuda disminuir los esfuerzos, costos y tiempos invertidos en la experimentación.

## Referencias

Aguilera A, Vega M, 2004, Efecto del cambio de las condiciones de maquinado sobre la rugosidad superficial de *Pinus radiata* D. Don. Instituto de Tecnología de Productos Forestales, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.

Casillas A, 1982, Máquinas. Graficas Reunidas. Madrid – España.

De Oliveira A, Frandinhi R, Oliveira J, Barbosa A, 2004, Global Education in Manufacturing: A Novel Approach for Digital Business Strategy y J. Browne, pp 428-436.

Lee C, Hwang YK, 2005, A Study on the Effect of Cutting Conditions on the Surface Roughness in Milling, Applied Simulation and Modelling, pp 469-476.

Lam J, Geddam A, 2003, A Neural Network Approach to Tool Wear Monitoring in End Milling Operations Intelligent Systems and Control, pp 388-396.

Cheng K, 2004, Internet-based e-Manufacturing: Fundamentals and Application Perspectives, pp 427-468

Sarache L, Peña M, 2004, “Software para el uso del Diseño Multifactorial de Dos Niveles en la Investigación SEMPRO2”. 5to. Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Mérida, Venezuela.

Sarache L, 2001, “Diseño de Experimentos y Análisis Multifactorial Aplicado a la Industria”. Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida. Venezuela, pp 585-590.

Gewali L, Kodela P, Bhadury J, 2003, Approximation Algorithm for Multi-Facility Location, Applied Informatics, [http://www.actapress.com/Content\\_Of\\_Proceeding.aspx?ProceedingID=230](http://www.actapress.com/Content_Of_Proceeding.aspx?ProceedingID=230) pp 378-432.

Tandon P, Gupta P, Dhande SG, 2003, Virtual Shape Prototyping of Side Milling Cutting Tool, Vol, VIII, Visualization, Imaging, and Image Processing.

Walpole R, Myers R, 1998, Probabilidad y Estadística para Ingenieros. McGraw Hill. 5ra Edición.

Kornienko S, Kornienko O, Levi P, 2003, Flexible Manufacturing Process Planning based on the Multi-agent Technology, Applied Informatics, 378-384.

Krar S, Check A, 2002, Tecnología de las Máquinas – Herramientas. Alphaomega Grupo Editor. Quinta Edición. México.

Jensen S, Shin YC, 1999, Stability Analysis in Face Milling Operations, Part 1: Theory of Stability, Journal of Manufacturing Science and Engineering Published by The American Society of Mechanical Engineers, pp 600-605.

Jensen S, Shin, YC, 1999, Stability Analysis in Face Milling Operations, Part 2: Theory of Stability, Journal of Manufacturing Science and Engineering Published by The American Society of Mechanical Engineers, pp 606-614.

Recibido: 13 de julio de 2017

Aceptado: 31 de enero de 2018

**Chacón, Rubén:** Doctor en Gerencia Avanzada, Universidad Fermín Toro, Barquisimeto. Magister en Gerencia Empresarial, Universidad José María Vargas, Caracas. Ingeniero Mecánico, Universidad de Los Andes, Mérida. Profesor Titular de la Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica, Departamento de Tecnología y Diseño.

**Díaz Miguel:** Doctor en Ingeniería Mecánica y Materiales de la Universidad Politécnica de Valencia, España. Magister en Matemática aplicada a la Ingeniería, Ingeniero Mecánico, Universidad de los Andes. Profesor Titular en la Universidad de los Andes, Venezuela. Editor en Jefe del portal [www.mecabot-ula.org](http://www.mecabot-ula.org). Correo electrónico: [dmiguel@ula.ve](mailto:dmiguel@ula.ve)

**Andueza, Luis:** Ingeniero Mecánico y M.Sc en ingeniería de control y automatización de la Universidad de Los Andes, Venezuela, con estudios posteriores en Diseño, gestión y desarrollo de nuevos productos de la Universidad Politécnica de Valencia, España. Actualmente se desempeña como profesor de la escuela de diseño de la Pontificia Universidad Católica de Chile. También es consultor para la implementación de herramientas digitales computacionales para el diseño, manufactura, análisis, simulación y gestión de datos de ingeniería. Correo electrónico: [landueza@uc.cl](mailto:landueza@uc.cl)