

# La rugosidad influenciada por factores geométricos en fresado de superficies

---

## The roughness influenced by geometric factors in surface milling

Andrés F. Cifuentes<sup>1a</sup>, Ernesto Córdoba-Nieto<sup>1b</sup>

<sup>1</sup> División de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia,

Orcid: <sup>a</sup> 0000-0002-2006-3485, <sup>b</sup> 0000-0002-6527-1069.

Correo electrónico: <sup>a</sup> [afcifuentesg@unal.edu.co](mailto:afcifuentesg@unal.edu.co), <sup>b</sup> [ecordoban@unal.edu.co](mailto:ecordoban@unal.edu.co)

Recibido: 19 octubre, 2018. Aceptado: 13 diciembre, 2018. Versión final: 20 febrero, 2019.

### Resumen

Por medio de modelos experimentales y geométricos, y en un entorno simulado, se determinan valores de rugosidad propia de desviaciones de tercer orden. El entorno de simulación se desarrollada a partir de la integración y verificación simulada (ISV) en *software* CAD/CAM NX 11. Las aproximaciones geométricas son validadas por medio del análisis de las nubes de puntos.

Se realizan dos diseños de experimentos para determinar la influencia de los factores geométricos dinámicos, definidos como avance transversal ( $A_e$ ), ángulo *lead* y ángulo *tilt*, con una herramienta de fresado de punta plana. Un experimento  $2^k$  se desarrolla con propósitos de ubicar una zona de influencia de los parámetros mencionados y validar la precisión del entorno simulado. Para el segundo experimento se presenta un modelo factorial  $3^k$ , a fin de precisar el factor de mayor influencia sobre la rugosidad.

Como resultado de la experimentación se obtiene un valor óptimo (mínimo) de rugosidad, ubicado en zonas en donde el avance transversal es determinante y de alto impacto, el ángulo *lead* tiene una influencia moderada y el ángulo *tilt* es el factor de menor influencia. Los valores mínimos de rugosidad se presentan cuando el avance transversal es bajo, el ángulo *lead* es bajo y el ángulo *tilt* es alto. El método presentado pretende ahondar en el maquinado para terminado de superficies libres con herramienta de punta plana.

**Palabras clave:** CAD/CAM; DOE; ISV; *lead*; modelos experimentales; rugosidad; *tilt*.

### Abstract

By means of experimental, geometric models and in a simulated environment, the roughness values of third order deviations are determined. The simulation environment was developed from integration and simulated verification (ISV) in the CAD / CAM software NX 11. The geometric approaches are based on the analysis of point clouds.

Two experimental designs are carried out to determine the influence of the dynamic geometric factors defined as transverse advance ( $A_e$ ), lead angle and tilt angle, with a flat tip milling tool. An experiment  $2^k$  is developed with the results of locating a zone of influence of the adjustment parameters and validating the precision of the simulated environment. For the second experiment, a factorial model  $3^k$  is presented for the factor with the greatest influence on roughness.

As a result of the experimentation, an optimum value (minimum) of roughness is obtained, located in areas where the transversal advance is determinant and of high impact. The main angle has a moderate influence, and the angle is the factor of least influence. The values Roughness minima occur when the transverse advance is low, the angle is low, and the angle of inclination is high. The purpose of the method presented is to obtain a surface free space with the flat-tipped tool.

**Keywords:** experimental models; ISV; CAD/CAM; DOE; lead; tilt, roughness.

## 1. Introducción

La rugosidad superficial es el resultado de la combinación de parámetros tecnológicos en el proceso de maquinado, las propiedades de la herramienta, la pieza de trabajo y los factores no controlables de proceso, como la vibración, la temperatura y el cambio de geometría de herramienta causada por el desgaste, entre otros.

Varios autores proponen diversos métodos para predecir la rugosidad resultante de un proceso [1], [2]. Van desde el análisis de la geometría que describe la superficie de corte hasta los análisis estadísticos de la influencia de parámetros de corte.

La rugosidad superficial hace referencia a las desviaciones de una superficie ideal con respecto a una ideal [3]. Estas desviaciones son producto de efectos no controlables del proceso y son clasificados en cuatro niveles [4]. El tercer nivel corresponde a los surcos periódicos que se generan sobre la superficie, producto de la interacción con la geometría del filo de la herramienta y los parámetros tecnológicos de proceso [5].

Durante los procesos de maquinado son imperativas la verificación y la validación de las características resultantes. Este conjunto de características se relaciona con el orden de desviación mencionado anteriormente.

Las desviaciones de segundo orden pueden ser verificadas en las trayectorias de la herramienta sobre la pieza de trabajo. Sin embargo, las desviaciones de tercer orden son alteradas por la geometría de la herramienta y la cinemática del proceso de maquinado.

Herramientas CAD/CAM verifican los aspectos dimensionales de un elemento, por medio de la comparación entre demasías y piezas de trabajo ideales [6]. Para ahondar en los aspectos de rugosidad se presentan simuladores que relacionan la cinemática de la herramienta, con respecto a la superficie, y la intersección entre el volumen de la herramienta y el volumen de la pieza de trabajo [7].

Es posible extraer la geometría resultante de la superficie de corte. Esta remoción de volúmenes está basada en la técnica MRSEV [8], el análisis de remoción de microvolúmenes puede considerarse una herramienta útil para aproximar desviaciones en propias del maquinado.

Los simuladores no tienen la capacidad de representar las propiedades del material, y, por ende, no es posible hacer aproximaciones sobre el cuarto orden de rugosidad.

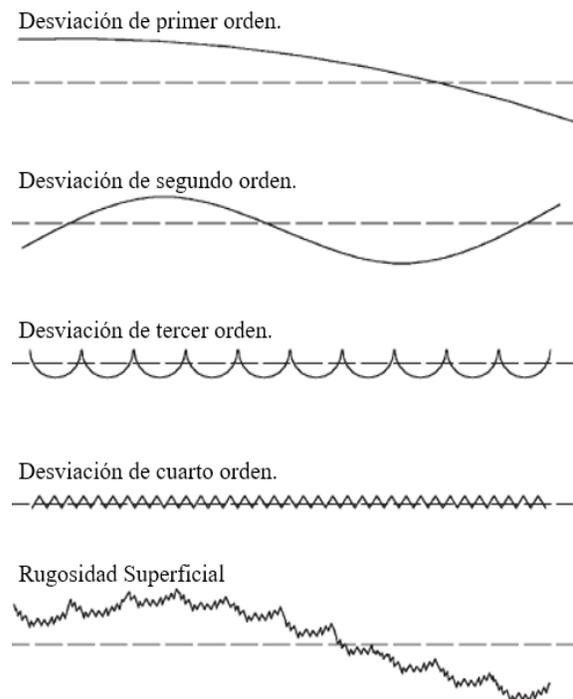


Figura 1. Desviación de una superficie (adaptado de ref. 1).

## 2. Materiales y métodos

### Experimento

Se diseñan dos experimentos factoriales; (1)  $2^k$  con punto central, aleatorizado, de 3 factores y 2 niveles y (2) 3 factores con 3 niveles. Los factores que se pretenden

analizar son los ángulos *lead* y *tilt* en combinación con el avance transversal [9]. Como respuesta se esperan variaciones en la rugosidad superficial.

El primer experimento  $2^3$  se usará para determinar la zona de influencia de los factores por medio de una superficie de respuesta. El segundo experimento  $3^3$  se utiliza para determinar posibles óptimos de los factores, para la obtención de rugosidades mínimas.

### 2.1.1. Experimento $2^3$

En el experimento se propone una probeta con superficie plana de 5 mm x 5 mm, la superficie a cortar cuenta con una demasía de material de 0,3 mm. Los niveles máximos y mínimos están en el rango de  $45^\circ \leq \alpha \leq 65^\circ$ ,  $45^\circ \leq \beta \leq 65^\circ$  y  $0,1 \text{ mm} \leq A_e \leq 0,3 \text{ mm}$  mostrados en la figura 2. Este montaje aplica solamente para el experimento  $2^k$  (figura 2).

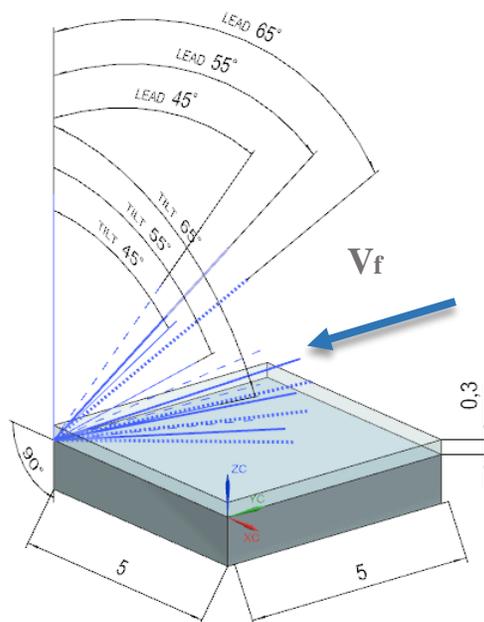


Figura 2. Esquema de montaje tecnológico para experimento.

Para el diseño del experimento se plantea un modelo cuadrático, que incluye las combinaciones AA, AB, AC, BC, A, B, C, de modo que A es el ángulo *tilt*, B el ángulo *lead* y C el avance transversal. Se excluyen del experimento los factores BB y CC para mitigar completamente los efectos netos del ángulo *lead* y el avance transversal.

Como resultado se proponen 22 muestras que se enuncian en la Tabla 1. Se analiza en profundidad el punto central con 5 repeticiones.

Tabla 1. Listado y orden de muestras – Experimento  $2^3$ .

N.º	Lead [°]	Tilt [°]	Ae/Pf [mm]
1	45	45	0,3
2	65	65	0,1
3	45	65	0,3
4	45	65	0,1
5	55	55	0,2
6	65	65	0,3
7	65	45	0,1
8	65	45	0,3
9	45	45	0,1
10	55	55	0,2
11	55	55	0,2
12	45	45	0,3
13	65	65	0,1
14	45	65	0,3
15	45	65	0,1
16	55	55	0,2
17	65	65	0,3
18	65	45	0,1
19	65	45	0,3
20	45	45	0,1
21	55	55	0,2
22	55	55	0,2

### 2.1.2. Experimento $3^3$

Se presentan probetas con caras planas de 5 mm x 5 mm, con una demasía de 0,3 mm. El objetivo de este experimento es validar la correlación entre el montaje experimental ISV (simulación y verificación integrada, por sus siglas en inglés), el modelo teórico analítico y la medición de rugosidad sobre la superficie maquinada. Los niveles máximos y mínimos son  $5^\circ$  y  $15^\circ$ , respectivamente, para los ángulos *lead* y *tilt*; el  $A_e$  tiene un rango entre 0,05 mm y 0,1 mm. El experimento plantea un modelo cuadrático sin excluir efectos.

Como resultado se plantean las 28 muestras enunciadas en la tabla 2. Para este experimento se analizan dos puntos centrales.

### 2.2. Simulación

El maquinado de las superficies se simuló por medio del software CAD/CAM/CAE NX 11, en donde se generaron mallas tetragonales resultantes de la interacción entre el volumen de la herramienta y la demasía de la pieza de trabajo (figura 3).

Tabla 2. Listado y orden de muestras – experimento 3<sup>3</sup>.

N°	Lead [°]	Tilt [°]	Ae[Pf [mm]
1	10	5	0,10
2	10	10	0,05
3	5	10	0,08
4	5	5	0,08
5	5	10	0,05
6	10	15	0,10
7	10	15	0,08
8	15	15	0,08
9	10	5	0,05
10	10	5	0,08
11	5	10	0,10
12	10	10	0,08
13	5	15	0,10
14	15	10	0,05
15	10	15	0,05
16	10	10	0,08
17	5	15	0,05
18	15	15	0,10
19	5	15	0,08
20	5	5	0,10
21	15	5	0,05
22	10	10	0,10
23	5	5	0,05
24	15	10	0,075
25	15	10	0,1
26	15	5	0,1
27	15	5	0,075
28	15	15	0,05

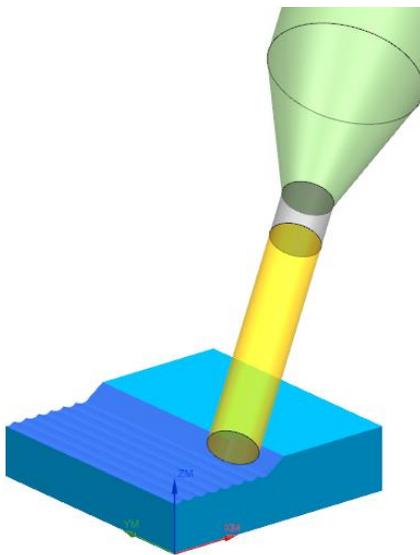


Figura 3. Superficie de corte simulada.

La herramienta de corte es una fresa de punta planta Ø1 mm con características mostradas en la tabla 3.

Tabla 3. Dimensiones de herramienta.

Dimensiones	
Ø	1 mm
FL	3 mm
R1	0.08 mm
z	4 filos

Se desarrolla el simulador de máquina virtual para centro de mecanizado Leadwell V-20 con cuarto eje. Este simulador facilita el control del ángulo *lead* y la verificación del reglaje de la máquina (figura 4).

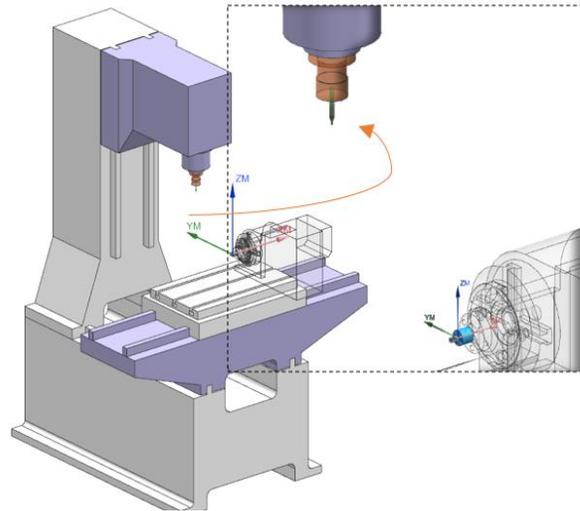


Figura 4. ISV máquina Leadwell V-20.

### 2.3. Estimación de rugosidad

La estimación de la rugosidad se establece por medio de la caracterización de las crestas y los valles formados en la superficie maquinada. Por medio del análisis entre la malla tetragonal y un plano que simula la superficie nominal, es posible medir la altura de los picos y la curvatura (figura 4).

La combinación entre la altura de cresta, su separación y su curvatura en el valle permiten posicionar una elipse sobre la superficie, que hace posible estimar la rugosidad de la cara maquinada aplicando las ecuaciones (1, 2, 3)[10].

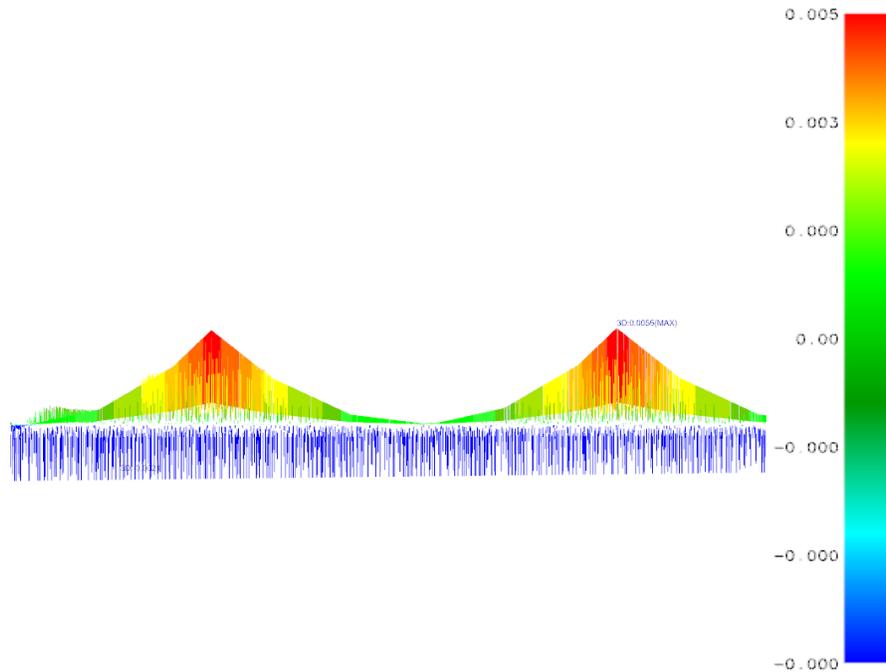


Figura 5. Morfología de corte transversal de superficie.

$$R_t \cong \frac{f^2 b}{8a^2} \quad (1)$$

$$R_a \cong 0.032 \frac{f^2 b}{a^2} \quad (2)$$

$$R_q \cong \frac{2}{2\sqrt{5}} \left( b - \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - \frac{f^2}{4}} \right) \quad (3)$$

En donde

$a$ : semieje mayor de elipse

$b$ : semieje menor de elipse

$f$ : avance transversal ( $A_e$ )

El posicionamiento de la elipse se realiza mediante técnicas y herramientas de CAD, con las que se garantiza la tangencia de la elipse sobre el surco formado por la herramienta de corte. Para el caso de la Figura 6, se muestra un segmento de la superficie maquinada de la muestra número 4, con parámetros *lead* 65°, *tilt* 45°,  $A_e$  0,1 mm.

La elipse resultante tiene los siguientes valores como semiejes:

$$a = 0,065 \text{ mm}$$

$$b = 0,014 \text{ mm}$$

Para las muestras analizadas en este ejercicio se asume que la dirección de medición de rugosidad es perpendicular al vector de velocidad de avance de la herramienta  $\theta = 90^\circ$ . Por esta razón el valor de  $f$  y  $A_e$  son iguales, según la (ecuación 4).

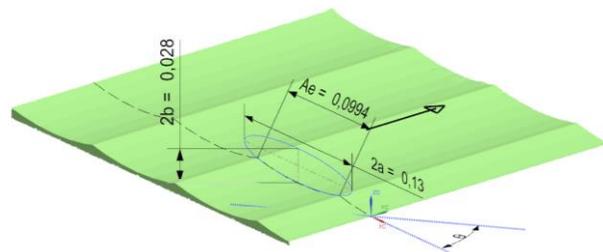


Figura 6. Aproximación de elipse sobre superficie de muestra número 4.

$$f = \frac{A_e}{\text{sen}(\theta)} \quad (4)$$

Se compara la proximidad de los semiejes del modelo CAD de la muestra número 4 contra los modelos analíticos deducidos a partir de la geometría del perfil de los surcos generados por la herramienta (ec.5, ec.6).

En donde

$$a = r \frac{\cos(\alpha - \theta)}{\sin(\theta)} \quad (5)$$

$$b = r \cos(\beta) \quad (6)$$

Con

r: radio de la herramienta

$\alpha$ : ángulo *lead*

$\beta$ : ángulo *tilt*

$\theta$ : ángulo de lectura

### 3. Desarrollo experimental

Se simulan las 22 muestras del experimento factorial  $2^3$  en el módulo de verificación de trayectoria de herramienta. Para obtener una malla con mayor resolución se reducen las tolerancias del IPW (pieza de trabajo en proceso, por sus siglas en inglés). Las tolerancias reducidas son las siguientes:

1. Tolerancia de acordes: 0,002
2. Tolerancia de ángulo *tilt*: 0,01
3. Distancia entre nodos: 0,002
4. Conteo de agujas: 4000

Para cada muestra se ajusta una elipse sobre el perfil transversal de la maya tetragonal. Posterior a esto se miden los semiejes, la curvatura y la altura de las crestas. Se seleccionan ángulos *lead* y *tilt* entre  $45^\circ$  y  $65^\circ$ , en todos los casos, la dirección de corte se conserva en contrasentido para mantener los valores positivos en los ángulos. Para un ángulo *lead* de  $45^\circ$  el perfil de la herramienta plana se transforma en un segmento de circunferencia. Según los modelos teóricos, en este punto se encontrarían las crestas más altas si se combina con el parámetro máximo de avance transversal.

De la misma forma, para el modelo experimental  $3^3$ , los ángulos seleccionados tienen un rango entre  $5^\circ$  y  $15^\circ$ . En este caso se quieren aproximar elipses con amplio rango de curvatura.

Para el caso del experimento factorial  $3^3$  se simulan las muestras en modelo ISV. Las nubes de puntos resultantes son analizadas por separado y por medio de técnicas CAD se posicionan elipses tangentes sobre los surcos generados por la herramienta y su trayectoria.

### 4. Resultados y discusión

Los resultados del experimento  $2^3$  se muestran en la Tabla 4, los datos consignados en la tabla son resultado del análisis geométrico de los perfiles generados.

Tabla 4. Resultados de experimento  $2^3$ .

N°	Lead [°]	Tilt [°]	Ae/f [mm]	a [mm]	b [mm]	Rt [mm]	Ra [μm]	Rq [μm]
1	45	45	0,3	0,354	0,354	31,82	8,146	4,008
2	65	65	0,1	0,453	0,211	1,29	0,329	0,155
3	45	65	0,3	0,354	0,211	19,02	4,869	2,395
4	45	65	0,1	0,354	0,211	2,11	0,541	0,255
5	55	55	0,2	0,410	0,287	8,55	2,188	1,042
6	65	65	0,3	0,453	0,211	11,58	2,964	1,429
7	65	45	0,1	0,453	0,354	2,15	0,551	0,259
8	65	45	0,3	0,453	0,354	19,37	4,959	2,392
9	45	45	0,1	0,354	0,354	3,54	0,905	0,426
10	55	55	0,2	0,410	0,287	8,55	2,188	1,042
11	55	55	0,2	0,410	0,287	8,55	2,188	1,042
12	45	45	0,3	0,354	0,354	31,82	8,146	4,008
13	65	65	0,1	0,453	0,211	1,29	0,329	0,155
14	45	65	0,3	0,354	0,211	19,02	4,869	2,395
15	45	65	0,1	0,354	0,211	2,11	0,541	0,255
16	55	55	0,2	0,410	0,287	8,55	2,188	1,042
17	65	65	0,3	0,453	0,211	11,58	2,964	1,429
18	65	45	0,1	0,453	0,354	2,15	0,551	0,259
19	65	45	0,3	0,453	0,354	19,37	4,959	2,392
20	45	45	0,1	0,354	0,354	3,54	0,905	0,426
21	55	55	0,2	0,410	0,287	8,55	2,188	1,042
22	55	55	0,2	0,410	0,287	8,55	2,188	1,042

Por medio del procesamiento de los datos enunciados en la Tabla 4 en el *software* STATGRAPHICS 18<sup>®</sup>, se deduce la superficie de respuesta de la

Figura 7, en donde se hace una aproximación de la influencia de los ángulos de inclinación de la herramienta y el avance transversal sobre la rugosidad superficial durante un maquinado.

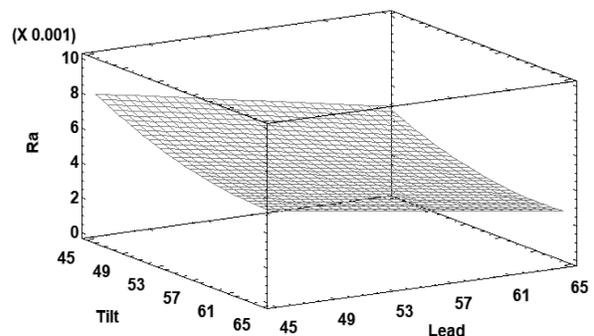


Figura 7. Superficie de respuesta  $Ae = 0,3$  mm – Experimento  $2^3$ .

Es apreciable que la rugosidad tiende a 0 a medida que el avance transversal tiende a 0 (figura 8). Sin embargo, en valores máximos de  $Ae$ , se aprecia una marcada

influencia en la zona donde los ángulos *tilt* y *lead* son máximos.

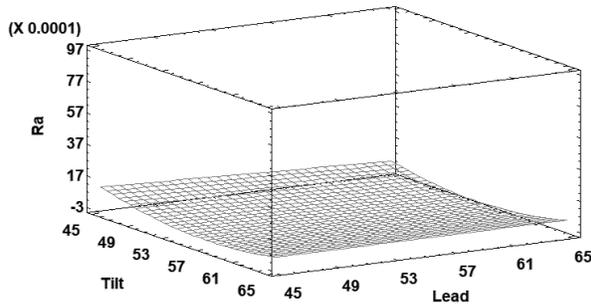


Figura 8. Superficie de respuesta  $A_e = 0,1 \text{ mm}$  – Experimento 2<sup>3</sup>.

De las superficies de respuesta se derivan los factores de correlación y se construye la fórmula de regresión (7).

$$R_a = 0.0194563 - 0.000829375\alpha - 0.000050625\beta + 0.08525A_e + 0.000007125\alpha^2 + 0.000001625\alpha\beta - 0.0005625A_e\alpha - 0.0005625 A_e\beta \quad (7)$$

En donde

$\alpha$ : ángulo *tilt*

$\beta$ : ángulo *lead*

$A_e$ : avance transversal o paso

Los efectos principales de cada factor están descritos en la Figura 9, para valores razonables de avance transversal ( $0,05 \leq A_e \leq 0,1$ ) la influencia del ángulo *lead* es mayor. Esto se debe a la elipse generada por la rotacion del perfil de la herramienta; en donde la altura de las crestas es proporcional a la magnitud del ángulo de inclinación.

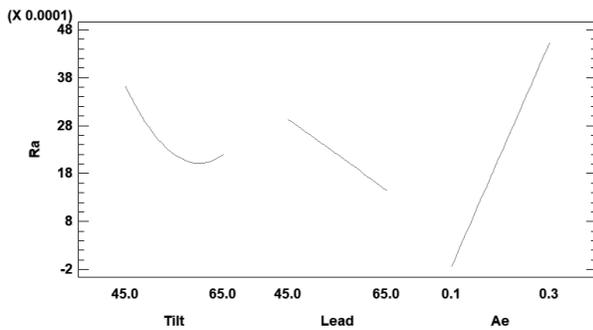


Figura 9. Efectos principales de factores *lead*, *tilt*,  $A_e$ .

Por otro lado, los resultados experimentales para el desarrollo factorial 3<sup>3</sup> consignados en la tabla 5. Se añaden los resultados de la regresión. En comparación, el error relativo promedio de la regresión y el modelo analítico son de 2,61 %.

Tabla 5. Resultados de experimento 3<sup>3</sup>.

N	Lea d [°]	Tilt [°]	Ae\ff [mm]	a [mm]	b [mm]	Rt [μm]	Ra [μm]	Reg. Ra [μm]
1	10	5	0.10	0.181	0.498	0.912	0.234	0.233
2	10	10	0.05	0.181	0.492	0.233	0.060	0.060
3	5	10	0.08	0.091	0.492	0.264	0.067	0.062
4	5	5	0.08	0.091	0.498	0.258	0.066	0.061
5	5	10	0.05	0.091	0.492	0.117	0.030	0.032
6	10	15	0.10	0.181	0.483	0.971	0.248	0.248
7	10	15	0.08	0.181	0.483	0.546	0.140	0.140
8	15	15	0.08	0.270	0.483	0.814	0.208	0.214
9	10	5	0.05	0.181	0.498	0.228	0.058	0.059
10	10	5	0.08	0.181	0.498	0.513	0.131	0.131
11	5	10	0.10	0.091	0.492	0.469	0.120	0.122
12	10	10	0.08	0.181	0.492	0.525	0.134	0.134
13	5	15	0.10	0.091	0.483	0.487	0.125	0.129
14	15	10	0.05	0.270	0.492	0.348	0.089	0.086
15	10	15	0.05	0.181	0.483	0.243	0.062	0.062
16	10	10	0.08	0.181	0.492	0.525	0.134	0.134
17	5	15	0.05	0.091	0.483	0.122	0.031	0.032
18	15	15	0.10	0.270	0.483	1.447	0.370	0.366
19	5	15	0.08	0.091	0.483	0.274	0.070	0.066
20	5	5	0.10	0.091	0.498	0.458	0.117	0.119
21	15	5	0.05	0.270	0.498	0.340	0.087	0.083
22	10	10	0.10	0.181	0.492	0.934	0.239	0.239
23	5	5	0.05	0.091	0.498	0.114	0.029	0.033
24	15	10	0.08	0.270	0.492	0.783	0.200	0.206
25	15	10	0.1	0.270	0.492	1.392	0.356	0.355
26	15	5	0.1	0.270	0.498	1.360	0.348	0.347
27	15	5	0.08	0.270	0.498	0.765	0.196	0.200
28	15	15	0.05	0.270	0.483	0.362	0.093	0.091

Se generan las superficies de respuesta con valores  $A_e = 0,05$ ;  $A_e = 0,075$  y  $A_e = 0,1$ . Se presenta la misma tendencia en donde a menor avance transversal menor es la rugosidad.

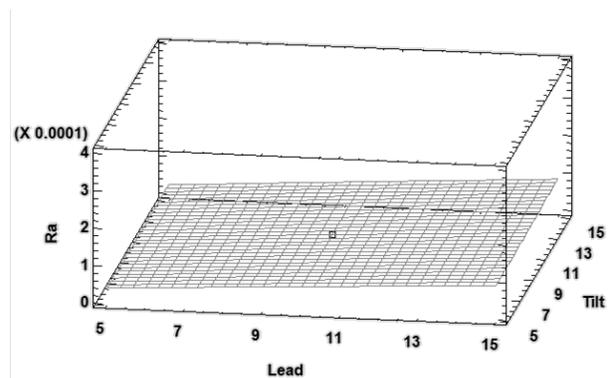


Figura 10. Superficie de respuesta  $A_e=0.05 \text{ mm}$  – Experimento 3<sup>3</sup>.

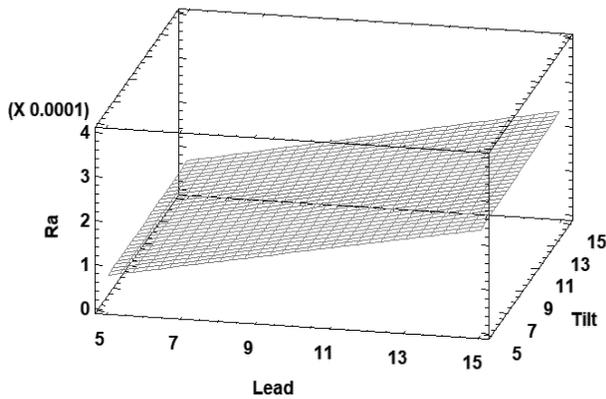


Figura 11. Superficie de respuesta  $Ae = 0,1$  mm – Experimento 3<sup>3</sup>.

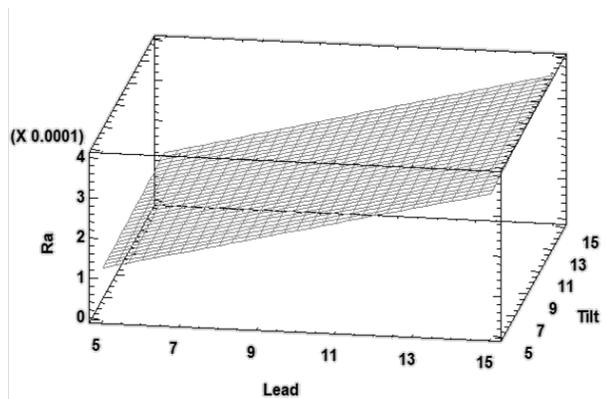


Figura 12. Superficie de respuesta  $Ae = 0,075$  mm – Experimento 3<sup>3</sup>.

Por medio del proceso de refinación aumentando un nivel sobre cada factor, el efecto principal con mayor influencia es el ángulo *lead*. En la misma magnitud se aprecia la influencia del avance transversal.

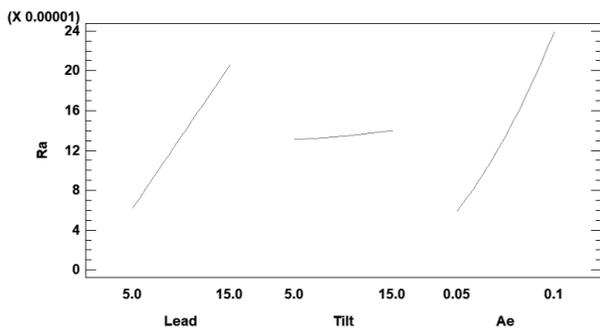


Figura 13. Efectos principales de factores *lead*, *tilt*, *Ae*.

El error entre los modelos geométricos y los modelos experimentales aumenta a medida que el ángulo *tilt* sobrepasa la magnitud descrita por la ecuación 8, en donde la inclinación de la herramienta distorsiona el perfil de los surcos (Figura 14). Esta geometría se presenta

cuando los filos radiales de la herramienta entran en contacto con la cresta anterior.

$$h_s = \begin{cases} R_0 + N_i, & \text{si } Ae \leq 2R_0 \cos(\beta) \\ R_0 + N_s, & \text{si } Ae \geq 2R_0 \cos(\beta) \end{cases} \quad (8)$$

En donde

- $h_s$ : altura de cresta
- $R_0$ : radio de herramienta
- $N_i$ : distancia de centro de herramienta a cresta
- $N_s$ : distancia de centro de herramienta a cresta
- $Ae$ : avance transversal
- $\beta$ : *tilt*

Sobre estos los perfiles generados por un ángulo *tilt* mayor a 45° no es viable posicionar una elipse con semiejes centrados. En síntesis, el modelo analítico pierde validez.

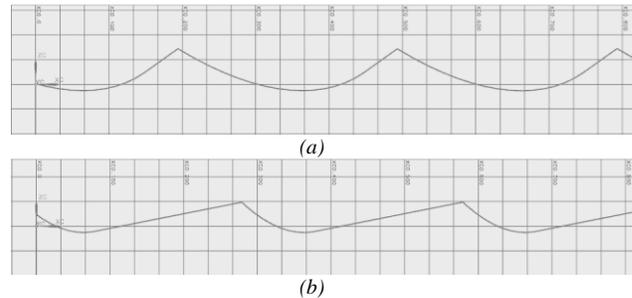


Figura 14. Perfil transversal de superficie (a) *lead* 65°, *tilt* 45°,  $Ae$  0,1 mm.

### 5. Conclusiones

El análisis geométrico de la intersección entre los volúmenes de la herramienta y la pieza de trabajo permite realizar aproximaciones de desviaciones de tercer orden. La geometría del cuerpo resultante tiene características compartidas con la sección transversal de corte o viruta no deformada.

Aplicando modelos para simulación es viable la apreciación de rugosidades sobre superficies maquinadas. La aplicación de métodos como el presentado en este trabajo puede extrapolarse a superficies libres.

En el experimento 2<sup>3</sup> se determina la zona de influencia de los factores, en donde pueden ubicarse los posibles valores óptimos de rugosidad. En la Figura 15. Zona de influencia de ángulos *lead* y *tilt*. se muestran valores bajos de rugosidad en valores elevados de ángulos *lead* y *tilt*.

Del modelo experimental  $3^3$  es posible determinar el valor óptimo de rugosidad ( $0,3 \mu\text{m}$ ), el cual está ubicado por los valores de la Tabla 6 y representado en la superficie de respuesta estimada de la Figura 16.

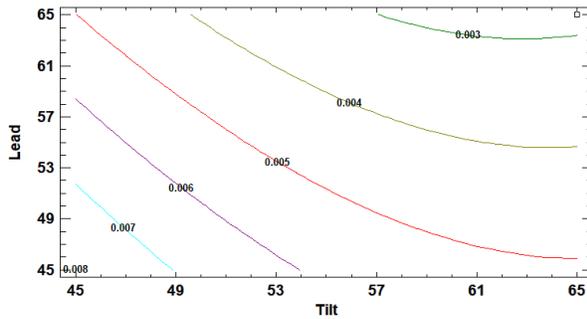


Figura 15. Zona de influencia de ángulos lead y tilt.

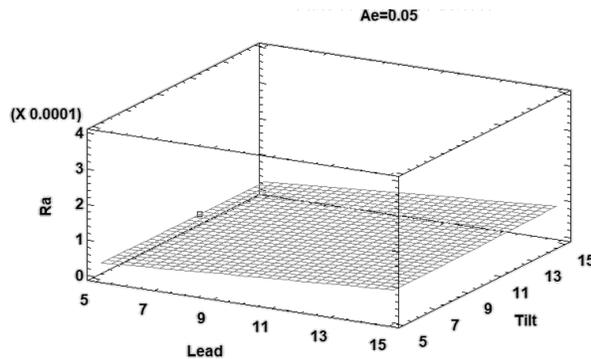


Figura 16. Superficie de respuesta estimada para valor óptimo de rugosidad.

Tabla 6. Valores de factores para óptimo de rugosidad.

Factor	Óptimo
Lead [°]	5
Tilt [°]	11,06
Ae [mm]	0,05

Para la ejecución de estrategias de acabado superficial, con herramientas de punta plana, es imperativo el control de al menos cinco ejes. Mantener constante los ángulos lead y tilt sobre la superficie requiere maquinas herramientas CNC con  $5^\circ$  de libertad.

### Referencias

[1] K. D. Bouzakis, P. Aichouh, and K. Efstathiou, “Determination of the chip geometry, cutting force and roughness in free form surfaces finishing milling, with

ball end tools,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 43, no. 5, pp. 499–514, 2003. doi: 10.1016/S0890-6955(02)00265-1

[2] P. G. Benardos and G. C. Vosniakos, “Predicting surface roughness in machining: A review,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 43, no. 8, pp. 833–844, 2003.

[3] X. Chen, J. Zhao, Y. Dong, S. Han, A. Li, and D. Wang, “Effects of inclination angles on geometrical features of machined surface in five-axis milling,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 65, no. 9–12, pp. 1721–1733, 2013. doi: 10.1007/s00170-012-4293-y

[4] S. M. Wu, “Statistical evaluation and its relationship to of surface finish parameters studies illustrating the influence of common cutting parameters on the workpiece surface roughness for single point turning have been performed by a number of investigators I-1,” vol. 1, 1977.

[5] P. Benardos and G. . Vosniakos, “Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi’s design of experiments,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 18, no. 5, pp. 343–354, 2002. doi: 10.1016/S0736-5845(02)00005-4

[6] J. A. García Barbosa, J. M. Arroyo Osorio, and E. Córdoba Nieto, “Simulation and verification of parametric numerical control programs using a virtual machine tool,” *Prod. Eng.*, vol. 8, no. 3, pp. 407–413, 2014.

[7] Y. Sahin and A. R. Motorcu, “Surface roughness model for machining mild steel with coated carbide tool,” *Materials and Design*, vol. 26, no. 4. pp. 321–326, 2005.

[8] S. K. Gupta, T. R. Kramer, D. S. Nau, W. C. Regli, and G. Zhang, “Building MRSEV models for CAM applications,” *Adv. Eng. Softw.*, vol. 20, no. 2–3, pp. 121–139, 1994. doi: 10.1016/0965-9978(94)90054-X

[9] B. S. Reddy, J. S. Kumar, and K. V. K. Reddy, “Optimization of surface roughness in CNC end milling using response surface methodology and genetic algorithm,” *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 8, pp. 102–109, 2011.

[10] J. Qu and A. J. Shih, “Analytical surface roughness parameters of a theoretical profile consisting of elliptical arcs,” *Mach. Sci. Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 281–294, 2003.