

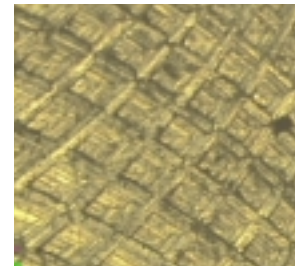
Caracterización de superficies maquinadas por medio de parámetros de rugosidad

F. Eugenio López Guerrero, Raúl Cavazos Flores, Mario Delgado Acosta
Sistemas Integrados de Manufactura, División de Ingeniería Mecánica,
FIME-UANL, México
elopez@uanl.mx

ABSTRACT

The proper functioning of a machined part depends on the quality of its surface. The term “surface quality” includes not only the dimensional values of the surface, but also material properties such as hardness and metallurgical structure¹ as well as optical and esthetic characteristics. The dimensional quality is related with the surface irregularities and is known as the “roughness surface”. The importance of the roughness of the final finish has been well appreciated.

This work proposes a method based on the decomposition of the roughness in terms of the frequency analysis in order to identify the tool marks on a machined surface. As result, the relationship between the feed rate and roughness is clarified.



KEYWORDS

Roughness, characterization, surface, machining.

INTRODUCCIÓN

La calidad de un producto está directamente relacionada a las desviaciones de éste con respecto al diseño original debido a fallas en los procesos de manufactura. Esto influye directamente en la funcionalidad de la pieza. Bajo ese punto de vista, la falla está definida por la incapacidad del tren de producción de funcionar de una manera esperada y, en la mayoría de los casos, se manifiesta en el producto en términos de calidad.

En los procesos de maquinado, las características superficiales del producto influyen en su funcionalidad. La figura dominante en una superficie está influenciada por el método de maquinado, ya que cada tipo de herramienta de corte deja marcas distintivas en la superficie.

Se pueden distinguir tres aspectos que influyen en la calidad de la superficie de los productos maquinados:

1. Condiciones y características de la herramienta.
2. Condiciones de operación de la máquina-herramienta.
3. Propiedades mecánicas de la pieza de trabajo.



Fig. 1. Imagen reconstruida de forma virtual, a partir de imagen de microscopio tomada a 40X que muestra la superficie maquinada de una aleación Aluminio 6063.

El identificar la influencia que estos aspectos tienen en las superficies maquinadas permite mejorar los parámetros de corte, detectar eventuales fallas de maquinado (tales como vibraciones, malas sujeciones, etc) y encontrar situaciones de trabajo que den como resultado una mayor calidad en el producto.

A continuación se plantea una metodología para caracterizar las superficies maquinadas. Este trabajo centra su base en caracterizar la superficie maquinada identificando las componentes de la huella de la herramienta y las características de rugosidad asociadas a las propiedades del material al ser maquinado.

OBJETIVOS

Los objetivos particulares del presente trabajo son:

- a) observar la rugosidad en función de la velocidad de avance en una superficie maquinada,
- b) caracterizar la huella de la herramienta,
- c) encontrar los parámetros mejorados de avance de herramienta para mejorar la calidad superficial del producto,
- d) finalmente se plantea como mejorar el desarrollo de un método de predicción de características de superficie a partir de los valores de los parámetros de corte y las propiedades de los materiales.

MARCO TEÓRICO

Las superficies de maquinado generadas por medio de los procesos de arranque de viruta exhiben características topográficas^{2,3} que juegan un papel fundamental en el desempeño de la funcionalidad del producto, y pueden estar determinadas por las con-

diciones de trabajo como fricción, lubricación, estética, etc.

En la comprensión de los procesos que generan superficies es crucial la relación entre la calidad de la superficie y su comportamiento funcional.⁴ Esta comprensión puede lograrse a través de una técnica adecuada de caracterización y síntesis de las superficies.

Los métodos para analizar superficies se basan en su caracterización por medio de medidas convencionales (altura promedio, distancia de pico a pico máxima, etc), por medio de transformaciones matemáticas (onduletas o «wavelets», análisis de frecuencia, etc) y métodos nuevos como la geometría de fractales, entre otros.^{5,6}

Rugosidad por método convencional.

El término rugosidad superficial⁷ es cuantificado por parámetros relativos a características de la superficie (ver figura 2), tales como:

- a) Rugosidad, irregularidades más pequeñas y finamente separadas a lo largo de la más corta longitud de muestreo de la superficie maquinada,
- b) ondulación, irregularidades más grandes, dentro del nivel siguiente superior de la longitud de muestreo. La separación de los picos y valles es mayor y la longitud de muestreo es, por lo tanto, más larga que la de rugosidad,
- c) Sesgo de superficie, se asocia con la orientación de la figura de la superficie. Esto describe la dirección de la figura dominante en la superficie, generada por el método de maquinado,
- d) Imperfecciones propias del material, éstas comprenden inclusiones de material, estrías, grietas, agujeros y otras deformaciones no intencionales de la superficie.

La definición estándar de la rugosidad se representa con los parámetros R_a y R_z .

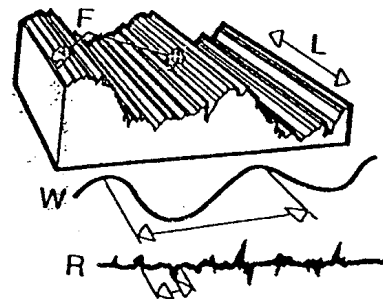


Fig. 2. Vista ampliada de una superficie maquinada, rugosidad (R), ondulación (W), sesgo de la superficie (L), imperfecciones del material (F).

Ra es referida al promedio de las alturas graficadas en una muestra dada de datos, representa el primer momento estadístico de la muestra (ecuación 1).

$$Ra = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^N |Datos| \quad (1)$$

La altura máxima de pico a valle en una muestra de datos es Rz (ecuación 2).

$$Rz = |max(Datos)| \quad (2)$$

Estos dos conceptos son los más aplicados en los trenes productivos.

Las relaciones entre el proceso convencional y la calidad superficial han cambiado por los perfeccionamientos en herramientas de corte y maquinaria.

Esto significa también que el modelo del costo convencional entre el nivel de calidad de acabado y los costos de manufactura ha cambiado. En la tabla I se muestran los costos relativos de obtención de diferentes grados de Ra².

Caracterización por medio del espectro de frecuencias

Algunos de los comportamientos funcionales de la calidad de las superficies maquinadas pueden lograrse solamente bajo su caracterización. La caracterización en el dominio de la frecuencia se logra utilizando un análisis en términos de frecuencia para posteriormente transformar las características al dominio del espacio.

Tabla I.- Costo de obtención de Ra para diferentes clases de acabado.

Clase	Rugosidad, Ra (µm)	Costo relativo de obtención
Espejo	0.10	40
Pulido	0.20	35
Ground	0.40	25
Terso	0.80	18
Fino	1.60	13
Semifino	3.2	9
Medio	6.3	6
Semirugoso	12.5	4
Rugoso	25	2
Limpio	50	1

La descomposición de una señal en su espectro de frecuencias se logra aplicando la transformada de Fourier. Ver ecuación (3).

$$C_j = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} V_k \cdot e^{2\pi i \left(\frac{j}{n}\right)k} \quad (3)$$

En donde

C vector resultado de la transformada de Fourier

n número de datos

V vector conteniendo la señal muestreada

j coeficiente del vector resultado C

k coeficiente del vector de frecuencias C

i unidad imaginaria

El algoritmo de la transformada rápida de Fourier regresa vectores cuyos elementos son las amplitudes complejas de las diferentes frecuencias que componen la señal original. El número de datos de la señal muestreada cumple con la condición, de la ecuación (4).

$$K = 2^n \quad (4)$$

Ya que para datos reales la segunda mitad de la transformada es el conjugado de la primera. Una vez aplicado el algoritmo se puede conocer la frecuencia asociada al elemento j, (ecuación 5):

$$F_k = \frac{j}{n} \cdot f_s \quad (5)$$

En donde

F_k frecuencia asociada al coeficiente j

f_s frecuencia muestreada

Filtrado y reconstrucción

Si se desea filtrar una zona específica del espectro, basta con hacer cero los valores del rango de la frecuencia no deseada.

Sean los valores límites de esa zona: Lim_{in} y Lim_{su}, entonces

$$c_p = 0 \quad (6)$$

para Lim_{in} > p > Lim_{su}.

La señal filtrada se reconstruye aplicando la transformada inversa de Fourier. Los cálculos de rugosidad convencionales Ra y Rz hechos sobre esta señal reconstruida pueden compararse con los cálculos hechos con la señal original.

$$FRa = \frac{1}{\left(\frac{n}{2}\right)} \left(\sum_j |v_j| \right) \tag{7a}$$

$$FRz = |max(v) - min(v)| \tag{7b}$$

En donde

v vector resultado de la transformada inversa de Fourier

j coeficiente del vector de frecuencias C

n/2 número de elementos según la condición de la ecuación (4).

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El material usado en los experimentos fue una aleación de aluminio comercial forjada⁸ tipo AlMgSi 6063. Se cortó en piezas de 88.9 x 50.8 x 12.7 mm.

Se hizo una ranura para cada velocidad de avance, según la tabla III, fresando con una herramienta cilíndrica. Los valores de corte se muestran en la tabla II. No se utilizó refrigerante.

Tabla II.- Valores de los parámetros de maquinado.

Número de ábales	N	2
Radio de la herr. (mm)	r	5
Velocidad de giro (rpm)	S	1000
Profundidad de corte (mm)	t	2.54

Tabla III. Avances de corte usados en los experimentos.

Experimento No.	F (mm/min)
1	60
2	70
3	80
4	90
5	100

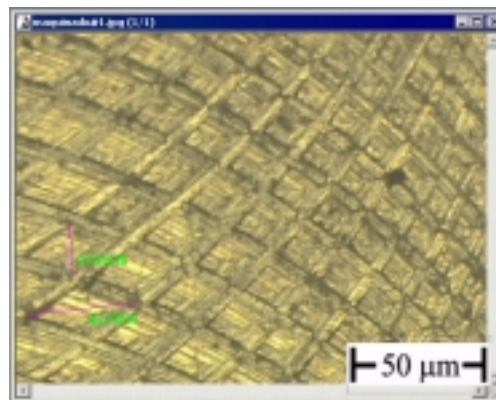


Fig. 3. Imagen de microscopio a 40X que muestra la superficie maquinada de la aleación Al-Mg-Si 6063.

Se tomaron lecturas con un rugosímetro provisto de una probeta de radio 0.002mm y un espaciamiento de 0.00025mm. La longitud de barrido fue de 40,000 datos (10mm), de los cuales se analizó una muestra representativa (ver figura 4).

RESULTADOS

Los perfiles reconstruïdos sin tendencia a partir de los datos obtenidos por el rugosímetro se representan en la figura 4.

Método convencional

La tabla IV muestra los resultados de los valores Ra y Rz.

Los valores de rugosidad Ra y Rz se incrementan para velocidades de avance bajas (ver figuras 5 y 6), y disminuye conforme se incrementa la velocidad de avance. Los picos máximos representan baja calidad superficial.

Método de descomposición de frecuencias

Los espectros de frecuencia para cada uno de los experimentos se muestran en la figura 7.

Tabla IV. Resultados obtenidos en los experimentos.

F (mm/mi)	Ra (µm)	Rz (µm)
60	100.56	397.91
70	131.93	489.26
80	123.52	822.23
90	115.06	516.10
100	102.28	397.22

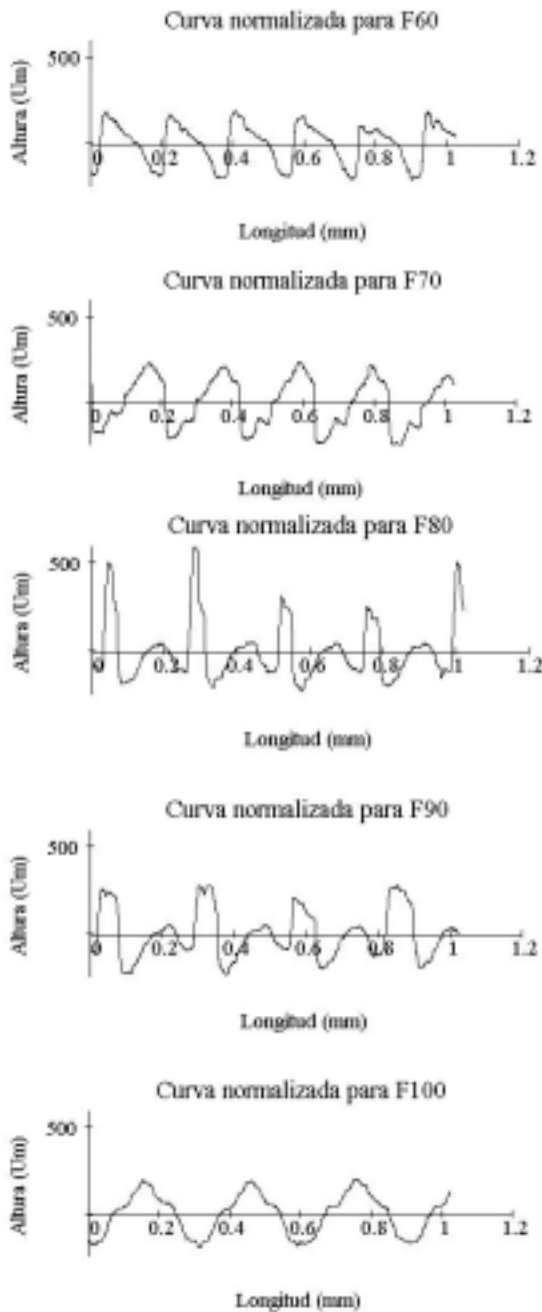


Fig. 4. Perfiles de rugosidad normalizados de los cinco experimentos.

Los espectros muestran una zona de baja frecuencia con intensidades mayores al resto. Las tablas V a IX presentan los valores significativos de frecuencia y sus índices. Los valores de filtrado de frecuencia se seleccionaron observando que el filtro fuera aplicado a esta zona.

Los valores límites de las frecuencias de las tablas V a IX son 1 y 20: Los valores de Ra y Rz de las

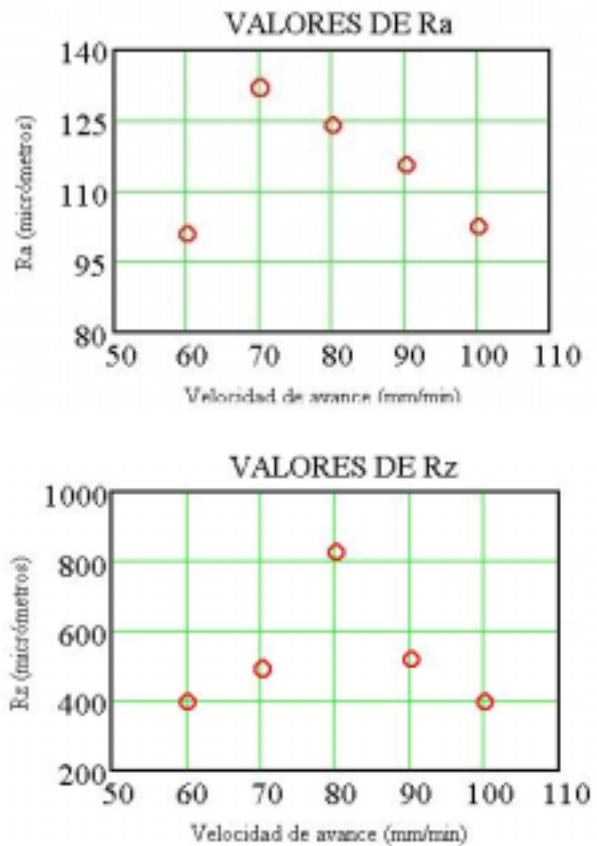


Fig. 6. Gráfico de comparación de Rz entre los 5 experimentos.

Tabla V. Valores obtenidos aplicando la FFT en el experimento de F60.

Frecuencia más significativa	Frecuencia (ciclos/ μm)	Intensidad
1	6	3515
2	5	2778
3	11	1887
4	17	1162

Tabla VI. Valores obtenidos aplicando la FFT en el experimento de F70.

Frecuencia más significativa	Frecuencia (ciclos/ μm)	Intensidad
1	5	5775
2	10	1799
3	4	1239
4	15	1004

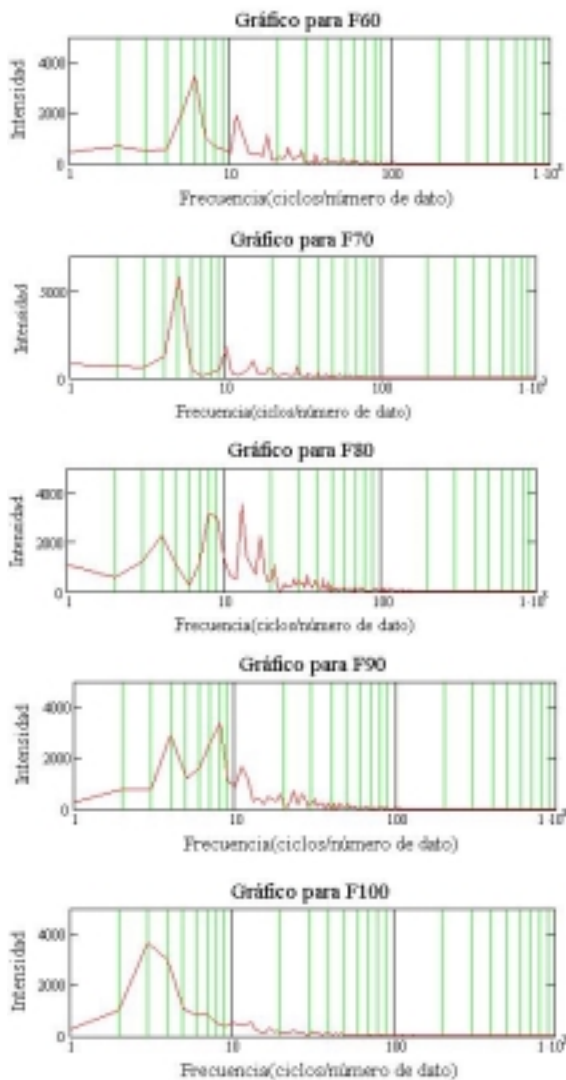


Fig. 7. Gráfico en escala semilogarítmica mostrando los espectros de frecuencia de los cinco experimentos.

Tabla VII. Valores obtenidos aplicando la FFT en el experimento de F80.

Frecuencia más significativa	Frecuencia (ciclos/ μm)	Intensidad
1	13	3563
2	8	3196
3	9	3012
4	4	2292

señales reconstruidas con estos límites se muestran en la figura 8 y 9.

En donde:

Es el valor de rugosidad antes de filtrar.

Es el valor de rugosidad después de filtrar

Tabla VIII. Valores obtenidos aplicando la FFT en el experimento de F90.

Frecuencia más significativa	Frecuencia (ciclos/ μm)	Intensidad
1	8	3376
2	4	2914
3	7	2597
4	11	1692

Tabla IX. Valores obtenidos aplicando la FFT en el experimento de F100.

Frecuencia más significativa	Frecuencia (ciclos/ μm)	Intensidad
1	3	3700
2	4	2993
3	5	1068
4	2	1038

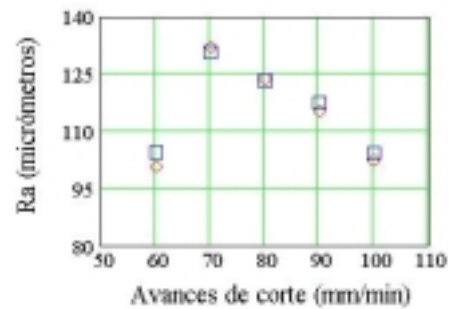


Fig. 8. Gráfico de comparación de Ra entre los 5 experimentos analizados.

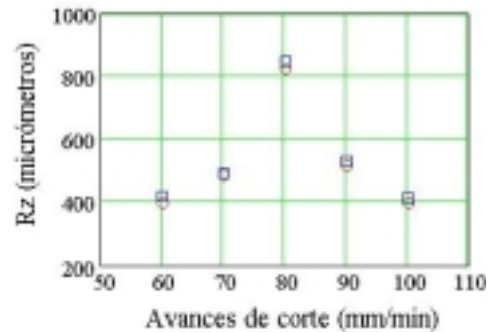


Fig. 9. Gráfico de comparación de Rz entre los 5 experimentos analizados.

CONCLUSIONES

La huella de la herramienta está determinada por las primeras cinco componentes de baja frecuencia del espectro. Con ello es posible caracterizar la huella de la herramienta en una superficie maquinada bajo las condiciones experimentales presentadas.

Los valores convencionales de R_a y R_z representan esencialmente la huella de la herramienta, por lo que es posible mejorar la calidad de la superficie en términos de la herramienta de maquinado.

Se demostró la influencia de la velocidad de avance sobre la calidad superficial, y se encontró una velocidad de avance que produce mejor calidad superficial.

Es de esperarse que los valores de alta frecuencia del espectro determinen la rugosidad del material al ser maquinado. Con ello sería posible encontrar el valor de rugosidad óptimo bajo las condiciones de corte utilizadas.

Utilizando el método de manera inversa, es posible calcular los valores con los que una superficie fue maquinada a partir de su análisis de rugosidad.

MEJORAS A DESARROLLAR

El presente trabajo utilizó valores de corte necesarios para obtener superficies con rugosidades acentuadas y por lo tanto fácilmente identificables. Futuros trabajos deberán considerar valores de corte y herramental para acabados de alta calidad.

Es deseable hacer un análisis de rugosidad microscópico para establecer una relación entre las componentes de alta frecuencia de los espectros y las características de rugosidades a ese nivel en la zona maquinada. Es de esperarse que exista un valor característico de rugosidad del material al ser maquinado.

Estudios comparativos utilizando técnicas como ésta o similares podrán determinar diferencias y similitudes entre las propiedades de rugosidad natural (como por ejemplo superficies en grietas de fractura) y rugosidades en superficies maquinadas.

RECONOCIMIENTOS Y EQUIPO UTILIZADO

El presente trabajo fue realizado por los autores como parte de su proyecto de investigación en el Doctorado de Materiales FIME-UANL bajo el apoyo de PROMEP y PAICYT 2001 (contrato CA556-01), CONACYT 2002 (contrato 37668-U) utilizando las instalaciones del Centro de Manufactura Integrada

por Computadora y del Programa Doctoral de Materiales de la FIME UANL:

- Rugosímetro marca Mitutoyo surfest 211 series 178
- Centro de maquinado EMCO VMC 300
- Microscopio óptico NIKON a 5X, 20X, 40X y 100X

Los autores agradecen el apoyo de la M.C. Guadalupe Ramírez López de la Coordinación de Servicio Social de FIME y al Prof.Dr. Alberto Pérez del Programa Doctoral en Materiales de FIME.

REFERENCIAS

1. Cheng-Gui-Li, Shen Dong, Guo-Xiong Zhang, Evaluation of the anisotropy of machined 3D surface topography 12 Oct. 1999.
2. Hinojosa, M., Reyes, M. La rugosidad de superficies: Topometría. Revista Ingenierías vol. IV, No. 11.
3. G. Galante A. Lombardo, M. Piacentini,. Fractal dimension: A useful tool to describe the microgeometry of machined surfaces 15 Julio 1992.
4. Tsu-Wei Hwang. Analysis of surface quality in machining of metals and advanced ceramics. Thesis report doctoral's degree, Faculty of the Graduate School of the University of Maryland 1992.
5. S Gopalakrishnan Development of a prototype System for on line monitoring of surface Roughness using fractal geometry. Thesis report master's degree Institute for Systems Research University of Maryland 1994.
6. Don. L. De Voe. An optical area-scattering based approach for the measurement of surface Roughness formed during machining. Thesis report master's degree, Faculty of the Graduate School of the University of Maryland 1993.
7. Metals Handbook 9th edition, vol 6 "Aluminium". ASM International, 1989.
8. Cavazos García, José Luis. Tratamiento térmico de una aleación de aluminio 6063. Tesis Doctoral FIME-UANL, 1998.
9. Metals Handbook 9th edition, vol 16 "Machining". ASM International, 1989.