

# MODELADO DE SUPERFICIES MAQUINADAS UTILIZANDO UNA METODOLOGÍA BASADA EN CAPAS

A48DM13

Eugenio López, Miguel Ruiz, Francisco Ramírez, Javier de la Garza, José Luis Castillo  
Cuerpo Académico de Sistemas Integrados de Manufactura.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León,  
Av Universidad s/n, Apdo. Postal 9-"F", CP. 66450, San Nicolás de los Garza, N.L., México.  
Teléfono: (0052-81) 8329-4020. Fax: (0052-81) 8332-0904.

Correo electrónico [elopez@uanl.mx](mailto:elopez@uanl.mx)

## ABSTRACT

The surface characteristics of a machined part in the functional performance of it have a great effect. In the case of elements of mechanisms the surface influences in the behavior of the parts in contact, while in the case of injection molds, this influence is not only present in the aesthetic appearance of the final product, but rather it can be decisive in phases of the manufacturing process.

In previous works [1, 2, 3, 4] frequency spectrum analysis has been presented to determine the influence of the machining parameters on the surface of products and factors have been identified for having direct influence in the surface quality.

This work presents a method for machined surface modeling based on layers, using the most significant values from roughness in different ranges to generate each layer, in such a way that is possible to produce synthetic surfaces and expect to predict surface characteristics for given machining situations.

**Keywords:** roughness, frequencies spectrum, surface modeling, free surfaces, shape optimization.

## RESUMEN

Las características de superficie de una pieza maquinada tienen un gran efecto en el desempeño funcional de la misma. En el caso de elementos de mecanismos la superficie influye en el comportamiento de las partes en contacto, mientras que en el caso de moldes de inyección, dicha influencia se presenta no solamente en la apariencia estética del producto final, sino que puede ser determinante en fases del proceso de manufactura.

En trabajos anteriores [1, 2, 3, 4] se han presentado análisis espectrales de frecuencia que determinan la influencia de los parámetros de maquinado en la superficie de productos, y se han identificado factores de maquinado de influencia directa en la calidad superficial.

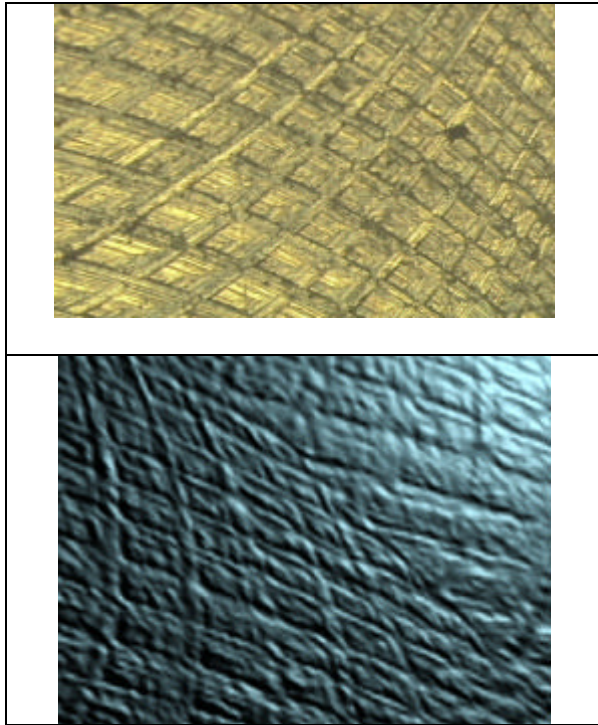
Este trabajo presenta un método para modelar superficies maquinadas en base a capas, utilizando para generar cada capa los valores más significativos de la rugosidad a diferentes rangos, de tal manera que es posible producir superficies sintéticas y con ello se espera predecir características de superficie para situaciones de maquinado dadas.

**Palabras clave:** rugosidad, espectro de frecuencias, modelado de superficies, superficies libres, optimización de forma.

## INTRODUCCIÓN

Para realizar un análisis de la calidad de una superficie maquinada se requiere de la correlación de los parámetros de corte y los efectos que producen sobre dicha superficie. Estos efectos se pueden traducir en características superficiales como rugosidad, brillo, color entre otros.

Este trabajo plantea un método para generar capas que describen las propiedades más significativas de una superficie maquinada. Utiliza como datos de entrada los valores experimentales de parámetros de corte de maquinado y análisis superficial. A partir de ello se generan capas que describen huella de la herramienta, la ondulación y la rugosidad a baja y alta escala de la superficie maquinada.



**Fig. 1.-** Superficie a) vista con un microscopio óptico y b) generada por computadora incluyendo propiedades de brillo.

El método de capas es introducido en este trabajo para proveer una herramienta simple que sirva en la producción de las superficies requeridas según las especificaciones de diseño. Se espera que la aplicación del método pueda ser usado para predecir las características de superficies maquinadas.

## OBJETIVOS

Los objetivos particulares de este trabajo son:

- Determinar la relación de parámetros de corte y la calidad superficial para modelar superficies de maquinado.
- Encontrar un método para el modelado de superficies maquinadas.
- Establecer las bases de un método de predicción de la calidad superficial de piezas maquinadas.

## ANTECEDENTES

El análisis de calidad superficial de piezas maquinadas se mide tradicionalmente por medio de la rugosidad promedio ( $R_a$ ) y la rugosidad máxima ( $R_z$ ). Sin embargo este método no refleja todos los detalles que permitan el ajuste fino de los parámetros de corte,

haciendo necesarios estudios para mejorar la calidad de superficies maquinadas.

En años recientes, coincidiendo con el desarrollo de microcomputadoras, instrumentación digital y otras técnicas de medición, se han perfeccionado las técnicas de topografía de superficies. Muchos sistemas de medición tridimensional se han propuesto y desarrollado. Algunos investigadores han presentado parámetros de evaluación de la topografía de superficie tridimensional, al igual que han investigado las características de las superficies resultantes del maquinado. A continuación se presenta algunos trabajos significativos:

El trabajo de Yean, Kai, Ong y Feng se centra en la creación de texturas maquinables [5]. Este trabajo propone la conversión de fotografías digitales a superficies de relieve que pueden ser utilizadas para programar trayectorias de herramienta, las cuales son comprobadas por medio de una simulación. Sin embargo, las condiciones de corte no son consideradas, ni las propiedades de los materiales. Esto no permite concluir si la textura propuesta es en realidad maquinable o no.

Cheng-Gui evalúa la rugosidad maquinada proveniente de torneado y esmerilado finos por medio de geometría de fractales y momentos espectrales de superficie [6]. Este trabajo se centra en la mejora del comportamiento de partes de contacto. Se presenta el análisis de la rugosidad y su caracterización por medio del comportamiento de amplitudes y frecuencias de la señal muestreada. Los resultados presentados son el coeficiente de rugosidad, el ángulo de perfil, segundo momento espectral, la dimensión fractal, el coeficiente de escalamiento y el valor de anisotropía dimensional.

Zhang y Kapoor presentan en la primera parte de un estudio sobre modelado de superficies [7] un modelo para la generación dinámica de textura tridimensional de superficies maquinadas. En este trabajo desarrolla un modelo del sistema aleatorio de excitación que es responsable de la porción aleatoria del perfil superficial. Posteriormente presentan una metodología para generar dinámicamente la superficie topografía a través de una simulación por computadora. La metodología propuesta usa el movimiento y el vibratorio movimiento geométrico de la herramienta para construir la topografía de la superficie maquinada.

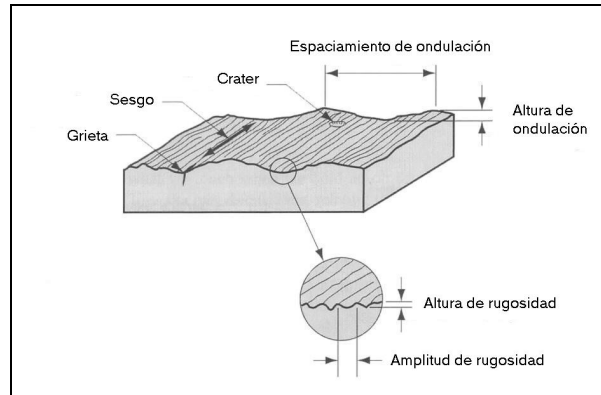
Lin y Gian [8] proponen una metodología para generar código de maquinado a partir de los datos tridimensionales provenientes de aparatos de medición de rugosidad sobre superficies maquinadas. Diversos algoritmos se desarrollaron para automatizar la generación de los planes de proceso, que contienen información detallada necesaria para el maquinado de control numérico.

## MODELADO DE SUPERFICIES POR MEDIO DE CAPAS

La calidad superficial puede ser definida por cuatro elementos: rugosidad, ondulación, imperfecciones del material y sesgo de la superficie resultado del proceso de formado. La textura superficial consiste en finas irregularidades (picos y valles) o desviaciones repetidas o al azar de la superficie nominal de un objeto (ver Figura 2).

- Rugosidad: se refiere a las desviaciones pequeñas y finamente espaciadas de la superficie nominal que son determinadas por las características del material y la acción del corte por medio de los filos de la herramienta.
- Ondulación: es la desviación de mayor espaciamiento en comparación con la rugosidad, y se deben a vibraciones, tratamientos térmicos y métodos de producción.
- Imperfecciones del material: se definen como las irregularidades que ocurren en la superficie como grietas, inclusiones, etc.
- Sesgo de la superficie: es la dirección predominante de la textura superficial, y es determinada por el método de manufactura usado para crear la superficie, que usualmente es por la acción de una herramienta de corte.

Estos elementos pueden ser analizados por separado mediante la creación de capas que representen las características de cada uno de ellos. Estas capas modelan la ondulación, rugosidad macroscópica y microscópica, la huella de la herramienta. La figura 3 muestra las capas en las que fue separada el modelo de superficie maquinada.



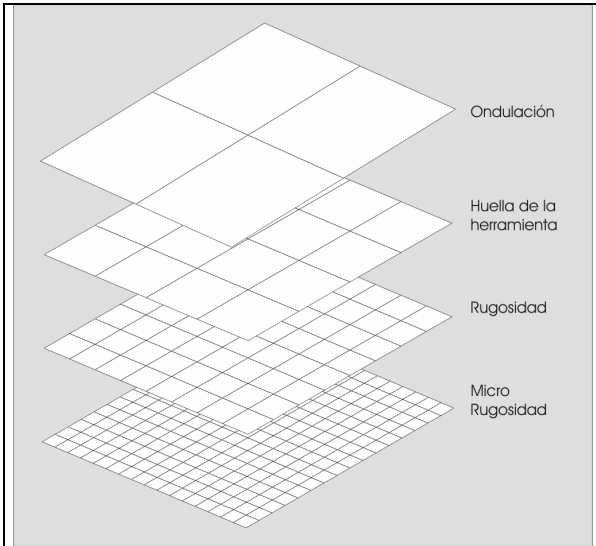
**Fig. 2.-** Gráfica de una superficie maquinada mostrando rugosidad, ondulación, sesgo de la superficie e imperfecciones del material.

Para generar la capa de la huella de la herramienta se emplea la ecuación matemática que describe el movimiento de los filos de la herramienta. Conociendo la trayectoria en dos dimensiones de los filos de la herramienta es posible crear un modelo en tres dimensiones empleando programas de diseño por computadora comerciales.

A partir de la señal de rugosidad muestreada, se genera la capa que representa la rugosidad macroscópica. El análisis de rugosidad se puede realizar por medio de un rugosímetro, el cual genera una señal con el perfil de alturas. Dicha señal debe ser filtrada para separar las alturas corresponden a la rugosidad macroscópica de las de la ondulación.

El proceso de análisis para la rugosidad a baja escala es igual al utilizado con la rugosidad macroscópica, cambiando solamente el instrumento de medición. Este trabajo utilizó para ello la microscopía de fuerza atómica.

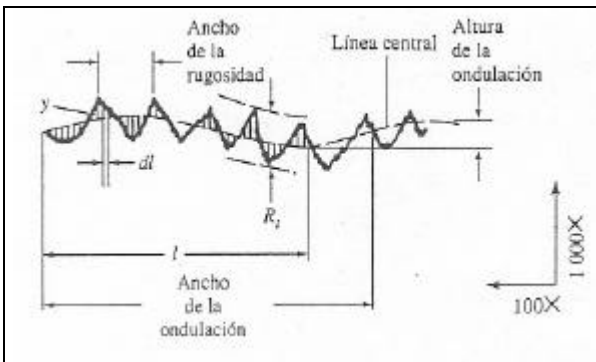
Cada capa se exporta como mapas de bits en escala de gris, donde la altura de las irregularidades del perfil esta en función del tono de gris. Los mapas de bits son representados como matrices, donde cada bit es un número, siendo el 0 el color negro y 255 el blanco. Operaciones aritméticas y lógicas elementales pueden ser empleadas en dichas matrices, para fusionar las capas sintéticas de las diversas características superficiales, generando el modelo de superficies maquinadas.



**Fig. 3.-** El modelo de superficies basado en capas.

#### Capa de ondulación

La ondulación es definida como la desviación de mayor espaciamiento en comparación con la rugosidad. Los parámetros de ondulación son usados para caracterizar espaciamientos de picos y valles de superficies, como se muestra en la figura 4.

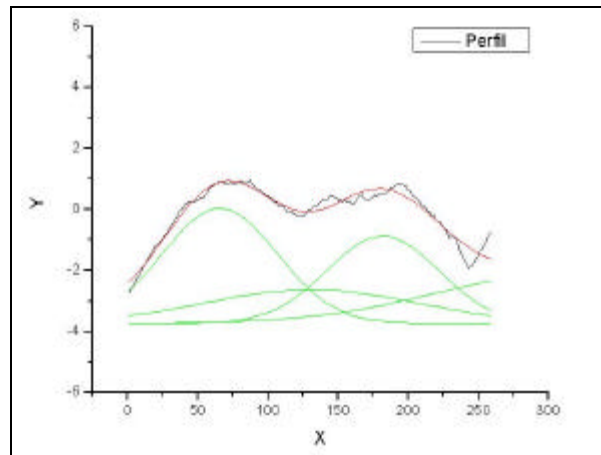


**Fig. 4.-** Diferencia entre rugosidad y ondulación.

Existen varios métodos de ajuste a curva no periódica con ondulaciones, en el presente trabajo es empleado el ajuste a curva de Gauss (ec. 1) por su simplicidad.

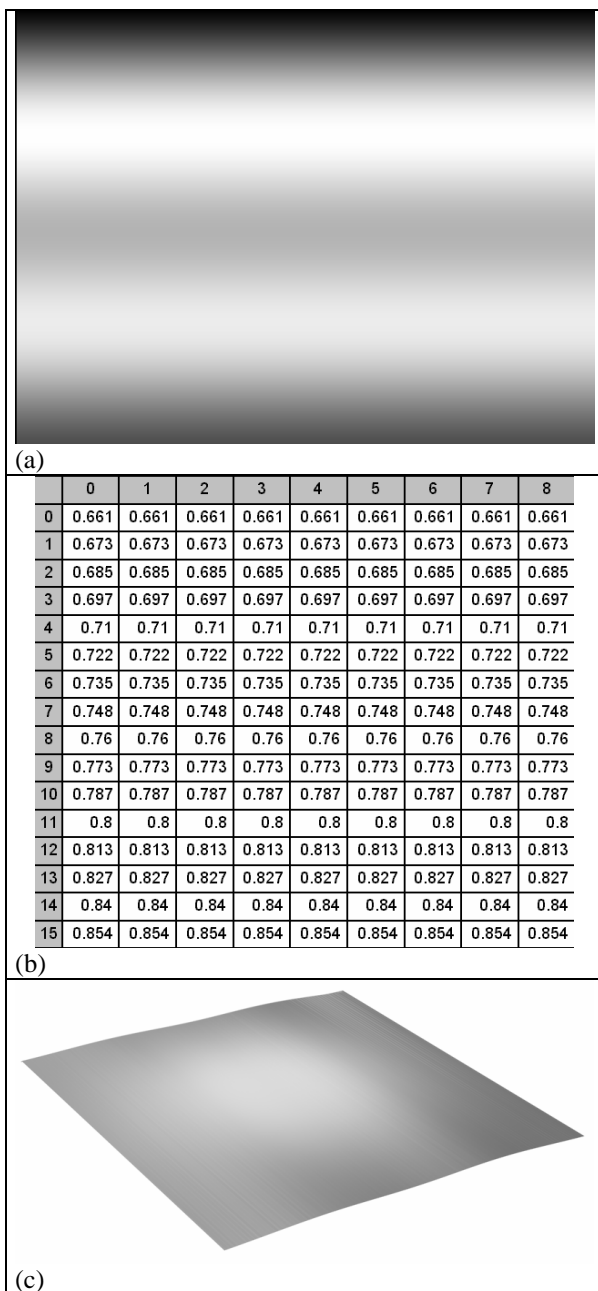
$$y_x := \left[ \frac{A}{w \cdot \left( \frac{\pi}{2} \right)^2} \right] \cdot e^{-2 \left[ \frac{(f \cdot x - x_c)}{w} \right]^2} \quad (1)$$

En donde  $y$  es el ajuste a curva,  $A$  representa el área bajo la curva,  $w$  es la amplitud de la curva,  $x_c$  indica la posición de la curva en el eje  $x$ ,  $f$  es el factor de escala y  $x$  es una variable independiente. La figura 5 muestra el resultado del ajuste a curva.



**Fig. 5.-** Ajuste a curva del perfil de alturas por medio de la ecuación de Gauss. Se suman las curvas de Gauss para formar la curva de ajuste.

Posteriormente se forma una matriz a partir del ajuste, prolongando la curva de ajuste en el eje  $Z$ . Con la matriz se obtiene un gráfico de tonos de gris que es utilizado para formar la capa en tres dimensiones de la ondulación (figura 6).



**Fig. 6.-** Reconstrucción de superficie de ondulación: a)mapa de bits usando la función mostrada en la figura 5, b)matriz numérica de tonos de grises y c)deformación resultante.

### Capa de la huella de la herramienta

Las piezas maquinadas presentan marcas distintivas en su superficie debido al proceso de maquinado al que fueron sometidas y al tipo de herramienta de corte con que el material fue desbastado. En la Figura 7 se presentan los posibles patrones que puede tomar una superficie maquinada.

Símbolo de la huella	Huella superficial	Descripción
=		La huella es paralela a la línea de superficie
⊥		La huella es perpendicular a la línea de superficie
X		La huella esta en ambas direcciones a la línea de superficie.
M		La huella es multidireccional.
C		La huella es circular con respecto al centro de la superficie
R		La huella es aproximadamente radial con respecto al centro.
P		La huella esta particulada, sin dirección o protuberante.

**Fig. 7.-** Posibles huellas de la superficie debidas al proceso de maquinado según la especificación ANSI B46.1-1978.

Considerando el punto radial del filo de una herramienta giratoria que se traslada en un plano, la ecuación de movimiento puede ser descrita en forma paramétrica por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} x(t) &= r \cos(t) + V_x \\ y(t) &= r \sin(t) + V_y \end{aligned} \quad (2)$$

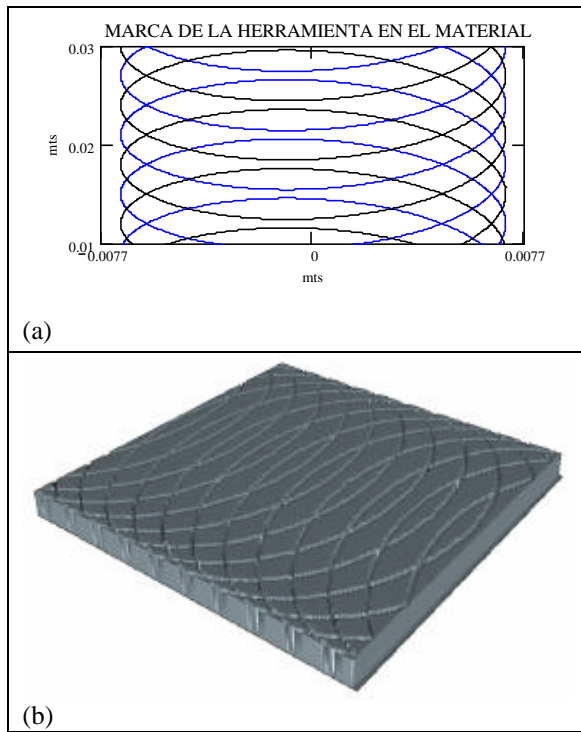
en donde  $t$  es la variable independiente en un rango de  $0 < t < 2\pi$ .  $V_x$  y  $V_y$  son las componentes de la velocidad lineal, que pueden ser representadas en términos del avance programado  $F$ :

$$x(t) = r \cdot \cos(t) + \frac{F_x}{2\pi} \cdot t \quad (3)$$

$$y(t) = r \cdot \sin(t) + \frac{F_y}{2\pi} \cdot t$$

La curva de desplazamiento en relación de un alabe con respecto al otro en cada eje se muestra en la Figura 8.

Utilizando el mismo método se genera la capa de la huella de la herramienta. (Ver Figura 9).



**Fig. 8.**– Reconstrucción de la huella de la herramienta: a)marca de la herramienta con avance de 60 mm/min para los cálculos de la ecuación 2, b)deformación en términos del tono de gris.

### Capa de rugosidad

La definición estándar de la rugosidad se representa con los parámetros Ra y Rz. Estos dos conceptos son los más aplicados en los trenes productivos. Ra es referida al promedio de alturas graficadas en una muestra dada de datos, y representa el primer momento estadístico de la muestra (ec. 4), donde n se define como el número de datos; mientras que Rz es la altura máxima de pico a valle (ec. 5).

$$Ra = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^n |\text{Datos}| \quad (4)$$

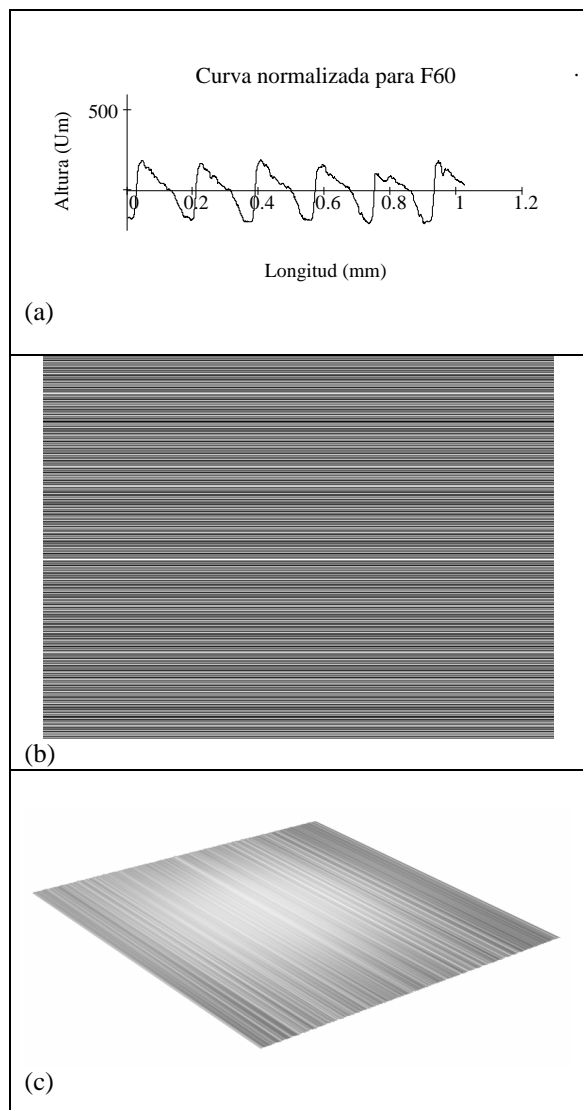
$$Rz = |\max(\text{Datos})| \quad (5)$$

La rugosidad promedio (Ra) es el único parámetro de este tipo definido en las normas de Estados Unidos, Canadá, Países Bajos y Suiza (ANSI 85). También está bien definido en las normas de todos los países industrializados y en las normas internacionales ISO, por lo tanto, es el más utilizado; sin embargo, todas estas normas definen algún o algunos parámetros adicionales como la raíz cuadrada media de las desviaciones del perfil, la proporción del comportamiento de la longitud, el espaciamiento medio de los picos locales o el espaciamiento medio de las irregularidades.

Para el modelado de la capa de rugosidad es necesario medir la superficie maquinada mediante un rugosímetro. Dicho aparato genera una señal que representa el perfil de la superficie de barrido. Se analiza dicha señal por medio del espectro de frecuencias para filtrar la señal a partir de las frecuencias medias ya que ésta corresponde a la rugosidad [4]. Posteriormente se reconstruye la señal mediante la transformada inversa de Fourier y se genera un nuevo perfil.

Posteriormente se hace un ajuste a curva de la señal con las armónicas del espectro resultante y se prolonga dicha curva en el eje z para crear una matriz. Ver figura 9.



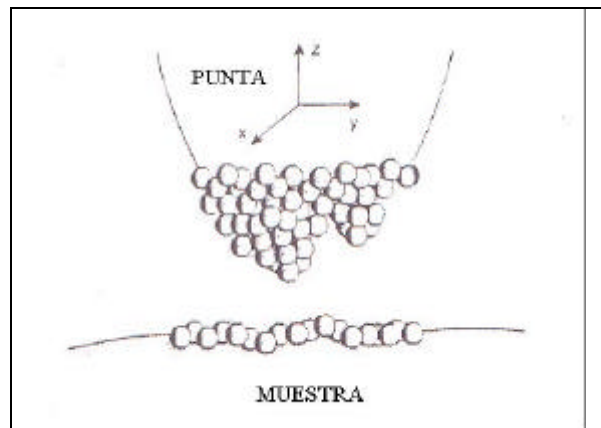


**Fig. 9.**– Modelado de capa de rugosidad: a)curva típica obtenida por medio de un rugosímetro, b)mapa de bits de los datos filtrados, y c)deformación en términos del tono de gris.

### Capa de micro-rugosidad

Las texturas pueden ser clasificadas en dos grupos: macrotextura y microtextura. La microtextura se refiere a superficies que están mas allá del poder de resolución del ojo humano. El rango de microtextura especificado por ANSI B46.1 es de 0 a 50  $\mu\text{m}$ . El rango de acabado superficial obtenido de un proceso de fresado es 1 – 200  $\mu\text{m}$  de acuerdo con la Organización Internacional de Estandarización ISO 4288:1996. Usando una máquina fresadora de control numérico, es posible obtener tolerancias hasta de 10 $\mu\text{m}$ .

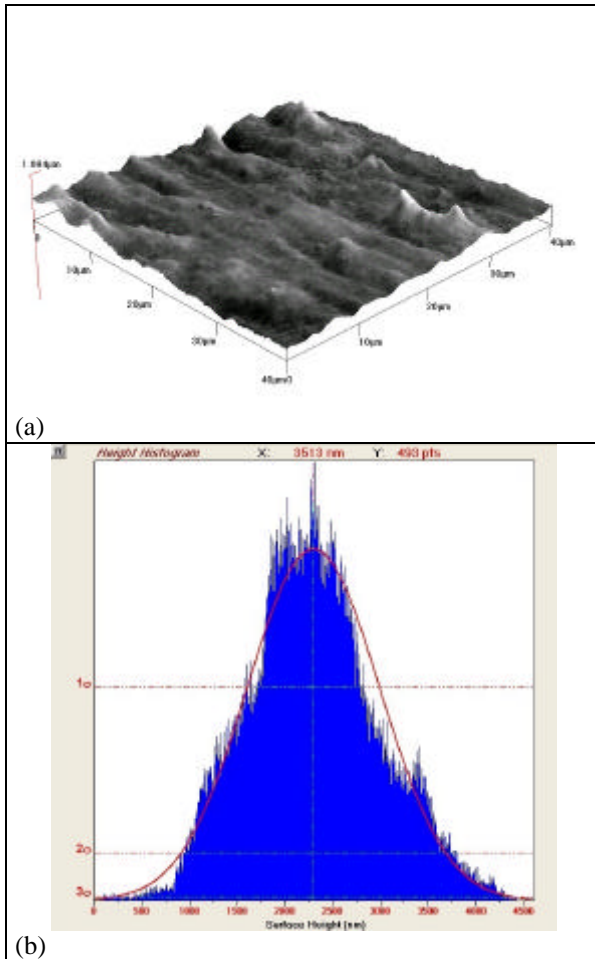
La microscopía de fuerza atómica es una técnica de caracterización de superficies creada en 1968 por G. Binnig, C. Quate y Ch. Gerber. Esta se fundamenta en la construcción de imágenes digitalizadas mediante la medición de las fuerzas repulsivas y atractivas que ocurren entre los átomos de una punta y los de la superficie de la muestra. (Figura 10)



**Fig. 10.**– Punta del microscopio de fuerza atómica (AFM).

Para generar la capa de rugosidad a baja escala, se emplea un microscopio de fuerza atómica que realiza un barrido sobre la superficie maquinada.

Debido a la escala, la altura promedio en nanómetros puede ser considerada como el parámetro de una función de ruido que genera el tono de gris de la capa. Ver figura 11.



**Fig. 11.-** a) Superficie obtenida con el microscopio de fuerza atómica y b) Histograma de alturas.

## PARTE EXPERIMENTAL

Para comprobar el método de reconstrucción se utilizaron las superficies analizadas en trabajos anteriores [1,2,3,4], la situación de maquinado se resume a continuación.

Tabla I. Valores de maquinado utilizados.		
Número de álaves	N	2
Radio de la herramienta (mm)	r	5
Velocidad de giro (rpm)	S	1000
Profundidad de corte (mm)	t	2.54

El material usado en los experimentos fué una aleación de aluminio comercial tipo AlMgSi 6063, forjada. Los valores de los parámetros de corte se muestran en la tabla I. Se fresó con una herramienta cilíndrica y no se utilizó refrigerante.

Tabla II. Avances de corte usados en los experimentos.	
Experimento	F (mm/min)
1	60
2	70
3	80
4	90
5	100

## Medición de ondulación

Para el análisis de ondulación se empleó un brazo de medición por coordenadas con una punta de 3mm de diámetro.

Se obtuvieron 3 perfiles de ondulación para cada uno de los cinco experimentos con coordenadas x, y, z para cada punto. Al igual que en el experimento de rugosidad, estos datos fueron almacenados en archivos de computadora para su posterior análisis.

## Medición de rugosidad

Se utilizó un rugosímetro provisto de una sonda de radio de 2  $\mu\text{m}$ . Se tomaron lecturas con un muestreo de 0.25  $\mu\text{m}$ . La longitud de barrido fue de 10mm, de los cuales se analizó una muestra representativa. Las lecturas del rugosímetro de laboratorio se almacenaron en archivos de computadora. Los valores medidos fueron filtrados para separar la huella de la herramienta [4] de la rugosidad.

## Medición de rugosidad a baja escala

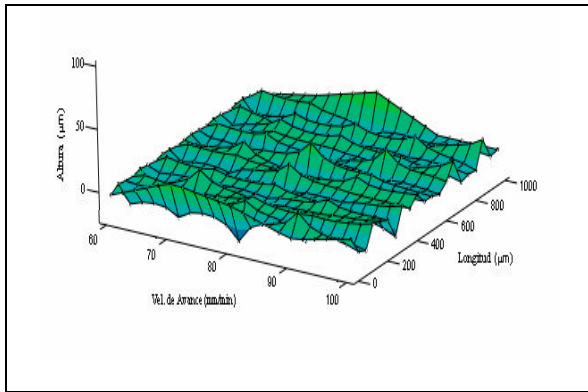
Para el análisis de rugosidad a baja escala se empleó un microscopio de fuerza atómica, en modo de no contacto para realizar los barridos sobre cada uno de los cinco experimentos con una resolución de .08  $\mu\text{m}$  y áreas de 40  $\mu\text{m}$ . Se cortaron piezas de 10 x 10 mm de la superficie de cada experimento.

## RESULTADOS

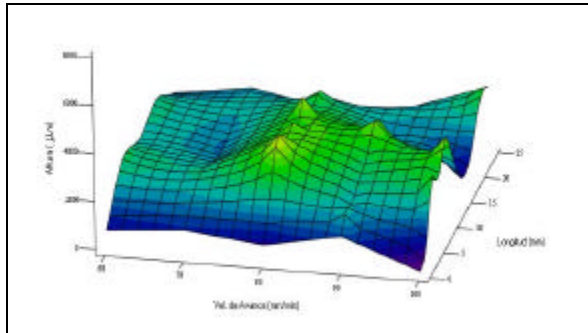
Se realizó un ajuste a curva a los perfiles de rugosidad de los cinco experimentos, empleando la ecuación de las armónicas más representativas de la señal muestreada. se modelaron capas de cada una de las características superficiales y se sumaron para reconstruir virtualmente la superficie maquinada.

En las figuras 12 y 13 se muestra el diagrama de ondulación y rugosidad con respecto a la velocidad de avance. En la Tabla III se muestran las alturas promedio.





**Fig. 12.-** Diagrama de rugosidad con respecto a la velocidad de avance para cada experimento, donde el eje X corresponde a las velocidades de avance en mm/min, eje Y la longitud de barrido y Z es la altura en  $\mu\text{m}$ .



**Fig. 13.-** Diagrama de ondulación con respecto a la velocidad de avance para cada experimento, donde el eje x corresponde a las velocidades de avance en mm/min, el eje y es la longitud de barrido en mm y z es la altura en  $\mu\text{m}$ .

Tabla III. Valores de micro-rugosidad.	
Experimento	Altura prom. (nm)
1	782.4
2	1642.0
3	753.5
4	515.5
5	539.2

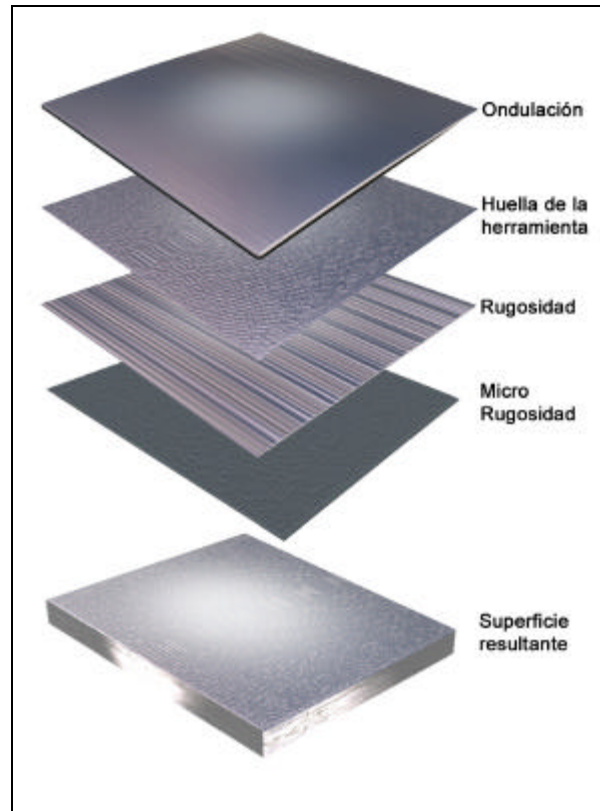
### Superficie reconstruída

Los elementos que componen la textura superficial fueron analizados por separado empleando equipos que miden a diversas escalas. Los resultados fueron analizados por medio de Fourier y ajustes a curva, para con ello generar capas que representan las características de cada uno de ellas.

Operaciones aritméticas y lógicas elementales fueron empleadas para juntar las capas sintéticas de las diversas características superficiales, generando el modelo de superficies maquinadas.

Para producir una superficie maquinada a una velocidad de avance diferente a las analizadas en la experimentación, se hace una relación entre velocidad de avance y calidad superficial, se interpola para obtener la calidad para una velocidad de avance deseada bajo las mismas condiciones de corte.

En la figura 14 se muestra una superficie modelada por medio de este método a una velocidad de 65 mm/min.



**Fig. 14.-** Superficie reconstruída a partir de las cuatro capas del experimento 1.

## CONCLUSIONES

Se observó el proceso de corte de un aluminio comercial bajo condiciones particulares y se propuso un método para generar superficies maquinadas sintéticas mediante un modelo matemático que describe la huella de la herramienta y un análisis superficial a diversas escalas.

Se estableció una relación entre la velocidad de avance y las características predominantes de una superficie maquinada, para de esta manera inferir situaciones de maquinado mejoradas. Por medio de experimentos se demostró que bajo condiciones de maquinado moderadas es posible determinar una relación proporcional entre la calidad superficial y la velocidad de avance de una manera simple. El presente trabajo no considera experimentos exhaustivos que permitan relacionar completamente la morfología con la situación de corte ni las propiedades de materiales.

Se modelaron las superficies maquinadas de los cinco experimentos, provenientes de análisis superficiales presentados en [1,2,3,4], tales como la rugosidad promedio, ondulación y microtextura. Por medio de interpolación se modeló una capa a una velocidad distinta a la de los experimentos, logrando así producir las características superficiales de una pieza antes de ser maquinada.

Se modelaron capas de cada una de las características superficiales y se sumaron para reconstruir la superficie maquinada. Por ultimo se generó una superficie a una velocidad diferente a la de los experimentos mediante interpolación, para predecir la calidad superficial a esa velocidad.

## RECONOCIMIENTOS Y EQUIPO UTILIZADO

El presente trabajo se llevo a cabo en las instalaciones del Departamento de Sistemas Integrados de Manufactura de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Autónoma de Nuevo León. La microscopia de fuerza atómica fue realizada en el laboratorio del Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales de la misma institución. El análisis de rugosidad se realizó en el laboratorio de la empresa NEMAK y el análisis de ondulación en la empresa METRICA S.A. de C.V.

Los recursos provinieron de parte de las instituciones PAICYT 2001 (contrato CA556-01) y CONACYT (contrato clave J37668-U).

El equipo utilizado fue el siguiente

- Centro de Maquinado EMCO VMC 300.
- Rugosímetro Mitutoyo Surftest 211 series 178.
- Brazo mecánico por coordenadas FARO modelo Gold 8.
- Microscopio de fuerza atómica Quest modelo QSCOPE 250
- Licencia de software 3D Studio MAX R3.1
- Licencia de software Origin 7.5
- Licencia de software Mathcad 2000 Professional

## REFERENCIAS

- [1] López, E., Ruiz, M., Colás, R. “*Modelaje de la viruta en el proceso de maquinado. Parte 1*”. Revista Ingenierías Vol. IV, No. 13, 2001.
- [2] López, E., Ruiz, M. “*Modelaje de la viruta en el proceso de maquinado. Parte II Validación experimental.*”. Revista Ingenierías Vol. IV, No. 14, 2002.
- [3] López, E. Ruiz, M. Méndez, L. “*Evaluación de las condiciones de maquinado por medio de emisiones infrarrojas*”. Revista Ingenierías vol. V, no. 16, 2002.
- [4] López, E. Cavazos, R. Delgado, M. “*Caracterización de superficies maquinadas por medio de parámetros de rugosidad*”. Revista Ingenierías vol. VI, no. 18, 2003.
- [5] Yean, C., Kai, C., Ong, T., Feng, L. “*Creating Machinable Textures for CAD/CAM Systems*”. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 14. Springer-Verlag London, 1998.
- [6] Cheng-Gui Li, Shen Dong, Guo- Xiong Zhang. “*Evaluation of the anisotropy of machined 3D surface topography*”. 0043-168 Elsevier Cience, 2000.
- [7] Zhang, G, Kapoor, S. “*Dynamic Generation of Machined Surfaces. Part 2: Construction of Surfaces Topography*”. University of Maryland Research Center
- [8] Lin, J., Tai, C. “*Accuracy optimization for mould surface profile milling*”. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 15, Springer-Verlag London, 1999.