

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE LICENCIATURA



MODELADO DE SUPERFICIES MAQUINADAS

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE
INGENIERO MECANICO ADMINISTRADOR

PRESENTA:
MIGUEL ANGEL RUIZ SILVA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.
NOVIEMBRE DEL 2004

T

Z5853

.M2
FINE

2004

.R875

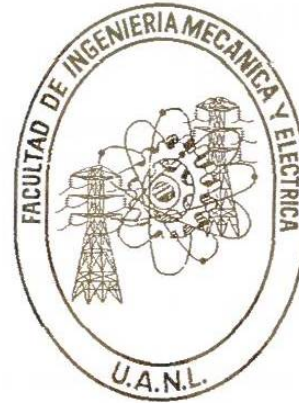


1020150333

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE LICENCIATURA



MODELADO DE SUPERFICIES MAQUINADAS

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE
INGENIERO MECÁNICO ADMINISTRADOR

PRESENTA

MIGUEL ANGEL RUIZ SILVA

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L.

NOVIEMBRE DEL 2004

996486

T
Z5853
.M2
FIME
2007
.R875



FONDO
TESIS

ÍNDICE

1	Introducción.....	1
	1.1 Superficies Maquinadas.....	2
	1.2 Antecedentes.....	3
	1.3 Planteamiento de Tesis.....	7
	1.4 Bosquejo de la Tesis.....	8
	1.5 Resumen del Capítulo.....	10
2	Modelado de superficies mediante capas	11
	2.1 Antecedentes.....	11
	2.2 Procesos de manufactura.....	12
	2.3 Superficies maquinadas	13
	2.4 Modelado de superficies por medio de capas	15
	2.5 Resumen del Capítulo.....	17
3	Capa de huella de la herramienta.....	18
	3.1 Introducción.....	18
	3.2 Modelo de corte teórico.....	19
	3.3 Condiciones teóricas de maquinado.....	20
	3.4 Modelado de capa de huella de la herramienta.....	21
	3.5 Resumen del Capítulo.....	22
4	Capa de ondulación.....	23
	4.1 Introducción.....	23
	4.2 Métodos de medición de ondulación.....	24
	4.3 Parámetro de ondulación.....	25
	4.4 Modelado de capa de ondulación	25
	4.5 Resumen del Capítulo.....	27
5	Capa de rugosidad.....	28
	5.1 Introducción.....	28
	5.2 Definición de rugosidad y textura superficial.....	28
	5.3 Perfilómetro.....	30
	5.4 Caracterización por medio del espectro de frecuencias.....	32
	5.4.1 Transformada rápida de Fourier.....	32
	5.4.2 Filtrado y reconstrucción de una señal.....	33
	5.5 Modelado de capa de rugosidad.....	34
	5.6 Resumen del Capítulo.....	36
6	Capa de rugosidad a baja escala.....	37
	6.1 Introducción.....	37
	6.2 Microscopio de fuerza atómica.....	38
	6.3 Modelado de capa de rugosidad a baja escala.....	39
	6.4 Resumen del Capítulo.....	40

7	Experimentación.....	41
	7.1 Justificación y uso del material utilizado.....	43
	7.2 Medición de rugosidad.....	43
	7.3 Medición de ondulación.....	44
	7.4 Medición de rugosidad a baja escala	44
	7.5 Resumen del Capítulo.....	45
8	Resultados y discusión.....	46
	8.1 Capa huella de la herramienta.....	46
	8.2 Capa de ondulación.....	48
	8.2.1 Resultados de análisis de ondulación.....	48
	8.2.2 Modelado de capa de rugosidad.....	49
	8.3 Capa de rugosidad.....	50
	8.3.1 Resultados de análisis de rugosidad.....	50
	8.3.2 Modelado de capa de rugosidad.....	53
	8.4 Capa de rugosidad a baja escala	55
	8.5 Superficie reconstruida.....	56
	8.6 Resumen del Capítulo.....	59
9	Conclusiones y recomendaciones.....	60
	9.1 Conclusiones.....	60
	9.2 Recomendaciones para trabajos futuros.....	61
10	Referencias.....	62
	10.1 Referencias bibliográficas.....	62
	10.2 Listado de figuras.....	65
	10.3 Listado de tablas.....	66
	10.4 Listado de ecuaciones.....	66
11	Apéndices.....	67
	Apéndice I – Resultados de los análisis.	
	11.1 Gráficos de huella de herramienta	67
	11.2 Resultados de los análisis de ondulación	68
	11.3 Resultados de los análisis de rugosidad	70
	11.4 Gráficos de rugosidad a baja escala	73
	11.5 Capa de huella de herramienta	74
	11.6 Capa de ondulación	75
	11.7 Capa de rugosidad	76
	11.8 Capa de rugosidad a baja escala.....	77
	11.9 Superficies modeladas.....	78
	Apéndice II – Datos de los análisis	
	11.10 Perfiles del análisis de ondulación.....	79
	11.11 Perfiles del análisis de rugosidad.....	86
	11.12 Matriz del análisis de rugosidad a baja escala.....	109

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La calidad en los productos es hoy en día más que un valor agregado, un requisito para competir en el mercado nacional e internacional. En este aspecto, las partes maquinadas no son la excepción. Continuamente la industria manufacturera ha buscado eficientar sus procesos para disminuir costos y mejorar la calidad de los productos. Los avances tecnológicos han contribuido al incremento en productividad con calidad, ya que ahora se cuenta con equipo que permite el monitoreo de la calidad en línea.

Los procesos actuales de maquinado requieren de acabados precisos, de características superficiales específicas y de tolerancias cada vez menores. Son varios los factores que intervienen en estas características, y que están relacionados con las propiedades finales de la pieza. Para maquinar con una calidad dada, es necesario seleccionar el método y los parámetros de corte considerando los materiales de la pieza y herramienta así como el efecto de la vibración, el desgaste de la herramienta, temperatura, etc.

El diseño mecánico juega un papel importante en el aspecto de calidad y productividad. Se ha vuelto común aceptar el hecho que el 70% o más de los costos de manufactura son determinados desde la etapa de diseño [SHE93]. Es por esto que se requiere de simulaciones que involucren los parámetros de maquinado y las condiciones del proceso para lograr modelos más aproximados a la realidad.

1.1 Superficies Maquinadas

En las últimas décadas se ha incrementado el interés en el estudio de superficies maquinadas debido a su repercusión en la calidad de las piezas. La anisotropía de la superficie topográfica tiene un gran efecto en el desempeño funcional de una superficie maquinada al igual que su apariencia estética. Es bien sabido que la rugosidad superficial influencia en gran parte las propiedades físicas y mecánicas de las partes en contacto. El entendimiento de este comportamiento es importante en muchas aplicaciones tales como la fricción, lubricación, sellado y rigidez de contacto [CHE00]. Por lo tanto, la caracterización de la topografía superficial se vuelve cada vez más importante y urgente.

Los defectos superficiales de piezas maquinadas están a menudo relacionados con las desviaciones debidas al empleo de parámetros de corte inadecuados. Los errores típicamente se manifiestan como variaciones en las mediciones del sistema de calidad. Indicado por ejemplo, como variaciones indeseables de la máquina herramienta, o variaciones en el perfil superficial del producto terminado. Hay muchos factores que pueden contribuir a tales desviaciones. Como resultado, se vuelve crucial el descomponer con precisión los diversos componentes de la superficie y tratar de entender su naturaleza y potencial de daño a la calidad de la pieza [TUM00].

La producción y aplicación de superficies virtuales es de importancia en la industria, ya que la predicción de la calidad superficial permitirá la selección de los parámetros de maquinado óptimos desde el proceso de diseño, además de ayudar en la planeación de un sistema de monitoreo de calidad y determinación de tolerancias adecuadas.

1.2 Antecedentes

El análisis de calidad superficial de piezas maquinadas se mide tradicionalmente por medio de la rugosidad promedio (Ra) y la rugosidad máxima (Rz). 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 [CHE00]. Algunos investigadores han presentado parámetros de evaluación de la topografía de superficie tridimensional, al igual que han investigado las características de las superficies rugosas.

El trabajo de Yean, Kai, Ong y Feng se centra en la creación de texturas maquinables [YEA98]. 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. Los errores de posicionamiento y vibración de herramienta no son analizados.

La calidad de la superficie maquinada puede ser medida a través de la exactitud dimensional, acabado superficial o su funcionalidad [LOP02c]. La razón de arranque de material se determina simplemente como la cantidad de volumen removido por unidad de tiempo. La facilidad de formación de viruta [LOP01c, LOP02a] es evaluada en términos de la longitud de la viruta, cantidad, espesor, rugosidad o su fragilidad.

Cheng-Gui evalúa la rugosidad maquinada proveniente de torneado y esmerilado finos por medio de geometría de fractales y momentos espectrales de superficie [CHE00]. 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.

Lin predice la calidad superficial del fresado a través de redes neuronales que tienen como datos de entrada los resultados de experimentos para situaciones de corte dadas [LIN99]. Por medio de simulación encuentra la temperatura de enfriamiento para calcular con ella las rugosidades y los esfuerzos residuales. Sin embargo, sus consideraciones para el cálculo de errores son solamente geométricas.

Experimentos de fresado comparativos para varios materiales y velocidades son presentados por Galante [GAL93], pero sus resultados muestran solamente el valor del exponente fractal D y el coeficiente de rugosidad R_a . Otros investigadores han presentado la evaluación de parámetros topográficos y las propiedades tridimensionales de la topografía. Describen la característica direccional de la superficie, la relación estadística de la anisotropía superficial y la correlación entre muestreo radial-longitudinal. Las primeras incursiones en términos de geometría de fractales fueron desarrolladas en 1986 por medio de conteos reticulares de celda y, más tarde, fué propuesto un modelo funcional para análisis de rugosidad anisotrópica.

Chua y coautores proponen un sistema de diseño y manufactura asistida por computadora (CAD/CAM) de prototipos rápidos para aplicación biomédica digitalizando puntos espaciales por rayos láser [CHU98]. El trabajo se centra en la generación de superficies que puedan utilizarse para maquinado, pero deja de lado las consideraciones de corte, por lo que la parte que corresponde a CAM queda completamente indefinida.

El análisis de manufactura para superficies hecho por Yang, Ding y Xiong [YAN99] propone el cálculo de costos a través del tiempo de maquinado utilizando para ello la trayectoria de la herramienta, que, a su vez, es calculada con un algoritmo de detección

de conos de visualización. Sin embargo, los diagramas propuestos del proceso desde el diseño geométrico hasta el código de control numérico no son explotados adecuadamente, pues la atención se centra en el aspecto geométrico, lo cual sólo es válido después del maquinado de desbaste.

Tiziani y coautores [TIZ99] presentan un método para medir y describir microestructuras superficiales con consideración de propiedades específicas del material por medio de interferometría de luz y microscopía confocal. Se analiza el proceso de medición y se comparan resultados con los medidos por rugosímetros convencionales. Sin embargo, las propiedades aprovechadas son solamente las ópticas.

Turner y coautores, introducen en [TUM00] la transformada matemática Karhunen-Loeve para detectar errores en máquinas-herramienta por medio de la descomposición de señales en componentes individuales. Proponen el uso de dicha técnica matemática para el monitoreo de la calidad superficial de las piezas maquinadas.

En el aspecto de geometría fractal, Cheng-Gui Li y Shen Dong [CHE00] proponen un método de evaluación cuantitativo que está basado en la aplicación de la teoría de geometría fractal. Se discute la caracterización fractal de superficies rugosas, el comportamiento de los momentos espectrales del perfil y superficie, y una evaluación anisotrópica de una superficie rugosa.

La investigación de Feng y Wang [FEN02], se enfoca en el desarrollo de un modelo empírico para la predicción de superficies rugosas. El modelo considera los siguientes parámetros de trabajo: dureza de la pieza de trabajo (material), velocidad de corte, avance, profundidad de corte y radio de la herramienta. Realiza un comparativo entre redes neuronales y regresión, para el modelado de superficies.

Zhang y Kapoor presentan en la primera parte de un estudio sobre modelado de superficies [ZHA94] un modelo para la generación dinámica de textura tridimensional de superficies maquinadas. En la primera parte de este trabajo desarrollan un modelo

matemático del sistema aleatorio de excitación que es responsable de la porción aleatoria del perfil superficial. En la segunda parte de su trabajo [ZHA94] presentan una metodología para generar dinámicamente la superficie a través de una simulación por computadora. La metodología propuesta usa la herramienta de movimiento vibratorio con la herramienta de movimiento geométrico para construir la topografía de la superficie maquinada.

En los estudios de Zhang y Hwang [ZHA95] se presenta una metodología para el análisis de superficies. Estudiando la variedad de propiedades de materiales básicos en micro escala y relacionando esta información con la formación de la textura superficial durante el maquinado. Esta investigación propone un sistema basado por computadora y comprensivo, para el control industrial y diagnóstico de la calidad superficial durante el maquinado.

Lin y Gian [LIN99] proponen una metodología para generar instrucciones de maquinado a partir de los datos tridimensionales provenientes de aparatos de medición de rugosidad sobre superficies maquinadas. Diversos algoritmos son desarrollados para automatizar la generación de los planes de proceso, que contienen información detallada necesaria para el proceso de maquinado de control numérico.

1.3 Planteamiento de Tesis

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.

Se pueden modelar dichas características a partir de un análisis previo. Este trabajo plantea un método predictivo del acabado superficial de piezas maquinadas generando superficies sintéticas a partir de los parámetros de corte y de un análisis de la superficie.

Dichas superficies se generan a partir de capas basadas en modelos que describe la huella de la herramienta y que reproducen la ondulación, la rugosidad a baja y alta escala de la superficie maquinada.

El método de capas es introducido en este trabajo para proveer una herramienta simple para la producción de las superficies requeridas según las especificaciones de diseño. Se espera que la aplicación exhaustiva del método de capas pueda resolver el problema de superficies maquinadas.

Los objetivos que este trabajo pretende alcanzar 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.
- Predecir la calidad superficial de la pieza maquinada.

El presente trabajo es esencialmente una extensión del estudio realizado por el Dr. Francisco Eugenio López Guerrero en su tesis “Estudio de Maquinabilidad para Aleaciones de Aluminio AlMgSi 6063” [LOP02].

1.4 Bosquejo de Tesis

El Capítulo 2 expone las características superficiales dominantes de una pieza maquinada. Posteriormente se describirá la metodología para llevar a cabo el modelado de superficies maquinadas. Se justificará el empleo de capas.

El Capítulo 3 trata el tema de la huella de la herramienta. Se mencionarán las principales huellas en la superficie de piezas debido al proceso de maquinado. Se plantea el modelo de corte teórico y el método para generar la capa de la huella de la herramienta

El Capítulo 4 expone el concepto de ondulación y sus características. Posteriormente se mencionarán los métodos convencionales para medirla y por último se presenta la metodología para modelar la capa de ondulación.

El Capítulo 5 menciona conceptos referentes a la rugosidad y las técnicas para medirla. Se describe la metodología para la caracterización por medio del espectro de frecuencias y el método para el modelado de la capa de rugosidad.

El Capítulo 6 presenta conceptos referentes a la rugosidad a baja escala, dando algunos antecedentes sobre la microscopía de fuerza atómica y su aplicación en el análisis de superficies. Posteriormente se expone la metodología que se siguió para generar la capa de textura.

El Capítulo 7 expone la metodología y experimentación realizada para la generación de capas y del modelado de superficies maquinadas.

El Capítulo 8 presenta los resultados de la experimentación y su relación con el marco teórico de los capítulos anteriores. Se comparan las superficies generadas virtualmente con los resultados obtenidos experimentalmente.

El Capítulo 9 reevalúa los objetivos y propósitos presentados en la introducción y muestra las conclusiones obtenidas en este trabajo. Se discuten dichas conclusiones y se presentan propuestas de mejora, al mismo tiempo que se recomiendan nuevas líneas de investigación que se pueden continuar a partir de este estudio.

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. Este trabajo se realizó en conjunto con el ingeniero Mario Delgado Acosta bajo la supervisión del Dr. Eugenio López.

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

1.5 Resumen del Capítulo

En este capítulo se discutió la importancia de la calidad de las piezas maquinadas. Se trató el tema del interés en disminuir costos y la repercusión del diseño mecánico en este aspecto. Se mencionaron los efectos que produce la superficie de una pieza y cómo el proceso de maquinado influye en ella.

Adicionalmente se presentaron trabajos de investigación relacionados al tema de modelado y análisis de superficies maquinadas y se identificaron aspectos no cubiertos por dichas investigaciones. A partir de ello se plantearon los objetivos que el presente trabajo persigue y la estructura de cómo se presenta la información.

CAPÍTULO 2

MODELADO DE SUPERFICIES MEDIANTE CAPAS

2.1 Antecedentes

Las computadoras han sido usadas en el diseño desde hace ya varias décadas, y en gran medida han remplazado las técnicas tradicionales de dibujo en áreas como arquitectura, planeación de productos y diseño gráfico [LIN95]. El uso de computadoras para asistir en la creación, modificación y análisis de un producto es llamado CAD por sus siglas en inglés que significan diseño asistido por computadora.

Un sistema CAD está compuesto por una terminal gráfica donde se muestra la imagen de la pieza que está siendo diseñada. El diseñador alimenta la información de la pieza a través de un programa de dibujo, donde se agregan dimensiones y otros datos. La descripción computarizada de la pieza no es una imagen, sino una representación gráfica de puntos coordenados y formas geométricas de las cuales una imagen puede ser construida. La pieza puede ser dibujada, rotada, escalada y presentada en tres dimensiones para permitir a los diseñadores una mejor visualización del objeto.

Inicialmente los dibujos tridimensionales hechos en computadora solo modelaban la geometría del elemento. Con la integración de la computadora en los sistemas de manufactura, el tiempo de producción se ha reducido significativamente. La evolución de los sistemas de CAD/CAM ha permitido el modelado y manufactura de partes más complejas. Posteriormente surge la necesidad de crear modelos que simulen las características superficiales que tendrán las piezas maquinadas.

Diversos estudios pueden ser encontrados en la literatura que representen el conocimiento de las operaciones de manufactura [LOP02]. Dificultades en el modelado de procesos de manufactura son claros debido al gran número de operaciones diferentes

de maquinado, donde se requieren mediciones multidimensionales, no lineales, además de un entendimiento de las relaciones entre parámetros de corte.

2.2 Procesos de manufactura

La manufactura se puede definir como la aplicación de procesos químicos y físicos que alteran la geometría, las propiedades, o el aspecto de un determinado material para elaborar partes o productos terminados; la manufactura incluye también el ensamble de partes múltiples para fabricar productos terminados. Los procesos de manufactura involucran una combinación de máquinas, herramientas, energía y trabajo manual. [GRO96]

Los procesos de manufactura pueden dividirse en dos tipos básicos: operaciones de proceso y operaciones de ensamble. Una operación de proceso transforma un material de trabajo de una etapa a otra más avanzada, que lo sitúa cerca del estado final deseado para el producto. Esto le agrega valor al cambiar la geometría, las propiedades o la apariencia del material inicial. Las operaciones de procesamiento se pueden dividir en procesos de formado (fundición, moldeo, procesamiento de partículas, procesos de deformación, remoción de material, etc.), procesos de mejora (tratamientos térmicos) y operaciones de procesamiento de superficies (limpieza, tratamiento de superficies, recubrimiento, procesos de deposición, etc.). [BOT89]

Los procesos de remoción de material son operaciones que quitan el exceso de material de la pieza de trabajo inicial para que la forma resultante adquiera la geometría deseada. Los procesos más importantes en esta categoría son operaciones de maquinado como torneado, taladrado y fresado (figura 2.1). Estas operaciones de corte son las que más se aplican a metales sólidos. Se ejecutan utilizando herramientas de corte que son más duras y más fuertes que el metal de trabajo.

El fresado es un proceso común en esta categoría, en el cual se hace avanzar un material de trabajo por medio de un cortador giratorio con filos múltiples. En el torneado un buril

de punto sencillo remueve material de una pieza de trabajo giratoria para reducir su diámetro. El taladrado es una operación donde una broca rotatoria avanza dentro del material para generar un barreno redondo. En el esmerilado se emplea una rueda abrasiva de esmeril para quitar el material excedente.

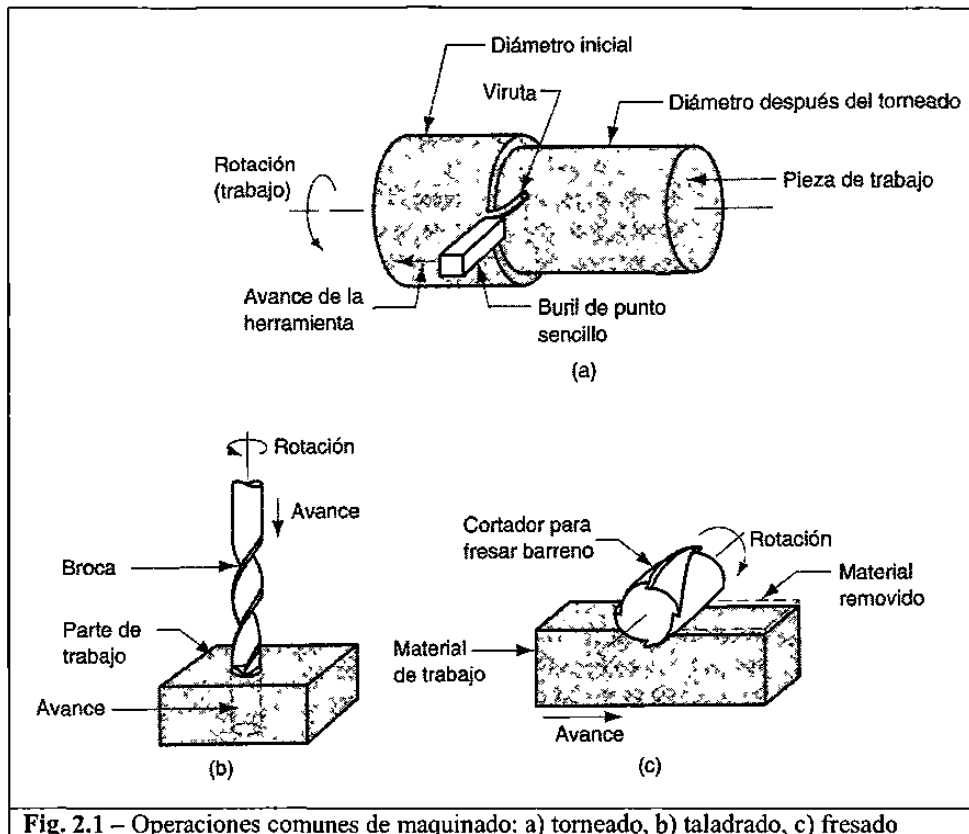


Fig. 2.1 – Operaciones comunes de maquinado: a) torneado, b) taladrado, c) fresado

Existen otros procesos de remoción de material denominados no tradicionales porque emplean rayo láser, haces de electrones, erosión química, descargas eléctricas y energía electroquímica en lugar de las herramientas tradicionales de corte y abrasión. [GRO96]

2.3 Superficies Maquinadas

La calidad superficial de una pieza no sólo se refiere a su calidad dimensional sino también a algunas propiedades del material como son su dureza, color, brillo y estructura metalúrgica entre otras.

Las superficies pueden ser clasificadas en geométricas y reales. Las superficies geométricas son superficies ideales cuya forma está especificada por el dibujo y/o documento técnico. Las superficies reales son aquellas generadas por medio de los procesos de arranque de material que exhiben características topográficas que juegan un papel fundamental en el desempeño de la funcionalidad del producto, afectando en la capacidad de desgaste, lubricación, resistencia a la fatiga y aspecto externo.

Topográficamente, aquellas superficies que no tienen una dirección o patrón geométrico preferente debido al proceso de su generación se conocen como aleatorias o estocásticas, las superficies que resultan de romper un objeto generalmente son de este tipo. Las superficies con un patrón geométrico distinguible se conocen como determinísticas [HIN00b], una superficie maquinada en un torno es de este tipo.

La textura es 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 (Figura 2.2).

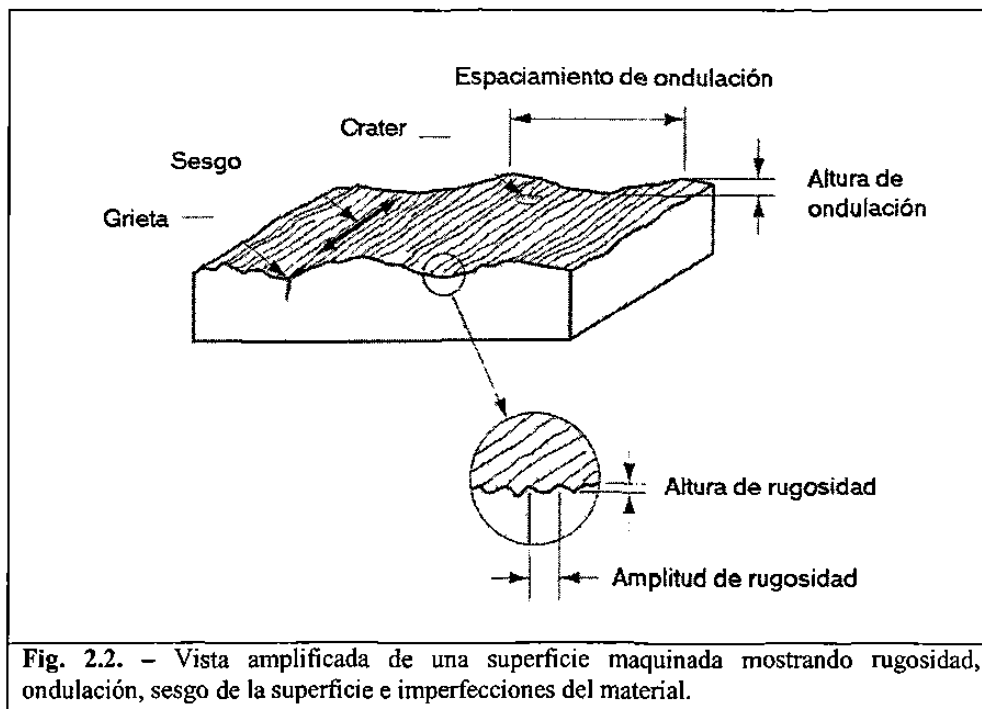


Fig. 2.2. - Vista ampliada de una superficie maquinada mostrando rugosidad, ondulación, sesgo de la superficie e imperfecciones del material.

- Rugosidad: se refiere a las pequeñas y finamente espaciadas desviaciones 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.

2.4 Modelado de superficies maquinadas por medio de capas

El objetivo de la actividad de modelaje es describir de una manera precisa, concisa, correcta y comprensible un modelo del mundo real. En el modelado de procesos de manufactura, modelos empíricos derivados de datos experimentales y evaluaciones cualitativas realizadas mediante la experiencia, aun siguen jugando un rol importante en los trenes productivos.

La precisión con que un modelo puede describir la realidad depende en gran medida de los datos de entrada que se alimenten a dicho modelo, por lo que es conveniente asegurarse que los datos de entrada provengan de características representativas. En el caso del modelado de superficies maquinadas, los parámetros de corte son de vital importancia, al igual que las características superficiales de la pieza maquinada.

Los elementos que componen la textura superficial 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 y las imperfecciones del material.

Para generar la capa de la huella de la herramienta se emplea un modelo matemático 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 las herramientas con las que cuentan algunos programas de diseño auxiliados por computadora.

A partir del análisis de rugosidad se genera la capa que representa la rugosidad macroscópica. El análisis de rugosidad se puede realizar por medio de un perfilómetro, el cual genera una señal o perfil de alturas. Dicha señal debe ser analizada para definir que alturas corresponden a la rugosidad macroscópica y cuales a la ondulación.

La rugosidad a baja escala también influye en las propiedades funcionales de la pieza por lo que es deseable crear una capa que lo simule. Esta se puede modelar con la ayuda de 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 juntar las capas sintéticas de las diversas características superficiales, generando el modelo de superficies maquinadas.

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

2.5 Resumen del Capítulo

En este capítulo se mencionaron algunos antecedentes del maquinado, diseño, análisis y modelado de procesos de manufactura. Se mencionaron las características superficiales dominantes de una pieza maquinada y conceptos relacionados con este tema. Por último se describió brevemente la metodología para llevar a cabo el modelado de superficies maquinadas mediante capas.

CAPÍTULO 3

CAPA DE HUELLA DE LA HERRAMIENTA

3.1 Introducción

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 desvastado. En la Figura 3.1 se presentan los posibles patrones que puede tomar una superficie maquinada según la especificación ANSI B46.1-1978.



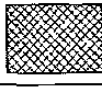



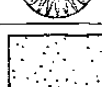
Símbolo de la huella	Huella superficial	Descripción
=		La huella es paralela a la línea de superficie
⊥		La huella es perpendicular a la línea de superficie
X		La huella esta en ambas direcciones a la línea de superficie.
M		La huella es multidireccional.
C		La huella es circular con respecto al centro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

Fig. 3.1 – Posibles huellas de la superficie debidas al proceso de maquinado

Las condiciones geométricas del proceso de corte pueden ser representadas por medio de ecuaciones de posición y movimiento de los puntos de contacto de los filos de la herramienta sobre el material [CHI99]. Estas ecuaciones determinan la cantidad de material que la herramienta arrancará. E. López, en su trabajo de estudio de maquinabilidad [LOP02] propone una serie de ecuaciones de movimiento, cuyos valores

de las constantes enmarcan una situación de corte en particular. En esta sección se plantean dichas ecuaciones utilizando valores de corte prácticos.

3.2 Modelo de corte teórico

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:

$$x(t) = r \cos(t) + V_x t \quad (3.1)$$

$$y(t) = r \sin(t) + V_y t$$

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 :

$$x(t) = r \cdot \cos(t) + \frac{F_x}{2\pi} \cdot t \quad (3.2)$$

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

La ecuación se puede utilizar para calcular la posición de cada álabe de la herramienta, en donde existe un desfaseamiento entre ellos de

$$\text{MAX}_t = \frac{2\pi}{N} \quad (3.3)$$

Siendo N el número de álabes de la herramienta. Considerando una herramienta de dos álabes, las ecuaciones resultantes para el primer alabe son:

$$x_1(t) = r \cdot \cos(t) + \frac{F_x}{2\pi} \cdot t \quad (3.4)$$

$$y_1(t) = r \cdot \sin(t) + \frac{F_y}{2\pi} \cdot t$$

Y para el segundo alabe son:

$$x_2(t) = r \cdot \cos(t + \text{MAX}_t) + \frac{F_x}{2\pi} \cdot t \quad (3.5)$$

$$y_2(t) = r \cdot \sin(t + \text{MAX}_t) + \frac{F_y}{2\pi} \cdot t$$

3.3 Condiciones teóricas de maquinado.

Si se supone que la herramienta se moverá en línea recta entre dos puntos, los cálculos pueden simplificarse trasladando el origen del movimiento al primer punto y colocando el segundo en cualquiera de los ejes, como se muestra en la ecuación. Considerando la situación de maquinado con los datos de la tabla para un recorrido entre los puntos del vector P

$$P := \begin{pmatrix} 0 & 10 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

En donde

$$X = P \langle 0 \rangle$$

$$Y = P \langle 1 \rangle$$

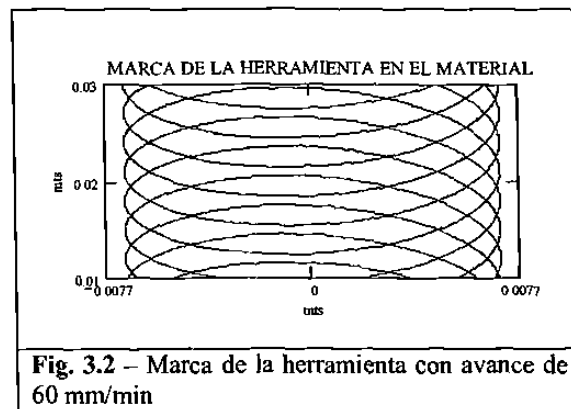
Las componentes de avance F se calculan con la distancia del recorrido D:

$$D = \sqrt{(X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2} \quad (3.6)$$

$$F_x = F \cdot \frac{(X_1 - X_0)}{D}$$

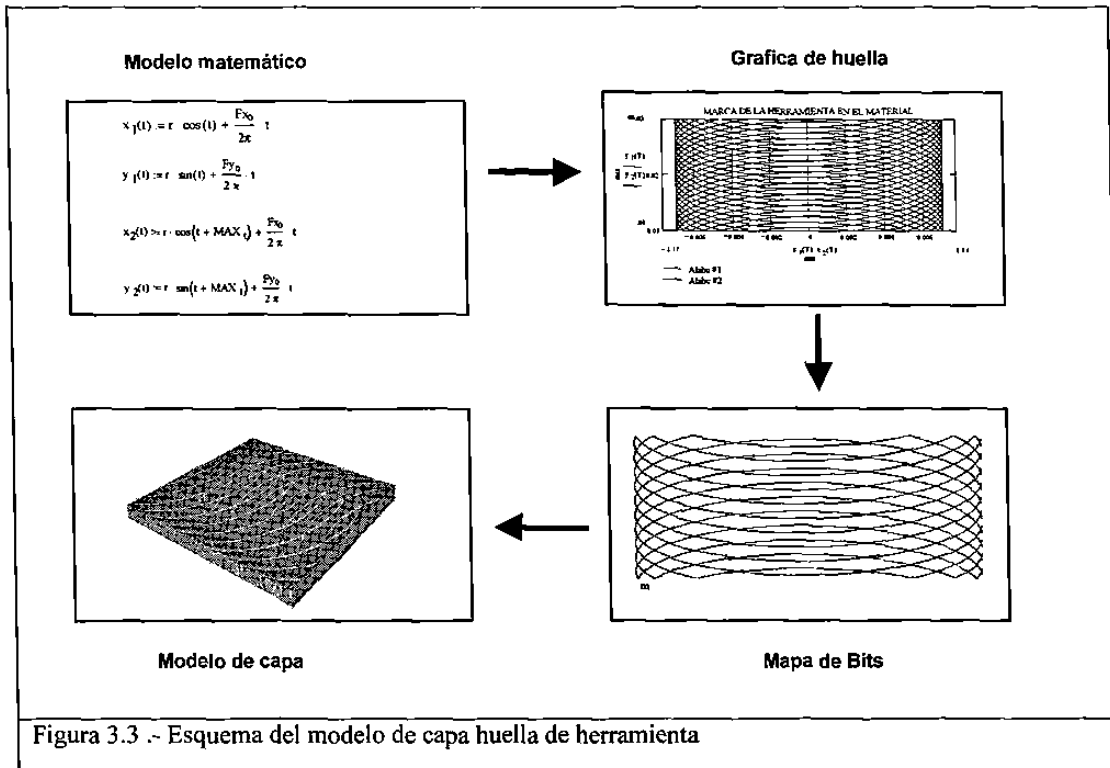
$$F_y = F \cdot \frac{(Y_1 - Y_0)}{D} \quad (3.7)$$

La curva de desplazamiento en relación de un alabe con respecto al otro en cada eje se muestra en la figura 3.2. Dicho grafico es para un avance de 60 mm/min.



3.4 Modelado de capa de huella de la herramienta

Considerando que las bajas frecuencias del análisis de rugosidad corresponden a la huella de la herramienta [LOP02] y empleando el modelo de corte teórico, se genera una matriz de puntos que a su vez se traduce en un mapa de bits que es extruido para formar la capa de la huella de la herramienta. (Figura 3.3)



3.5 Resumen del capítulo

En este capítulo se mencionaron las principales huellas en la superficie de una pieza debido al proceso de maquinado. Como extensión del modelo de corte ortogonal y utilizando las condiciones programadas de velocidad, se plantearon las ecuaciones de movimiento de una herramienta cilíndrica durante el proceso de fresado para una superficie plana utilizando curvas paramétricas. Se encontró con ellos las ecuaciones que describen la diferencia posicional de los filos de la herramienta que producen la huella de la herramienta y determinan con ello la calidad superficial del maquinado. A partir de este modelo de corte teórico, se presentó la capa de huella de la herramienta.

CAPÍTULO 4

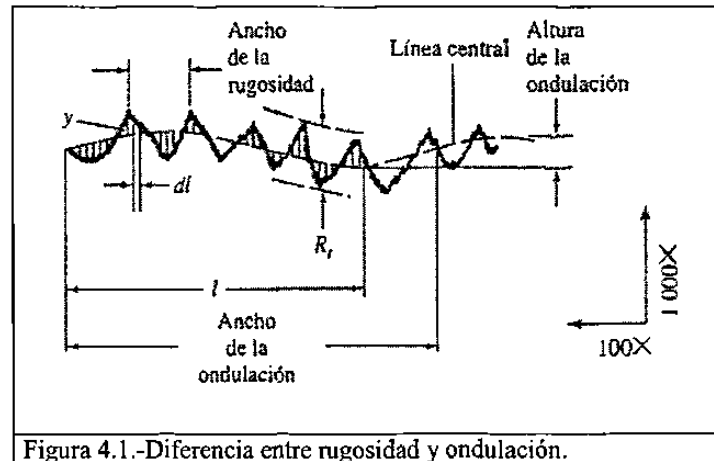
CAPA DE ONDULACIÓN

4.1 Introducción

Las irregularidades menores o microgeométricas en una superficie se definen como ondulación y rugosidad. Los espaciamentos o longitudes de ondulación son comunmente ocasionados por características del proceso de formado de la superficie tales como la flexión de la pieza durante el maquinado, falta de homogeneidad del material, liberación de esfuerzos residuales, deformaciones por tratamiento térmico, vibraciones, etc.

Existe una gran variedad de parámetros para analizar superficies como se mencionó en el capítulo 3, muchos de los cuales han sido desarrollados para caracterizar superficies según aplicaciones particulares. Algunos parámetros han sido definidos para el uso industrial, y muchos de estos aparecen en estándares internacionales [SON92]. Sin embargo, los parámetros superficiales pueden ser clasificados de forma general como parámetros de altura, ondulación, forma y combinación de estos, conocidos como parámetros híbridos.

La ondulación es definida como la desviación de mayor espaciamento en comparación con la rugosidad (Figura 4.1). Los parámetros de ondulación son usados para caracterizar espaciamentos de picos y valles de superficies.



4.2 Medición de ondulación

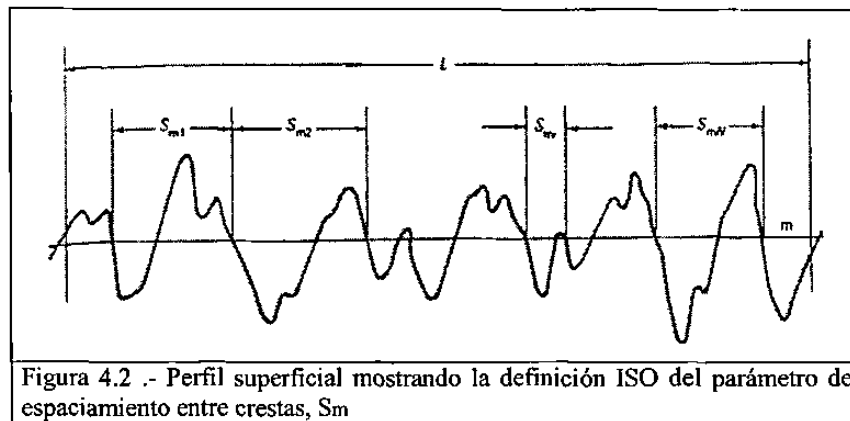
El equipo utilizado convencionalmente para la medición de la ondulación es el rugosímetro con patín mecánico. El patín describe las ondulaciones de la superficie mientras la aguja recorre los picos y valles del perfil. Así se separan mecánicamente ondulación y rugosidad que son simplemente desviaciones respecto de la superficie geométrica con distinta longitud de onda.

Existen otros equipos en el mercado más sofisticados para la medición de la ondulación, entre ellos se encuentra el brazo mecánico por coordenadas, el cual puede obtener mediciones con una exactitud de hasta $\pm .051$ mm. Dicho brazo cuenta con una punta que se desliza sobre la superficie a analizar y este genera una serie de puntos con coordenadas x, y, z que pueden ser analizados de la misma manera que los resultados provenientes de un rugosímetro (Figura 4.2).

La ventaja de este equipo con respecto al rugosímetro es que se pueden obtener gráficos en tres dimensiones de la superficie con mayor facilidad mediante barridos sucesivos. Existen también brazos de coordenadas que miden con láser, este equipo es más conveniente cuando no se desea una prueba destructiva, ya que al deslizar la punta sobre la superficie esta queda marcada.

4.3 Parámetro de ondulación

El parámetro más común para medir el espaciado de la longitud de onda, reconocido como estándar de la Organización Internacional de Estandarización (ISO), es el espaciado promedio de pico S_m , definido para un perfil superficial como el espaciado promedio entre dos cruces negativos de la línea media (Figura 4.3)



Ecuación del espaciado promedio de pico S_m

$$S_m := \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n S_{mi} \quad (4.1)$$

4.4 Modelado de capa de ondulación

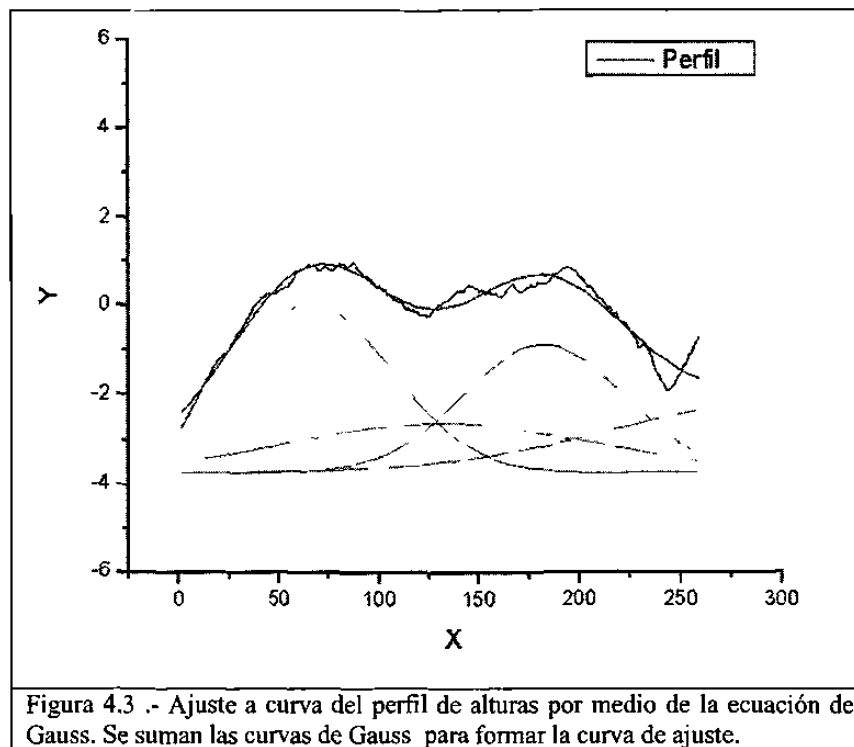
Mediante un análisis de ondulación se obtienen los perfiles de altura que deberán ser analizados para generar la capa sintética de ondulación. Dicho análisis es semejante al empleado en el caso de la rugosidad, la diferencia es principalmente el equipo con que se obtienen los perfiles de altura, ya que el brazo de coordenadas mide a una escala mayor que el rugosímetro.

El análisis de un perfil se puede llevar a cabo mediante un ajuste a curva. Existen varios métodos de ajuste a curva, en el presente trabajo es empleado el ajuste a curva de Gauss por su simplicidad (Ecuación 4.2).

$$y_x := \left[\frac{A}{w \cdot \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \right] \cdot e^{-2 \left[\frac{(fx-xc)}{w} \right]^2} \quad (4.2)$$

donde y es el ajuste a curva, A representa el área bajo la curva, w es la amplitud de la curva, xc indica la posición de la curva en el eje x , f es el factor de escala y x es una variable independiente.

Para hacer el ajuste a curva se calcula una curva de Gauss por cada uno de los picos más representativos del perfil de alturas y luego se suman estas ecuaciones, como se observa en la figura 4.4.



CAPÍTULO 5

CAPA DE RUGOSIDAD

5.1 Introducción

La rugosidad juega un importante papel en la calidad del producto y en la planeación de muchos procesos de manufactura. Esta ha sido un área activa de investigación por muchos años debido a que es una característica importante de diseño y es empleada con frecuencia para la medición de calidad.

Tradicionalmente se han empleado métodos para realizar mediciones unidimensionales de superficies por medio de mediciones promedio (mediciones de rugosidad superficial), métodos de análisis de series de tiempo [ZEL00], y más recientemente las transformadas matemáticas (espectro de frecuencias) [LOP02c] Las técnicas para descomponer información de superficies basadas en las transformadas de Fourier se han vuelto estándar en manufactura [TUM00].

La necesidad de mejorar los métodos tradicionales para incrementar las expectativas de los procesos de manufactura, llevo a la tarea de desarrollar metodologías más exactas en el análisis superficial. A pesar de los esfuerzos para el empleo de técnicas matemáticas avanzadas, no se ha logrado una implementación en los trenes productivos. El problema es principalmente la difícil interpretación de la información de estas transformadas y la inhabilidad de proveer un método que de una clara y fácil imagen de los resultados del análisis superficial.

5.2 Definición de rugosidad y textura superficial

Los errores superficiales pueden ser clasificados en macrogeométricos y microgeométricos. Dichos errores se presentan simultáneamente sobre una superficie, lo que dificulta su medición individual.

Las irregularidades mayores o macrogeométricas, son errores de forma asociados con la variación en tamaño de una pieza, paralelismo entre superficies, plenitud de una superficie, conicidad, redondez y cilindridad. Estas irregularidades pueden ser medidas con instrumentos convencionales.

Las irregularidades menores o microgeométricas, son la ondulación y la rugosidad. La ondulación puede ser ocasionada por la flexión de la pieza durante el maquinado, falta de homogeneidad del material, liberación de esfuerzos residuales, deformaciones por tratamiento térmico, vibraciones, etc. La rugosidad promedio, la altura máxima y el espaciamiento en la rugosidad, son los parámetros empleados para la medición de las irregularidades microgeométricas, que usualmente son producidas por la combinación de la geometría de la herramienta, avance, entre otros parámetros de corte.

La rugosidad superficial es el conjunto de irregularidades de la superficie real, definidas convencionalmente en una sección donde los errores de forma y las ondulaciones han sido eliminados.

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 (5.1), donde n se define como el número de datos; mientras que Rz es la altura máxima de pico a valle (5.2).

$$Ra = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^n |\text{Datos}| \quad (5.1)$$

$$Rz = |\max(\text{Datos})| \quad (5.2)$$

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 del perfil, el espaciamiento medio de los picos locales del perfil o el espaciamiento medio de las irregularidades del perfil.

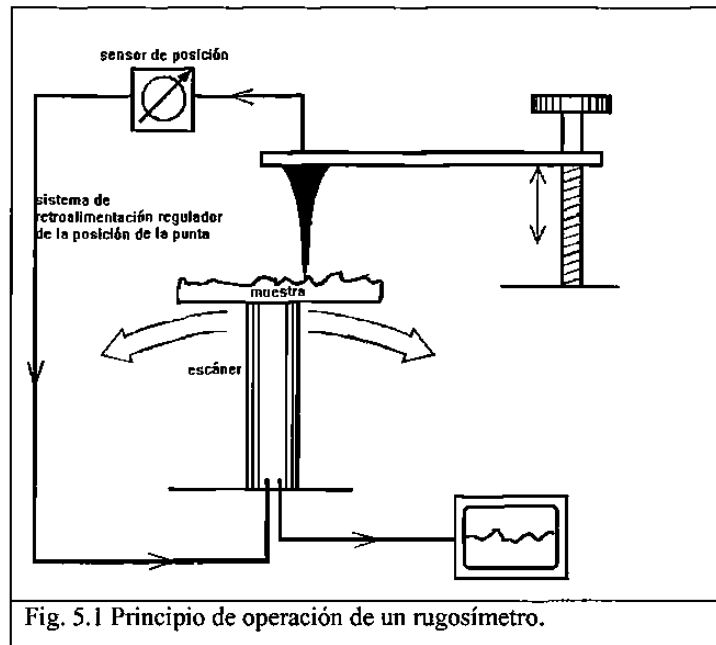
5.3 Perfilómetro

Existen varios métodos para la medición de la rugosidad, los cuales se pueden clasificar como de contacto y no contacto. De entre los más comunes en los trenes productivos cabe destacar los comparadores visotáctiles y los perfilómetros. Los comparadores visotáctiles son muestras superficiales planas o cilíndricas empleadas como estándares para evaluar el acabado superficial de piezas por comparación visual y táctil con superficiales de diferentes acabados obtenidas por el mismo proceso de fabricación. Este método resulta ser un tanto subjetivo e impreciso ya que el resultado depende del criterio de la persona que utiliza el comparador.

El perfilómetro es el equipo más usado para la medición de la rugosidad en la industria. El principio de operación de este equipo es el siguiente: una fina punta realiza un barrido controlado en línea recta sobre la superficie a analizar y las variaciones de alturas se convierten en señales eléctricas que son registradas o graficadas (Fig.5.1). El tratamiento estadístico de los datos permite determinar parámetros de rugosidad tales como la rugosidad promedio o la rugosidad máxima.

El perfilómetros se pueden clasificar según su palpador en: mecánico, inductivo y capacitivo. El rugosímetro mecánico se basa en la amplificación eléctrica de la señal generada por el barrido de la punta que traduce las irregularidades del perfil de la sección de la pieza. En el perfilómetro inductivo, el desplazamiento de la aguja al describir las irregularidades del perfil modifica la longitud del entrehierro del circuito magnético, y con ello el flujo de campo magnético que lo atraviesa, generando una señal eléctrica. En el perfilómetro capacitivo, el desplazamiento vertical del palpador

aproxima las dos láminas de un condensador, modificando su capacidad y con ella la señal eléctrica.



A pesar de ser el equipo más común en los trenes productivos, las mediciones realizadas por medio de rugosímetros tienen ciertas limitaciones:

- La exactitud de las mediciones depende en gran parte del diámetro de la punta, ya que no puede penetrar en toda la profundidad de las estrías mas finas.
- Los instrumentos que dan lecturas numéricas están influidos por la longitud de muestra recorrida por la cabeza de medición y por las posiciones particulares de inicio y terminación utilizadas.

Los equipos de no contacto son en general ópticos, los cuales se basan en cambios en el enfoque de luz monocromática que corresponden a diferencias de altura en la superficie. Otros equipos ópticos empleados en la industria son los interferómetros que aprovechan el fenómeno de interferencia.

5.4 Caracterización por medio del espectro de frecuencias

La caracterización de superficies se puede definir como el proceso de detectar y caracterizar todos los patrones significativos de la superficie de las piezas, por medio de técnicas matemáticas.

Debido a las diversas características que presentan las superficies maquinadas, es necesario el empleo de un método matemático que permita descomponer la señal generado por perfilómetros en componentes individuales para su caracterización. En este aspecto, la transformada rápida de Fourier es la herramienta más empleada. En los trenes productivos, la transformada rápida de Fourier se emplea frecuentemente para analizar vibraciones mecánicas [TUM00].

5.4.1 Transformada rápida de Fourier

La descomposición de una señal en su espectro de frecuencias se logra aplicando la transformada de Fourier.

$$C_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=0}^{n-1} V_k \cdot e^{-2\pi i \left(\frac{j}{n}\right) k} \quad (5.3)$$

En donde

- C Vector resultado de la transformada de Fourier
- n Número de elementos
- V Vector conteniendo la señal muestreada
- j Coeficiente del vector resultado C
- k Coeficiente del vector de frecuencias C
- i Unidad imaginaria

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.

El filtrado tiene por objeto separar de la señal original, las señales de alta, media y baja frecuencia que corresponden a rugosidad, ondulaciones y huella de la herramienta

$$FRa = \frac{1}{\left(\frac{n}{2}\right)} \cdot \left(\sum_j |v_j|\right) \quad (5.7)$$

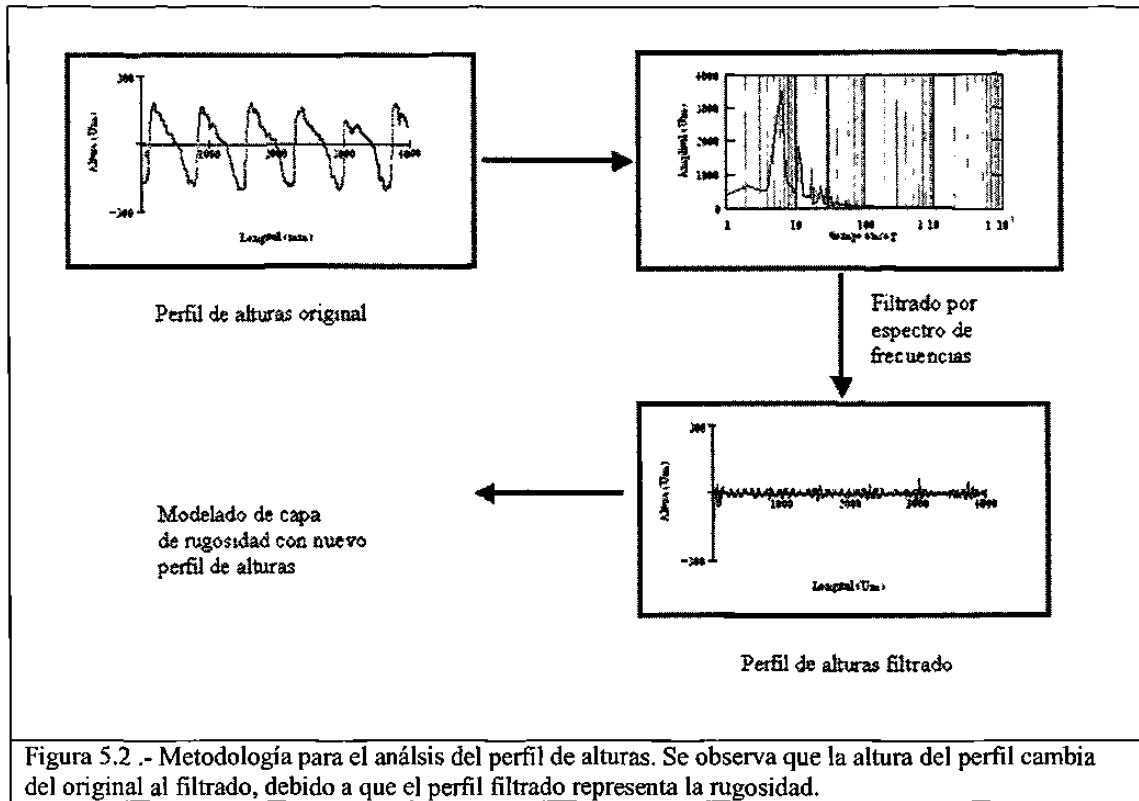
$$FRz = |\max(v) - \min(v)| \quad (5.8)$$

En donde

- v vector resultado de la transformada inversa de Fourier
- j coeficiente del vector de frecuencias V
- n/2 número de elementos según la condición de la ecuación 3.32.

5.5 Modelado de capa de rugosidad

Para el modelado de la capa de rugosidad es necesario del análisis de la superficie maquinada mediante un perfilómetro. 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 de alta frecuencia ya que esta corresponde a la rugosidad [LOP02]. Se reconstruye la señal mediante la transformada inversa de Fourier y se genera un nuevo perfil. (Figura 5.2)



Posteriormente se hace un ajuste a curva de la señal mediante las ecuaciones de las armónicas mas representativas del espectro resultante. Empleando la ecuación 5.9 para cada armónica y se suman dichas ecuaciones para obtener el ajuste a curva.

$$Y = (a) \text{sen} (wt) \tag{5.9}$$

En donde

- a constante de ajuste
- w amplitud de onda
- t variable independiente

$$Y_t = Y_1 + Y_2 \dots Y_n \tag{5.10}$$

Se prolonga la curva resultante de la sumatoria de las ecuaciones antes mencionadas, en el eje z para crear una matriz. Los números en la matriz pueden ser representados como tonos de gris con lo cual se genera un mapa de bits. El mapa de bits es extrudido en un programa de diseño que reconoce los tonos de gris como alturas generando así se la capa de rugosidad. (Figura 5.3)

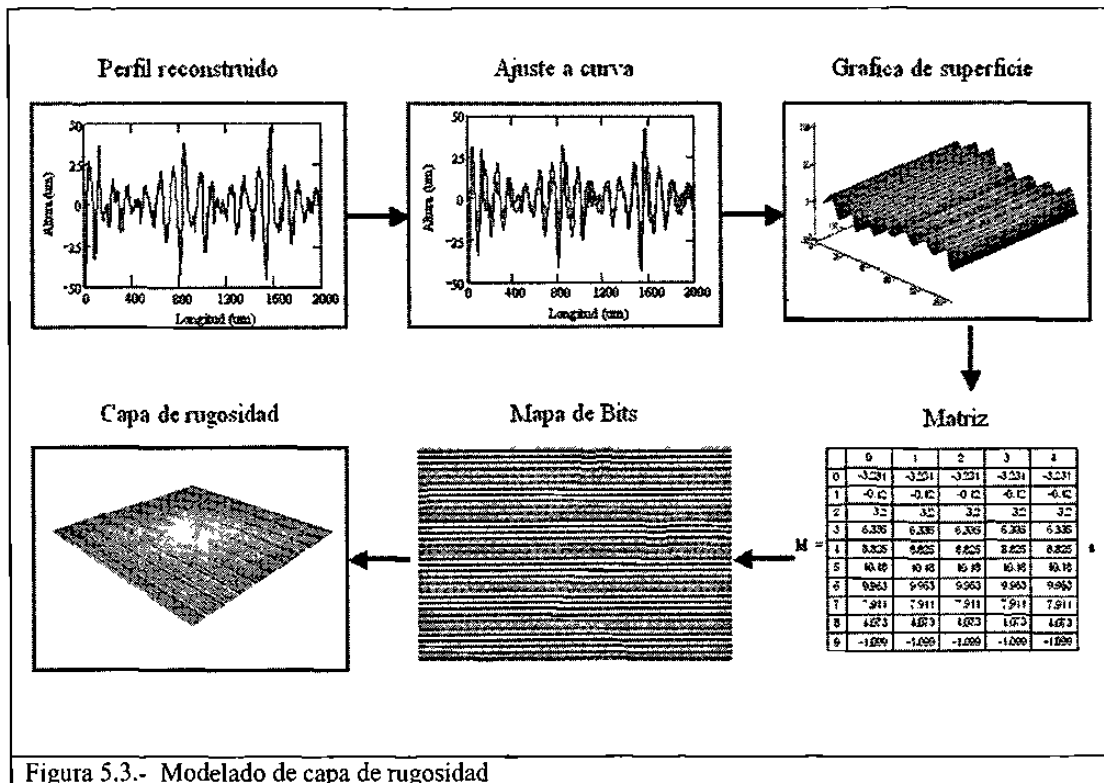


Figura 5.3.- Modelado de capa de rugosidad

3.6 Resumen del Capítulo

En este capítulo se mencionó la definición de rugosidad y textura superficial. Se discutió sobre conceptos referentes a la rugosidad y metodologías para medirla. Se presentó la metodología para la caracterización por medio del espectro de frecuencias y por último se presentó el método para la generación de la capa de rugosidad.

CAPÍTULO 6

RUGOSIDAD A BAJA ESCALA

6.1 Introducción

Las superficies son creadas y modificadas tanto por los procesos naturales como por la intervención humana. Dentro de los procesos naturales, fenómenos como la erosión y la fractura de los materiales entre otros, en muchos casos generan superficies que se observan más rugosas, que las superficies generadas en los procesos de manufactura de dichos materiales. Al observar microscópicamente una superficie es posible observar las características de la microestructura de una pieza, que dependen del proceso previo al que fue sometido el material, composición, química, proceso de obtención, operaciones de formado y tratamiento.

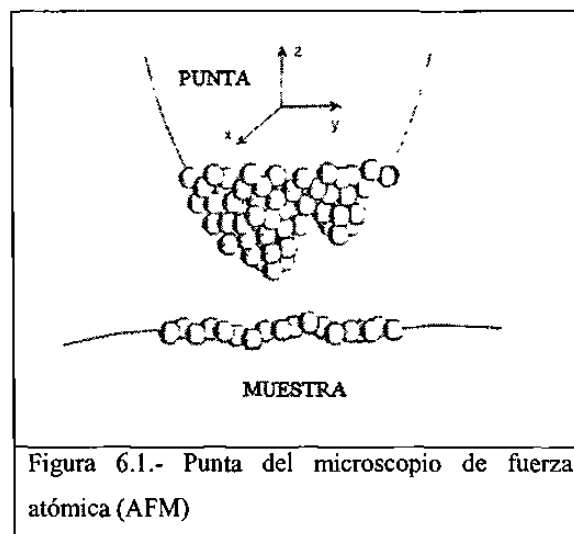
En las últimas dos décadas el análisis de superficies se ha incrementado enormemente, el uso de equipos de alto vacío y el desarrollo de nuevas técnicas para el estudio de las últimas capas electrónicas de los átomos de materiales cristalinos, han contribuido a entender la Fisicoquímica de las Superficies; sin embargo la mayoría de los trabajos de investigación desarrollados se centraban en materiales conductores o semiconductores principalmente, hasta el surgimiento del microscopio de fuerza atómica como una alternativa para el análisis de superficies de materiales conductores y no conductores.

[HIN00b]

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 μm . El rango de acabado superficial obtenido de un proceso de fresado es 1 – 200 μm 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 μm [CHO98].

6.2 Microscopía de fuerza atómica

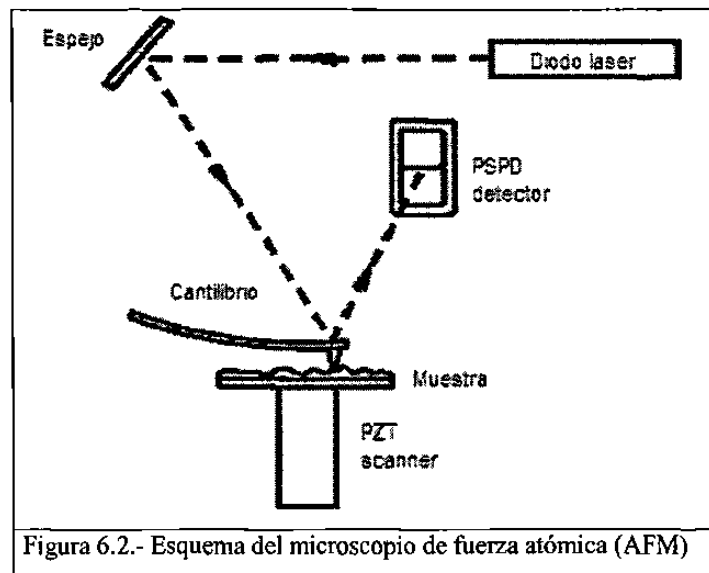
La microscopía de fuerza atómica es una técnica de caracterización de superficies creada en 1968 por G. Binning, C. Quate y Ch. Gerber. Esta se fundamenta en la construcción de imágenes digitalizadas mediante la medición de las fuerzas repulsivas y atractivas que ocurren entre los átomos de una punta y los de la superficie de la muestra. (Figura 6.1)



El microscopio cuenta con un sistema piezoeléctrico donde la punta se encuentra localizada al final de una parte flexible en voladizo, de tal manera que al efectuar un barrido sobre la muestra, responde a los picos o valles ocasionando que este se flexione. Dichas flexiones se monitorean haciendo incidir un haz de luz justo en la parte superior de la punta, donde el haz es reflejado y se alinea hacia un fotodetector sensible de posición.

Por otra parte la muestra se coloca sobre un dispositivo de barrido responsable de los desplazamientos que se suscitan debajo de la punta durante el barrido; al flexionarse debido a la topografía de la muestra que está siendo rastreada, la posición del punto del haz reflejado en el fotodetector indica cuanto se flexiona.

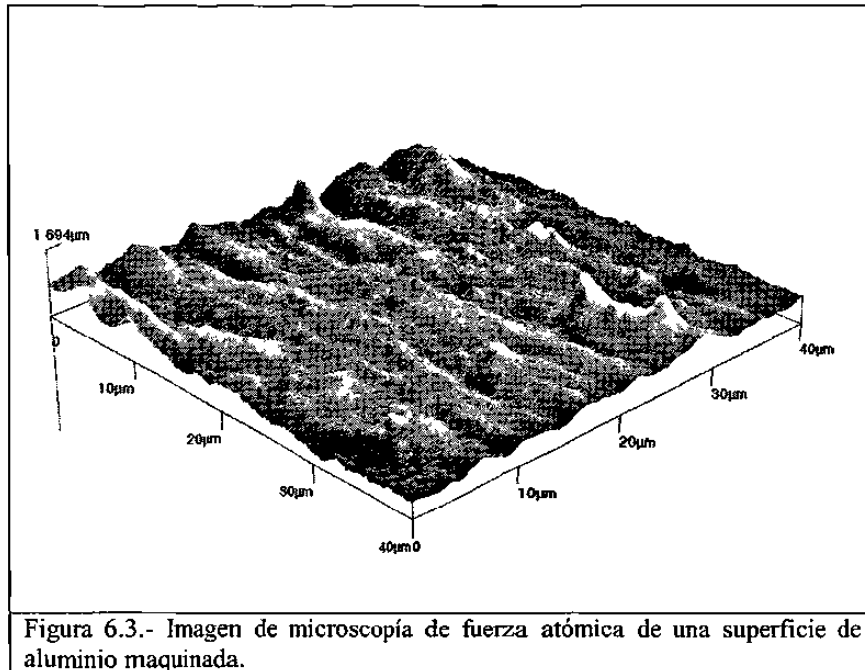
El mecanismo de barrido mueve la muestra hacia arriba o hacia abajo con el fin de mantener la flexión constante, además de desplazarla en los planos X y Y. Este movimiento del mecanismo coincide con la topografía de la superficie ya que por cada altura generada en el eje Z durante el análisis corresponde un punto de coordenadas X y Y. La señal obtenida se digitaliza con el propósito de construir imágenes de la superficie. (Figura 6.2)



6.3 Modelado de Capa Textura

Para generar la capa de rugosidad a baja escala, se emplea un microscopio de fuerza atómica que realiza un barrido sobre la superficie maquinada. Este análisis genera una serie de puntos con coordenadas X, Y y Z que pueden ser manipulados por medio de programas computacionales en forma de matriz para generar una superficie en tres dimensiones, como se muestra en la figura 6.3.

A partir de la matriz también es posible obtener un ajuste a curva empleando Boltzman, Gaussian, Lorentzian, Exponential o Sigmoideal con el fin de incrementar la longitud de la capa y así poder sumarla a las otras capas antes descritas.



6.4 Resumen del Capítulo

Este capítulo hace referencia a conceptos de microscopía de fuerza atómica, dando algunos antecedentes sobre esta tecnología y su aplicación en el análisis de superficies. Se describió el funcionamiento del microscopio de fuerza atómica y se presentó la metodología para generar la capa de rugosidad a baja escala.

CAPÍTULO 7

EXPERIMENTACIÓN

Se realizaron cinco experimentos utilizando un valor diferente de velocidad de avance. Dichos experimentos fueron realizados en trabajos anteriores del departamento de sistemas integrados de manufactura, tales como proyecto de variables en vueltas en el maquinado, caracterización de superficies maquinadas por medio de parámetros de rugosidad [LOP02c] y estudios de maquinabilidad para aleaciones de aluminio Al-MgSi 6063 [LOP02].

La velocidad de giro de la herramienta se seleccionó como el valor más bajo de acuerdo a los valores típicos de trabajo para aluminio en pruebas de maquinabilidad de la Asociación Americana de Metales [ASM16]. El rango de avance utilizado fue en velocidades bajas, con el fin de que las variables del proceso que se deseaban medir, así como el acabado superficial de la pieza tuviese características fácilmente identificables.

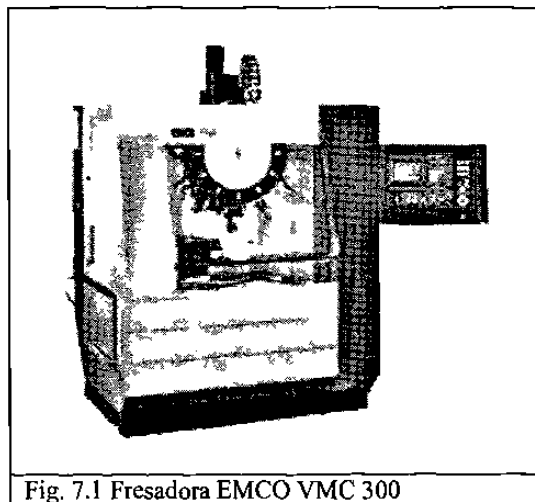


Fig. 7.1 Fresadora EMCO VMC 300

Los experimentos se realizaron en el centro de maquinado EMCO VMC 300 (Figura 7.1). El material usado en los experimentos fue 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.

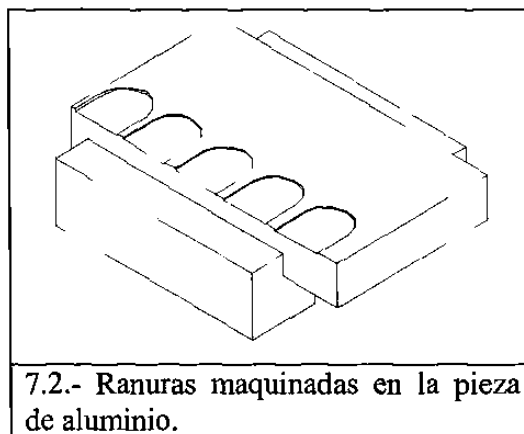
Tabla I.- Parámetros de maquinado.		
Número de álabes	N	2
Radio de la herramienta (mm)	r	5
Velocidad de giro (rpm)	S	1000
Profundidad de corte (mm)	t	2.54

Para los ensayos de maquinado, el material fue cortado en piezas de 88.9 x 50.8 x 12.7 mm., para posteriormente realizar el fresado.

Para determinar la relación que existe entre los parámetros de corte y la calidad superficial, se realizaron experimentos con diferentes velocidades de avance (Tabla II), se hicieron mediciones de la calidad superficial a varias escalas diferentes a lo largo de estas ranuras y se procesó la información obtenida para compararlos.

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

El maquinado se hizo en una pasada de herramienta, a profundidad de corte y velocidad constantes. En la figura 7.1 se muestran las cinco ranura resultantes de los experimentos.



7.1 Justificación y uso del material empleado.

El material utilizado en los experimentos fue un perfil extruido de aluminio comercial para maquinado. Este material es usado en la región por talleres de maquinado para la fabricación de piezas de aluminio con aplicación de planta tales como guías, cajas de balero para correderas, etc. En la industria de la decoración se emplea como piezas de ornato y soportes de baja carga, como lamparas de mesa y otros objetos de uso doméstico.

7.2 Medición de ondulación

Para el análisis de ondulación se empleo un brazo de medición por coordenadas marca FARO modelo Gold 8 con una punta de 3mm de diámetro (Figura 7.2). 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.

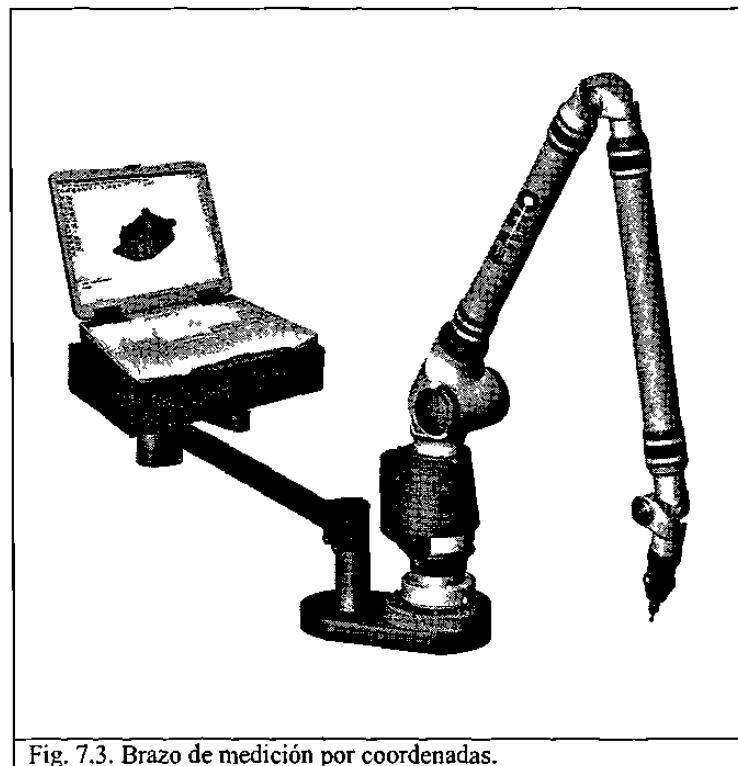


Fig. 7.3. Brazo de medición por coordenadas.

7.3 Medición de rugosidad

Se utilizó un rugosímetro marca Mitutoyo Surftest 211 series 178 (Figura 7.3), 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.



7.4 Medición de rugosidad a baja escala

Para el análisis de rugosidad a baja escala se empleó un microscopio de fuerza atómica marca QUEST, modelo QSCOPE 250 (figura 7.5). Se empleó el 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 $10 \times 10\ \text{mm}$ de cada experimento, para poder analizarlas en el microscopio debido a que la geometría del microscopio no permite medir piezas de dimensiones como las de la pieza original.

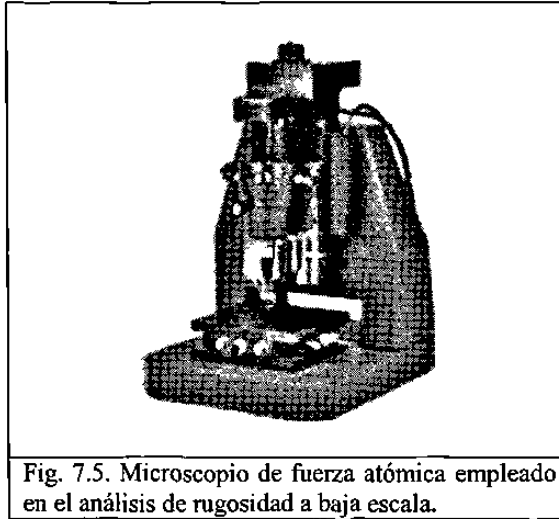


Fig. 7.5. Microscopio de fuerza atómica empleado en el análisis de rugosidad a baja escala.

7.5 Resumen del Capítulo

Mediante el empleo de un perfilómetro se realizó un análisis superficial de la rugosidad a alta escala de cada experimento, con el cual se obtuvieron los perfiles de alturas. Se hizo un análisis de ondulación por medio del brazo de coordenadas, con el que se obtuvieron una serie de puntos con coordenadas x , y , z de las superficies maquinadas. Por último se realizó un análisis de microscopía a baja escala por medio de un microscopio de fuerza atómica a cada experimento.

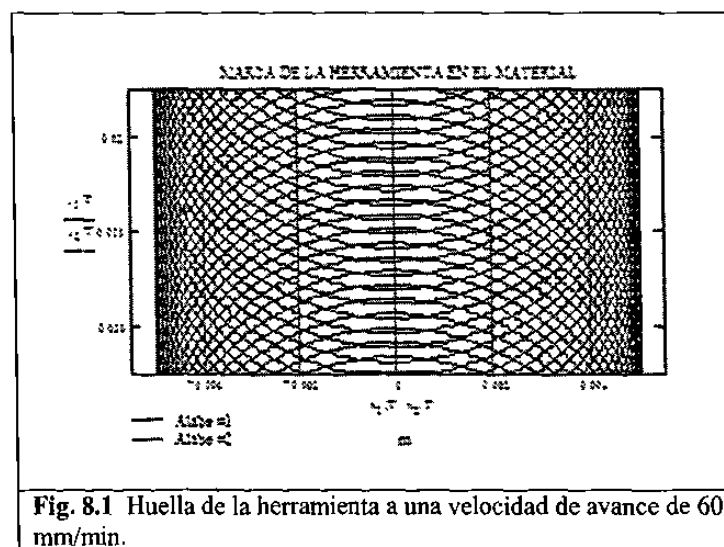
Capítulo 8

Resultados y discusión

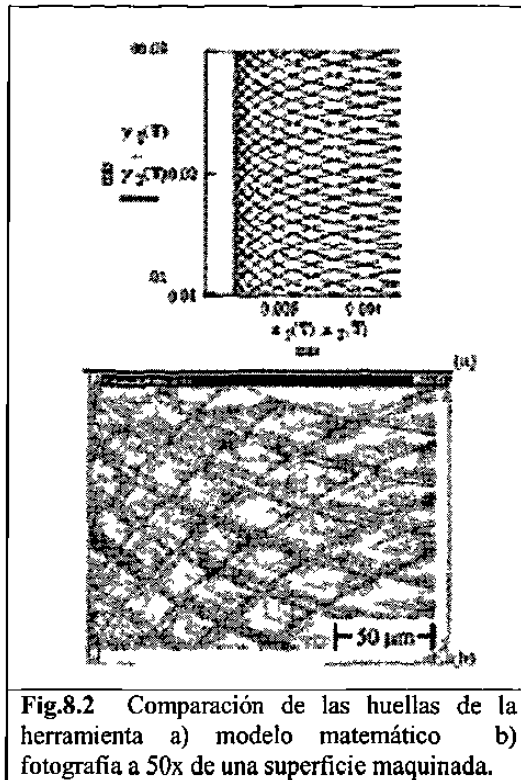
En este capítulo se presentan los resultados de la medición de ondulación, rugosidad a alta escala y a baja escala del experimento 1 (60mm/min), el resto de los resultados se encuentran en el Apéndice I debido a la cantidad de gráficos y datos. Adicionalmente se presentan las capas correspondientes a cada una de las características superficiales antes mencionadas y se suman dichas capas para generar virtualmente la superficie maquinada del experimento 1. Finalmente se genera una superficie a una velocidad de avance diferente a la de los experimentos, empleando el método del modelado de superficies maquinadas del presente trabajo.

8.1 Capa de la huella de la herramienta

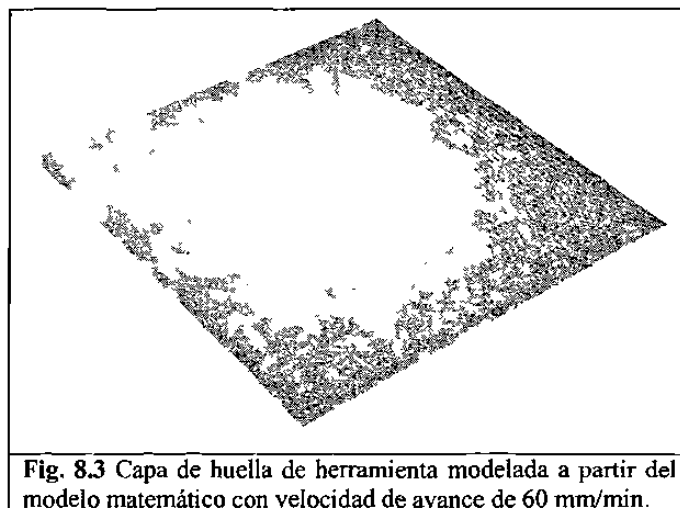
Con el modelo matemático se analizó la trayectoria de la huella a velocidades de 60, 70, 80, 90 y 100 mm/min (Apéndice I). En la figura 8.1 se muestra la gráfica del modelo matemático para un avance de 60 mm/min.



En la figura 8.2 se puede comparar la gráfica del modelo matemático y una fotografía a 50x de la superficie maquinada.



La capa de la huella de la herramienta para una velocidad de 60 mm/min se presenta en la figura 8.3. Al observar las capas de las cinco velocidades diferentes se puede percibir que el espaciamiento entre huellas es mayor al aumentar la velocidad de avance (Apendice I).

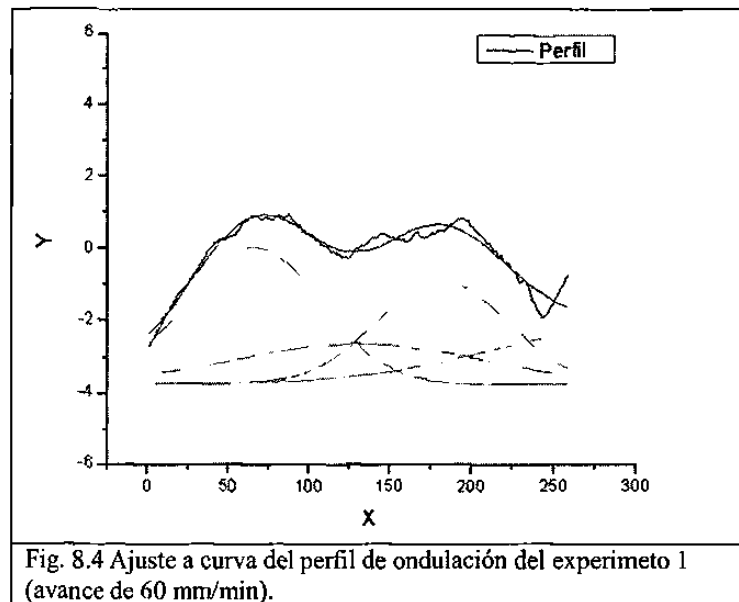


8.2 Capa de ondulación.

8.2.1 Resultados de análisis de ondulación

Al igual que en la medición de rugosidad, el resultado del análisis de superficie por medio del brazo de coordenadas fueron 5 perfiles de alturas pero a una escala mayor debido al diámetro de la punta (Figura 8.5). Los resultados del análisis de ondulación se presentan en el Apéndice I.

Los perfiles de alturas correspondientes a la ondulación de la superficie maquinada se ajustaron a curva, como se muestra en la figura 8.5



En la figura 8.6 se muestra el diagrama de ondulación con respecto a la velocidad de avance. Por medio de interpolación se obtienen los valores de ondulación para velocidades de avance intermedias.

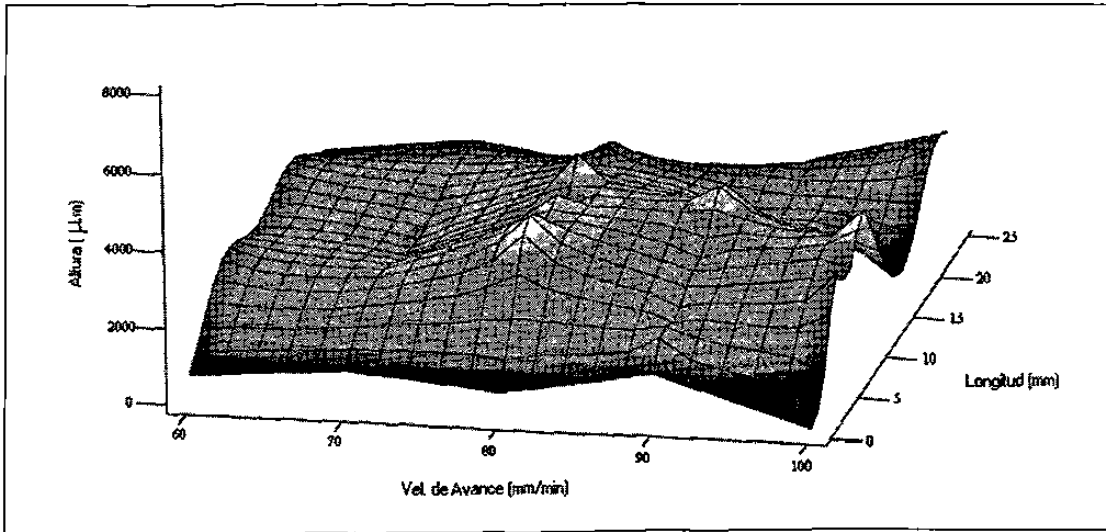


Figura 8.5. Diagrama de ondulación con respecto a la velocidad de avance para cada experimento, donde el eje x corresponde a las velocidades de avance en mm/min, el eje y es la longitud de barrido en mm y z es la altura en μm .

8.2.2 Modelado de capa de ondulación

Dichos perfiles fueron ajustados a curva para generar matrices. Al igual que en la capa de rugosidad, los números en la matriz corresponden a alturas representadas gráficamente como tonos de gris. A partir de estos gráficos se obtuvo la capa de ondulación (Apéndice I). En la figura 8.7 se muestra una superficie modelada con una velocidad de avance 60 mm/min.

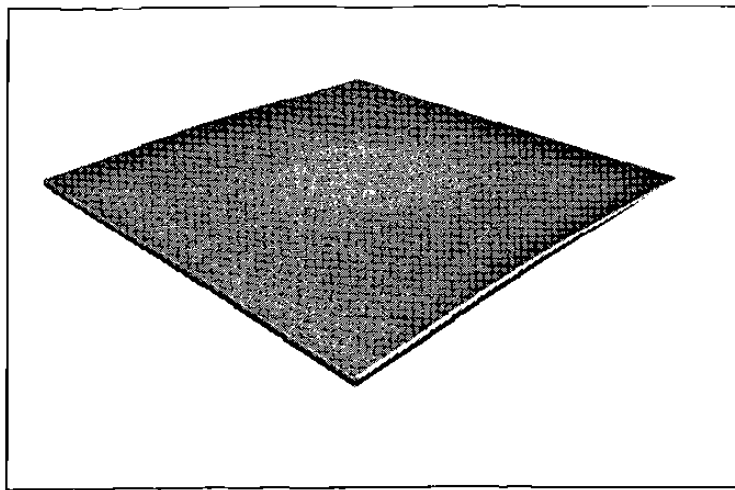
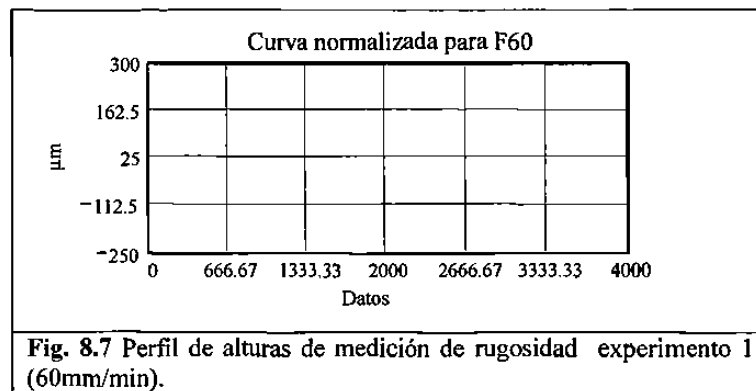


Fig. 8.6 Superficie modelada a partir del análisis de ondulación con una velocidad de avance 60 mm/min a una escala de 10 mm.

8.3 Capa de rugosidad

Empleando el rugosímetro se realizaron barridos a los cinco experimentos y se obtuvieron perfiles de alturas formados por 40000 datos. Se tomaron 4096 datos representativos del perfil de alturas (Apéndice II) a partir de los cuales se realizó el análisis.

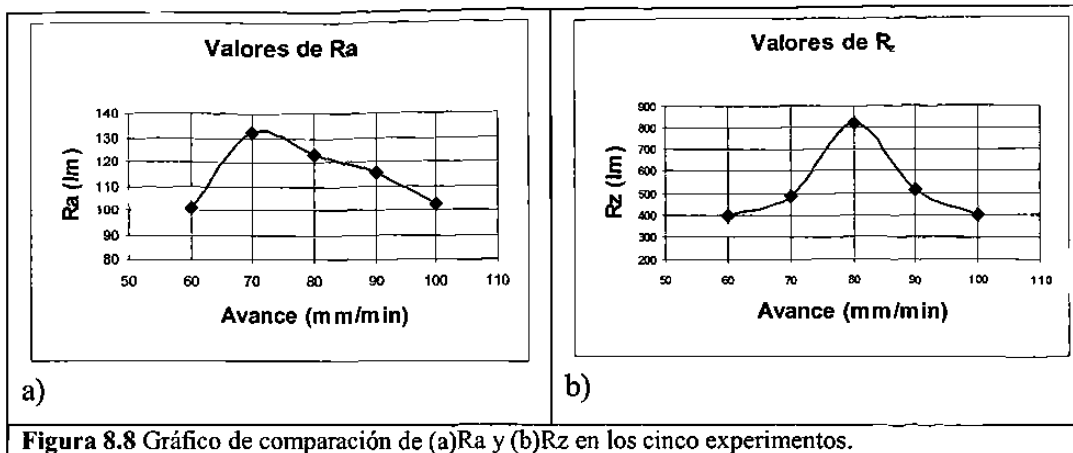
8.3.1 Resultados de análisis de rugosidad



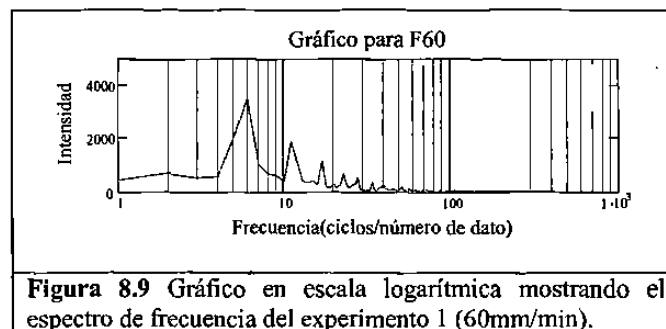
La tabla III muestra los resultados de los valores de rugosidad promedio (R_a) y rugosidad máxima (R_z) para cada uno de los valores de avance.

Tabla III Resultados obtenidos en los experimentos		
F (mm/min)	R_a (μm)	R_z (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

El valor de rugosidad promedio R_a al igual que el valor de altura máxima R_z presentan una tendencia a incrementarse para velocidades de avance medias (Figura 8.9). Ambos picos muestran una zona de baja calidad superficial.



Mediante el espectro de frecuencias se realizó un filtrado de la rugosidad medida a superficies maquinadas con diversos avances. Se determinó que las bajas frecuencias correspondían a la huella de la herramienta y las altas frecuencias a la rugosidad natural (Figura 8.10). Los espectros de frecuencia para cada uno de los experimentos se muestran en el Apéndice I



Los espectros muestran una zona de baja frecuencia con intensidades mayores al resto. Las tablas 8.2.1 a 8.2.5 del Apéndice I, 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 VII.III a VII.VII son 1 y 20. Los valores de Ra y Rz de las señales reconstruidas se muestran en la figura 8.11.

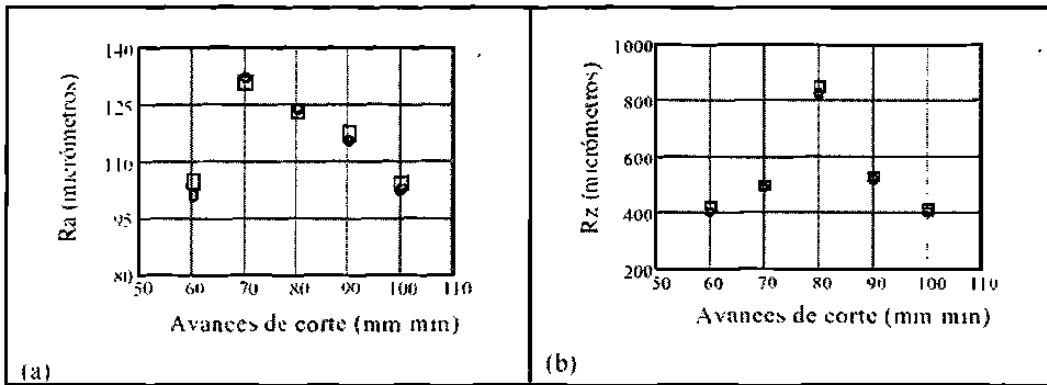
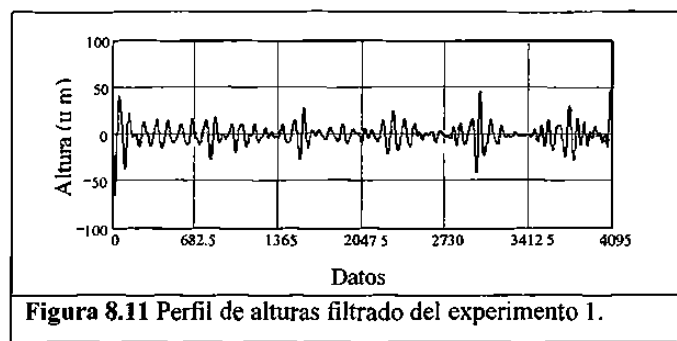


Figura 8.10 Gráfico de comparación de (a)Ra y (b)Rz de la señal original con respecto a la huella de la herramienta obtenida de la señal filtrada en cada uno de los 5 experimentos. En donde:

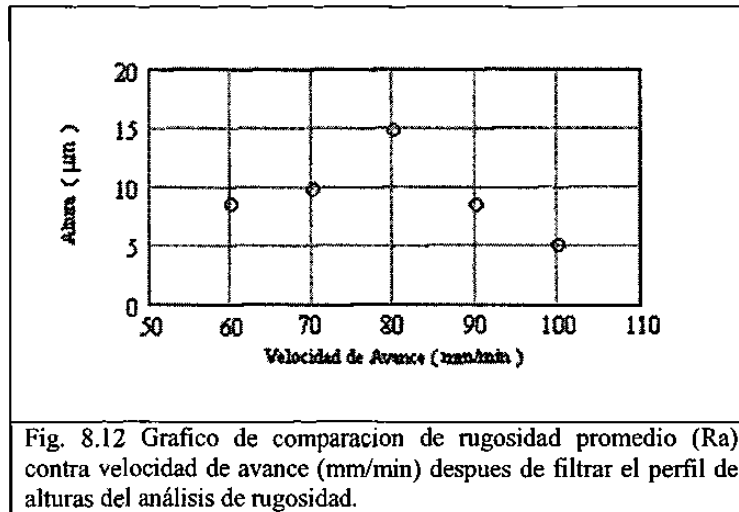
- O Es el valor de rugosidad antes de filtrar.
- X Es el valor de rugosidad después de filtrar.

La huella de la herramienta está determinada por las primeras componentes de baja frecuencia del espectro. Con este análisis se demuestra que los valores convencionales de Ra y Rz representan esencialmente la huella de la herramienta.

En la figura 8.12 se muestra el perfil de alturas medido por el rugosímetro después de ser filtrado por medio de Fourier. Este perfil representa la rugosidad real de la superficie maquinada y se puede observar que el promedio de alturas disminuye debido a que ya no esta presente la huella de la herramienta.



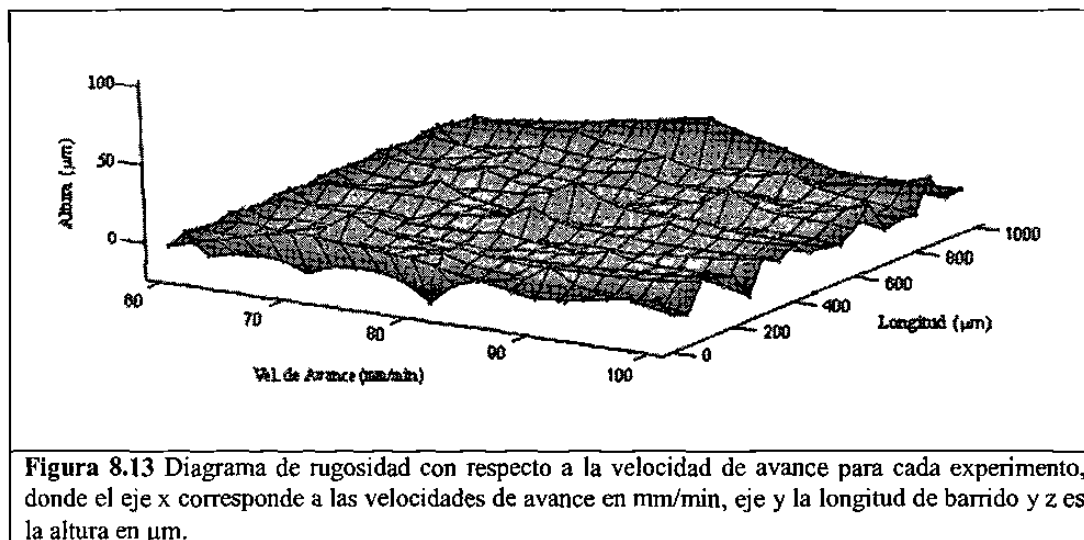
A partir de este nuevo perfil se recalcularon las rugosidades promedio (Ra) para cada uno de los experimento (Figura 8.13). Al compararlas entre si se observa que al igual que en la rugosidad antes de filtrar, se presenta un valor de rugosidad mayor para velocidades de avance medias.



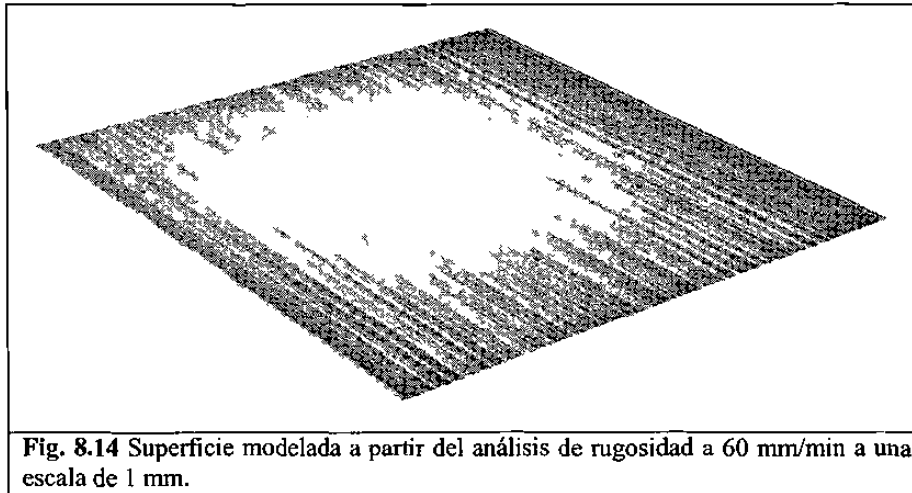
8.3.2 Modelado de capa de rugosidad

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 resultante del filtrado. Las gráficas de los ajustes a curva se presentan en el Apéndice I.

En la figura 8.14 se muestra el diagrama de rugosidad con respecto a la velocidad de avance. Por medio de interpolación se obtienen los valores de rugosidad para velocidades de avance intermedias, como por ejemplo 65 mm/min.



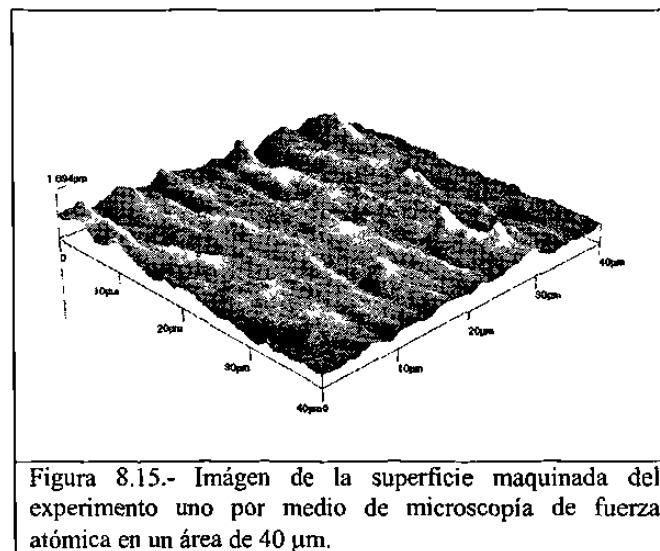
A partir de las curvas de ajuste se generaron matrices, con las cuales se obtuvieron los mapas de bits utilizados en el modelo de superficie. A continuación se presenta una superficie modelada considerando solo la característica de rugosidad para una velocidad de 60 mm/min (figura 8.15).



8.4 Capa de rugosidad a baja escala

Mediante el análisis de microscopía de fuerza atómica se obtiene un histograma de alturas, altura promedio, desviación RMS y desviación promedio de cada uno de los cinco experimentos.

La superficie reconstruida por medio del microscopio de fuerza atómica del experimento 1 (60 mm/min) se presentan en la figura 8.16. Los histogramas de frecuencias (Apéndice II) muestran que a velocidades de avance bajas se presenta con mayor frecuencia alturas superiores que a velocidades de avance altas.



Al comparar las superficies reconstruidas de los 5 experimentos (Apéndice I) se observa también que la superficie a) es más irregular que la e) donde la velocidad de avance es mayor. A diferencia del análisis de rugosidad a alta escala, aquí no son las velocidades medias las de baja calidad sino las velocidades bajas. Esta diferencia se puede deber a que el área de barrido del MFA es muy reducida en comparación a la del perfilómetro y posiblemente los resultados varíen al hacer varios análisis sobre la misma superficie.

8.5 Superficie reconstruida

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 luego generar capas que representan las características de cada uno de ellos.

Operaciones aritméticas y lógicas elementales fueron empleadas para juntar las capas sintéticas de las diversas características superficiales, generando el modelo de superficies maquinadas (Figura 8.17).

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

En la figura 8.18 se muestra una superficie modelada por medio de este método a una velocidad de 65 mm/min. Las capas de esta superficie se obtuvieron interpolando los valores de rugosidad y ondulación de los experimentos anteriores (Fig. 8.10 y 8.14).

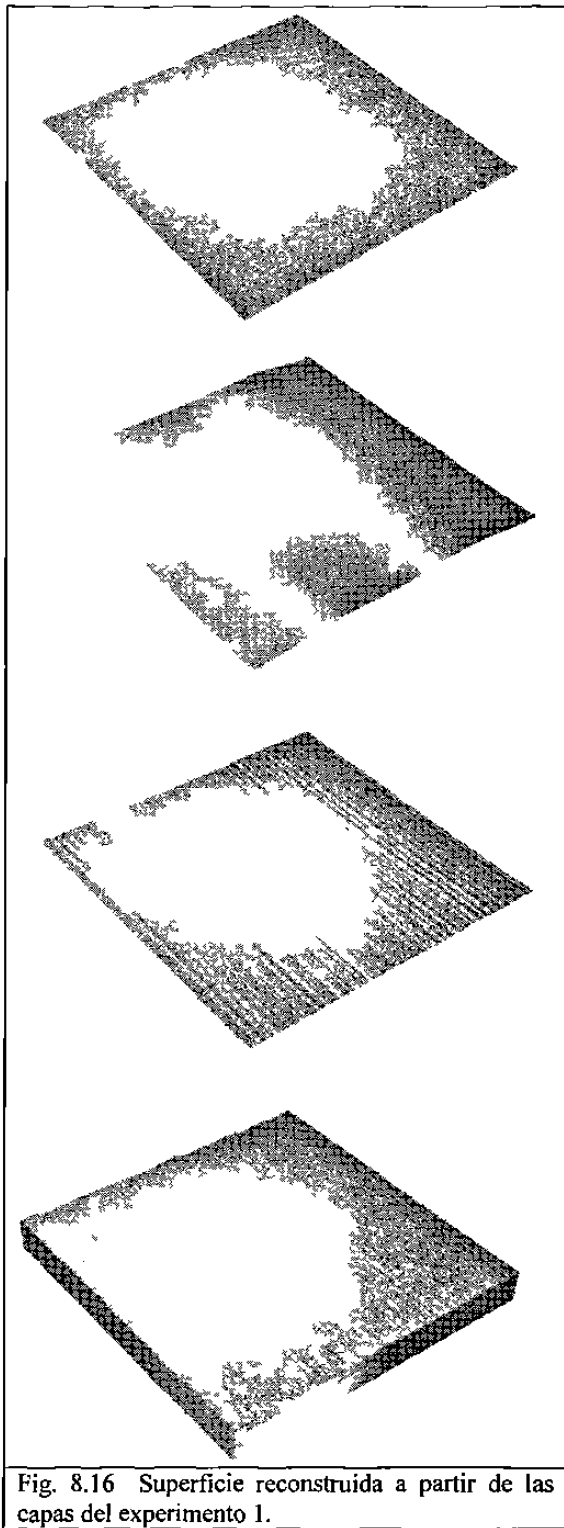
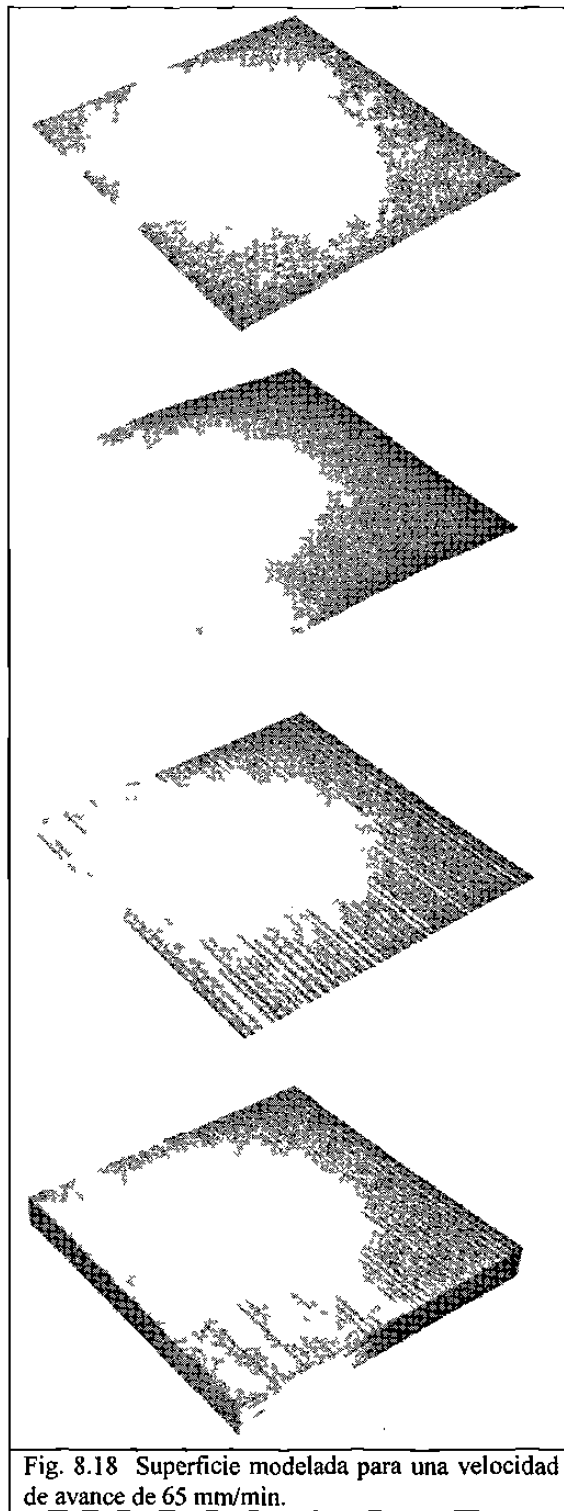


Fig. 8.16 Superficie reconstruida a partir de las capas del experimento 1.



8.6 Resumen del Capítulo

Se presentaron los resultados de los análisis de rugosidad a alta y baja escala al igual que los resultados del análisis de ondulación de los cinco experimentos. Se compararon los resultados y se concluyó que la calidad superficial a velocidades medias es mayor en cuanto a rugosidad a alta escala se refiere, mientras que para el análisis de rugosidad a baja escala, la calidad aumenta a velocidades de avance mayores. Se modelaron capas de cada una de las características superficiales y se sumaron para reconstruir virtualmente la superficie maquinada. Por último se generó una superficie a una velocidad diferente a la de los experimentos mediante interpolación, logrando así predecir la calidad superficial.

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 Conclusiones

Se observó el proceso de corte de un aluminio comercial bajo condiciones particulares y se propuso un método para el modelado de superficies maquinadas 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, como son la ondulación, rugosidad a baja y alta escala y huella de la herramienta, para de esta manera inferir situaciones de maquinado mejoradas. Con esto 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 determinó que los valores de rugosidad R_a y R_z representan la huella de la herramienta, la cual está compuesta por las primeras 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.

En cuanto a calidad superficial, los análisis de ondulación y rugosidad a alta escala coincidieron en que a velocidades medias la calidad era baja mientras que en el análisis de rugosidad a baja escala la calidad baja era a velocidades bajas.

Se modelaron las superficies maquinadas de los cinco experimentos, las cuales cuentan con las características superficiales de las piezas maquinadas originales, 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 predecir las características superficiales de una pieza antes de ser maquinada.

9.2 Recomendaciones para trabajos futuros

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 herramienta para acabados de alta calidad.

Utilizar el presente trabajo como base para analizar superficies con otros parámetros de corte usando diferentes materiales y reconstruir dichas superficies por esta metodología. Los aspectos resultantes de la problemática de cada caso deberán abordarse por separado.

En el presente trabajo se emplearon solo las ecuaciones de las armónicas más representativas del perfil de rugosidad para modelar dicha capa. En futuros trabajos se deberán emplear todas las ecuaciones de las armónicas resultantes del filtrado, para obtener así un modelo más exacto de la capa de rugosidad.

Agregar a este modelo más capas que representen otras características producto del maquinado sobre la superficie, tales como efectos estéticos de brillo y color.

Realizar un análisis de rugosidad a baja escala más extenso, ya que los resultados de dicho análisis pueden variar mucho de una medición a otra sobre la misma superficie debido a la reducida área de barrido.

CAPÍTULO 10

REFERENCIAS

10.1 Referencias Bibliográficas

- [BOT89] Boothroyd, G., Knight, W. Fundamentals of machining and machine tools Ed. Marcel Dekker Inc., 1989
- [CHE00] Cheng-Gui Li, Shen Dong, Guo-Xiong Zhang Evaluation of the anisotropy of machined 3D surface topography. 0043-168 Elsevier Cience, 2000.
- [CHO98] Chow Kin Yean Creating machinable textures for CAD/CAM systems, Advanced Manufacturing Technology, 1998.
- [FEN02] Feng, C., Wang, X. Surface roughness predictive modeling: neural networks versus regresion. IIE Transactions. Vol. 53, 2002
- [GAL93] Galante, G., Lombardo, A., Piacentini, M. Fractal dimension: A useful tool to describe the microgeometry of machined surfaces. Mach. Tools Manufact. Vol. 33 No.4 Pergamon Press, 1993.
- [GRO96] Groover, P. Fundamentals of modern manufacturing. Ed. Prentice Hall, 1996
- [GUE00] Guerrero, X., Hinojosa, M., Garza, R. Análisis de la superficie de alambión de cobre usando microscopia de fuerza atómica. Revista Ingenierías V3, No. 6, 2000
- [HIN00b] Hinojosa, M., Reyes, M. La rugosidad de superficies: Topometria. Revista Ingenierias Vol. IV, No. 11, 2002.
- [LEE99] Lee, T., Lin, Y. An improved sculptured part surface design method with jerk continuity consideration for smooth machining. The Internacional Journal of Advanced Manufacturing Technology. 1999
- [LIN99] Lin, J., Tai, C. Accuracy optimization for mould surface profile milling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 15, Springer-Verlag London, 1999.
- [LIN98] Lin, A., Gian, R. A multiple-tool approach to rough machining of sculptured surfaces. The Internacional Journal of Advanced Manufacturing Technology. 1998
- [LIN99] Lin, A., Gian, R. An Integrated Model of a Fixture-Workpiece System for Surface Quality Prediction. The Internacional Journal of Advanced Manufacturing Technology. 1999
- [LIN95] Lindbeck, John Product design and manufacture. Ed. Prentice Hall, 1995
- [LOP01c] López, E., Ruiz, M., Colás, R. Modelaje de la viruta en el proceso de maquinado. Parte 1. Revista Ingenierias Vol. IV, No. 13, 2001.
- [LOP02a] López, E., Ruiz, M. Modelaje de la viruta en el proceso de maquinado. Parte II. Validación experimental. Revista Ingenierias Vol. IV, No. 14, 2002.
- [LOP02c] López, E., Caracterización de superficies maquinadas por medio de

- [LOP99] Cavazos, R., Delgado, M., López, M., Guerrero C., Reyes, E., Ortiz, U. parámetros de rugosidad. Tercer Foro de Investigación UDEM 2002.
Grain Boundary analysis of an Al-Cu 4% alloy by atomic force microscopy. *Wire Journal Internacional*. 1999
- [LOP02] López, Eugenio Estudio de maquinabilidad para aleaciones de aluminio AIMgSi 6063. Tesis doctoral FIME-UANL, 2002.
- [MON99] Monostori, L., Viharos, J., Markos, S. Satisfying various requirements in different levels and stages of machining using one general ANN-based process model. Technical University of Budapest.
- [REY99] Reyes, E., Guerrero, C., Hinojosa, M., Gonzalez, V. Análisis de superficies mediante microscopia de fuerza atómica. VII Congreso Iberoamericano de Química Inorgánica. 1999
- [SAR00] Sarma, R. Flat-Ended Tool Swept Sections for Five-Axis NC Machining of Sculptured Surfaces. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2000
- [SHE93] Sheppard, L. Designing for Manufacturing: An Upadotc. Lash Publications Internacional 1993
- [SON92] Song, J., Vorburger, T. Surface Texture. National Institute of Standards and Technology. 1992
- [SUV96] Suvrat, J. Surface modeling of non-mathematical surfaces and optimization of orientation for manufacturing. California State University, Sacramento. 1996
- [TUM00] Tumer, I., Wood, K., Busch-Vishniac, I. A mathematical Transform to Analyze Part Surface Quality in Manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2000
- [WAN99] Wang, Y., Tang, X. Five-Axis NC Machining of Sculptured Surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 15. Springer-Verlag London, 1999.
- [WEI00] Weinert, K., Surmann, T., Mehnen, J. Parallel Surface Reconstruction. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002.
- [WHI91] Whintont, E. Surface Topography and Image Analysis (Area). *ASM Handbook*, Vol. 18, 1991
- [YAN99] W. Yang, H. Ding, Y. Xiong Manufacturability Analysis for a Sculptured Surface Using Visibility Cone Computation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 15. Springer-Verlag London, 1999
- [YEA98] 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.
- [ZEL00] Zeleny, R., González, C. Metrología Dimensional, McGraw Hill, 2000.
- [ZHA94] Zhang, G, Dynamic Generation of Machined Surfaces PartI:

- Kapoor, S. Description of a Random Excitation System. University of Maryland Research Center
- [ZHA94] Zhang, G, Dynamic Generation of Machined Surfaces. Part 2: Kapoor, S. Construction of Surfaces Topography. University of Maryland Research Center
- [ZHA95] Zhang, G, Dynamic Visualization of the Surface Textura Formed Hwang, T. During Machining. University of Maryland Research Center
- [SZA96] Szalay, T., Investigation of machined surface using artificial Monostori, L., intelligence methods. Technical University of Budapest. Markos, S. Viharos, J.

10.2 Listado de figuras

<u>Num.</u>	<i>Descripción</i>	<i>Página</i>
2.1	Operaciones comunes de maquinado	13
2.2	Vista ampliada de una superficie maquinada	14
3.1	Posibles huellas producidas por un proceso de maquinado	18
3.2	Gráfica de la huella de la herramienta con avance de 60 mm/min	21
3.3	Esquema del modelado de la capa de la huella de la herramienta	22
4.1	Diferencia entre rugosidad y ondulación.	24
4.2	Parámetro de espaciado entre crestas	25
4.3	Ajuste a curva del perfil de ondulación	26
4.4	Esquema del modelado de la capa de ondulación	27
5.1	Principio de operación de un rugosímetro.	31
5.2	Metodología para el análisis del perfil de alturas	35
5.3	Modelado de la capa de rugosidad	36
6.1	Punta del microscopio de fuerza atómica	38
6.2	Esquema del funcionamiento del microscopio de fuerza atómica	39
6.3	Imagen de microscopía de fuerza atómica de aluminio	40
7.1	Fresadora EMCO VMC 300	41
7.2	Ranuras maquinadas en la pieza de aluminio	42
7.3	Brazo de medición por coordenada.	43
7.4	Rugosímetro empleado en la medición	44
7.5	Microscopio de fuerza atómica	45
8.1	Huella de la herramienta a una velocidad de 60 mm/min	46
8.2	Comparación de la huella del modelo matemático y una fotografía	47
8.3	Capa de la huella de la herramienta del experimento uno.	47
8.4	Ajuste a curva del perfil de ondulación	48
8.5	Diagrama de ondulación con respecto a la velocidad de avance	49
8.6	Capa de ondulación para el experimento uno.	49
8.7	Perfil de alturas de la medición de rugosidad del experimento uno.	50
8.8	Gráfico comparativo de Ra y Rz de los cinco experimentos	51
8.9	Gráfico en escala logarítmica mostrando el espectro de frecuencia	51
8.10	Gráfico comparativo de Ra y Rz antes y después de filtrar.	52
8.11	Perfil de alturas filtrado del experimento uno.	52
8.12	Gráfico comparativo de rugosidad promedio del perfil filtrado.	53
8.13	Diagrama de rugosidad con respecto a la velocidad de avance	53
8.14	Capa de rugosidad para el experimento uno.	54
8.15	Imagen a escala microscópica de la superficie del experimento uno	55
8.16	Superficie reconstruida a partir de las capas del experimento 1.	57
8.17	Superficie modelada para una velocidad de avance de 65 mm/min	58

10.3 Listado de tablas

<u>Num.</u>	<u>Descripción</u>	<u>Página</u>
I	Parámetros de maquinado	42
II	Avances de corte usados en los experimentos	42
III	Resultados de rugosidad	50
IV	Valores mas significativos de frecuencia	69

10.4 Listado de ecuaciones

<u>Num.</u>	<u>Descripción</u>	<u>Página</u>
3.1	Movimiento del filo de la herramienta en forma paramétrica	19
3.2	Ecuación 5.1 en términos del avance.	19
3.3	Desfasamiento entre álabes.	19
3.4	Ecuación resultante para el primer álabe .	20
3.5	Ecuación resultante para el segundo álabe.	20
3.6	Distancia del recorrido	21
3.7	Componentes de avance F	21
4.1	Parámetro de espaciamiento entre crestas	25
4.2	Ajuste a curva Gauss	26
5.1	Rugosidad promedio	29
5.2	Rugosidad máxima	29
5.3	Espectro de frecuencias	32
5.4	Condición para aplicar la transformada rápida de Fourier	33
5.5	Frecuencia asociada al elemento j	33
5.6	Filtrado de señal	33
5.7	Rugosidad promedio reconstruida	34
5.8	Rugosidad máxima reconstruida	34
5.9	Ecuación de armónica	35
5.10	Sumatoria de armónicas	35

APENDICE I

11.1 Gráficos de huella de la herramienta

En el siguiente figura se muestran las gráficas del modelo matemático que describe la huella de la herramienta, para las velocidades de avance antes descritas.

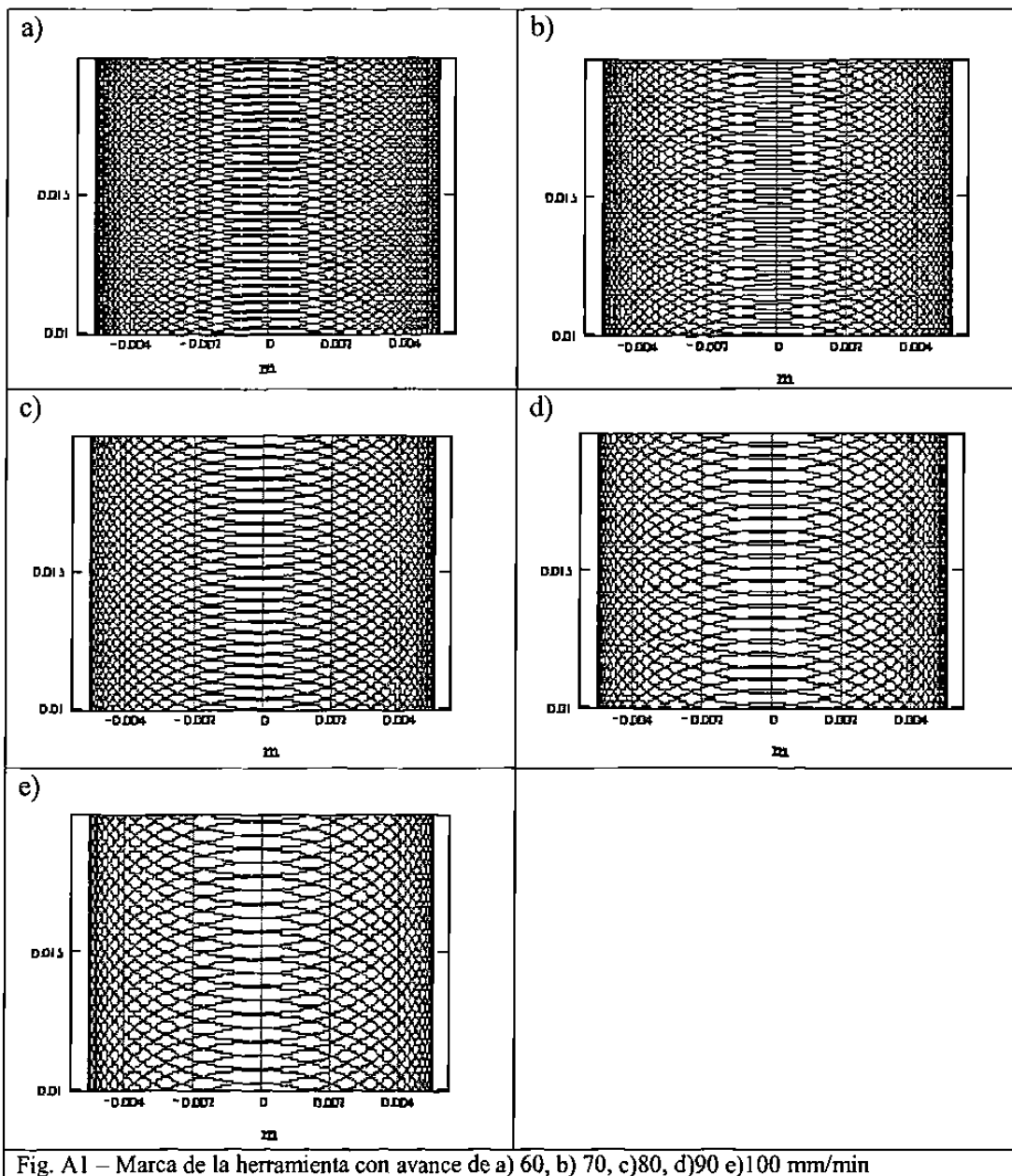
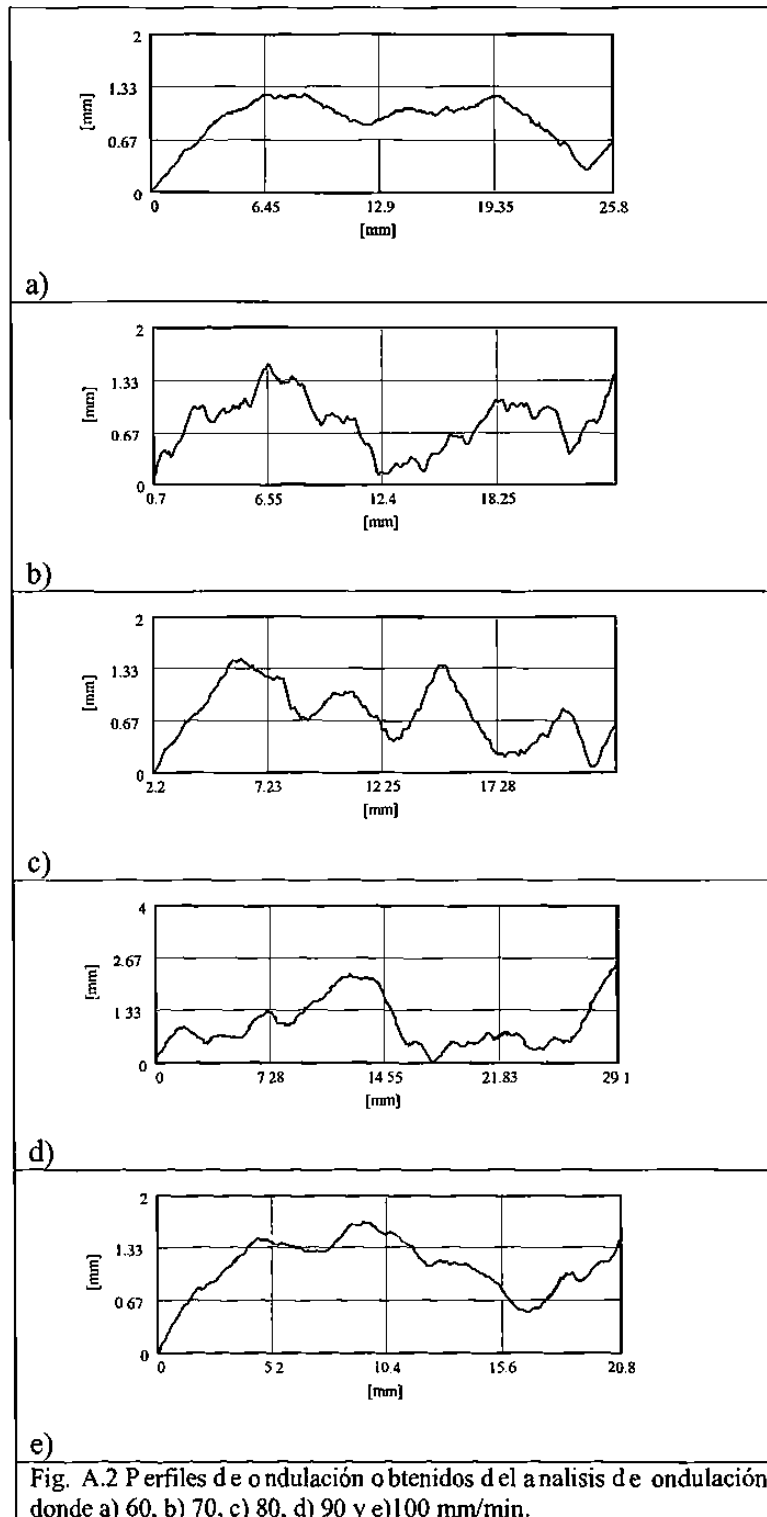


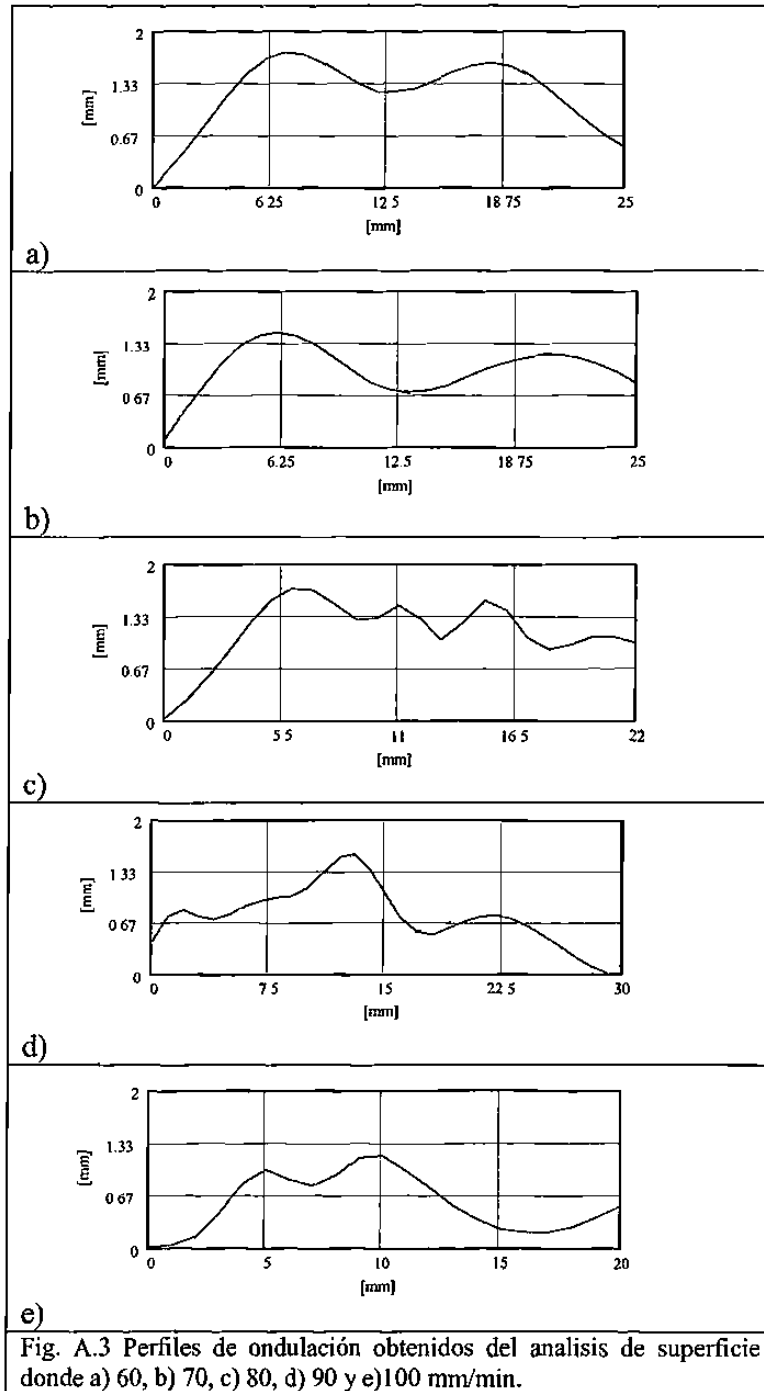
Fig. A1 – Marca de la herramienta con avance de a) 60, b) 70, c)80, d)90 e)100 mm/min

11.2 Resultados de los análisis de ondulación.

En la figura A2 se muestran los perfiles de altura normalizados del análisis de ondulación.



En la figura A.3 se muestran las gráficas de ajuste a curva de los perfiles de ondulación de los cinco experimentos.



11.3- Resultados de los análisis de rugosidad

Para la creación de la capa de rugosidad superficial, se hace un filtrado de los valores de rugosidad (Figura A4) mediante el espectro de frecuencias. Los espectros de frecuencia de los perfiles de rugosidad de los cinco experimentos se presentan en la figura A5.

Las tablas 8.2.1 a 8.2.5 presentan los valores significativos de frecuencia y sus índices

Tabla 8.2.1 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 8.2.2 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

Tabla 8.2.3 Valores obtenidos aplicando la FFT en el experimento de F80

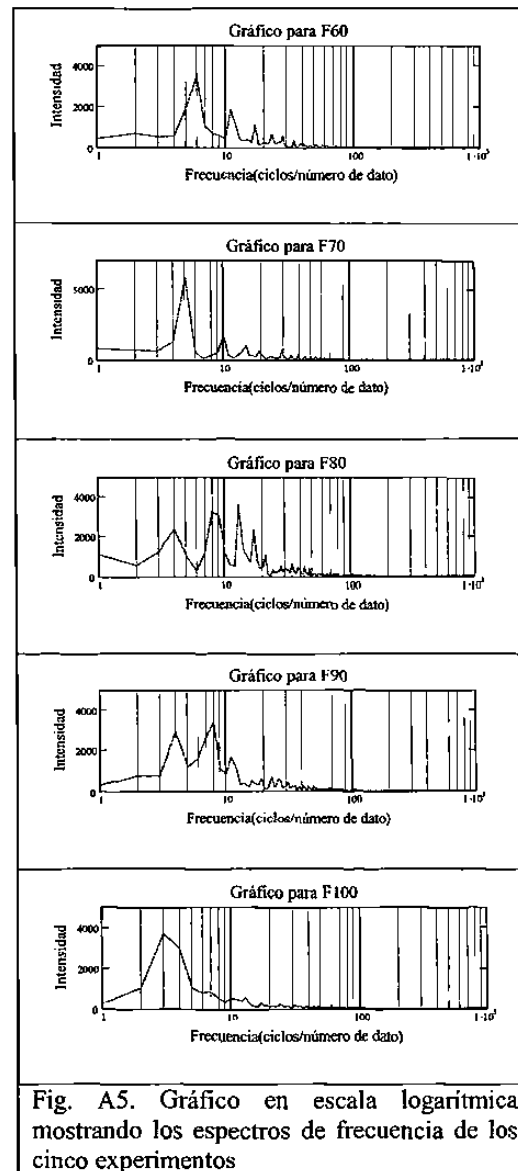
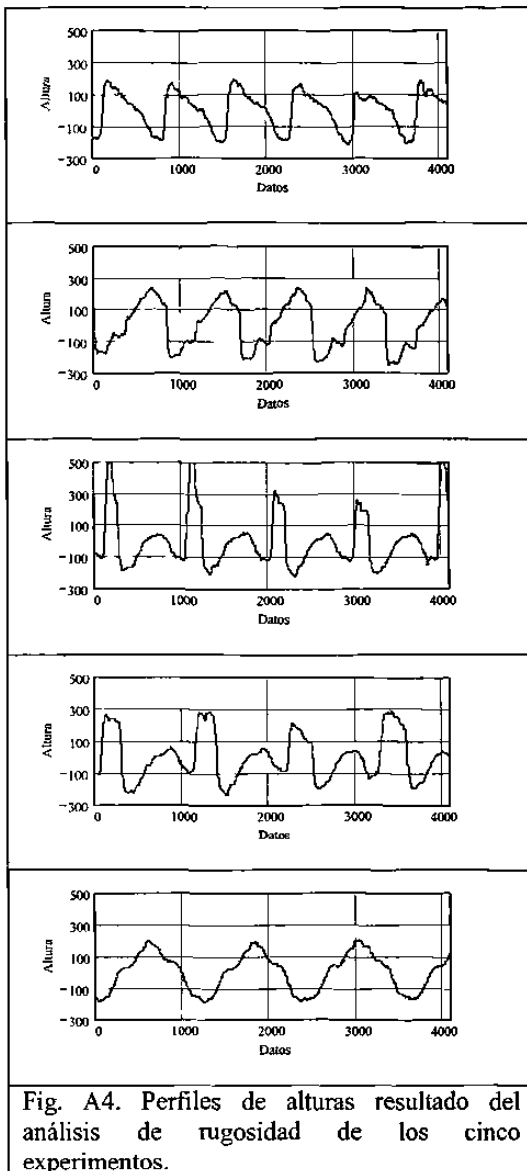
Frecuencia más significativa	Frecuencia (ciclos/ μm)	Intensidad
1	13	3563
2	8	3196
3	9	3012
4	4	2292

Tabla 8.2.4 Valores obtenidos aplicando la FFT en el experimento de F90

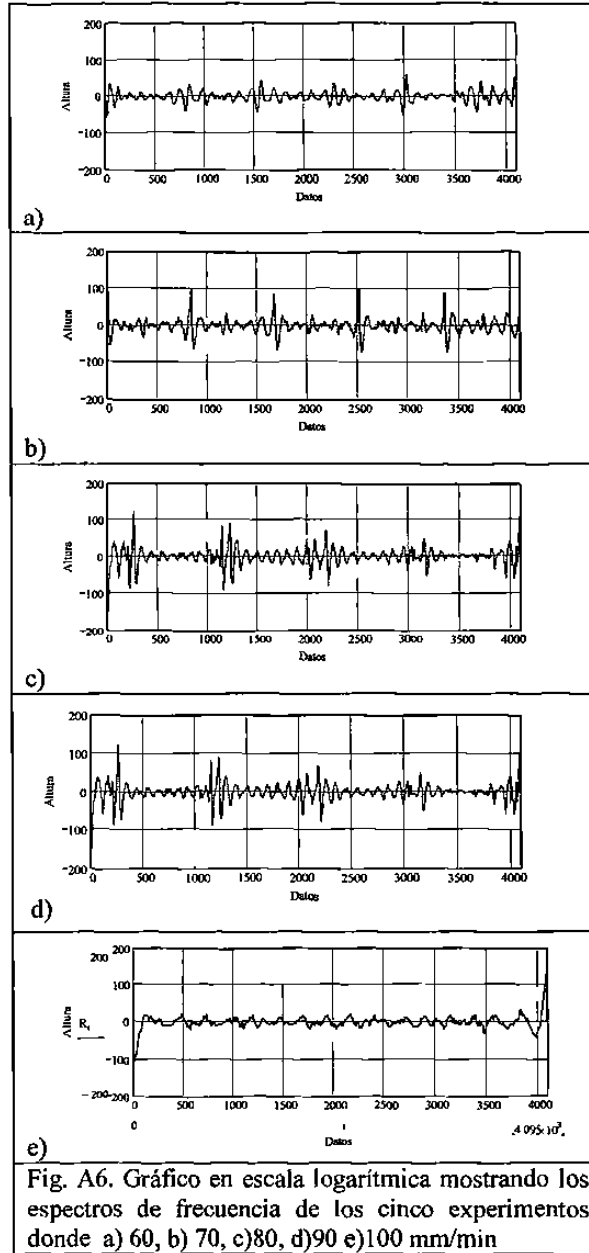
Frecuencia más significativa	Frecuencia (ciclos/ μm)	Intensidad
1	8	3376
2	4	2914
3	7	2597
4	11	1692

Tabla 8.2.5 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



En la figura A6 se muestran los perfiles de alturas ya filtrados. Se puede observar que a diferencia de los perfiles mostrados en la figura A2,



11.4 – Resultados de los análisis de rugosidad a baja escala.

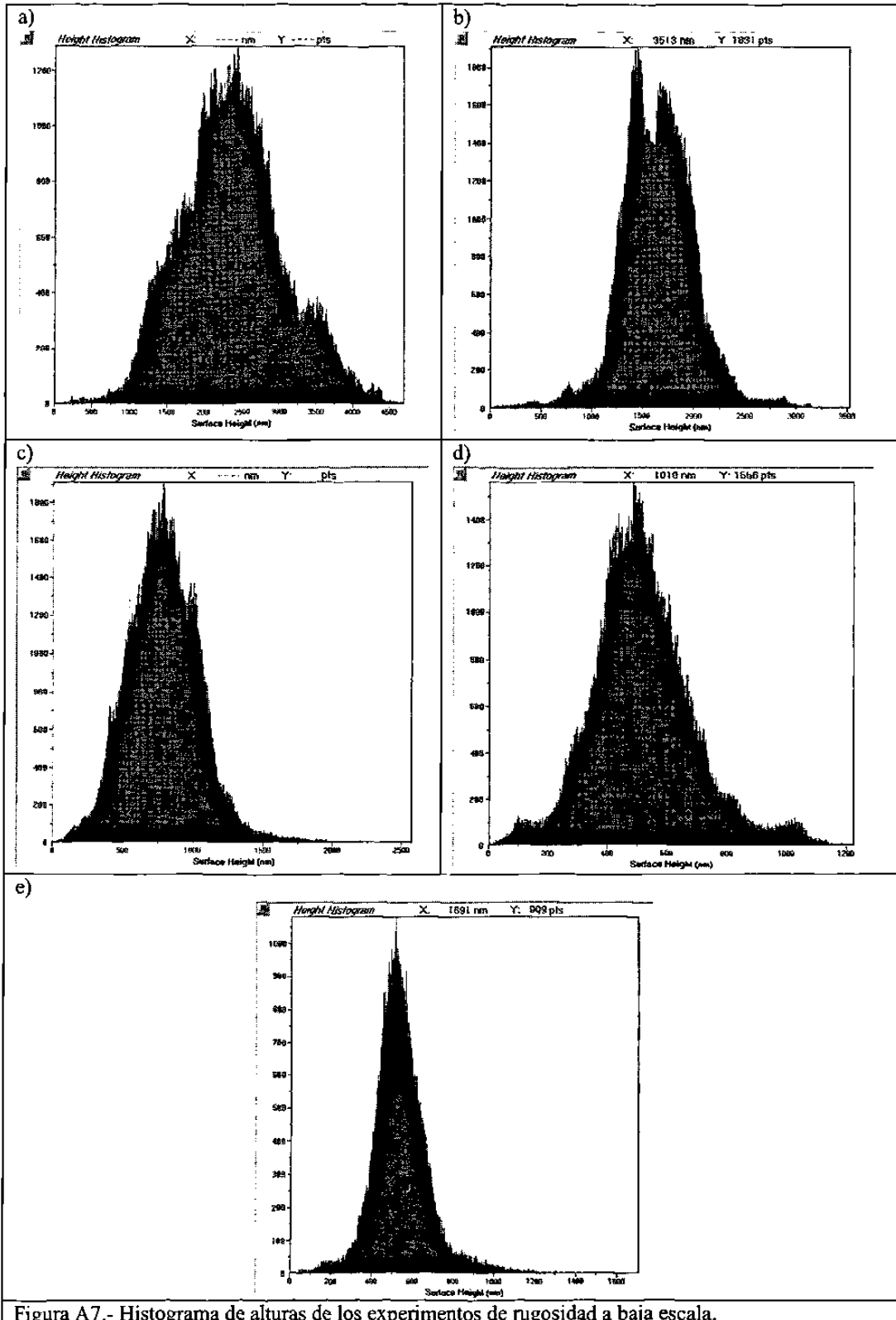
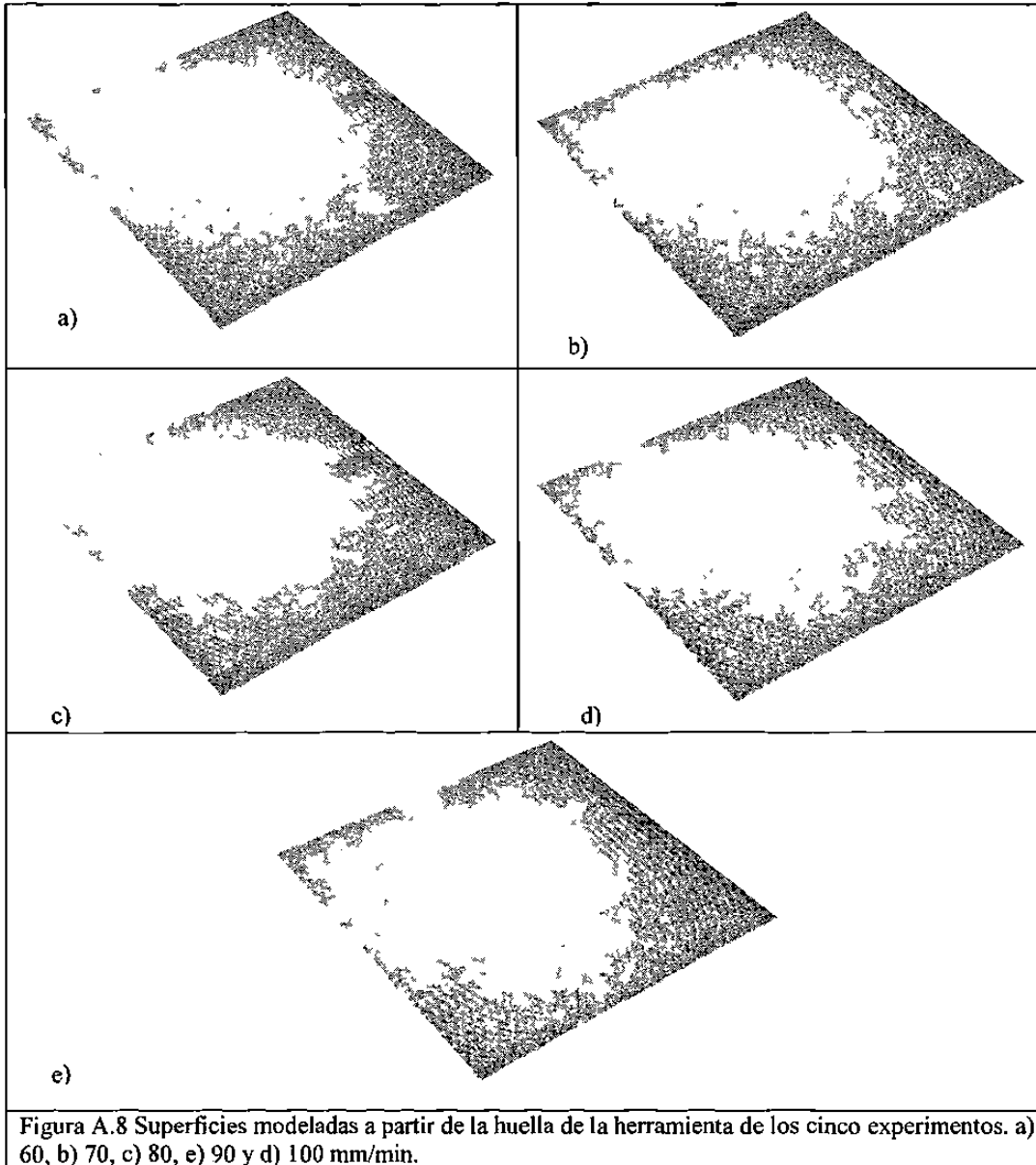


Figura A7.- Histograma de alturas de los experimentos de rugosidad a baja escala.

11.5 Capa de huella de la herramienta

A continuación se presentan las capas de la huella de la herramienta de los cinco experimentos. (Figura A.8)



11.6 Capa de ondulación

Dichos perfiles fueron ajustados a curva para generar matrices. Al igual que en la capa de rugosidad, los números en la matriz corresponden a alturas que pueden ser representadas gráficamente como tonos de gris. A partir de estos gráficos se obtuvo la capa de ondulación. (Figura 8.4)

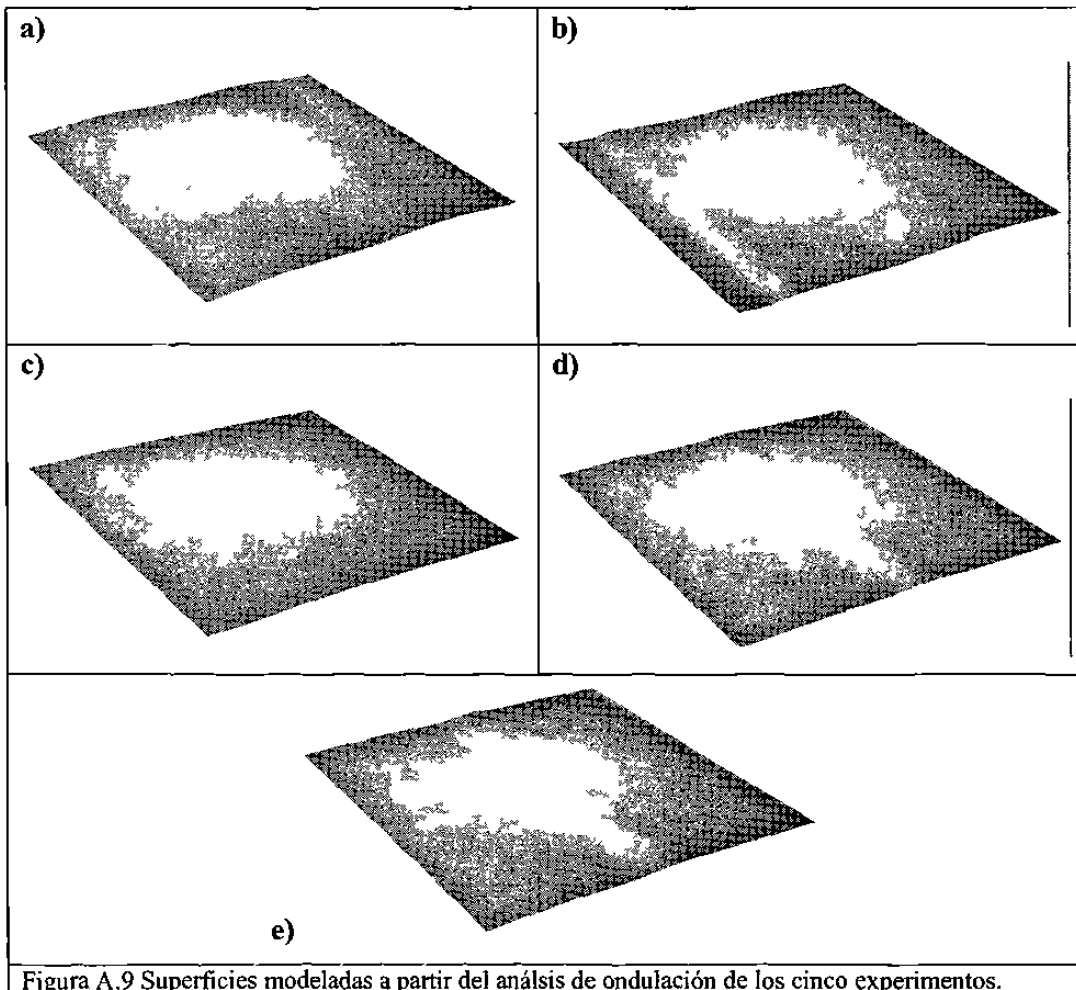


Figura A.9 Superficies modeladas a partir del análisis de ondulación de los cinco experimentos.

11.7 Capa de rugosidad

A partir de estas curvas se generaron matrices, con las cuales se obtuvieron los mapas de bites utilizados en el modelo de superficie. Estos modelos se presentan en la figura 8.2

