

TESIS DOCTORAL

2015



**ESTUDIO EXPERIMENTAL BASADO EN LA RUGOSIDAD
SUPERFICIAL PARA LA SELECCIÓN DE HERRAMIENTAS Y
CONDICIONES DE CORTE EN OPERACIONES DE REFRENTADO EN
SECO A BAJA VELOCIDAD DE PIEZAS DE MAGNESIO**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

Dpto. de Ingeniería de Construcción y Fabricación

Dpto. de Ingeniería de Construcción y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales
UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

**ESTUDIO EXPERIMENTAL BASADO EN LA RUGOSIDAD
SUPERFICIAL PARA LA SELECCIÓN DE HERRAMIENTAS Y
CONDICIONES DE CORTE EN OPERACIONES DE REFRENTADO EN
SECO A BAJA VELOCIDAD DE PIEZAS DE MAGNESIO**

TESIS DOCTORAL

Presentada por: D. Adolfo José Saá Sarria

Titulación: Ingeniero Industrial

Dirigida por: Dña. Eva María Rubio Alvir

Madrid-2015

AGRADECIMIENTOS

Mi gratitud a todos aquellos que de manera directa o indirecta han hecho posible que mi proceso formativo en general, y la realización de esta Tesis en particular, hayan podido ser una realidad.

Mi primer agradecimiento a mi directora de Tesis Dña. Eva M^a Rubio Alvir por todo el apoyo que me ha brindado en todo momento y por la paciencia que ha tenido conmigo a lo largo de todos estos años.

A los profesores del Departamento de Estadística e Investigación Operativa III de la Universidad Complutense de Madrid D. José Luis Valencia Delfa y Dña. María Villeta López, por toda la ayuda que me dispensaron en la parte de análisis estadístico.

A D. Diego Carou Porto y a Dña. Beatriz de Agustina Tejerizo por su colaboración en la elaboración de los artículos asociados a la investigación.

A los grupos de Investigación de la UNED "Tecnologías Mecánica, de Materiales y de Manufactura (TM3)" y "Producción Industrial e Ingeniería de Fabricación (IPME)" por el apoyo ofrecido durante el desarrollo de la investigación.

Al Ministerio de Ciencia e Innovación de España por la financiación a través de los proyectos: DPI2008-06771-C04-02 y DPI2011-27135.

A la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la UNED por la financiación a través del proyecto REF2014-ICF05.

Al Grupo Antolín Magnesio SL por suministrar parte del material utilizado en este trabajo.

Finalmente, a mi familia. Por haberme apoyado siempre en todas y cada una de mis iniciativas. Gracias.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: Introducción	1
CAPÍTULO 2: Estado del arte	9
2.1. <i>Introducción</i>	11
2.2. <i>Magnesio y sus aleaciones</i>	14
2.2.1. <i>Generalidades del magnesio</i>	14
2.2.2. <i>Aleaciones de magnesio</i>	17
2.2.2.1. <i>Clasificación de las aleaciones de magnesio</i>	17
2.2.2.2. <i>Elementos aleantes</i>	21
2.2.2.3. <i>Procesos de fabricación</i>	26
2.2.2.4. <i>Corrosión de las aleaciones de magnesio</i>	31
2.2.3. <i>Usos del magnesio</i>	33
2.2.3.1. <i>Automoción</i>	35
2.2.3.2. <i>Aeroespacial y aeronáutica</i>	40
2.2.3.3. <i>Electrónica</i>	42
2.2.3.4. <i>Medicina</i>	44
2.2.3.5. <i>Otros usos</i>	45
2.3. <i>Mecanizado de las aleaciones de magnesio</i>	46
2.3.1. <i>Introducción</i>	46
2.3.2. <i>Sistemas de lubricación/refrigeración</i>	48
2.3.2.1. <i>Generalidades</i>	48
2.3.2.2. <i>Lubricación/refrigeración del magnesio</i>	53
2.3.2.3. <i>Mecanizado en seco de aleaciones de magnesio</i>	56
2.3.3. <i>Herramientas de corte</i>	58
2.3.3.1. <i>Desgaste de las herramientas</i>	58
2.3.3.2. <i>Materiales base</i>	60
2.3.3.3. <i>Recubrimientos</i>	63
2.3.3.4. <i>Incidencia del recubrimiento en el mecanizado en seco</i>	67
2.3.3.5. <i>Herramientas para el magnesio</i>	69
2.4. <i>Refrentado</i>	72
2.4.1. <i>Generalidades</i>	72
2.4.2. <i>Trabajos de investigación sobre operaciones de refrentado en seco</i>	75
2.4.3. <i>Análisis y discusión</i>	80
2.5. <i>Técnicas de predicción de la rugosidad superficial</i>	82
2.5.1. <i>Introducción</i>	82

2.5.2. Clasificación de los distintos enfoques	84
2.5.2.1. Enfoque mecanicista.....	85
2.5.2.2. Enfoque empírico.....	85
2.5.3. Determinación de las condiciones de corte óptimas o casi óptimas.....	91
2.5.3.1. Técnicas convencionales de optimización.....	92
2.5.3.2. Técnicas no convencionales	96
2.5.4. Análisis.....	99
2.5.5. Discusión.....	104
CAPÍTULO 3: Metodología	107
3.1. Introducción	109
3.2. Planificación pre-experimental	111
3.3. Elección del diseño de experimentos	117
3.4. Ejecución de los experimentos.....	119
3.5. Análisis estadístico.....	122
3.6. Conclusiones.....	124
CAPÍTULO 4: Aplicaciones y análisis de resultados	125
4.1. Introducción	127
4.2. Aplicaciones.....	130
4.2.1. Equipo experimental.....	128
4.2.2. Definición de los experimentos.....	133
4.3. Análisis de resultados	136
4.3.1. Resultados obtenidos de la variable respuesta.....	136
4.3.2. Representación gráfica de los resultados	138
4.3.3. Análisis estadístico.....	143
4.3.4. Optimización	151
CAPÍTULO 5: Conclusiones y desarrollos futuros.....	153
5.1. Conclusiones.....	155
5.1.1. Introducción.....	155
5.1.2. Conclusiones de tipo general	156
5.1.3. Conclusiones de tipo particular.....	158
5.2. Desarrollos futuros.....	162
BIBLIOGRAFÍA	165
ANEXOS	191
Anexo I: Conversión de unidades	193
Anexo II: Medidas de rugosidad superficial.....	197

ÍNDICE DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

Expresión	Descripción
AFNOR	Asociación francesa de normalización (<i>Association Française de Normalisation</i>)
AFS	Sociedad americana de fundidores (<i>American Foundry Society</i>)
AISI	Instituto americano del hierro y el acero (<i>American Iron and Steel Institute</i>)
ANFIS	Sistema neuronal difuso adaptativo de inferencia (<i>Adaptative Neuronal Fuzzy Inference System</i>)
ANN	Red neuronal artificial (<i>Artificial Neural Network</i>)
ANOVA	Análisis de la varianza (<i>Analysis Of Variance</i>)
ASME	Sociedad americana de ingenieros mecánicos (<i>American Society of Mechanical Engineers</i>)
ASTM	Sociedad americana para el ensayo de materiales (<i>American Society for Testing Materials</i>)
BN	Redes bayesianas (<i>Bayesian Networks</i>)
BUE	Filo recrecido (<i>Built-Up Edge</i>)
BUL	Capa adherida (<i>Built-Up Layer</i>)
CAM	Fabricación asistida por computadora (<i>Computer-Aided Manufacturing</i>)
CBN	Nitruro de boro cúbico (<i>Cubic Boron Nitride</i>)
CM	Cuadrados medios
CNC	Control numérico por ordenador (<i>Computer Numerical Control</i>)
CVD	Deposición química en fase de vapor (<i>Chemical Vapour Deposition</i>)
DIN	Instituto alemán para la normalización (<i>Deutsches Institut für Norming</i>)
DoE	Diseño de experimentos (<i>Design of Experiments</i>)
EN	Euronorma
EDS	Espectroscopía de energía dispersiva (<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>)
FL	Lógica difusa (<i>Fuzzy Logic</i>)
FLC	Controlador óptimo basado en lógica difusa (<i>Fuzzy Logic Controller</i>)
FN	Redes neuronales difusas (<i>Fuzzy Networks</i>)
GA	Algoritmo genético (<i>Genetic Algorithm</i>)
GL	Grados de libertad
HC	Sistema de cristalización Hexagonal Centrado
ISO	Organización internacional para la estandarización (<i>International Organization for Standarization</i>)
JIS	Estándares industriales japoneses (<i>Japanese Industrial Standards</i>)
LOO-CV	Validación cruzada dejando uno fuera (<i>Leave-One-Out Cross Validation</i>)
LSD	Prueba estadística de diferencia mínima significativa (<i>Less Significant Difference</i>)
MF	Función de pertenencia (<i>Membership Function</i>)
MQL	Mínima cantidad de lubricante (<i>Minimum Quantity Lubrication</i>)
MMC	Materiales compuestos de matriz metálica (<i>Metal Matrix Composites</i>)

OPTI	Observatorio de prospectiva tecnológica industrial. Ministerio de ciencia y tecnología.
PACVD	Deposición química en fase vapor asistida por plasma (<i>Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition</i>)
PAPVD	Deposición física en fase vapor asistida por plasma (<i>Plasma Assisted Phisical Vapour Deposition</i>)
PCBN	Nitruro de boro cúbico policristalino (<i>Polycrystalline Cubic Boron Nitride</i>)
PCD	Diamante policristalino (<i>PolyCrystalline Diamond</i>)
PEO	Oxidación electrolítica por plasma (<i>Plasma Electrolytic Oxidation</i>)
PVD	Deposición física en fase vapor (<i>Phisical Vapour Deposition</i>)
RSM	Metodología de superficie respuesta (<i>Surface Roughness Methodology</i>)
SA	Recocido simulado (<i>Simulated Annealing</i>)
SAE	Sociedad de ingenieros de automoción (<i>Society of Automotive Engineers</i>)
SEM	Microscopía de escaneado de electrones (<i>Scanning Electron Microscopy</i>)
SI	Sistema Internacional de unidades
S/N	Relación señal a ruido (<i>Signal to Noise ratio</i>)
TS	Búsqueda tabú (<i>Tabu Search</i>)
UNS	Sistema de numeración unificado (<i>Unified Numbering System</i>)

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

Expresión	Descripción
a	Espesor de la viruta no deformada
A_c	Sección de la viruta no deformada
b	Ancho de corte
d	Profundidad de corte
f	Avance de la herramienta
f^*R	Interacción avance-radio de la zona de medición
F	Estimador F de Snedecor
F_α	Valor del estimador F de Snedecor para nivel de significación α
K_r	Ángulo de posición la herramienta
N	Régimen de giro del husillo
N^*f	Interacción régimen de giro del husillo-avance
L_{27}	Matriz ortogonal de Taguchi
R	Parámetro que fija el radio sobre el que se mide la Ra
Ra	Desviación media aritmética del perfil evaluado
Rae	Desviación media aritmética esperada del perfil evaluado
T	Tipo de herramienta
T^*f	Interacción tipo de herramienta-avance
T^*N	Interacción tipo de herramienta-régimen de giro del husillo
t_m	Tiempo de mecanizado para cada ensayo
V_f	Velocidad de avance
v_m	Velocidad media de corte
α	Nivel de significación
ρ_1	Porcentaje de contribución a la variabilidad de Ra según el modelo
ρ_2	Porcentaje de contribución a la variabilidad de Ra total
\emptyset	Diámetro de la pieza
θ	Parámetro que fija el ángulo sobre el que se mide la Ra

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.	Minerales que contienen magnesio (Czerwinski, 2008)	14
Tabla 2.2.	Producción primaria de magnesio en miles de toneladas (U.S. Geological Survey, 2014)	15
Tabla 2.3.	Propiedades del magnesio comparadas con otros materiales estructurales (Kleiner et al., 2003)(Magnesium Elektron, 2012).....	16
Tabla 2.4.	Letras empleadas en la designación de los aceros según UNS.....	18
Tabla 2.5.	Principales elementos presentes en las aleaciones de magnesio según UNS.	19
Tabla 2.6.	Designación de los elementos presentes en las aleaciones según ASTM (ASTM B275, 2005).....	19
Tabla 2.7.	Designación de algunos tratamientos térmicos empleados en aleaciones de magnesio (ASM, 1991)	20
Tabla 2.8.	Designación de la aleación AZ91D-F según los principales sistemas de designación (NADCA, 2009)(Totemeier, 2004).....	20
Tabla 2.9.	Ventajas y desventajas de distintas aleaciones en función de los aleantes presentes (Department of Trade and Industry- U.K., 2004).....	24
Tabla 2.10.	Comparativa de las principales propiedades de diferentes aleaciones de magnesio de uso común (MATWEB, s.f.).....	25
Tabla 2.11.	Comparativa de la maquinabilidad del magnesio con diversos metales (Polmear, 2005).....	47
Tabla 2.12.	Técnicas de lubricación utilizadas en diferentes trabajos de mecanizado de magnesio.....	54
Tabla 2.13.	Trabajos de modelado y optimización considerando el proceso de corte. Basada en Rubio et al. (2012b).....	101
Tabla 2.14.	Trabajos de modelado y optimización considerando la los parámetros de mecanizado. Basada en Rubio et al. (2012b).....	102
Tabla 2.15.	Trabajos de modelado y optimización considerando las propiedades de la herramienta de corte. Basada en Rubio et al. (2012b).....	103
Tabla 2.16.	Trabajos de modelado y optimización considerando las propiedades de la pieza de trabajo. Basada en Rubio et al. (2012b).....	104
Tabla 3.1.	Clasificación de superficies según R_a y tolerancia (ASM, 1989)	112
Tabla 3.2.	Documento para el seguimiento de los ensayos de mecanizado	113
Tabla 3.3.	Documento para el registro de datos.....	114
Tabla 3.4.	Factores, niveles y nomenclatura.....	116
Tabla 3.5.	Matriz ortogonal L_{27} con tres replicaciones anidadas.....	118
Tabla 3.6.	Cuadro resumen del análisis ANOVA.....	123
Tabla 4.1.	Principales propiedades mecánicas de la aleación AZ91D-F (MATWEB, s.f.).....	129
Tabla 4.2.	Composición de la aleación AZ91D-F (% en masa).....	129
Tabla 4.3.	Factores, nomenclatura y niveles para el diseño de experimentos	133
Tabla 4.4.	Hoja de seguimiento de los ensayos.....	134
Tabla 4.5.	Resultados de la rugosidad superficial medida R_a (μm).....	137
Tabla 4.6.	Resultados globales del ANOVA inicial	143

Tabla 4.7.	<i>Ra</i> y medidas de dispersión para el ANOVA inicial	143
Tabla 4.8.	Resultados detallados del ANOVA inicial.....	144
Tabla 4.9.	Resultados globales del ANOVA final.....	145
Tabla 4.10.	<i>Ra</i> y medidas de dispersión para el ANOVA final.....	145
Tabla 4.11.	Resultados detallados del ANOVA final.....	145
Tabla 4.12.	Porcentaje de contribución de los factores e interacciones a la variabilidad de <i>Ra</i>	147
Tabla 4.13.	Estimación de los parámetros en el modelo de la ecuación (4.3).....	148
Tabla 4.14.	Test de normalidad	150
Tabla 4.15.	Ranking de combinación de parámetros en función de la rugosidad superficial esperada, <i>Rae</i>	152
Tabla A1.1.	Equivalencia de las unidades empleadas con las unidades del SI	195

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.	Moldeo por inyección en cámara fría. Basada en Department of Trade and Industry- U.K. (2004).....	28
Figura 2.2.	Proceso de moldeo tixotrópico. Basada en Wikivalec (s.f.).....	29
Figura 2.3.	Claves para el desarrollo de aleaciones de magnesio. Basada en Mordike y Ebert (2001)	31
Figura 2.4.	Límites de emisiones en las diferentes directivas europeas (Gutiérrez, 2013)	37
Figura 2.5.	Elementos interiores utilizados por la Hyundai & Kia motors corporation: a) marco del asiento, b) corazón del volante y c) alojamiento del air-bag del conductor (Kim and Han, 2008)	39
Figura 2.6.	a) Modelo experimental del Lockheed F-80C y b) aeronave militar TU-95MS (Ostrovsky y Henn, 2007)	41
Figura 2.7.	Imágenes SEM de una plaquita recubierta de TiN tras torneado de aleación de aluminio AA2024 (Sánchez et al., 2005).....	59
Figura 2.8.	Relación entre dureza y tenacidad para diferentes materiales de herramientas de corte. Basada en Heath (2001)	63
Figura 2.9.	Esquema de una operación de refrentado. Basada en Martín et al. (2003).....	72
Figura 2.10.	Parámetros que afectan a la rugosidad superficial	83
Figura 2.11.	Técnicas de modelado empírico. Basada en Mukherjee y Ray (2006).....	86
Figura 2.12.	Estructura de una neurona artificial. Basada en Karayel (2009).....	87
Figura 2.13.	Ejemplo de red neuronal artificial y principio matemático de funcionamiento de la neurona. Basada en Cus y Zuperl (2006)	88
Figura 2.14.	Clasificación de las técnicas y herramientas de optimización. Basada en Mukherjee y Ray (2006).....	92
Figura 4.1.	Tipos de herramientas empleadas: a) HX, b) TP200 y c) TP2500.....	130
Figura 4.2.	Geometría de las herramientas empleadas.....	130
Figura 4.3.	Pieza de trabajo: a) en el torno y b) durante ensayo de refrentado.....	131
Figura 4.4.	Posicionamiento de las zonas de medición.	132
Figura 4.5.	a) Equipo de medición y monitorización de la rugosidad superficial y b) plantilla utilizada para para el posicionamiento de las zonas de medición	132
Figura 4.6.	Ejemplo de certificado de medición de R_a	136
Figura 4.7.	Gráficos de cajas y bigotes de la rugosidad superficial en términos de R_a frente los factores: a) avance, b) régimen de giro y c) tipo de herramienta	139
Figura 4.8.	Rugosidad superficial en términos de R_a considerando: a) la interacción $N*f$; b) la interacción $R*f$ y c) la interacción $T*f$	141
Figura 4.9.	Rugosidad superficial en términos de R_a considerando la interacción $T*N$ para un avance, f , de: a) 0.04 mm/rev, b) 0.08 mm/rev y c) 0.12 mm/rev.....	142
Figura 4.10.	Residuales frente a la predicción de R_a	149
Figura 4.11.	Residuales frente al orden de los ensayos	149
Figura 4.12.	Distribución de los residuales y distribución $N(0;0.0452)$	150

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, el desarrollo y la evolución de las sociedades han estado íntimamente ligados a la capacidad de producir y conformar los materiales necesarios para satisfacer sus necesidades. Con el transcurso del tiempo, el conocimiento acumulado y la necesidad de progresar permitieron al hombre producir materiales con propiedades superiores a los disponibles en la naturaleza, entre ellos los materiales metálicos.

El conocimiento de la relación entre los elementos estructurales de los materiales y sus propiedades, ha favorecido el desarrollo de procesos que permiten modificar o adaptar dichas propiedades. En el caso de los metales, el descubrimiento de que la fusión y mezcla de metales cambiaba sus propiedades, ha puesto en valor la relevancia comercial y estratégica de estos.

En las últimas décadas, sectores que trabajan con componentes estructurales están orientando sus esfuerzos a la reducción del consumo de energía, reemplazando materiales tradicionales como el acero y la fundición, por termoplásticos y metales más ligeros.

El uso de aleaciones ligeras, principalmente de aluminio, de titanio y de magnesio, está muy extendido en industrias como la aeronáutica y la de automoción debido a la excelente relación peso/resistencia mecánica que presentan (Gil *et al.*, 2001). Estas aleaciones pueden ser combinadas tanto entre sí como con otros materiales poco pesados y resistentes para formar estructuras híbridas, que tienen la ventaja de bajo peso combinado con una alta resistencia y buenas características de desgaste y fatiga. En el caso del magnesio, estas estructuras híbridas suelen ser estructuras magnesio-aluminio, magnesio-titanio o magnesio-acero sinterizado (Catón, 1991)(Ballerini *et al.*, 2001).

Dentro de los metales estructurales, el uso del magnesio es recomendable para aplicaciones donde la densidad es un factor importante y, además, se precisen unas adecuadas

características mecánicas. Su densidad (1740 kg/m^3) es prácticamente $2/3$ de la del aluminio y $1/4$ de la del acero (Kleiner *et al.*, 2003). Es por ello que su uso ha ido ganando peso en industrias tales como la aeroespacial, donde se utiliza en diferentes estructuras de aeronaves y en componentes, por ejemplo, de satélites, misiles y cohetes espaciales (Eliezer *et al.*, 1998)(Ostrovsky y Henn, 2007); y la de automoción, donde su uso incluye diferentes aplicaciones, tales como bastidores de asientos, paneles de la carrocería o piezas para el motor (Davies, 2003). En ambas industrias, el consumo de energía es una prioridad, en términos de sostenibilidad, por razones tanto económicas como medioambientales.

Otro aspecto que promueve el uso de las aleaciones de magnesio, también por su impacto positivo sobre el medio ambiente, es el reducido coste que implica su reciclaje. Para su reciclaje sólo se precisa un 5% de la energía necesaria para obtener el producto primario (Friedrich y Mordike, 2006). Además, los productos obtenidos presentan las mismas características químicas, físicas y mecánicas que el material original. Esta circunstancia está fomentando una fuerte expansión de la industria de reciclaje del magnesio.

Las piezas de magnesio utilizadas con función estructural presentan, por lo general, geometrías cada vez más complejas, con altos requerimientos dimensionales y de rugosidad superficial, que encarecen los costes de fabricación. Es por ello que se hace necesario llevar a cabo operaciones de reparación y mantenimiento cuando estas piezas han sufrido cualquier daño. Para optimizar dichas operaciones es preciso determinar las mejores combinaciones de las condiciones de corte y de las herramientas que permitan minimizar tiempos y costes.

En lo referente a su maquinabilidad, en términos generales, las aleaciones de magnesio tienen un buen rendimiento en el mecanizado. Sin embargo, este material tiene problemas con el calor generado durante el proceso de mecanizado, ya que tiene tendencia a la ignición, siendo su temperatura de autoignición de 430°C (más baja que su temperatura de

fusión de 650°C). Además, el uso de refrigerantes que contienen agua es peligroso porque el magnesio, al producirse la ignición de las virutas o el polvo de magnesio generado durante el mecanizado, en presencia de agua se descompone para formar atmósferas de hidrógeno altamente explosivas. En estas circunstancias, asegurar un enfriamiento adecuado para el mecanizado de estas aleaciones no es fácil. Además, en los últimos años, el uso de lubricantes o refrigerantes se considera un factor indeseable debido a los costes económicos y ambientales que su empleo conlleva. Por estas razones, se hace necesario investigar qué herramientas y qué condiciones de corte favorecen la evacuación del calor generado en el mecanizado de magnesio cuando dicho mecanizado se lleva a cabo en seco.

Hasta la fecha, el escaso número de trabajos que abordan el estudio del proceso de torneado en seco de aleaciones de magnesio, se centran en operaciones de cilindrado, no encontrándose en la bibliografía apenas referencias de estudios realizados sobre las operaciones de refrentado.

La presente Tesis Doctoral tiene como objetivo último realizar un estudio experimental que permita llevar a cabo la mejor selección de herramientas y condiciones de corte para obtener una determinada rugosidad superficial en piezas de magnesio obtenidas mediante refrentado en seco a baja velocidad; entendiendo por baja velocidad las condiciones de corte en las que se emplean bajas profundidades de corte y bajas velocidad de corte y de avance, tales como las que se emplean en las operaciones de reparación y mantenimiento.

Para lograrlo, es necesario ir alcanzando una serie de objetivos parciales o intermedios que se plantean con el fin de establecer un estado del arte sobre el tema abordado, y también con la intención de definir una metodología de trabajo que permita llevar a cabo la experimentación y el análisis de resultados.

Para establecer el estado del arte, se pretende conocer: las características del magnesio y sus aleaciones; los fundamentos del mecanizado del magnesio y sus aleaciones; las particularidades de los procesos de mecanizado en seco y, en concreto, de las operaciones de refrentado; los distintos enfoques empleados con más frecuencia para abordar la optimización de los procesos de mecanizado; y las técnicas de optimización específicas adoptadas con el fin de predecir la rugosidad superficial.

Por otra parte, dentro de los objetivos parciales, se pretende también definir una metodología de ensayo y análisis de resultados que permita profundizar en el comportamiento de diferentes aleaciones de magnesio ante el refrentado en seco en determinadas condiciones de corte, y empleando diferentes herramientas; así como mostrar un ejemplo concreto de aplicación y análisis.

En lo relativo a su estructura, la Tesis Doctoral consta de cinco capítulos, cuyos títulos y contenidos se exponen a continuación. En el presente capítulo, titulado *Introducción*, se establece el contexto general en el que está enmarcada la investigación, la motivación, los objetivos perseguidos y la estructura de la Tesis Doctoral.

En el capítulo 2, *Estado del arte*, se comienza recopilando información general relativa al magnesio y sus aleaciones, para pasar, a continuación, a analizar los distintos ámbitos en los que su uso está generalizado. Se continúa con una recopilación bibliográfica y documental relativa al mecanizado de las aleaciones de magnesio, prestando especial atención a las herramientas de corte, a las operaciones de refrentado y a los sistemas de lubricación y refrigeración. Por último, se analizan los distintos enfoques utilizados con más frecuencia para abordar la optimización de los procesos de mecanizado y las técnicas de optimización específicas adoptadas con el fin de predecir la rugosidad superficial.

En el capítulo 3, *Metodología*, se establece el conjunto de actividades necesarias para analizar experimentalmente el proceso de estudio.

En el capítulo 4, *Aplicaciones y análisis de resultados*, se aborda todo lo relativo a la parte experimental llevada a cabo, incluyendo los procedimientos experimentales considerados, así como los resultados obtenidos a raíz del análisis estadístico.

En el capítulo 5, *Conclusiones y desarrollos futuros*, se recoge el conjunto de hechos más significativos de los capítulos anteriores. Además, se presentan las principales líneas de trabajo en las que se podría seguir investigando a partir de los resultados obtenidos en la presente Tesis Doctoral, con el fin de profundizar en el desarrollo del campo del conocimiento considerado.

Tras estos cinco capítulos, en el apartado de *Bibliografía*, se recopila el conjunto de referencias bibliográficas utilizadas: artículos científicos publicados en actas de congresos y revistas, libros, y los demás tipos de fuentes documentales consultados.

Por último, se incluyen 2 anexos en los que se amplía la información dada a lo largo de la Tesis Doctoral. En el *Anexo I*, se recoge la equivalencia de las unidades empleadas con las correspondientes del Sistema Internacional de unidades. En el *Anexo II*, se adjuntan los protocolos de los valores de rugosidad superficial obtenidos en los diferentes ensayos, elaborados mediante el software del equipo de medición de rugosidad empleado.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

2.1. INTRODUCCIÓN

A principios del siglo XX, en las incipientes industrias de automoción y aeronáutica, comenzaron a introducirse nuevos materiales en las partes estructurales, principalmente los aceros aleados y las aleaciones de aluminio, ya que eran fáciles de trabajar, proporcionaban una calidad uniforme y sufrían bajo deterioro (Schultz, 1985). Desde entonces, la búsqueda de materiales cada vez más ligeros y resistentes ha constituido un constante desafío para diseñadores e ingenieros.

Casi un siglo antes, en el año 1808, Sir Humphry Davy obtuvo por primera vez el magnesio como metal puro a través de sus trabajos con la electrolisis. La reducida densidad de este metal, prácticamente $2/3$ de la del aluminio, hace que su uso sea especialmente recomendable para la industria del transporte, en el contexto actual de creciente preocupación por el medio ambiente y el desarrollo sostenible.

Las aleaciones de magnesio y aluminio satisfacen las actuales demandas que se exigen a un material estructural en la industria aeronáutica y en la del automóvil. Dichas aleaciones se someten a distintos tipos de operaciones de conformado, entre las que se encuentra el mecanizado por arranque de viruta. Hoy en día, debido a la creciente competitividad, existe la necesidad de reducir costes de producción manteniendo los exigentes requisitos de calidad de acabado superficial. El empleo del magnesio en los distintos sectores industriales necesita el desarrollo de procesos de producción adecuados a sus características específicas.

La presencia de fluidos de corte en el mecanizado se ha considerado tradicionalmente necesaria, ya que garantizan una mejora de la vida de la herramienta, reducen la

deformación térmica de la pieza, despejan las virutas de la zona de corte y logran un mejor acabado superficial. La eliminación de fluidos de corte por motivos medioambientales supone un nuevo reto en la búsqueda de alternativas que permitan mantener esa competitividad (Sreejith y Ngoi, 2001). Existen diversas alternativas al uso de los fluidos de corte, siendo la más drástica el mecanizado en seco, es decir, en ausencia de fluidos de corte. Para poder mecanizar en seco se han desarrollado herramientas con distintos tipos de recubrimientos que llevan a cabo la acción refrigerante/lubricante evitando, así, el desgaste prematuro de la herramienta.

En este nuevo escenario, se hace necesario buscar combinaciones de parámetros de corte y tipos de herramientas que optimicen el mecanizado en condiciones extremas, con el propósito de obtener un nivel de calidad del producto en concordancia con las especificaciones demandadas y con el menor coste posible.

Ante estos nuevos retos, parecería lógico suponer la existencia de estudios amplios y detallados sobre el mecanizado en seco de las aleaciones de magnesio. Sin embargo, los estudios realizados hasta el momento son escasos. En el caso concreto de las operaciones de torneado, dichos estudios se han centrado principalmente en operaciones de cilindrado (Tönshoff y Winkler, 1997)(Arai *et al.*, 1996)(Villetea *et al.*, 2011)(Rubio *et al.*, 2012a)(Carou, 2013), no existiendo apenas referencias bibliográficas de refrentado (Rubio *et al.*, 2013) (Rubio *et al.*, 2014a).

En el presente capítulo se lleva a cabo una revisión y análisis del material bibliográfico de interés en relación con el trabajo de investigación desarrollado, con el fin de establecer un "estado del arte" del ámbito del conocimiento objeto de estudio.

Considerando el título de la presente Tesis: "Estudio experimental basado en la rugosidad superficial para la elección de herramientas y condiciones de corte en operaciones de

refrentado en seco a baja velocidad de piezas de magnesio”, se considera necesario centrar la revisión bibliográfica en los siguientes campos:

- Magnesio y sus aleaciones, incluyendo generalidades, clasificación, procesos de fabricación y usos de las aleaciones de magnesio.
- Mecanizado de las aleaciones de magnesio, revisando los estudios experimentales previos centrados en la investigación de la influencia de las herramientas de corte, parámetros de corte y sistemas de lubricación/refrigeración en el acabado superficial; prestando especial atención a las operaciones de refrentado que se realizan en seco.
- Por último, se revisan y analizan los distintos enfoques utilizados con más frecuencia para abordar la optimización de los procesos de mecanizado y las técnicas de optimización específicas adoptadas con el fin de predecir la rugosidad superficial.

2.2. EL MAGNESIO Y SUS ALEACIONES

2.2.1. GENERALIDADES DEL MAGNESIO

El magnesio es un elemento metálico de color blanco plateado de la serie alcalinotérrea. Ocupa el octavo lugar en cuanto a abundancia en la corteza terrestre, estando presente en varios minerales como la magnesita, dolomita y carnalita (Tabla 2.1). Por otra parte está también presente en el agua de mar, en forma de cloruro de magnesio (Cl_2Mg). Cada metro cúbico de agua de mar contiene aproximadamente 1.3 kg de magnesio (Kulekci, 2008). Por esta razón, se le considera un metal prácticamente inagotable.

Tabla 2.1. *Minerales que contienen magnesio (Czerwinski, 2008).*

Nombre del mineral	Fórmula química	Contenido de magnesio en peso (%)
Brucita	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	41.7
Magnesita	MgCO_3	28.8
Serpentina	$3\text{MgO}-2\text{SiO}_2-2\text{H}_2\text{O}$	26.3
Dolomita	$\text{MgCO}_3-\text{CaCO}_3$	13.2
Carnalita	$\text{KCl}-\text{MgSO}_4-6\text{H}_2\text{O}$	8.8

Se obtiene principalmente por electrolisis de Cl_2Mg . Este proceso es el más empleado para la obtención del magnesio, representando un 80% de la obtención mundial (Avedesian y Baker, 1999). El Cl_2Mg se coloca en una cuba que hace de cátodo y en la que se introduce una barra de carbón que actúa como ánodo; el magnesio liberado en estado de fusión, como es menos denso que el cloruro, queda flotando sobre éste. También se obtiene por reducción térmica de silicatos y carbonatos de magnesio, sometiéndolos a elevadas temperaturas en un horno de arco eléctrico con electrodos de carbono que actúan como elemento reductor.

La Tabla 2.2 recoge datos de la producción primaria de magnesio en miles de toneladas de los principales países productores. Como puede comprobarse en la misma, la producción mundial en la última década prácticamente se ha duplicado, siendo China el principal productor mundial de magnesio, aportando en torno al 80% de la producción total de este metal.

Tabla 2.2. Producción primaria de magnesio en miles de toneladas (U.S. Geological Survey, 2014).

PAÍS	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
USA	43	43	43					¹			
BRASIL	6	11	6	6	18	15	16	16	16	16	16
CANADA	50	55	54	50	16	0	0	0	0	0	0
CHINA	354	450	470	534	627	559	501	654	661	698	800
ISRAEL	30	33	28	25	25	35	29	25	30	27	28
KAZAJSTAN	14	14	20	21	21	21	21	21	21	21	21
MALASIA	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	5
RUSIA	45	45	45	50	37	37	37	37	37	29	30
COREA NORTE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	9
UCRANIA	0	0	2	2	2	3	3	2	2	2	2
SERBIA	2	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2
TOTAL ²	544	655	670	690	748	672	609	757	771	802	910
VARIACIÓN ANUAL (%) ³	16.2	20.4	2.3	3.0	8.4	-10.2	-9.4	24.3	1.9	-2.3	11,9

¹ Valores retenidos por el propietario de los datos

² Excluida la producción de USA

³ Excluida la producción de USA

El magnesio cristaliza en el sistema hexagonal compacto (HC), lo que le confiere anisotropía para sus propiedades mecánicas. Esta estructura dificulta la deformación a temperatura ambiente, pues sólo están disponibles tres sistemas de deslizamiento y no son cruzados (Askeland, 2011). Es por ello que es poco dúctil a temperatura ambiente, por lo que debe ser moldeado en caliente donde es muy reactivo con el oxígeno. Su configuración electrónica es: $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2$. Presenta la tendencia a perder los dos electrones del último nivel, lo que facilita que forme soluciones sólidas con gran cantidad de elementos.

Como material estructural se encuentra aleado y tratado térmicamente. Sin duda la propiedad mecánica que hace más interesante al magnesio es su baja densidad (1740 kg/m^3), inferior a la de otros materiales estructurales. Su densidad es $2/3$ de la del aluminio y $1/4$ de la del acero (Kleiner *et al.*, 2003). En la siguiente tabla se muestran las propiedades del magnesio en comparación con otros materiales estructurales de uso común.

Tabla 2.3. Propiedades del magnesio comparadas con otros materiales estructurales (Kleiner *et al.*, 2003)(Magnesium Elektron, 2012).

Propiedad	Acero	Aluminio	Magnesio	Titanio
Densidad (kg/m^3)	7830	2800	1740	4500
Módulo de Elasticidad (GPa)	210	70	45	110
Resistencia a tracción (10^6 N/m^2)	300 – 1200	150 – 680	100 – 380	910 - 1190
Resistencia específica (10^3 Nm/kg)	38 – 153	54 – 243	57 – 218	202 - 264
Rigidez específica (10^6 Nm/kg)	26.8	25.0	25.9	24.4
Resistencia a la abolladura ($\text{N}^{1/2} \text{ m}^2/\text{kg}$)	4.4	9.3	11.2	7.7
Rigidez a la celda ($\text{N}^{1/3} \text{ m}^{7/3}/\text{kg}$)	7.6	14.7	20.4	10.6
Maquinabilidad (kWh/kg)	0.54	0.15	0.085	0.65
Conductividad térmica ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)	75	130-230	51-156	22
Conductividad eléctrica (10^7 S/m)	0.9	3.7	2.2	0

El magnesio presenta numerosas ventajas, entre las que destacan: densidad más baja entre los materiales estructurales; bajo módulo de elasticidad, que lo hace un material rígido con gran capacidad de amortiguamiento de vibraciones; elevada resistencia específica; elevada

resistencia a la abolladura; buena maquinabilidad a altas velocidades; alta conductividad eléctrica y térmica, que lo convierten en un excelente disipador de calor; elevada fluidez, que le confiere una gran estabilidad dimensional; y una excelente capacidad de ser reciclado (Mordike y Ebert, 2001)(Kleiner *et al.*, 2003).

El magnesio también presenta una serie de inconvenientes, entre los que destacan: baja resistencia mecánica; pobre resistencia a fluencia para temperaturas superiores a 100°C; bajo módulo de elasticidad; alta reactividad química; reducida ductilidad y baja resistencia a la corrosión (Yan *et al.*, 2006)(Kleiner *et al.*, 2003). Por otra parte, el hecho de presentar un punto de ignición (430°C) por debajo de su punto de fusión (650°C) hace que pueda inflamarse fácilmente, en particular, durante los procesos de mecanizado (Weinert *et al.*, 2004). También presenta dificultades en el conformado por fundición, por tratarse de un material que en estado líquido se oxida rápidamente. Esto supone en muchos casos la necesidad de trabajar en atmósferas no oxidantes. Por último, su coste económico respecto a otros metales de funcionalidad parecida, como el aluminio, son superiores (Coca, 1992).

2.2.2. ALEACIONES DE MAGNESIO

2.2.2.1. CLASIFICACIÓN DE LAS ALEACIONES DE MAGNESIO

A pesar de los esfuerzos que se han realizado por armonizar las designaciones de los materiales, tanto en Europa, mediante la norma europea UNE-EN 1754 (UNE-EN 1754:1998, 1998), como internacionalmente, mediante la norma ISO (ISO 16220:2005, 2005)(ISO 16220:2005/Amd 1:2007, 2007), se siguen utilizando normas definidas por organismos de países como Alemania (DIN), Estados Unidos (AA, AISI, ASME, ASTM, o SAE), Francia (AFNOR), Reino Unido (BSI) o Japón (JIS).

Para el caso de las aleaciones de magnesio, los dos sistemas de designación más ampliamente aceptados son el sistema ASTM (del inglés *American Society for Testing Materials*) y el UNS (del inglés *Unified Number System*).

Tabla 2.4. Letras empleadas en la designación de los aceros según UNS.

Clase de aleación (Letra)	Aluminio y aleaciones (A)	Cobre y aleaciones (C)	Fundido de hierro (F)
	Aceros AISI ⁴ y SAE ⁵ al carbono y aleados (G)	Aceros bonificados (H)	Aceros fundidos (J)
Aceros diversos y aleaciones ferrosas (K)	Magnesio y aleaciones (M)	Níquel y aleaciones (N)	Aleaciones refractarias (R)
Aceros inoxidables y superaleaciones de base hierro (S)	Aceros para herramientas (T)	Materiales para soldar (W)	Zinc y aleaciones (Z)

⁴ American Iron and Steel Institute

⁵ Society of Automotive Engineers

Según el sistema UNS, las aleaciones se designan con una letra, que indica la clase de aleación, y cinco dígitos, que definen las aleaciones específicas dentro de cada clase. La Tabla 2.4 recoge las principales designaciones para cada clase de aleación. En el caso de las aleaciones de magnesio, la designación comienza por M1, indicando el segundo valor numérico los principales elementos presentes en la aleación (Tabla 2.5).

El criterio ASTM se basa en designar las aleaciones de magnesio por dos letras mayúsculas seguidas de dos o tres números. Las letras representan los dos elementos que principalmente componen la aleación (Tabla 2.6), ordenados según la concentración que posean, empezando por el de concentración superior. Los números indican el contenido

porcentual en peso de los elementos señalados por las letras, redondeados al número entero más cercano.

Tabla 2.5. Principales elementos presentes en las aleaciones de magnesio según UNS.

Principales elementos de la aleación (Código UNS)	Al, Cd, Mn (M10xxx; M11xxx)	Zn, Zr, Ag (M12xxx)
Mn, Th, Zn, Zr (M13xxx)	Li, Al, Mn (M14xxx)	Mn (M15xxx)
Zn, Zr, Th (M16xxx)	Zr, Mn (M18xxx)	Al, Be, Cu (M19xxx)

Tabla 2.6. Designación de los elementos presentes en las aleaciones según ASTM (ASTM B275, 2005).

Elemento (Letra)	Aluminio (A)	Antimonio (Y)	Arsénico (V)	Berilio (L)	Bismuto (B)	Cadmio (D)	Cobre (C)
	Cromo (R)	Estaño (T)	Fósforo (J)	Hierro (F)	Itrio (W)	Magnesio (G)	Manganeso (M)
Níquel (N)	Plata (Q)	Plomo (P)	Silicio (S)	Tierras raras (E)	Torio (H)	Zinc (Z)	Zirconio (K)

En el caso de que la aleación haya sido modificada en los elementos aleantes de menor proporción, después de las letras y los números, se incluye otra letra asignada en el orden en que las aleaciones se han ido normalizando (A, B, C, etc.). La presencia de la letra X indica que se trata de una aleación experimental. Finalmente, en algunas aleaciones se puede añadir un último término que indica el tipo de trabajo o tratamiento térmico aplicado a la aleación (Tabla 2.7).

Así, por ejemplo, la aleación AZ63-T4, sería una aleación de magnesio con valores de aluminio y zinc próximos al 6% y 3% respectivamente, a la que se le ha aplicado un tratamiento térmico de solución.

Tabla 2.7. Designación de algunos tratamientos térmicos empleados en aleaciones de magnesio (ASM, 1991).

Tipo de tratamiento (Designación)	Como se fabricó (colada o forja). Sin tratamiento (F)	Endurecido por deformación (sólo forjados) (H)	Endurecido por deformación parcialmente recocido (H2)
	Endurecido por deformación y estabilizado (H3)	Recocido, recristalizado (sólo forjados) (O)	Tratamiento térmico para estabilizar F, O, H (T)
Tratamiento térmico de solución y trabajo en frío (T3)	Tratamiento térmico de solución (T4)	Sólo artificialmente envejecido (T5)	Tratamiento térmico de solución y envejecido artificialmente (T6)
Trabajado en frío entre el temple y el envejecido (T8)	Tratamiento térmico de solución, envejecido artificialmente y trabajado en frío (T9)	Envejecido artificialmente y trabajado en frío (T10)	Tratamiento térmico de solución (W)

A continuación, se muestra, a modo de ejemplo, la designación de la aleación AZ91D-F⁶ según los principales sistemas de designación.

Tabla 2.8. Designación de la aleación AZ91D-F según los principales sistemas de designación (NADCA, 2009)(Totemeier, 2004).

Designación	Sistema de designación
AZ91D-F	ASTM
M11917	UNS
G-A9Z1	AFNOR
MgAl9Zn1	ISO
J465	SAE
Z91	EN

⁶ En la presente Tesis Doctoral se ha utilizado el sistema ASTM para designar las distintas aleaciones de magnesio por tratarse del más extendido y preciso para las mismas. Para el resto de materiales mencionados en la Tesis se ha optado por mantener la denominación utilizada en su fuente documental, debido a que, en la mayoría de casos, no existe una equivalencia única en el sistema ASTM.

2.2.2.2. ELEMENTOS ALEANTES

Para aumentar el potencial del magnesio en el campo de la ingeniería se forman aleaciones de magnesio con distintos elementos para mejorar sus propiedades mecánicas y físicas. Los elementos principales de las aleaciones de magnesio son: Al, Zn, Mn, Si, Zr, Ca, Ag, Li, Cu y tierras raras, entre otros (Coca, 1992)(Czerwinski, 2008).

- **Aluminio**

El aluminio aumenta la dureza y la resistencia mecánica. Por otra parte, la ductilidad y la resistencia a la fractura disminuyen gradualmente a la vez que se incrementa el porcentaje en peso de aluminio en la aleación. También contribuye a mejorar la resistencia a la corrosión. La mayoría de las aleaciones Mg-Al contienen entre el 8-9% de aluminio con pequeñas cantidades de zinc y manganeso. Tienen buenas características de moldeo y son idóneas para temperaturas entre 110-120°C. Para temperaturas más altas, entre 150-170°C, se emplea un menor contenido en aluminio dando mejores resultados en cuanto a resistencia a fluencia, a cambio de un pequeño sacrificio en cuanto a resistencia a corrosión.

- **Zinc**

El zinc presenta una buena aptitud para el moldeo, mejora la resistencia a la corrosión y proporciona una mejor capacidad de deformación permanente. En casos de porcentajes altos, forma compuestos intermetálicos. Se suele emplear junto con el aluminio mejorando la resistencia. La cantidad debe ser limitada para evitar el agrietamiento durante la solidificación.

- **Manganeso**

El manganeso tiene la finalidad de controlar el contenido en hierro de la aleación. Incrementa el límite elástico sin influir en la resistencia a la tracción. En pequeñas cantidades ayuda a mejorar la resistencia a la corrosión. Las aleaciones magnesio-aluminio-manganeso son tan resistentes como las aleaciones magnesio-aluminio-zinc, pero son considerablemente más dúctiles.

- **Tierras raras**

Se añaden en pequeñas cantidades, siendo algunas de las más utilizadas: cerio, lantano, neodimio y praseodimio. La adición de estas tierras raras contribuye a mejorar la resistencia a la termofluencia por encima de los 250°C y disminuye la fragilidad en aleaciones que contienen zinc.

- **Calcio**

El calcio, que presenta una solubilidad relativamente baja, tiene la finalidad de mejorar el control de grano y la resistencia a la fluencia. No influye en la mejora de las propiedades mecánicas.

- **Zirconio**

El zirconio posee una solubilidad máxima en magnesio de 0.6%, por lo que el incremento de resistencia es muy bajo. Ayuda a afinar el grano, lo que repercute en una mejoría de la ductilidad.

- **Itrio**

Tiene una solubilidad relativamente alta en el magnesio (12.4%) y se añade junto a otras tierras raras para aumentar la resistencia a fluencia a temperaturas por encima de los 250-300°C.

- **Torio**

Contribuye a mejorar la resistencia a la termofluencia hasta los 350°C. Evita la microporosidad y la fragilidad, mejorando la ductilidad. Mejora las propiedades de moldeo.

- **Berilio**

El berilio disminuye la tendencia a la inflamación durante la colada. Se restringe su uso porque es un elemento que no se considera afinador de grano, sino todo lo contrario.

- **Plata**

Su presencia es poco significativa comercialmente, pero la adición de este elemento a aleaciones de magnesio-tierras raras-zirconio incrementa su resistencia.

Otros elementos como el cobre, el níquel o el hierro son considerados elementos de impurezas perniciosas, lo que significa que disminuyen la resistencia a la corrosión.

En función de las propiedades que se necesiten para una aplicación concreta, se recurrirá a los elementos aleantes clave que puedan resultar más ventajosos en cada caso (Tabla 2.9).

En la Tabla 2.10 se recogen las principales propiedades de varias aleaciones de magnesio de uso común. La aleación AZ91D-F se utiliza, por ejemplo, en automoción, siendo el material con el que se fabrican las cajas de transmisión del Volkswagen Passat y de los Audi A4 y A6. Las aleaciones EZ33A-T5 y ZE41A-T5 se emplean ampliamente en la industria

aeronáutica en la fabricación de determinados elementos tales como ruedas de aterrizaje, techos de cabina, estructura de parabrisas y cajas de velocidades. Por su parte, la aleación AZ31B-F se utiliza en diversas aplicaciones, siendo un elemento estructural importante dentro de la industria aeroespacial en la construcción de satélites.

Tabla 2.9. Ventajas y desventajas de distintas aleaciones en función de los aleantes presentes (Department of Trade and Industry- U.K., 2004).

Designación ASTM	AZ	AM	AS	AE
Elementos aleantes clave	Al, Zn	Al	Al, Si	Tierras raras
Ventajas	Buena resistencia a temperatura ambiente. Buena moldeabilidad	Mejor ductilidad que la serie AZ	Resistencia y capacidad de fluencia mejoradas	Buena resistencia a temperatura ambiente, y resistencia a fluencia mejorada
Desventajas	Baja resistencia térmica. Baja ductilidad	Propiedades a temperatura ambiente pobres. Moldeabilidad limitada	Moldeabilidad limitada	Moldeabilidad limitada

Tabla 2.10. Comparativa de las principales propiedades de diferentes aleaciones de magnesio de uso común (MATWEB, s.f.).

Propiedades	AZ91D-F	EZ33A-T5	ZE41A-T5	AZ31B-F
Densidad	1810 Kg/m ³	1800 Kg/m ³	1840 kg/m ³	1770 Kg/m ³
Dureza Brinell	63	50	62	49
Resistencia última a tracción	230.10 ⁶ Pa	160.10 ⁶ Pa	205.10 ⁶ Pa	260.10 ⁶ Pa
Resistencia a tracción	150.10 ⁶ Pa	110.10 ⁶ Pa	140.10 ⁶ Pa	200.10 ⁶ Pa
Elongación	3%	2%	3.5%	15%
Módulo de elasticidad	44.8.10 ⁹ Pa	45.10 ⁹ Pa	45.10 ⁹ Pa	45.10 ⁹ Pa
Límite elástico a compresión	165.10 ⁶ Pa	110.10 ⁶ Pa	140.10 ⁶ Pa	97.10 ⁶ Pa
Coefficiente de Poisson	0.350	0.320	0.350	0.350
Impacto de Charpy	2.70 J	0.840 J	1.40 J	4.30 J
Resistencia a la fatiga	97.10 ⁶ Pa 5. 10 ⁸ ciclos	85.10 ⁶ Pa- 10 ⁶ ciclos	101.10 ⁶ Pa- 10 ⁶ ciclos	
Módulo de cizalla	17.10 ⁹ Pa	17.10 ⁹ Pa	17.10 ⁹ Pa	17.10 ⁹ Pa
Fuerza de cizallamiento	140.10 ⁶ Pa	145.10 ⁶ Pa	160.10 ⁶ Pa	130.10 ⁶ Pa
Resistividad eléctrica	14.3. 10 ⁻⁸ Ωm	7. 10 ⁻⁸ Ωm	6. 10 ⁻⁸ Ωm	9.2. 10 ⁻⁸ Ωm
Calor de fusión	373 J/g	373 J/g	370 J/g	340 J/g
Calor específico	1.047 J/g°C	1.04 J/g°C	1 J/g°C	1 J/g°C
Conductividad térmica	72.7 W/mK	99.5 W/mK	113 W/mK	96 W/mK
Punto de fusión	470-595°C	545-645°C	525-645°C	605-630°C
Temperatura de moldeo (Temperatura de procesado)	640-675°C	750-820°C	750-820°C	230-425°C
Composición	Al 8.30-9.70%	Cu <= 0.1%	Ce 0.75-1.75%	Al 2.5-3.5%
	Cu <= 0.03%	Mg 93%	Cu <= 0.1%	Ca <= 0.04%
	Fe <= 0.005%	Nd 2.5-4%	Mg 94%	Cu <= 0.05%
	Mg 90%	Ni <= 0.01%	Mn <= 0.15%	Fe <= 0.005%
	Mn 0.15-0.5%	Zn 2-3.1%	Ni <= 0.01%	Mg 97%
	Ni <= 0.002%	Zr 0.5-1%	Zn 3.5-5%	Mn >= 0.2%
	Si <= 0.1%		Zr 0.4-1%	Ni <= 0.005%
	Zn 0.35-1%			Si <= 0.1%
			Zn 0.6-1.40%	

2.2.2.3. PROCESOS DE FABRICACIÓN

Según las técnicas de procesado seguidas para su obtención, las aleaciones de magnesio se pueden agrupar en dos grandes categorías, que nos permiten hablar de aleaciones conformadas por fundición o de aleaciones conformadas por deformación plástica.

- **Aleaciones conformadas por fundición**

Las técnicas principalmente utilizadas son el moldeo por gravedad y el moldeo a alta presión, que incluye el moldeo por inyección y el moldeo en estado semisólido.

Moldeo por gravedad

Incluye las técnicas de moldeo en arena, moldeo a la cera perdida y moldeo en coquilla (Garcés y Pérez, 2009). Aplicaciones típicas de la colada por gravedad son componentes de motores de aviación y llantas de vehículos de competición.

Para el moldeo en arena se crea un molde de arena en torno a una réplica de la pieza a fabricar. Se añaden aditivos para evitar reacciones entre la aleación y el molde, así como para eliminar la humedad del molde de arena. Es una técnica relativamente económica que permite la producción de piezas de gran tamaño y formas complejas. Puede aplicarse a la mayoría de aleaciones de magnesio. Presenta el inconveniente de su baja productividad en relación con otras técnicas de moldeo, así como unas tolerancias de acabado inferiores que suelen requerir un pulido o mecanizado posterior de las superficies. El molde hay que destruirlo para recuperar la pieza.

En el moldeo a la cera perdida la fabricación del molde es más compleja, requiriendo generalmente de un equipamiento costoso. Permite mayores velocidades de producción y la

obtención de formas complejas con un buen acabado superficial. Se puede emplear con la mayoría de aleaciones de magnesio.

En el moldeo en coquilla los moldes utilizados son metálicos, fundamentalmente de acero y cobre. Permite altas velocidades de producción con buen acabado superficial, y microestructuras más finas que las obtenidas con el moldeo de arena o la cera pérdida. Presenta limitaciones en cuanto a la geometría de las piezas que pueden ser fabricadas y hay que controlar el recubrimiento utilizado para alargar la vida de la coquilla (Garcés y Pérez, 2009).

Moldeo por inyección

Consiste en inyectar a alta presión en un molde de acero el metal fundido que solidifica rápidamente (en pocos segundos). La pieza obtenida es extraída automáticamente. El moldeo por inyección presenta numerosas ventajas, ya que se trata de un proceso de producción rentable para grandes tiradas de piezas, presentando el resultado tolerancias ajustadas. La calidad y reproducción de piezas es mejor que con otros procesos y, a menudo, los costes de producción son menores. La vida útil del molde es muy larga, se pueden obtener paredes con espesores más finos que los obtenidos por otros métodos. Además, las aleaciones obtenidas por este método son las que presentan unas mejores propiedades mecánicas.

Se clasifica en moldeo por inyección en cámara caliente o en cámara fría (Figura 2.1) en función de si el sistema de inyección se encuentra sumergido o no en el material fundido. El proceso en cámara caliente es más adecuado para componentes pequeños y de paredes con espesores finos, mientras que el de cámara fría es más recomendable para piezas de mayor tamaño y con paredes de espesores superiores (Department of Trade and Industry-U.K., 2004).

Las aplicaciones típicas de la colada por inyección incluyen carcasas de herramientas a motor, palancas, mandos o bastidores.

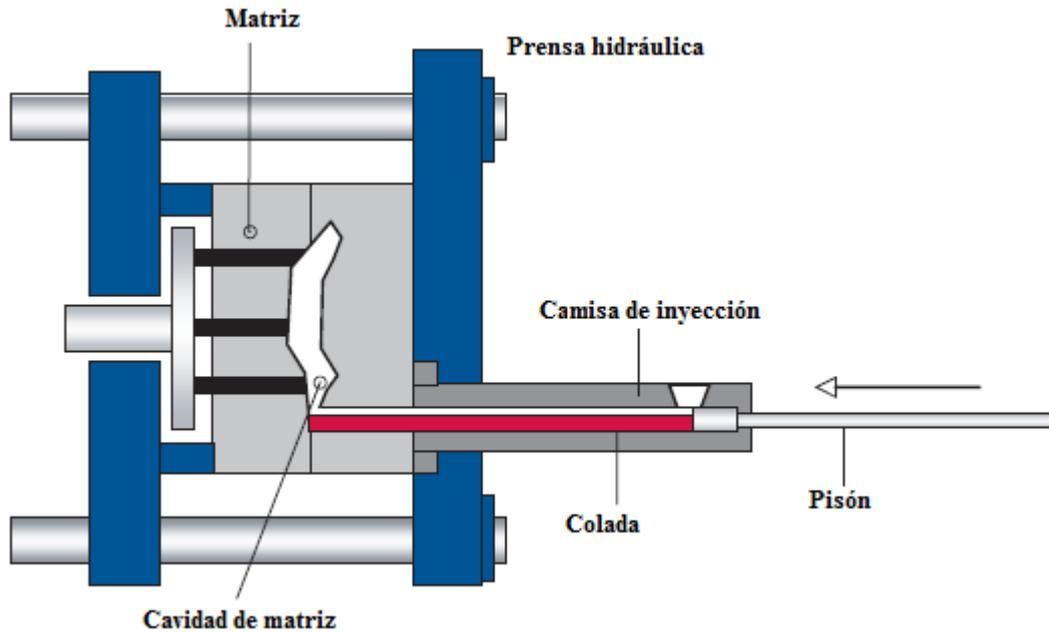


Figura 2.1. Moldeo por inyección en cámara fría. Basada en la referencia: Department of Trade and Industry- U.K. (2004).

Moldeo en estado semisólido

Se trata de técnicas de fundición de alta calidad que se suelen utilizar para fabricar componentes de geometrías complejas y paredes especialmente finas. El conformado en estado semisólido puede considerarse un proceso intermedio entre el conformado en estado sólido y el moldeo de fundición líquida, en el que el material obtenido presenta unas propiedades mecánicas mejoradas respecto a ambos procesos.

Las aleaciones de magnesio, al igual que las de aluminio y zinc, entre las temperaturas de *liquidus* y *solidus* se encuentran en estado semisólido. El objetivo es alcanzar dicho estado y generar una estructura tixotrópica que permita moldearlo utilizando un proceso similar al moldeo por inyección del plástico.

Este proceso presenta alta rentabilidad ya que, por un lado, los tiempos de solidificación son inferiores; y por otro, al presentar el producto final una mejor calidad, las operaciones de acabado que hay que llevar cabo se ven reducidas.

Existen diferentes técnicas de conformado en estado semisólido en distintos estadios de desarrollo e implantación industrial, siendo el *thixomolding* o moldeo tixotrópico la tecnología más extendida. En el moldeo tixotrópico el material se añade a una tolva desde la que se alimenta a la zona de inyección donde un tornillo sin fin empuja el material hacia el molde (Figura 2.2). Toda la zona de inyección se encuentra rodeada de calentadores que, junto a las fuerzas de fricción que produce el material al ser empujado, provoca la fusión parcial del material. Con esta técnica se aumenta la ductilidad y la resistencia mecánica, la contracción durante el enfriamiento disminuye, al igual que la porosidad (hasta el 50%). Las piezas no presentan inclusiones ni óxidos (Huang *et al.*, 2010).

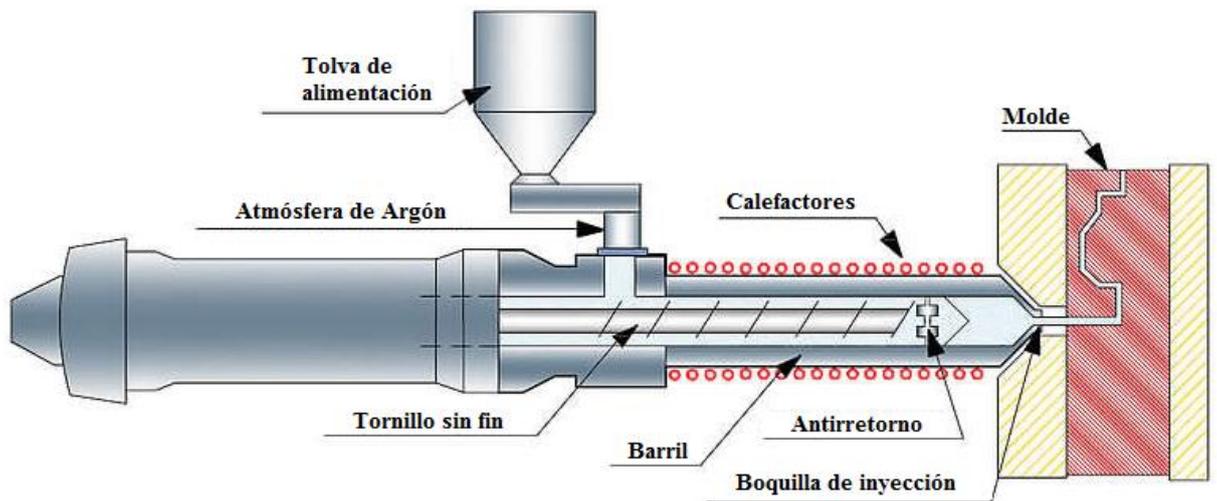


Figura 2.2. Proceso de moldeo tixotrópico. Basada en Wikivalec (s.f.).

- **Aleaciones conformadas por deformación plástica**

El conformado por deformación plástica incluye procesos tales como forja, extrusión y laminación. El comportamiento del magnesio al conformado es pobre a temperatura ambiente. Su estructura hexagonal requiere, normalmente, temperaturas de conformado altas para activar más sistemas de deslizamiento y permitir una mejor formabilidad. Esto implica la necesidad de un mayor consumo energético en el proceso, además de presentar una apariencia más pobre (Davies, 2003)(Schumann, 2005). Cuando el material es calentado a temperaturas desde 230°C a 370°C se pueden llevar a cabo la mayoría de los procesos convencionales. En este rango de temperaturas se pueden conformar los productos de magnesio sin necesidad de atmósferas protectoras (Blawert, 2004). Al ser fácil de trabajar en caliente, normalmente requiere de menos etapas de forjado que otros metales. En comparación con las aleaciones moldeadas por fundición, las conformadas por deformación plástica presentan mayor resistencia y ductilidad.

También se utilizan otros tipos de procesos de fabricación tales como la forja en estado líquido, el conformado superplástico o la pulvimetalurgia.

- **Elección del proceso de fabricación más adecuado**

En función de las propiedades que se deseen alcanzar para una aplicación concreta, aparte de los elementos aleantes necesarios, habrá que considerar los procesos de fabricación que permitan mejorar la ductilidad, resistencia específica o resistencia a fluencia, según convenga (Mordike y Ebert, 2001). En la siguiente figura se recogen las claves para el desarrollo de las diferentes aleaciones de magnesio en función de las propiedades que se pretenden alcanzar.

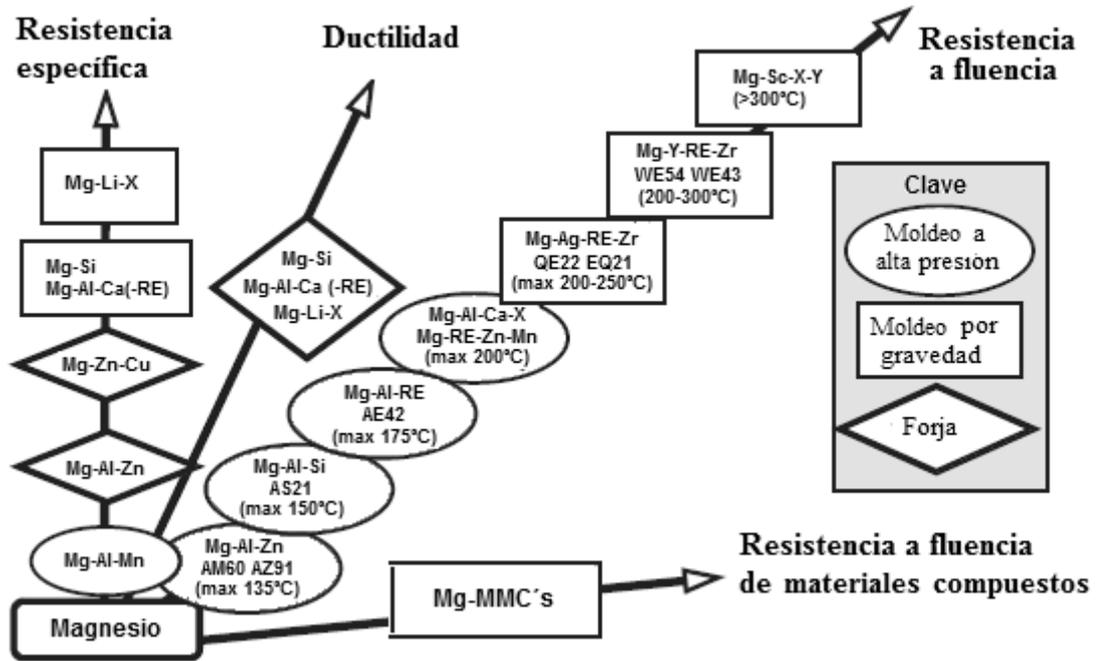


Figura 2.3. Claves para el desarrollo de aleaciones de magnesio. Basada en Mordike y Ebert (2001).

2.2.2.4. CORROSIÓN DE LAS ALEACIONES DE MAGNESIO

Uno de los principales inconvenientes del magnesio es su baja resistencia a la corrosión. Esta predisposición a la corrosión limita en parte el uso de aleaciones de magnesio en determinadas aplicaciones. Algunas de las aleaciones que mejor comportamiento tienen frente a la corrosión son: AZ91D, AZ91E, WE54, WE43.

El efecto de las soluciones acuosas en las aleaciones de magnesio varía considerablemente dependiendo de la naturaleza del soluto. Las soluciones más perjudiciales y también las más frecuentes, son soluciones de cloruro que, por lo general, se encuentran en forma de agua de mar (Magnesium Elektron, 2012).

El magnesio es anódico a la mayoría de los metales, lo que le hace también especialmente sensible a la corrosión galvánica. Es por ello, que la presencia de impurezas catódicas, tales

como cobre, hierro y níquel, tienen un efecto negativo en el proceso de corrosión. La habilidad para resistir la corrosión depende fuertemente del mantenimiento de dichas impurezas bajo unos límites máximos durante el proceso de producción (Eliezer y Alves, 2002).

Los métodos de protección de las aleaciones de magnesio más usados frente a la corrosión son los recubrimientos por anodizado y los tratamientos químicos. El anodizado presenta mejores propiedades que los tratamientos químicos, pero el coste es muy alto para la producción industrial en masa. Los tratamientos químicos presentan un menor coste comparados con los recubrimientos de anodizado, pero están limitados para su utilización debido a la alta toxicidad del cromo hexavalente que contienen.

Con el fin de desarrollar nuevos recubrimientos resistentes a la corrosión y a la abrasión para proteger piezas de magnesio, diferentes países europeos participaron en el proyecto “Framework 5 European NANOMAG” (Plano, 2002) financiado por la Unión Europea dentro de sus iniciativas para el crecimiento sostenible, utilizando procesos respetuosos con el medio ambiente a la par que económicos. Entre las técnicas de recubrimiento evaluadas en este proyecto está la oxidación electrolítica por plasma o PEO (del inglés *Plasma Electrolytic Oxidation*), la deposición física en fase vapor asistida por plasma o PAPVD (del inglés *Plasma Assisted Physical Vapour Deposition*), la deposición química en fase vapor asistida por plasma o PACVD (del inglés *Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition*) y el Sol-Gel.

De estas técnicas destaca la oxidación electrolítica por plasma. El proceso consiste en formar en la superficie del sustrato una capa de óxido de cerámica ($MgAl_2O_4$) dura (400-600 HV) y densa al hacer pasar una corriente a través de un baño con una baja concentración de solución alcalina. La capa así formada es porosa, lo que permite otros recubrimientos como el pintado. En los resultados se aprecia mejoría en cuanto a dureza, resistencia al desgaste y a la corrosión, respetando además el medio ambiente.

Al igual que otros materiales metálicos, las aleaciones de magnesio se pueden unir usando pernos, remaches, soldadura, atornillado y unión adhesiva. Si se espera que los componentes se utilicen en un entorno severo, la protección contra la corrosión galvánica se debe considerar en todos los métodos de unión.

2.2.3. USOS DEL MAGNESIO

El magnesio fue aislado por primera vez en 1808 por el científico inglés Sir Humphry Davy, pero no fue hasta 1852 que Robert Bunsen demostró que el metal de magnesio podría ser aislado por electrolisis del cloruro de magnesio anhidro fundido. Por la década de 1920, el proceso electrolítico se había elaborado a escala industrial y el metal se hizo disponible en cantidades comerciales para justificar su uso como material estructural.

Dentro de los metales estructurales, el magnesio es ideal para aplicaciones donde la densidad sea un factor importante y, además, se precisen unas adecuadas características mecánicas. Es por ello que su uso ha ido ganando peso en industrias tales como la aeroespacial, automoción, médica, electrónica o deportiva, donde los productos tienen que ser resistentes y duraderos pero de baja densidad.

La demanda de magnesio también está siendo bien recibida por una industria del reciclaje de magnesio en expansión. Las aleaciones usadas para aplicaciones estructurales pueden ser recicladas en productos que muestran las mismas características químicas, físicas y mecánicas que el material primario, siendo necesaria para el reciclaje sólo un 5% de la energía que se precisaría para obtener el producto primario (Friedrich y Mordike, 2006). Este atributo se promueve activamente dentro de la industria, debido a su impacto positivo sobre el medio ambiente.

Un 60% de la producción mundial de aleaciones utilizan magnesio como elemento de aleación, destacando su uso en las aleaciones de aluminio, zinc y plomo (Westengen, 2001).

El 43% de la utilización total del magnesio puro está destinado a ser usado como aleante de las aleaciones de aluminio (Cherubini *et al.*, 2008). Esto es debido a que la adición de magnesio proporciona una excelente combinación entre ductilidad y resistencia, mejorando la conformabilidad y soldabilidad de las aleaciones de aluminio, así como la resistencia a la corrosión y las propiedades de tracción. Las aleaciones de aluminio que contienen magnesio se utilizan en tres industrias principales: la industria de envases; la industria del automóvil, siendo su principal uso la producción de chapas de automóviles o la producción de cabezas de cilindros, pistones y bloques de motor; y la industria de la construcción, donde se utilizan principalmente en perfiles estructurales obtenidos por extrusión.

El magnesio puro también se utiliza en las acerías debido a su potencial como agente desulfurante (Westengen, 2001). La presencia de sulfuros en los aceros, en forma de sulfuros ferrosos (FeS), es indeseable debido a su influencia negativa en propiedades tales como: dureza, maleabilidad, formabilidad, soldabilidad y resistencia a la corrosión. El uso del magnesio como agente desulfurante se justifica por su alta afinidad química con el azufre y porque, a diferencia de otros reactivos de desulfuración, se disuelve en la masa fundida de hierro y carbono con el resultado de que su reacción con el azufre es homogénea. El uso del magnesio permite obtener porcentajes de sulfuros en masa inferiores al 0.002% (Mg Showcase issue 19, 2012).

El magnesio tiene una posición alta en la serie electroquímica y, por tanto, se emplea en aplicaciones que utilizan esta característica física, como, por ejemplo, en la protección catódica. La superficie del metal se corroe cuando se sumerge en medios conductores como agua, tierra, arena y lodo. Las células galvánicas están configuradas de modo que una

corriente fluye desde las zonas más reactivas (ánodo) a zonas menos reactivas (cátodo). Al conectar un ánodo de magnesio, la actividad corrosiva se transfiere fuera de la estructura a proteger, lo que resulta en la disolución del ánodo durante un periodo de tiempo dado. El magnesio se utiliza como ánodo de sacrificio para proteger catódicamente las estructuras de acero de la corrosión.

Otro uso del magnesio se encuentra en las placas de fotograbado de magnesio de utilización en una variedad de aplicaciones, particularmente en la industria de la impresión. Un recubrimiento fotosensible aplicado a una placa de fotograbado de magnesio permite al usuario grabar químicamente una imagen en dicha placa después de la exposición de una película negativa y el desarrollo de esa imagen en la placa. La aplicación más frecuente de las placas de grabado es en la creación de matrices para obtener sellos y relieves en una variedad de productos de impresión.

El uso del magnesio aleado es más amplio que su uso como metal puro. El gran desarrollo experimentado en el ámbito de las aleaciones de magnesio ha permitido el empleo del magnesio en sectores tan diversos como el aeronáutico, el automóvil, la industria electrónica o la industria médica. A continuación se recogen los principales usos de las aleaciones de magnesio en diferentes campos de la industria.

2.2.3.1. AUTOMOCIÓN

La reducción del peso de los automóviles mediante el uso de materiales cada vez más ligeros es una práctica habitual en los últimos años (Tharumarajah y Koltun, 2007). Esto ha propiciado que el uso del magnesio haya ido ganando terreno de forma progresiva en la industria de automoción.

El desarrollo sostenible del sector del transporte por carretera se fundamenta en tres aspectos básicos (Muñoz *et al.*, 2010):

- i. Reducir la demanda energética de los vehículos, independientemente del tipo de motorización considerado.
- ii. Disminuir la contaminación debida a los gases de efecto invernadero.
- iii. Potenciar el reciclaje de vehículos.

Los dos primeros aspectos mencionados están directamente relacionados con la reducción del peso del vehículo y el aumento del rendimiento del motor (OPTI, 2003). Para alcanzar estos objetivos es necesaria la utilización de aleaciones ligeras, plásticos y materiales compuestos. La reducción del consumo de combustible considerando la reducción del tren motriz y la de los componentes no motrices puede ser el doble respecto a la que se obtendría considerando sólo la reducción del peso de los componentes no motrices del vehículo.

Por otra parte, el constante crecimiento del parque automovilístico mundial hace necesario incrementar el reciclaje de vehículos. Sólo en Europa, cada año llegan a su fin de vida 14 millones de vehículos (Comisión Europea, 2007). En el actual escenario, cuando un vehículo llega a su fin de vida, la mayoría de los metales son recuperados, lo que supone un 70-75% del peso del vehículo, mientras que la mayoría de plásticos y materiales compuestos no se recuperan. Así pues, la aplicación de plásticos y materiales compuestos como estrategia para reducir el peso del vehículo puede suponer un aumento de la cantidad de residuos de vehículos que son depositados en vertedero (Muñoz *et al.*, 2009).

Estas consideraciones justifican que el magnesio tenga una larga tradición de uso como un material de peso ligero en el campo de la construcción de automóviles. Ya en la década de 1920, los coches de carreras comenzaron a utilizar piezas de magnesio, pero no se

comenzaron a utilizar piezas fundidas de magnesio ampliamente hasta el año 1936, cuando fue introducido el *escarabajo* de Volkswagen. La baja potencia del motor de dicho modelo hizo indispensable aligerar el coche lo más posible. El coche contenía alrededor de 25 kg de magnesio en el tren de potencia (Tharumarajah y Koltun, 2007). Durante su pico de producción en 1971, el consumo de magnesio alcanzó 42.000 toneladas por año. Posteriormente, el progresivo aumento de la potencia de los motores hizo que disminuyera el interés por aligerar el peso, por lo que el consumo de magnesio disminuyó.

En la última década se ha dado un crecimiento significativo en el uso del magnesio. El aumento de los costes del petróleo y de las preocupaciones medioambientales ha hecho del magnesio y sus aleaciones materiales estratégicos de peso ligero en la industria del automóvil.

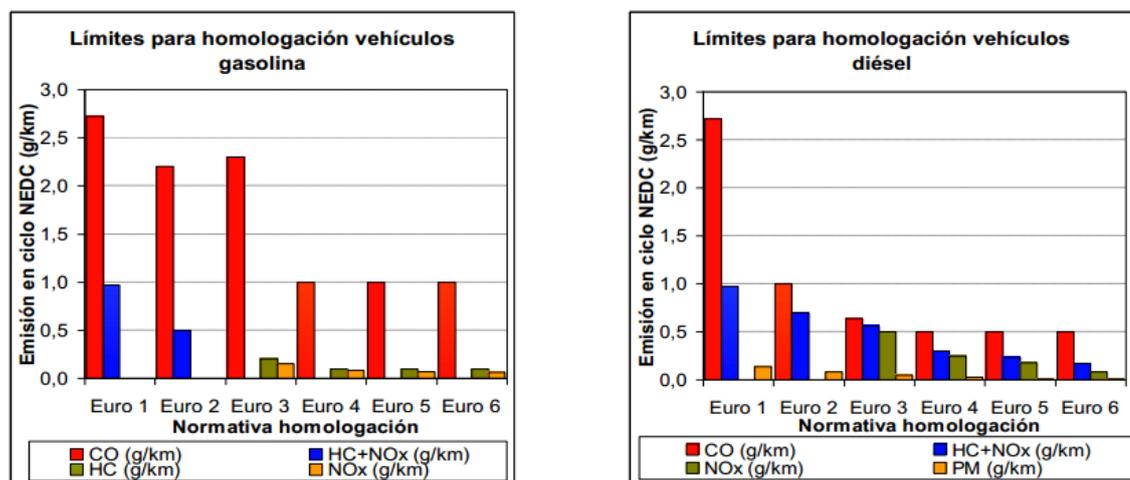


Figura 2.4. Límites de emisiones en las diferentes directivas europeas (Gutiérrez, 2013).

En lo concerniente a las preocupaciones medioambientales, con el fin de limitar la contaminación producida por los vehículos de carretera, el Reglamento CE nº 715/2007 del Parlamento Europeo y del Consejo de 20 de junio de 2007 (Parlamento europeo y Consejo europeo, 2007) introduce exigencias comunes relativas a las emisiones de los vehículos de

motor y de sus recambios específicos a través de las normas Euro 5 (en vigor desde 2011) y Euro 6 (que será aplicable a partir del 1 de septiembre de 2015 en lo que se refiere a la matriculación y venta de las nuevas clases de vehículos) (Figura 2.4).

Para alcanzar estos objetivos, además de utilizar combustibles más limpios y motores más eficientes, es necesario reducir el peso del vehículo (De Damborenea, 2007). Las aleaciones de magnesio están cumpliendo este cometido en ciertas piezas estructurales (Davies, 2003). La sustitución de los tradicionales motores de hierro fundido por aleaciones de magnesio, permiten reducir el peso del motor hasta un 75% (Tharumarajah y Koltun, 2007).

Se estima que el ahorro de combustible en un vehículo por cada 100 kg de peso reducido oscila entre el 2.5 y 5%. En términos relativos, el ahorro no es muy grande, pero, si se tiene en cuenta que gran número de piezas pueden ser sustituidas disminuyendo el peso total, podría llegarse a una disminución del 10% en el peso del vehículo (Ballerini *et al.*, 2001). Considerando el gran número de vehículos producidos en el mundo, que en el año 2013 superaron los 87 millones (ACEA, 2014), puede alcanzarse un ahorro significativo en consumo de combustible y en la cantidad de CO₂ liberado a la atmósfera.

El uso de aleaciones de magnesio en la construcción de vehículos mejora las prestaciones de las aleaciones de aluminio, no sólo en lo relativo al peso, sino también en otros aspectos que incluyen una mayor resistencia al choque y a la abolladura, así como una mayor capacidad de amortiguar ruidos y vibraciones (Du *et al.*, 2010).

Algunas de las aplicaciones típicas de las aleaciones de magnesio son: cubiertas de tapas de cilindros, brazos de suspensión, llantas, armaduras del volante, bastidores de asientos, paneles de la carrocería, soporte de frenos de mano, carcasas de cajas de cambios, mangos de puertas, colectores de admisión y rejillas de entrada de aire. Otros usos de estas aleaciones incluyen piezas para motor, carburadores, engranajes y elementos de la

dirección. Las aleaciones de magnesio empleadas en la industria automovilística son, principalmente, aleaciones magnesio-aluminio-zinc (AZ81, AZ91 y AZ92); aleaciones magnesio-aluminio-manganeso (AM20, AM50 y AM60); y las aleaciones de magnesio-aluminio-silicio (AS41 y AS42)(Polmear, 1995)(Davies, 2003).

En Europa, el aumento en el uso de magnesio como material estructural ligero está siendo liderado por el Grupo Volkswagen, aunque este material también está siendo utilizado por otros fabricantes líderes, incluyendo DaimlerChrysler (Mercedes Benz), Audi, BMW, Ford y Jaguar (Tempelman, 2011). Alrededor de 14 kg de magnesio se han utilizado en el Volkswagen Passat y en los Audi A4 y A6. Todos esos vehículos utilizan cajas de transmisión de magnesio en la aleación AZ91D, ofreciendo un ahorro de peso del 20-25% respecto al aluminio. Mediante la sustitución del acero por magnesio en los paneles internos, las puertas de los automóviles podrían pesar un 60% menos (U.S. Geological Survey, 2013).

En Corea y Japón se han desarrollado partes del interior del vehículo (Figura 2.5) y del tren de potencia utilizando el magnesio como elemento de preferencia en los turismos de lujo (Kim and Han, 2008).

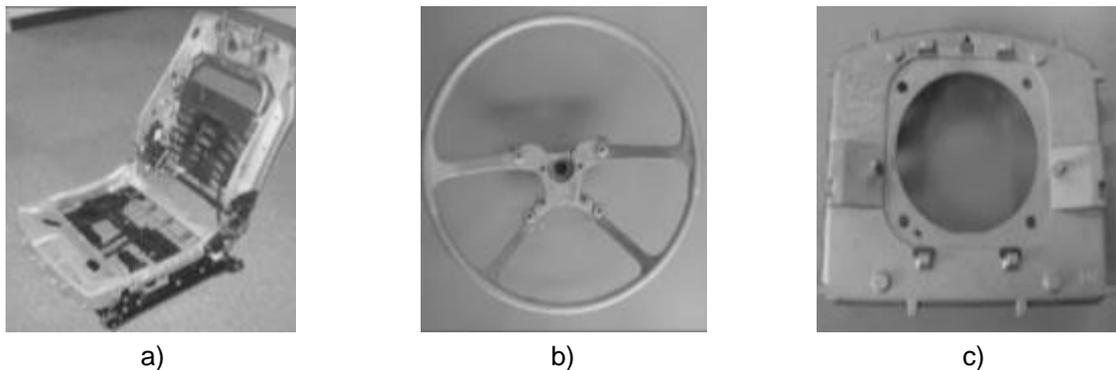


Figura 2.5. Elementos interiores utilizados por la Hyundai & Kia motors corporation: a) marco del asiento, b) corazón del volante y c) alojamiento del air-bag del conductor (Kim and Han, 2008).

En Estados Unidos, el uso de magnesio para aplicaciones de automóviles está más avanzado. La asociación “United States Automotive Materials Partnership” ha estimado una reducción de peso gracias al magnesio de hasta un 15% de cara al año 2020, consiguiendo así una reducción de consumo de entre un 9% y un 12% (Herraiz, 2012).

El interés que ha despertado el magnesio en la industria automovilística ha hecho que fabricantes como Volkswagen, Ford o General Motors hayan invertido en plantas de magnesio en Noruega, Israel y Australia (Mg Showcase issue 1, 2007).

Para continuar con el desarrollo de estos componentes es necesario eliminar, o al menos reducir, los problemas de corrosión galvánica, las diferencias en los coeficientes de expansión térmica y los problemas de montaje que puedan presentar (Chawla y Gupta, 1993). En cualquier caso, debido a los avances tecnológicos desarrollados en la producción de las aleaciones de magnesio y al constante afán de minimizar el peso y el consumo de combustible, en la actualidad existe una sinergia interesante entre lo que la industria automotriz está pidiendo y lo que la industria del magnesio tiene para ofrecer. Considerando las restricciones en cuanto a emisiones de la normativa actual, se prevé que prosiga el crecimiento del uso de magnesio en los próximos años.

2.2.3.2. AEROESPACIAL Y AERONÁUTICA

Debido a los elevados requerimientos de energía y a los extremadamente altos costes de transporte de equipos fuera de la atmósfera terrestre, la industria aeroespacial ha reconocido desde hace tiempo los beneficios que se pueden obtener de la reducción de peso mediante la utilización de aleaciones de magnesio.

El coste para mover una aeronave está estrechamente ligado al peso de ésta. Considerando que el gasto de combustible supone cerca del 30% de los costes del negocio del transporte aéreo y que se prevé que el tráfico aéreo sea el doble del actual en el año 2030, se entiende la necesidad del uso de materiales ligeros (ICAO, 2013).

Desde los años 50, las aleaciones de magnesio se han utilizado ampliamente en la estructura y en los componentes de las aeronaves. Tal es el caso, por ejemplo, del Boeing 707, que empleaba magnesio en una amplia variedad de elementos auxiliares (Melde, 1959). En el ámbito de la industria aeronáutica militar, también tuvo un papel relevante el magnesio como material estructural. La modificación experimental del *Lockheed F-80C* fue construido íntegramente utilizando magnesio, mientras que en la aeronave militar soviética *TU-95MS* se emplearon 1995 kg de magnesio para su fabricación (Ostrovsky y Henn, 2007). En la Figura 2.6 se muestran ambas aeronaves.



Figura 2.6. a) Modelo experimental del Lockheed F-80C y b) aeronave militar TU-95MS (Ostrovsky y Henn, 2007).

En la actualidad, las aleaciones de magnesio se utilizan con éxito en aviones, tanto civiles como militares, y helicópteros, siendo algunas de las más usadas las siguientes: AZ63, EZ33, HK31, HZ32, QE22A, WE43, ZE41 y ZE63. Su uso como material en el fuselaje ha ido abandonándose, mientras ha ido aumentando su uso en la fabricación de diversos

componentes tales como ruedas de aterrizaje, techos de cabina, estructura de parabrisas y cajas de engranajes (Froes, 1998)(Polmear, 2005).

Las aleaciones de magnesio han sido también utilizadas en la construcción de diversos componentes de satélite usados desde los primeros programas espaciales. Las aleaciones de magnesio para los componentes de satélite son principalmente las AZ31, AZ61 y AZM. También se utilizan aleaciones de magnesio en numerosas piezas de cohetes espaciales (principalmente la EZ33) y misiles (Eliezer *et al.*, 1998).

Otros materiales ligeros que están cobrando cada día mayor importancia en este campo, son los materiales compuestos. Los materiales compuestos de matriz metálica o MMC (del inglés *Metal Matrix Composite*) emplean como matriz metálica aleaciones de aluminio, de titanio o de magnesio reforzadas con fibras continuas o partículas de carburo de silicio, boro, grafito o alúmina. El refuerzo selectivo de las estructuras de magnesio con compuestos de matriz metálica de alto rendimiento ofrece la posibilidad de superar las deficiencias del magnesio cuando está sometido a elevadas cargas (Hausmann *et al.*, 1998). Los materiales compuestos con matriz de aleación de magnesio reforzada con carburo de silicio se han probado con éxito en distintas aplicaciones como, por ejemplo, en la fabricación de discos de compresor en aviones militares.

2.2.3.3. ELECTRÓNICA

En los últimos años, la digitalización y la necesidad de una mayor portabilidad han influido en que se produzca una rápida expansión en el empleo de magnesio en aparatos electrónicos tales como cámaras fotográficas, cámaras digitales, proyectores, portátiles, estuches de discos compactos, teléfonos móviles o carcasas de televisión. La industria ha reconocido que propiedades de las aleaciones de magnesio como la conductividad térmica y

eléctrica, la capacidad de amortiguamiento de vibraciones, la buena resistencia y su reducido peso, hacen de estas aleaciones un material idóneo para los productos electrónicos.

En 1998, Matsushita Electric Company utilizó magnesio por primera vez en la fabricación de una carcasa metálica para un televisor de 21" utilizando tecnología de moldeo tixotrópico. En 1999, Sony lanzó con éxito dos modelos del Mini-Disc Sony Walkman, ambos fabricados utilizando la aleación de magnesio AZ31. En la actualidad, el 80% del negocio de los portátiles de Dell utiliza aleaciones de magnesio para proteger el monitor, placa base, disco duro y demás componentes críticos (Mg Showcase issue 3, 2007).

La Sony DCR-VX1000 fue la primera cámara de vídeo digital en utilizar magnesio. Sus objetivos de diseño incluían: reducir el ruido y las vibraciones, prevenir la acumulación de calor en el interior de la máquina, aumentar su capacidad de adaptación a las interferencias electromagnéticas, conseguir un producto reciclable y reducir su tamaño. Objetivos todos ellos alcanzables mediante el uso del magnesio.

El magnesio ofrece ventajas en todos los aspectos respecto a los compuestos plásticos. Aunque tiene un peso específico mayor que el plástico reforzado, su relación resistencia-peso y su rigidez son significativamente más altas, lo que hace posible la fabricación de componentes más ligeros y más finos. Además, la conductividad de calor del magnesio es de varios cientos de veces mayor que la de los plásticos, dando al material excelentes características de disipación del calor. El blindaje electromagnético y el reciclaje del magnesio también son muy adecuados para este tipo de aplicaciones.

Hoy en día, el magnesio es utilizado ampliamente por los principales fabricantes de equipos electrónicos como Sony, Toshiba, Panasonic, Sharp, Canon, JVC, Hitachi, Minolta, Nikon,

NEC, Ericsson, IBM y Compaq. Debido a sus propiedades físicas y mecánicas, el material está siendo considerado para una gama más amplia de aparatos domésticos, en un intento de mejorar su rendimiento y reciclabilidad.

2.2.3.4. MEDICINA

Un considerable trabajo de investigación y desarrollo se está llevando a cabo para adaptar el magnesio y sus aleaciones a nuevas aplicaciones como material bioabsorbible. Estas aleaciones ofrecen un gran potencial en los campos de implantes y fijaciones ortopédicas en traumatología. También podrían ser utilizados como cánulas tipo estent en intervenciones vasculares, donde el uso de implantes metálicos es habitual (U.S. Geological Survey, 2013).

Las aleaciones de magnesio ofrecen la posibilidad de combinar las ventajas de las propiedades mecánicas de implantes metálicos con la naturaleza bioabsorbible de los polímeros degradables.

Debido a su carácter básico, el magnesio ofrece una baja resistencia a la corrosión, siendo atacado en entornos salinos como el organismo humano, lo que permite su uso como material absorbible. Por lo tanto, permite realizar temporalmente las funciones médicas soportando huesos fracturados hasta su curación (Denkena y Lucas, 2007). Sin embargo, el problema de algunas aleaciones de magnesio es precisamente la alta velocidad de corrosión que presentan en condiciones fisiológicas, lo que hace que en algunos casos estas aleaciones se degraden antes de que el hueso haya soldado. En la actualidad, se está controlando la velocidad de degradación de los implantes aleando el magnesio con paladio, ya que éste desplaza los potenciales de corrosión a valores más positivos (González *et al.*, 2012).

2.2.3.5. OTROS USOS

El magnesio se ha utilizado satisfactoriamente también en plantas nucleares. En los reactores nucleares de tipo *Magnox* que han aportado una parte importante de la electricidad generada en el Reino Unido en los últimos 40 años, se utilizan exclusivamente aleaciones de magnesio como material para el sistema de refrigeración de gas. Con uranio natural como combustible, es esencial seleccionar un material de envasado que no absorba fácilmente los neutrones. El magnesio cumple con ese requisito y, además, presenta otras ventajas, tales como: no se alea con el uranio, presenta una buena conductividad térmica, buenas propiedades de ductilidad a la fluencia, excelentes características de mecanizado y peso ligero que facilita su manejo (McKeen, 2010).

Continuando en el ámbito energético, también se están utilizando aleaciones de magnesio para la producción de electrodos en baterías que utilizan agua de mar como electrolito. Estas baterías se pueden utilizar, por ejemplo, para generar la energía eléctrica de luces de emergencia en chalecos salvavidas y, en general, en aplicaciones que requieran baja potencia eléctrica.

Otro de los campos donde las aleaciones de magnesio encuentran aplicación es en el deportivo. En la construcción de cuadros de bicicletas algunos fabricantes utilizan la aleación AZ61. Para la fabricación de horquillas se utiliza la AM60 y en el pedalier la AZ80 (Deetz, 2005)(Mg Showcase issue 4, 2008). En el ámbito de las competiciones deportivas de motor también se utilizan aleaciones de magnesio, por ejemplo, en la fabricación de ruedas para las motocicletas (Kleiner *et al.*, 2003) o en las cubiertas de los engranajes de los automóviles de Fórmula 1 (Davies, 2003).

2.3. MECANIZADO DE LAS ALEACIONES DE MAGNESIO

2.3.1. INTRODUCCIÓN

El uso creciente del magnesio requiere la adaptación de los diferentes tipos de procesos y necesidades de producción asociadas. Es necesaria esta adaptación tanto para la producción en masa de grandes series de piezas, como para operaciones de reparación y mantenimiento de piezas compuestas de varios materiales cuyos costes de producción son elevados, así como para el mecanizado de piezas con geometrías complejas, como las utilizadas frecuentemente en la industria aeronáutica y aeroespacial (Diniz *et al.*, 2005)(Oliveira *et al.*, 2009).

El magnesio y sus aleaciones presentan una excelente maquinabilidad (Polmear, 2005). Su mecanizado se puede realizar generalmente hasta diez veces más rápido que el acero y dos veces más rápido que el aluminio. Se pueden utilizar elevados valores tanto de velocidad de corte y avance, como de profundidad de corte. Puede mecanizarse a velocidades de corte incluso superiores a 2000 m/min con herramientas de diamante policristalino. Este tipo de herramientas son necesarias para el mecanizado de materiales compuestos de matriz metálica de aleación de magnesio reforzados con partículas como, por ejemplo, el carburo de silicio (Diniz *et al.*, 2005).

En la Tabla 2.11 se compara la maquinabilidad del magnesio con otros metales considerando la potencia relativa requerida para mecanizarlos y las velocidades de corte en m/s que se pueden aplicar en operaciones de torneado (Polmear, 2005).

Tabla 2.11. Comparativa de la maquinabilidad del magnesio con diversos metales (Polmear, 2005).

Metal	Potencia relativa requerida (Mg=1)	Velocidad de corte (m/s) en operaciones de torneado
Magnesio	1.0	Hasta 20
Aluminio	1.8	1.25-12.5
Hierro fundido	3.5	0.5-1.5
Acero templado	6.3	0.65-3.3
Acero inoxidable	10.0	0.3-1.5

En general, la vida de las herramientas en el mecanizado del magnesio es superior a la que se alcanza cuando se mecanizan otros metales. El magnesio conduce el calor rápidamente lejos de la punta de la herramienta, por lo que siempre la herramienta sigue manteniendo resistencia y dureza, favoreciendo que el mecanizado del magnesio sea un proceso inherentemente rápido. Así, la vida de la herramienta para el mecanizado en seco de magnesio puede ser cinco veces superior a la obtenida en el mecanizado de aluminio empleando fluidos de corte, para condiciones de mecanizado similares (Grzesik, 2008).

Estas ventajas quedan contrarrestadas en parte por problemas de seguridad debido al riesgo de ignición asociado a su mecanizado. La temperatura de autoignición (430°C) es menor que la temperatura de fusión (650°C) lo que lo convierte en un material fácilmente inflamable, ya que cualquier chispa puede provocar la combustión de virutas o del polvo. Las partículas de magnesio con un tamaño de menos de 500 µm presentan un inminente peligro de explosión (Weinert *et al.*, 2004).

Debido al riesgo de ignición, la selección de la lubricación o el sistema de refrigeración se convierte en un tema de especial relevancia en el mecanizado de magnesio.

2.3.2. SISTEMAS DE LUBRICACIÓN/REFRIGERACIÓN

2.3.2.1. GENERALIDADES

Para reducir la fricción y evitar que las temperaturas alcanzadas durante los procesos de mecanizado sean excesivas, tradicionalmente se han venido utilizando los fluidos de corte debido a sus funciones lubricantes y refrigerantes.

Entre los fluidos de corte que se suelen considerar están los aceites puros y los fluidos de base acuosa, que a su vez pueden ser aceites emulsificables o fluidos sintéticos y semisintéticos.

El uso de fluidos de corte implica innegables ventajas como son: mantener la herramienta refrigerada; reducir la fricción y el desgaste (lo que implica alargar la vida de la herramienta y mejorar el acabado superficial); reducir el consumo energético; disminuir la temperatura en la zona de corte; proteger la superficie mecanizada de la corrosión ambiental; y facilitar la retirada de la viruta de la zona de corte (Avallone y Baumeister, 1996).

Por otra parte, su uso también implica una serie de inconvenientes. El más evidente es el aumento del coste del proceso de fabricación debido al coste del fluido, al del equipo asociado para el suministro del mismo y al de la gestión de los residuos generados por su uso (Adler *et al.*, 2006). Además, hay que considerar que, aunque se tomen las medidas oportunas, su uso siempre conlleva un riesgo tanto para la salud de los operarios (por inhalación o contacto) como para el medio ambiente.

Estos inconvenientes, en un contexto de creciente sensibilidad medioambiental, han hecho que la búsqueda de alternativas al uso de fluidos de corte se haya convertido en tema prioritario de investigación. A continuación, se analizan como alternativas a la utilización de los fluidos de corte convencionales el uso de lubricantes/refrigerantes sólidos, gaseosos y criogénicos, así como las técnicas de mínima cantidad de lubricación o MQL (del inglés *Minimum Quantity of Lubricant*), y el mecanizado en seco.

- **Lubricantes/refrigerantes sólidos**

En este caso se aplican materiales de tipo sólido que actúan como lubricantes durante el proceso de mecanizado. Se trata de una alternativa a los fluidos de corte en proceso de desarrollo, que ya ha mostrado buenos resultados (Rhao y Krishna, 2008)(Shaji y Radhakrishnan, 2003). Los principales materiales empleados son el grafito y el disulfuro de molibdeno, que aplicados en forma de polvo seco presentan buenas propiedades lubricantes, debido a su estructura laminar.

Entre las opciones de aplicación del lubricante se incluyen la difusión del material en un fluido dirigido hacia la zona de corte (Sharma *et al.*, 2009), o la utilización de cargas electrostáticas para suministrar de manera continua el lubricante en la zona de corte (Reddy *et al.*, 2010).

- **Lubricantes/refrigerantes gaseosos**

Otra alternativa que puede emplearse como refrigerante en el mecanizado es la aplicación directa de gases a presión en la zona de mecanizado. Se suelen utilizar como refrigerantes gaseosos gases como dióxido de carbono, nitrógeno u oxígeno, además de aire y vapor de agua. Se trata también de una técnica en un estadio inicial de investigación.

Entre sus ventajas se incluyen su reducido coste e impacto ambiental (Sharma *et al.*, 2009). Como inconvenientes destaca su nula capacidad de lubricación, y su inferior capacidad de refrigeración y eliminación de viruta en comparación con los fluidos de corte clásicos (Weinert *et al.*, 2004). La compresión, el enfriamiento o la licuefacción, son estrategias que se están adoptando para mejorar sus propiedades refrigerantes (Shokrani *et al.*, 2012).

Otros gases como el argón, el helio y el nitrógeno, se utilizan algunas veces para prevenir la oxidación de la pieza y de las virutas, pero el alto coste de estos gases no los hace, generalmente, rentables para aplicaciones en la producción.

En términos de rugosidad superficial, el empleo de refrigerantes gaseosos como el dióxido de carbono, el nitrógeno y el oxígeno conduce a resultados similares a los obtenidos con lubricantes/refrigerantes convencionales (Çakir *et al.*, 2004).

- **Lubricantes/refrigerantes criogénicos**

En los lubricantes/refrigerantes criogénicos, la reducción de la temperatura asociada a su uso, por debajo de los -150°C , implica cambios en las propiedades de la pieza a mecanizar y en la propia herramienta que pueden facilitar su mecanizado en relación con el mecanizado a temperatura ambiente. Su aplicación incide en una mayor vida de la herramienta (al disminuir el desgaste) y en un mejor acabado superficial (Dhar *et al.*, 2002).

Se pueden utilizar aplicados directamente sobre la zona de corte o indirectamente circulando en el interior de la herramienta de mecanizado (Wang y Rajurkar, 2000).

El refrigerante criogénico por excelencia, y ampliamente utilizado como fluido de corte, es el nitrógeno líquido (Yildiz y Nalbant, 2008). Su utilización se justifica, además de por sus excelentes propiedades como refrigerante, por su carácter inodoro y no tóxico.

- **Mecanizado con mínima cantidad de lubricante**

Otro sistema ampliamente utilizado es el mecanizado con mínima cantidad de lubricante o MQL (del inglés *Minimum Quantity of Lubricant*). En este tipo de sistema suele ser habitual que los fluidos de corte empleados sean biodegradables y no tóxicos (Weinert *et al.*, 2004). Si en la lubricación convencional se produce una inundación de fluido en la zona de mecanizado, los sistemas MQL humedecen estrictamente la zona de corte (herramienta-pieza-viruta) con muy poca cantidad de lubricante. El hecho de utilizar tan poca cantidad de lubricante (en ocasiones 10000 veces inferior a la empleada en lubricación convencional) justifica que también se denomine mecanizado casi en seco o NDM (del inglés *Near Dry Machining*). El caudal del fluido de corte aportado suele estar en el rango de 10-50 ml/h (Sharma *et al.*, 2009).

El aporte del lubricante/refrigerante se realiza a través de una boquilla en la que se mezcla el aire de forma coaxial con el lubricante inyectado. El caudal de aire y el del lubricante pueden ajustarse independientemente. La mezcla coaxial del lubricante y el aire en la boquilla evita la posible formación de nieblas. En algunos casos se ha optado por reducir la temperatura del aire, obteniéndose un resultado positivo en términos de desgaste de la herramienta y rugosidad superficial (Yuan *et al.*, 2011).

En cuanto a la elección del fluido de corte más apropiado, es preciso considerar tanto su capacidad lubricante y refrigerante como otros aspectos secundarios relativos a su biodegradabilidad, estabilidad frente a la oxidación y estabilidad en el almacenamiento. En relación a estas propiedades secundarias, el polyol ester (biodegradable sintético) es superior a los aceites vegetales. Por su parte, los aceites vegetales presentan mejores propiedades lubricantes (al ser más viscosos), lo que redundaría en un mejor acabado

superficial (Rahim y Sasahara, 2011). Destaca dentro de estos aceites vegetales el aceite de palmera.

En términos de desgaste de la herramienta, los valores obtenidos son similares a los que se obtienen con fluidos de corte convencionales (Braga *et al.*, 2002), salvo para mecanizados en los que se apliquen elevados avances o velocidades de corte, en cuyo caso empeora sustancialmente (Rahman *et al.*, 2002).

- **Mecanizado en seco**

El mecanizado en seco supone la eliminación completa del fluido de corte. Esto implica la adopción de medidas para que las funciones que normalmente ejerce el fluido sean asumidas por otros medios. Para implantarlo, se requiere realizar un profundo análisis de las condiciones límites de la operación en conjunción con el conocimiento detallado de las complejas interacciones asociadas al proceso, entre la herramienta de corte, la pieza a mecanizar y la máquina herramienta (Sreejith y Ngoi, 2000).

La no aplicación de fluidos de corte tiene una implicación directa positiva, que es la ausencia de los choques térmicos asociados al uso de fluidos lubricantes.

En los aspectos negativos, es evidente que al mecanizar en seco ya no se dispone de las principales funciones del fluido de corte clásico como son: evacuar el calor generado en la zona de corte durante el proceso; lubricar para reducir la fricción en el conjunto herramienta-pieza; y evacuar la viruta de la zona de corte.

Uno de los factores de relevancia a considerar en el mecanizado en seco es la velocidad de corte. Así, se conoce experimentalmente que aumentos en la velocidad de corte ocasionan incrementos en la temperatura en la zona de trabajo. El desgaste del flanco también se

encuentra relacionado con la velocidad de corte, produciéndose a bajas velocidades de corte desgaste por abrasión y a altas velocidades de corte desgaste por adhesión (Klocke y Eisenblätter, 1997). Esto implica que en la práctica haya operaciones de mecanizado para las que se siga considerando más adecuada la aplicación de técnicas menos agresivas como el MQL (Weinert *et al.*, 2004).

Para evitar tanto el desgaste prematuro de la herramienta como una inferior calidad superficial de la pieza, la herramienta de corte juega un papel clave en el mecanizado en seco, debiendo adaptarse al sustrato empleado, además de poseer una geometría y recubrimiento adecuado al trabajo a realizar.

Los factores a los que se les otorga mayor influencia en el desgaste de la herramienta son la adhesión y la abrasión para velocidades de corte bajas, y la difusión y la oxidación a altas velocidades y elevadas temperaturas de corte. En consecuencia, el material de la herramienta debe presentar baja tendencia a la adhesión con el material de la pieza así como elevada dureza y resistencia al desgaste a alta temperatura.

Las herramientas recubiertas han permitido que el mecanizado en seco se extienda a áreas en las que los lubricantes se consideraban como esenciales (Scheerer *et al.*, 2005). Los avances en el campo de los materiales de corte están contribuyendo a la eliminación de los lubricantes, incluso en el caso de operaciones que se consideran extremadamente difíciles debido a la complejidad de la geometría de la herramienta y/o a la cinemática del proceso.

2.3.2.2. LUBRICACIÓN/REFRIGERACIÓN DEL MAGNESIO

En el mecanizado del magnesio debe ser considerado el peligro asociado al uso de fluidos de corte que contienen agua debido a su reactividad con el magnesio para formar atmósferas de hidrógeno inflamables y potencialmente explosivas (Tomac y Tønnessen,

1991). La opción más inmediata que permite evitar la generación de estas atmósferas consiste en mecanizar en condiciones secas, consiguiendo, además, un mecanizado aceptable medioambientalmente (Sreejith y Ngoi, 2000).

La posibilidad de ignición del magnesio está condicionada por diversos aspectos del proceso de mecanizado como son: el ambiente en el que se lleva a cabo, la composición del material, la geometría de la herramienta o los parámetros de corte (Zhao et al., 2011). Al estar asociado el riesgo de incendio básicamente a la viruta y al polvo que se genera en el mecanizado, es necesario tomar medidas para prevenir el inicio de fuego mediante la retirada de estas virutas y polvo dentro del área de trabajo. Esto se puede conseguir tanto con el sistema de refrigeración como con otros sistemas de evacuación como, por ejemplo, los basados en los separadores ciclónicos (Weinert et al., 2004).

Tabla 2.12. Técnicas de lubricación/refrigeración utilizadas en diferentes trabajos de mecanizado de magnesio.

Proceso de mecanizado	Técnica de Lubricación/Refrigeración			
	Convencional	MQL	Mecanizado en seco	Refrigeración criogénica
Torneado	Tomac y Tønnessen, 1991 (1)		Tönshoff y Winkler, 1997 (1)	Outeiro et al., 2013 (5)
			Pu et al., 2012 (5)	
			Villeta et al., 2011 (6)	
			Arai et al., 1996	
			Carou, 2013 (7)	
Taladrado			Wang et al., 2008 (1)	
			Gariboldi, 2003 (4)	
			Weinert y Lange, 2001 (1)	
			Balout et al., 2007 (2)	
			Bhowmick et al., 2010 (3)	
Bhowmick y Alpas, 2011 (1)				
Fresado			Fang et al., 2005 (1)	
			Salahshoor y Guo, 2011 (8)	

Aleaciones trabajadas en cada trabajo:

- | | | | |
|-----------|-----------|----------------|-------------|
| (1) AZ91 | (3) AM60 | (5) AZ31B | (7) AZ91D |
| (2) AZ91E | (4) AM60B | (6) UNS M11311 | (8) MgCa0.8 |

Las referencias bibliográficas relacionadas con el mecanizado de magnesio y sus aleaciones son escasas. La Tabla 2.12 recoge algunas de las principales investigaciones con relación a diferentes procesos de mecanizado y las técnicas de lubricación/refrigeración consideradas en cada caso.

Bhowmick y Alpas (2011) hacen un estudio comparativo para el taladrado de la aleación de magnesio AZ91 entre mecanizado en seco, lubricación/refrigeración convencional y sistema MQL. La experimentación muestra resultados inferiores para el caso de mecanizado en seco. El sistema MQL, en combinación con el uso de recubrimientos de carbono tipo diamante, ofrece resultados comparables a los obtenidos con aceites minerales.

El trabajo de Bhowmick *et al.* (2010), centrado en el taladrado de la aleación AM60, muestra cómo, usando el sistema MQL, los resultados mejoran respecto a los obtenidos por mecanizado en seco. En lo relativo al posible riesgo de ignición, la temperatura durante el proceso no supera la generada mediante lubricación/refrigeración convencional.

En la investigación de Pu *et al.* (2012) se comparan los resultados obtenidos mediante el mecanizado en seco y la refrigeración criogénica en una operación de torneado de la aleación AZ31B. Se concluye que la utilización de nitrógeno líquido permite reducir de forma sustancial la máxima temperatura obtenida en la superficie y obtener rugosidades superficiales aproximadamente un 20% menores a las obtenidas mecanizando en seco.

En el estudio de Outeiro *et al.* (2013) se analiza la influencia de los parámetros de corte en las tensiones de compresión residuales generadas en el torneado de la aleación AZ31B-O utilizando refrigeración criogénica. Dichas tensiones se consideran beneficiosas para mejorar la resistencia a la corrosión de las aleaciones de magnesio. Los resultados muestran que aumentar el avance es preferible a incrementar la velocidad de corte para garantizar mejores resistencias a la corrosión y a la fatiga.

En el estudio experimental de Carou (2013) se analiza la influencia de la refrigeración/lubricación en la rugosidad superficial en el torneado intermitente a baja velocidad de piezas de la aleación AZ91D-F. En este trabajo se compara el mecanizado en seco con el sistema MQL, concluyendo que lo más conveniente es realizar la operación en seco por doble motivo: el mecanizado en seco es un método más sostenible y económico; y el uso de fluidos de corte aumenta, por lo general, los valores de rugosidad superficial.

2.3.2.3. MECANIZADO EN SECO DE ALEACIONES DE MAGNESIO

Buena parte de los estudios de investigación encontrados relativos al mecanizado del magnesio se centran en operaciones de mecanizado en seco (Tabla 2.12).

El estudio de Fang *et al.* (2005), en el que se lleva a cabo una operación de fresado en seco de la aleación de magnesio AZ91, analiza la evolución de la temperatura durante el mecanizado. Se concluye que la temperatura media obtenida en el flanco de la herramienta puede ser un buen indicador para prevenir la generación de fuego.

El trabajo de Wang *et al.* (2008) analiza el desgaste de la herramienta en una operación de taladrado en seco de la aleación de magnesio AZ91. Se identifican como mecanismos de desgaste la abrasión, la adhesión y la difusión. En el estudio se determina un mapa de desgaste en el que se diferencian cinco zonas y que permite seleccionar los parámetros de corte que minimizan el desgaste de la herramienta.

La investigación realizada por Balout *et al.* (2007) muestra como el preenfriamiento de la pieza reduce considerablemente la cantidad de polvo de viruta generada en una operación de taladrado en seco de la aleación AZ91E.

El trabajo de Villeta *et al.* (2011) se centra en identificar los principales factores que influyen en el torneado en seco de la aleación UNS 11311, y seleccionar las condiciones óptimas de fabricación que resultan en rugosidad superficial mínima, aplicando para ello la metodología de Taguchi. Se concluye que el factor más influyente es el avance, empeorando claramente la rugosidad según se incrementa su valor.

En el estudio de Wojtowicz *et al.* (2013) se analiza la influencia de las condiciones de mecanizado en seco en el acabado superficial de una aleación Mg-Re. También se estudia la influencia de los diferentes parámetros de mecanizado con el fin de determinar las condiciones óptimas de corte. Para ello, se recurrió al diseño de experimentos, considerando como parámetros de entrada la velocidad de corte, el avance, la profundidad de corte y el radio de la punta de la herramienta. La rugosidad superficial, la microestructura, la dureza y la tensión residual se consideraron parámetros de salida. El propósito fue variar todos los factores simultáneamente sobre un conjunto de experimentos predefinidos y analizar los resultados para determinar un modelo matemático que permitiera interpretar y predecir resultados. Se comprobó que la rugosidad mejoraba al disminuir el avance y al incrementar el radio de la punta de la herramienta. El estudio sugiere que para mejorar la resistencia a la fatiga, los radios de punta de la herramienta mayores deben ser considerados para bajos avances y para velocidades de corte medias o bajas, con el fin de limitar los defectos superficiales.

2.3.3. HERRAMIENTAS DE CORTE

2.3.3.1. DESGASTE DE LAS HERRAMIENTAS

Las causas más comunes por las que se desgastan las herramientas son:

- i. El desgaste por abrasión, que se produce por el contacto entre materiales más duros que la herramienta y la propia herramienta que queda rayada y desgastada.
- ii. El desgaste por oxidación de la superficie de la herramienta, favorecido por las altas temperaturas.
- iii. El desgaste por adhesión, en el que debido a las altas temperaturas alcanzadas en la zona de corte, el material de la pieza se suelda a la herramienta y, al desprenderse, lo hace también parte del material de la herramienta.
- iv. El desgaste por difusión, que se produce también como consecuencia de las elevadas temperaturas alcanzadas en la zona de corte, las cuales producen una difusión entre las redes cristalinas de la pieza y la herramienta, debilitando la superficie de la herramienta.

El resultado de los dos últimos tipos de desgaste es el denominado filo recrecido o BUE (del inglés *Built-up Edge*) y capa adherida o BUL (del inglés *Built-up Layer*). La existencia de ambas incorporaciones, BUL y BUE, causa una alteración en la geometría inicial de la herramienta que va afectar a la calidad del acabado superficial de la pieza que se mecaniza (Carrilero *et al.*, 2002).

Por otro lado, en muchos casos, el material adherido es mecánicamente inestable y las fuerzas que tienen lugar en la zona de corte pueden arrancarlos, arrastrando consigo partículas de la herramienta y, consecuentemente, provocando su desgaste.

Los mecanismos de formación del BUL y el BUE son diferentes. El primero está originado por causas termomecánicas, mientras que el segundo se debe a condiciones puramente mecánicas. Al inicio del proceso comienza a formarse BUL por una combinación de efectos térmicos y mecánicos. Cuando el BUL está formado, comienza a formarse el BUE y a crecer hasta un espesor crítico. Una vez alcanzado dicho espesor, el BUE es extendido sobre la cara de desprendimiento de la herramienta aumentándose el espesor del BUL y quedando un BUL multicapa (Sánchez *et al.*, 2005).

Las diferencias entre ambos mecanismos dan lugar a diferencias microestructurales y composicionales entre el BUL y el BUE detectables mediante Microscopía Electrónica de Barrido o SEM (del inglés *Scanning Electron Microscopy*) y Espectroscopía de Energía Dispersiva o EDS (del inglés *Energy Dispersive Spectroscopy*). La Figura 2.7 muestra los dos fenómenos tras el torneado en seco de dos aleaciones de aluminio con una herramienta con recubrimiento de TiN.

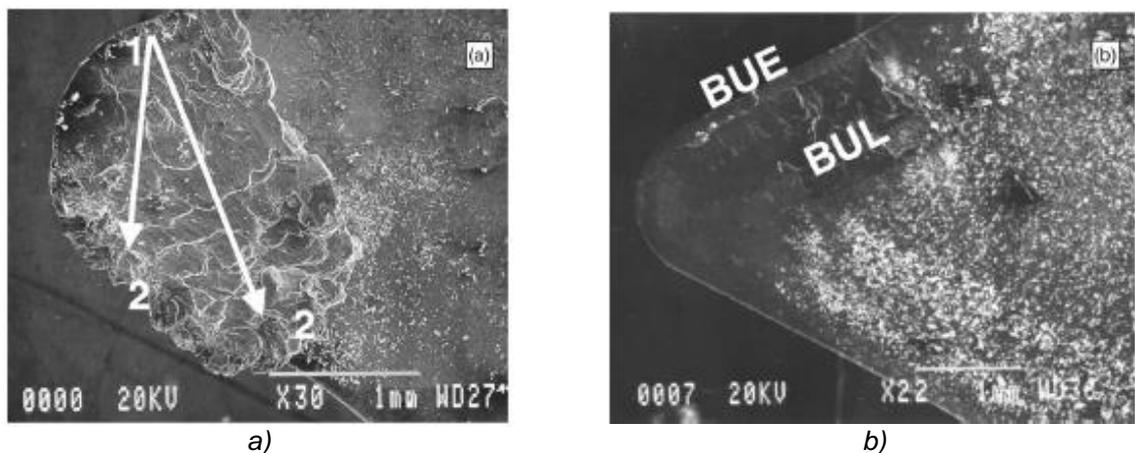


Figura 2.7. a) Imagen SEM de una plaquita recubierta de TiN tras 10 segundos de torneado de aleación de aluminio AA2024 (velocidad de corte de 85 m/min y avance de 0,1 mm/rev); b) Imagen SEM de una plaquita recubierta de TiN tras 10 segundos de torneado de aleación de aluminio AA7050 (velocidad de corte de 170 m/min y avance de 0,1 mm/rev) (Sánchez *et al.*, 2005).

El análisis mediante SEM y EDS en el estudio realizado por Carrilero *et al.* (2002) en un proceso de torneado en seco mediante ensayos de corta duración de barras cilíndricas de una aleación de aluminio (UNS A92024-T3) muestra diferencias en cuanto a composición para BUE y BUL. El BUE muestra una composición más próxima a la aleación original con mayor contenido en hierro y cobre que la detectada para el caso del BUL.

2.3.3.2. MATERIALES BASE

El mecanizado en seco sería inviable si no se dispusiese de herramientas capaces de soportar las nuevas condiciones de mecanizado. A continuación se analizan las características de los distintos tipos de herramientas en función del material base.

- **Aceros rápidos**

Se les denomina así por ser adecuados para el mecanizado a alta velocidad. También se les conoce como aceros HSS (del inglés *High Speed Steel*). Prácticamente son las primeras herramientas de las que se dispuso en la línea de mecanizado moderno. Son aleaciones de base hierro que pueden presentar como elementos aleantes carbono, cromo, vanadio, molibdeno, wolframio y cobalto. La proporción en la que aparecen estos elementos depende de la respuesta esperada por la herramienta para cada operación de corte (ASM, 1989). Pueden presentar durezas superiores a 900 HV y resistencias por encima de los 225 MPa.

- **Carburo cementado o metal duro**

Los carburos cementados son materiales compuestos constituidos por partículas cerámicas inmersas en una matriz metálica. Son los más utilizados en operaciones de mecanizado de aleaciones metálicas. Se empezaron a utilizar de forma generalizada durante la Segunda Guerra Mundial debido a las necesidades de elevadas velocidades de corte para la

producción masiva de munición (Heath, 2000). Las partículas cerámicas dan al compuesto su rigidez y dureza, mientras que la matriz aporta tenacidad. Las más comunes son el carburo de wolframio (WC) y carburo de titanio (TiC).

Se obtiene mediante sinterizado del carburo metálico a altas presiones y temperaturas, siendo el aglomerante más típico el cobalto (Co). Cuanto menor sea el tamaño de grano del carburo utilizado, mayor será la resistencia al desgaste. Para el caso del WC, para tamaños de grano inferiores a $0.8\ \mu\text{m}$ se pueden utilizar en el mecanizado en seco de materiales de elevada resistencia (Weinert *et al.*, 2004).

- **Cermets**

En lugar de carburo de wolframio, las partículas base en este caso son de carburos y nitruros de titanio (TiC, TiCN y TiN), siendo el aglomerante níquel-cobalto. Son de gran dureza y resistencia a la abrasión en detrimento de su tenacidad. También poseen buena resistencia al desgaste y a la formación de cráteres, así como alta estabilidad química y dureza en caliente. Presentan baja tendencia a la oxidación y a la formación de filo recrecido.

- **Cerámicos**

Los principales materiales empleados en las herramientas cerámicas son la alúmina (Al_2O_3) y el nitruro de silicio (Si_3N_4). Su uso es aconsejable para trabajar a altas velocidades de corte o para soportar elevadas temperaturas durante el mecanizado. No son aconsejables para el mecanizado con fluidos de corte debido a su reducida resistencia frente a los choques térmicos.

- **Nitruro de boro cúbico**

Tras el diamante, el nitruro de boro cúbico o CBN (del inglés *Cubic Boron Nitride*), es el material más duro. Posee excelente resistencia al desgaste y en general buena estabilidad química durante el mecanizado. Es frágil, pero más tenaz que las cerámicas.

Las herramientas de nitruro de boro cúbico policristalino o PCBN (del inglés *Polycrystalline Cubic Boron Nitride*) destacan por su alta dureza, elevada resistencia al desgaste y estabilidad térmica. Estas herramientas presentan una elevada vida útil y proporcionan muy buenos acabados superficiales (Oliveira *et al.*, 2009).

- **Diamante policristalino**

El diamante policristalino o PCD (del inglés *PolyCrystalline Diamond*) es un diamante sintético de gran resistencia al desgaste y baja conductividad térmica. La vida de la herramienta es hasta cien veces mayor que las del carburo cementado. Sin embargo, es muy frágil, no puede ser usado para mecanizar materiales férreos porque existe afinidad, y tampoco sirve para mecanizar materiales tenaces. Además, las temperaturas de corte no deben exceder 600°C debido a los procesos de grafitización que se generan (Weinert *et al.*, 2004).

En la siguiente figura se muestra el comportamiento de cada tipo de material en términos de dureza y resistencia a la abrasión frente a tenacidad y resistencia al combado.

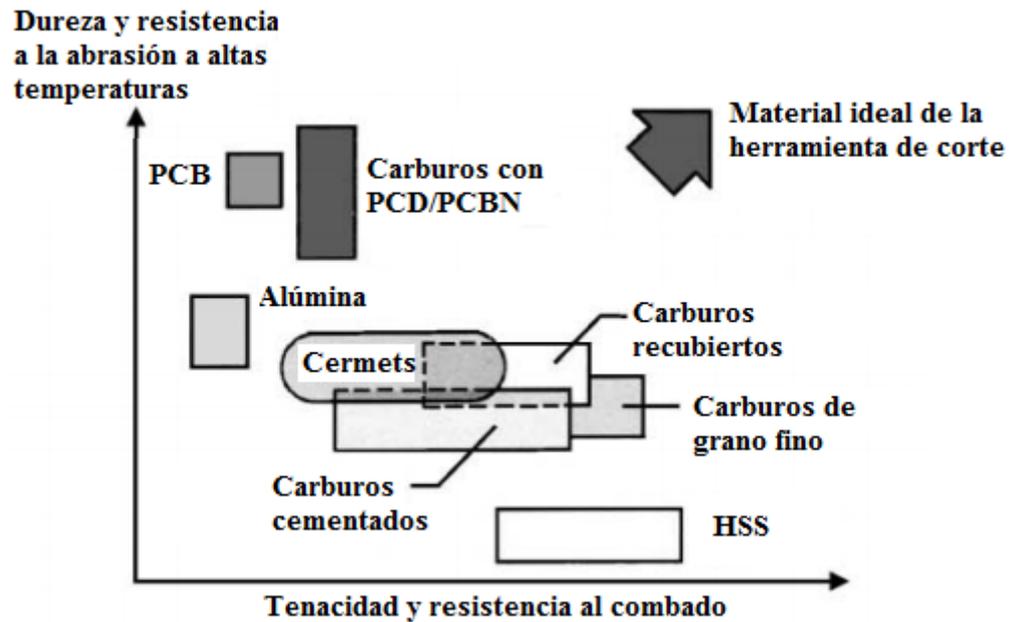


Figura 2.8. Relación entre dureza y tenacidad para diferentes materiales de herramientas de corte. Basada en Heath (2001).

2.3.3.3. RECUBRIMIENTOS

El uso de herramientas con recubrimiento permite trabajar a velocidades de corte y avance mayores, reduciendo el tiempo y el coste del mecanizado. Por otra parte, el uso de recubrimientos favorece una vida útil más prolongada de la herramienta, con la consiguiente reducción de los costes asociados a los cambios de herramienta.

La investigación en el campo de los recubrimientos de herramientas ha estado en constante desarrollo en las últimas décadas. La creciente competitividad en el ámbito de la fabricación industrial y los intentos de aumentar la producción sin incrementar costes, ha inducido al desarrollo de mejoras en las propiedades superficiales que presentaban los materiales que se estaban empleando.

En función de las condiciones de trabajo, se decide el recubrimiento idóneo para potenciar propiedades como la resistencia al desgaste, dureza, tenacidad, coeficiente de fricción o resistencia a la oxidación.

En la actualidad se tiende a utilizar recubrimientos multicapa que permiten aprovechar las características de diferentes tipos de materiales constituyendo un recubrimiento de características mejoradas (Weinert *et al.*, 2004).

Existen distintos procedimientos para la adhesión del recubrimiento, siendo los más frecuentes la deposición química en fase vapor o CVD (del inglés *Chemical Vapour Deposition*), la deposición física en fase vapor o PVD (del inglés *Physical Vapour Deposition*) y la deposición por spray térmico (Bewilogua *et al.*, 2009). Los recubrimientos por deposición química en fase vapor poseen capas menos definidas debido a los procesos de interdifusión que se producen. Esto les permite operar a mayores temperaturas que los de deposición física en fase vapor (Hogmark *et al.*, 2000).

A continuación se describen los recubrimientos de uso más frecuente:

- **Recubrimientos de titanio**

La base de carburo cementado es recubierta con carburo de titanio (TiC), nitruro de titanio (TiN), carbonitruro de titanio (TiCN) o nitruro de titanio y aluminio (TiAlN). El recubrimiento de TiN obtenido por deposición química en fase vapor, es el recubrimiento con mayor número de aplicaciones.

El TiCN es un compuesto de dureza superior al TiN, y, por tanto, con mayor resistencia al desgaste. Sin embargo, para el mecanizado de aleaciones blandas, el rendimiento es menor que el obtenido con el nitruro de titanio. La incorporación de aluminio en determinadas

proporciones en los recubrimientos de TiAlN aumenta la dureza y estabilidad térmica, permitiendo un rendimiento mayor.

- **Recubrimiento de carburo de wolframio/carbono**

El recubrimiento de carburo de wolframio/carbono (WC/C) se obtiene por deposición física en fase vapor a temperaturas alrededor de los 200°C. Al realizarse el proceso de recubrimiento en alto vacío, las propiedades del recubrimiento son sustancialmente mejores que las logradas a presión atmosférica (proyección térmica), o en gases y baños (nitruración, galvanizado). Estos recubrimientos, conocidos también como autolubricantes, presentan una combinación única de características: bajo coeficiente de fricción, alta resistencia al desgaste y excelente capacidad de carga. Así, se consiguen reducir las fuerzas de corte y el calor generado durante el proceso (Weinert *et al.*, 2004).

Los recubrimientos tienen un espesor de capa de sólo unas micras y se depositan, generalmente, encima de recubrimientos duros como nitruros de aluminio o titanio. Los de nitruro de titanio y aluminio (TiAlN) monocapa combinados con carburo de wolframio/carbono (WC/C) hacen frente a todos aquellos mecanismos de desgaste que se dan en la formación y evacuación de la viruta. Combinan la alta dureza y estabilidad térmica del recubrimiento TiAlN con las buenas propiedades de deslizamiento y lubricación del recubrimiento WC/C. Son precisamente estos nitruros de aluminio y titanio (TiAlN) los que se están empleando como base para el desarrollo de los nuevos tipos de recubrimientos, los nanocompuestos.

- **Nanocompuestos**

El desarrollo tecnológico de los últimos tiempos, ha permitido crear recubrimientos de dimensiones nanométricas, mejorándose los resultados obtenidos de modo significativo (Weinert *et al.*, 2004).

Los nanomateriales compuestos o nanocompuestos presentan una estructura constituida por granos nanocristalinos de nitruro de aluminio y titanio (TiAlN) o nitruro de aluminio y cromo (AlCrN) embebidos en una matriz de nitrato de silicio (Si_3N_4). Las principales ventajas de los nanocompuestos son su mayor dureza comparada con los recubrimientos convencionales y, especialmente, su elevada resistencia al calor (Bewilogua *et al.*, 2009).

Dentro de este grupo, se encuentran también los conocidos como supernitruros. Se obtienen empleando plasma ionizado como tecnología base, que permite obtener recubrimientos de TiAlN conductores o aislantes con un alto contenido de aluminio. Estos recubrimientos combinan la alta estabilidad química de las capas de óxido con las propiedades mecánicas de los recubrimientos de los nitruros más resistentes (Weinert *et al.*, 2004).

- **Recubrimientos de nitruro de boro cúbico**

Suelen ser utilizados en el mecanizado de materiales féreos. Los nitruros de boro cúbico (CBN) obtenidos por deposición física en fase vapor (PVD) sobre sustrato de carburo cementado poseen numerosas ventajas: flexibilidad geométrica, filos de corte afilados sin chaflanes ni ángulos de desprendimiento negativos, ausencia de difusión del aglomerante y buenos resultados con relación al coste (Weinert *et al.*, 2004).

La mejora de estos recubrimientos puede realizarse mediante la deposición de una capa intermedia de recubrimiento de TiAlN que mejora los resultados de desgaste del flanco de la herramienta (Bewilogua *et al.*, 2009).

- **Recubrimientos de diamante**

Las herramientas recubiertas de diamante, al reducir el desgaste por abrasión, permiten obtener una vida útil de la herramienta más larga. Por otra parte, este recubrimiento permite

trabajar con velocidades de corte mayores, lo que supone una disminución del tiempo de mecanizado. Se consigue un buen acabado superficial y una buena precisión dimensional.

A nivel estructural están constituidos por láminas de diamante producidas por deposición química en fase vapor (CVD). El recubrimiento de diamante CVD, si bien presenta un desgaste del flanco de la herramienta superior al obtenido con una herramienta de diamante policristalino (PCD) (Andrewes *et al.*, 2000), constituye un material especialmente idóneo para el mecanizado de materiales duros debido a la elevada dureza del recubrimiento (10000 HV), muy superior a la dureza del diamante PCD (6000 HV) (Teti, 2002). Además de las ventajas mencionadas, también ofrece flexibilidad geométrica con respecto a las herramientas a recubrir (Weinert *et al.*, 2004).

2.3.3.4. INCIDENCIA DEL RECUBRIMIENTO EN EL MECANIZADO EN SECO

En el mecanizado en seco, el recubrimiento es el encargado de realizar la función de lubricación/refrigeración asociada a los fluidos de corte clásicos. Algunas herramientas recubiertas de cerámica, carburo de wolframio con carbono (WC/C), nitruro de titanio-aluminio (TiAlN), bisulfuro de molibdeno (MoS₂) o diamante CVD, han demostrado un excelente comportamiento en el mecanizado en ausencia de lubricación. Estos materiales son tan duros que resisten el desgaste y se consiguen notables incrementos de vida de la herramienta (Weinert *et al.*, 2004).

El recubrimiento de TiN obtenido por deposición química en fase vapor, es el recubrimiento con mayor número de aplicaciones, y considerado como recubrimiento de elección en múltiples trabajos de mecanizado en seco (Sánchez *et al.*, 2005)(De Agustina *et al.*, 2011)(Saá *et al.*, 2009).

En los recubrimientos multicapa que combinan capas de recubrimiento de alta dureza con otras de recubrimiento blando, se suele obtener un comportamiento mejorado, ya que la capa de recubrimiento de alta dureza proporciona una reducción del desgaste abrasivo y adhesivo de la herramienta, mientras que el recubrimiento blando sustituye a los fluidos de corte en la zona de corte.

Las referencias bibliográficas en relación con la incidencia del recubrimiento en el mecanizado en seco son numerosas. A continuación se exponen las conclusiones alcanzadas en algunas de ellas.

En el estudio realizado por Lahres *et al.* (1997) se trabaja con diferentes recubrimientos comerciales para establecer su idoneidad en el fresado en seco de dos aleaciones de aluminio $AlZnMgCu_{1.5}$ y la $AlSi_{10}Mg$ de uso en la industria aeronáutica y en la de automoción. Se investigó la incidencia de diferentes recubrimientos con idéntico sustrato (carbono cementado) para reducir BUE y BUL. Destaca el buen comportamiento de los recubrimientos de WC/C y los de diamante CVD. El uso del diamante CVD supone un incremento del 30% en la vida de la herramienta, lo que confirma su gran potencial para el mecanizado en seco. Por otro lado, combinando una capa de recubrimiento de alta dureza como TiN con una de recubrimiento blando, como MoS_2 , se obtiene un comportamiento mejor en el fresado en seco que en el fresado con fluidos de corte utilizando herramienta sin recubrimiento. En este caso, la multicapa produce un incremento de la vida de la herramienta para el fresado en seco de hasta el 10% comparadas con las herramientas sin recubrimiento utilizadas en presencia de fluidos de corte.

El trabajo de Keipke *et al.* (1998) concluye que es preferible utilizar herramientas de CBN o de PCD en lugar de herramientas de Si_3N_4 recubiertas por CVD de diamante para el mecanizado de aleaciones aluminio-silicio. Esto se justifica por la dificultad de prever la vida de la herramienta en el caso de las primeras.

En el estudio realizado por Nouari *et al.* (2003) se analiza la vida de herramientas con recubrimiento de diamante respecto a herramientas sin recubrimiento en el taladrado de la aleación de aluminio UNS A92024. En concreto, para el taladrado con una velocidad de corte de 62 m/min y avance de 0.16 mm/rev, el número de taladros que se pueden realizar con la herramienta con recubrimiento manteniendo las especificaciones de calidad requeridas, triplica los realizables con la herramienta sin recubrimiento.

El trabajo de Settireni y Faga (2008) muestra la superioridad en términos de vida de la herramienta del recubrimiento multicapa de nitruro de titanio de aluminio silicio (AlSiTiN) respecto recubrimientos de carbonitruro de titanio (TiCN) en el mecanizado de una aleación de titanio con herramientas de base carburo de wolframio (WC-Co).

2.3.3.5. HERRAMIENTAS PARA EL MAGNESIO

Para el mecanizado del magnesio, en lo relativo a la geometría de las herramientas de corte, se puede recurrir a la misma geometría que la utilizada para el mecanizado de aceros y aleaciones de aluminio. No obstante, debido a la baja resistencia del magnesio frente al corte, se pueden utilizar diseños alternativos con geometrías más suaves, menores ángulos de incidencia, mayor espacio para las virutas, mayores ángulos de desprendimiento e incluso menos filos (como en las herramientas de fresado). Para minimizar el riesgo de ignición, resulta también relevante el diseño de los planos de desprendimiento para evitar una generación de calor excesiva (ASM, 1989).

En general, pueden utilizarse herramientas a base de carburos cementados sin recubrimiento, adecuadas para el mecanizado de metales no ferrosos (SECO, 2014).

En el caso de que se pretendan alcanzar acabados muy precisos, la herramienta de elección sería el diamante policristalino (PCD) que garantiza, además, una larga vida útil de la herramienta. Sin embargo, su aplicación se ve limitada por la temperatura de trabajo, debido a que a elevadas temperaturas el desgaste se incrementa notablemente. A temperaturas superiores a 600°C se producen procesos de grafitado (Weinert *et al.*, 2004).

Otro aspecto a tener en cuenta a la hora de decidir la herramienta más adecuada es la cantidad de material a mecanizar. Las herramientas a base de carburos son más adecuadas que las herramientas HSS para grandes ratios de producción (Avallone y Baumeister, 1996).

A continuación se comentan algunos de los trabajos de investigación consultados para la elaboración de la Tesis que han sido considerados más interesantes.

En el estudio de torneado de la aleación AZ91 llevado a cabo por Tönshoff y Winkler (1997), las herramientas recubiertas de PCD ofrecen mejores resultados que las recubiertas con TiN, incluso para velocidades de corte elevadas (superiores a 900 m/min). Así mismo, ayudan a disminuir la temperatura de las virutas y, por tanto, a disminuir también el riesgo de ignición.

Por otra parte, Salahshoor y Guo (2011) investigan el fresado de una aleación de aplicación en el campo de la biomedicina, una aleación Mg-Ca con un porcentaje de calcio del 0.8%, mediante herramientas PCD. Así, durante el proceso de mecanizado a alta velocidad se obtuvo una viruta continua y no se observó el inicio de la ignición de las mismas.

Otras investigaciones, como las realizadas por Gariboldi (2003) y Bhowmick *et al.* (2010), identifican la adhesión en el filo de las herramientas HSS utilizadas como mecanismo de desgaste durante el taladrado de las aleaciones AM60B y AM60, respectivamente. En el caso particular del trabajo de Gariboldi (2003), en el que el taladrado se realiza en seco, se

ensayan diferentes recubrimientos por deposición física en fase vapor (PVD): uno de TiN, otro de CrN y dos de ZrN. Para cada uno de ellos se determina un rango de avance que garantiza una buena vida de la herramienta y reducida rugosidad superficial. Se concluye que el recubrimiento de TiN y uno de los recubrimientos de ZrN utilizados son los que permiten operar con los mayores valores de avance.

El estudio de Wang *et al.* (2008) evalúa el desgaste de una herramienta HSS sin recubrimiento durante el taladrado en seco de la aleación de magnesio AZ91. Los principales mecanismos de desgaste apreciados son la abrasión, la adhesión y la difusión. Se identifica un mapa de desgaste formado por cinco zonas, que permite seleccionar los parámetros de corte de un modo adecuado para que el desgaste de la herramienta sea mínimo.

Weinert y Lange (2001) estudian el comportamiento de distintos recubrimientos en operaciones de taladrado y escariado de distintos compuestos de matriz metálica de magnesio. Se utilizan como herramientas carburos cementados recubiertos con diamante y TiAlN. En cuanto a las aleaciones, se mecaniza una aleación AZ91, reforzada con un 20% de δ -Al₂O₃ y otra una aleación ZC63, reforzada con un 12% de SiC, de mayor dureza. Los resultados varían claramente en función del material a mecanizar. Para la aleación AZ91 se obtiene un menor desgaste del flanco con el recubrimiento TiAlN, mientras que para el mecanizado de una aleación ZC63, los mejores resultados se obtienen con el recubrimiento de diamante.

2.4. REFRENTADO

2.4.1. GENERALIDADES

Se entiende por refrentado la operación de torneado mediante la que se mecanizan las caras planas terminales de la pieza. La operación de refrentado permite la obtención de una superficie plana perpendicular al eje de rotación de la pieza. El movimiento de avance es, por tanto, transversal; es decir, perpendicular a dicho eje de rotación.

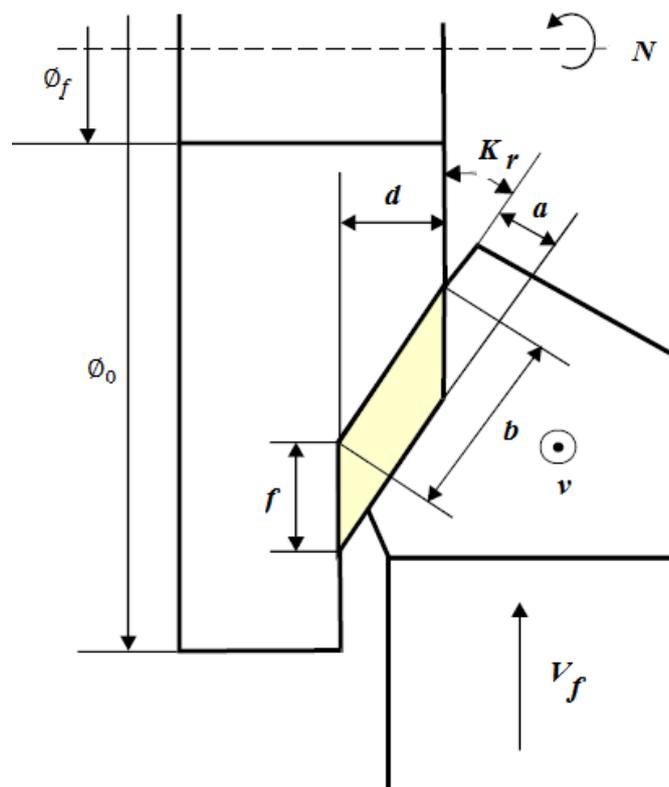


Figura 2.9. Esquema de una operación de refrentado Basada en Martín et al. (2003).

A diferencia del cilindrado, el refrentado, en el caso de realizarse a velocidad de rotación constante, no presenta una velocidad de corte constante. En las operaciones de refrentado, en el supuesto habitual de avance de la herramienta desde la periferia hacia el centro, se

trabaja sobre un diámetro que se reduce continuamente hasta anularse en el mismo centro. En estas condiciones la velocidad de corte se irá reduciendo progresivamente. Se puede deducir, por lo tanto, que el desgaste de la herramienta será máximo en la periferia de la pieza e irá decreciendo a medida que el proceso continúa. Por esta misma razón, en el refrentado tampoco es constante la potencia de corte, alcanzándose el valor máximo de ésta en el punto de contacto pieza-herramienta más alejado del eje de rotación. Todo ello implica que las superficies generadas sean anisotrópicas (Robbe-Valloire y Prat, 2008).

La Figura 2.9 esquematiza un proceso de refrentado, en el que están representados el avance (f), la profundidad de corte (d), el ancho de corte (b), el espesor de la viruta no deformada (a), la sección de viruta no deformada (A_c), el ángulo de posición (K_r), la velocidad de corte (v), la velocidad de avance (V_f), la velocidad de rotación (N), el diámetro final (\emptyset_f) y el diámetro inicial (\emptyset_0).

Algunas expresiones que relacionan estos parámetros son (Martín *et al.*, 2003):

- Sección de viruta:

$$A_c = b * a = f * d \quad (2.1)$$

- Volumen de material eliminado por unidad de tiempo (no constante):

$$\dot{z} = A_c * v = f * d * v \quad (2.2)$$

- Velocidad de corte:

$$v = \frac{\pi * N * \emptyset}{1000} \quad (2.3)$$

donde \emptyset está expresado en mm, N en rpm y v en m/min. Se aprecia cómo en esta operación, a diferencia del cilindrado, la velocidad de corte no es constante, sino que varía linealmente con el diámetro (\emptyset). El valor medio de la velocidad (v_m) se podría calcular considerando el valor medio del diámetro mecanizado (\emptyset_m).

- Velocidad de avance:

$$V_f = f * N \quad (2.4)$$

donde f está expresado en mm/rev, N en rpm y V_f en mm/min.

- Fuerza de corte (paralela a la dirección de la velocidad v):

$$F_c = K_s * A_c \quad (2.5)$$

donde K_s es una constante de proporcionalidad denominada presión de corte. La presión de corte depende de numerosos factores, entre los cuales cabe citar el material de la pieza y de la herramienta, la geometría de la herramienta, la sección de viruta, la velocidad de corte, la lubricación y el desgaste de herramienta. Al ser tan numerosos, y en algunos casos tan difícilmente cuantificables los factores que influyen en el valor de K_s , el único método fiable para su determinación es la medición directa sobre el proceso de mecanizado concreto en las condiciones específicas en las que éste se realiza. En la práctica, dado que este proceder resulta poco viable, se recurre a la utilización de tablas que recogen las variaciones de K_s en función de una serie de variables dependientes de los factores anteriormente mencionados.

- Potencia requerida en el proceso: (no constante)

$$Pot = \dot{W} = F_c * v = K_s * \dot{z} \quad (2.6)$$

- Tiempo de mecanizado. Puede calcularse mediante la expresión:

$$t_m = \frac{l_m}{V_f} = \frac{l_e + \left(\frac{\phi_0 - \phi_f}{2}\right) + d * \cot K_r + l_s}{f * N} \quad (2.7)$$

donde l_m representa la longitud de mecanizado y V_f la velocidad de avance. El valor de l_m se obtiene como suma de la longitud a refrentar en la pieza, más unas longitudes de entrada y salida de la herramienta (l_e y l_s), más la longitud necesaria para poder realizar el movimiento de penetración ($d * \cot K_r$).

Durante el mecanizado, la herramienta de corte aplica fuerzas tangenciales de considerable magnitud sobre la pieza de trabajo. Para garantizar un refrentado en condiciones adecuadas en términos de seguridad, la longitud de la pieza de trabajo desde la mordaza del torno no debe exceder más de 2-3 veces su diámetro, a no ser que se utilice un apoyo firme en el extremo libre (Kumar *et al.*, 2012).

2.4.2. TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN SOBRE OPERACIONES DE REFRENTADO EN SECO

El número de trabajos de investigación centrados en operaciones de refrentado en seco disponibles en la bibliografía son más bien escasos y, en cualquier caso, muy inferiores a los disponibles para otras operaciones de mecanizado en seco, tales como cilindrado, taladrado

o fresado. Se recogen a continuación, por orden cronológico, algunos de los estudios más relevantes.

El trabajo de Hung *et al.* (1996) estudia la maquinabilidad de materiales compuestos con matriz de aluminio reforzados con partículas de SiC o Al₂O₃. Se utilizan modelos para el desgaste acumulado de la herramienta para estudiar la maquinabilidad de estos materiales en operaciones de torneado y refrentado en seco. Entre otros aspectos se investigó el efecto del material de la herramienta empleada. Se recomienda el uso de herramientas de carburo en operaciones de desbaste, mientras que las herramientas de nitruro de boro cúbico (CBN) y las de diamante policristalino (PCD) se podrían utilizar para operaciones de acabado. Las últimas herramientas tienen una vida útil aceptable, y causan el mínimo daño en las zonas más próximas a la superficie de la pieza de trabajo. Para todos los casos estudiados, al aumentar la dureza de la matriz de aluminio, la vida de la herramienta se acorta. Las herramientas de CBN y de PCD son uno y dos órdenes de magnitud mejores que las de carburo en términos de resistencia al desgaste. Se analiza también la diferencia entre uso de fluidos de corte de base acuosa o mecanizado en seco. El uso de fluidos de base acuosa reduce la formación de BUE, pero no consigue mejorar la vida de la herramienta.

El trabajo de Arai *et al.* (1996) propone un método para el control de la viruta en operaciones de acabado de cilindrado y refrentado en seco de aleaciones de magnesio. Se estudiaron las condiciones de corte que conducían a la generación de virutas tubulares helicoidales, deseables cuando la dirección del flujo de viruta es estable y el radio tubular pequeño. Se concluye que se favorece la formación de virutas tubulares helicoidales al aumentar el ángulo de inclinación de la herramienta, al aumentar el avance y al disminuir la profundidad de corte.

El trabajo de Bason y Yung (2002) presenta un modelo mecanicista tridimensional de las vibraciones en el dominio de la frecuencia en procesos de refrentado. El modelo puede ser

utilizado para determinar los límites de estabilidad bajo diferentes condiciones de corte, así como para predecir el desgaste de la herramienta.

El trabajo de Dahlman *et al.* (2004) se centra en operaciones de refrentado en seco de probetas de la aleación AISI 52100, a régimen de giro del husillo constante. Se emplearon herramientas de nitruro de boro cúbico (CBN). La alimentación y la profundidad de corte fueron investigadas, pero el objetivo principal era analizar la influencia del ángulo de ataque de la herramienta en las tensiones residuales obtenidas en las probetas. Se midieron las tensiones residuales utilizando el método de difracción de rayos X en la velocidad y la dirección de alimentación. Todos los ensayos llevados a cabo muestran que siempre se generan tensiones de compresión bajo la superficie de la pieza. Los resultados muestran que el ángulo de ataque de la herramienta es el factor más influyente en las tensiones residuales. A mayor ángulo de ataque negativo, mayores tensiones compresivas, así como mayor profundidad de la zona afectada. Además, las tensiones de compresión se incrementan con el aumento del avance. Diferentes profundidades de corte no generan diferentes niveles de tensiones. Los resultados muestran que es posible controlar la medida de los niveles de tensiones residuales mediante una selección adecuada de la geometría de la herramienta y los parámetros de corte.

El trabajo de Robbe-Valloire y Prat (2008) se centra en la construcción de un modelo de microgeometría superficial basado en el análisis estadístico de los picos de rugosidad obtenidos en operaciones de refrentado, en las que las superficies generadas son anisotrópicas. De forma complementaria se llevó a cabo también un análisis estadístico de los valles, que a su vez juegan un papel clave en diversos fenómenos tribológicos, tales como aplicaciones de sellado estático en los que puede darse la fuga del fluido circulante a lo largo de los valles. Se concluye que el rendimiento del sellado no se debe sólo a la amplitud de la rugosidad, sino también a la variabilidad de las alturas del valle.

El trabajo de Velasco (2011) presenta una propuesta de planteamiento y solución del problema de optimización de parámetros de corte en operaciones de cilindrado, refrentado y torneado cónico siguiendo criterios como la máxima tasa de producción (equivalente al tiempo mínimo de producción por pieza) o el mínimo coste. Para ello utiliza dos variables de optimización alternas: la velocidad de corte o la velocidad angular. La similitud en la forma de las derivadas de la función objetivo y de las restricciones permite una solución determinística que asegura la obtención de los parámetros óptimos en un tiempo inferior al que requieren los métodos heurísticos sin que quien use el programa desarrollado deba tener conocimientos sobre métodos numéricos y alimentar al programa de un extenso conjunto de datos. Esta relativa sencillez del algoritmo y el programa que lo implementa facilitarían su uso en sistemas CAM. Se prueba con éxito el algoritmo sobre una pieza de material AISI 304 mecanizada en seco con herramientas de base de carburo cementado recubiertas de carburos y nitruros de titanio (TiCN+TiN) por deposición física en fase vapor (PVD).

El propósito del trabajo de Kumar *et al.* (2012) se centra en el análisis de las condiciones de corte óptimas para conseguir una adecuada rugosidad superficial en operaciones de refrentado en seco por análisis de regresión. El objetivo era establecer una correlación entre el régimen de giro del husillo, avance y profundidad de corte en el acabado superficial de una pieza de material EN-8 (AISI 1040). El mecanizado se realizó utilizando herramientas de carburo cementado (WC+TiC+Co). La influencia del avance resultó ser muy superior al resto de parámetros, y proporcional a la variación de la rugosidad superficial. Se determinó, así mismo, la combinación de parámetros de corte que conducían a un mejor acabado superficial.

El estudio de Rajshekhar *et al.* (2013) es una investigación experimental sobre la maquinabilidad de dos aceros de baja aleación, AISI 9320 y AISI 4340 sometidos a operaciones de refrentado en seco utilizando una herramienta de corte triangular de carburo

cementado sin recubrimiento. La eficacia de este método se evalúa mediante el estudio de: el tiempo de corte requerido para que la herramienta de corte alcance un recrocido de flanco de 0.3 mm (criterio de vida de la herramienta); el desarrollo del desgaste de la herramienta y de los mecanismos de desgaste que intervienen en el mecanizado; la vida de la herramienta y de los índices de maquinabilidad del material de trabajo; otras investigaciones realizadas sobre la rugosidad superficial de las superficies mecanizadas; y la morfología de la viruta. Los ensayos de maquinabilidad llevados a cabo en la investigación siguen algunas de las pautas que se indican en los estándares internacionales relativos a las pruebas de maquinabilidad: ISO 3685:1993 y AFS (del inglés, *American Foundry Society*). Los resultados obtenidos demuestran la capacidad del refrentado para: evaluar el desarrollo del desgaste de la herramienta; estudiar la vida de las herramientas; clasificar el material de trabajo de acuerdo a su maquinabilidad; investigar la rugosidad superficial asociada al desgaste de la herramienta; e investigar la relación de la morfología de la viruta con el desgaste de la herramienta. Así pues, el refrentado se muestra como un método simple y efectivo para caracterizar la maquinabilidad de los aceros. En lo que se refiere a los aceros considerados, la maquinabilidad del AISI 9320 es superior a la del AISI 4340 considerando desgaste de la herramienta, acabado superficial y morfología de la viruta.

La investigación de Arrazola *et al.* (2014) se centra en el estudio de las tensiones residuales producidas después de los procesos de mecanizado de una aleación a base de níquel (IN718) y en su predicción mediante el desarrollo de simulaciones 3-D basadas en elementos finitos. Esta cuestión se considera de gran interés para el control de la integridad superficial de componentes estructurales críticos sometidos a mecanizado. Se revisan los principales métodos de medición de tensiones residuales que incluyen técnicas de difracción. En términos generales, la predicción de los perfiles de tensiones residuales y los valores experimentales obtenidos de dichos perfiles, tienen la misma forma, si bien la simulación predijo una profundidad mayor de la capa afectada por las tensiones residuales.

Los resultados muestran que el pico máximo de tensión de compresión se incrementa al aumentar la velocidad de corte.

2.4.3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Del análisis de los trabajos de investigación previamente comentados, se puede apreciar el uso que se está haciendo del refrentado en seco para caracterizar la maquinabilidad de distintos materiales (Hung *et al.*, 1996)(Rajshekhar *et al.*, 2013), mostrándose un método simple y eficaz para dicho propósito.

Otros trabajos se centran en el estudio y predicción de las tensiones residuales producidas bajo la superficie del material de trabajo tras su mecanizado, analizando su influencia en la integridad superficial de la pieza (Dahlman *et al.*, 2004)(Arrazola *et al.*, 2014).

En lo relativo a la influencia de los parámetros de corte, el estudio de Dahlman *et al.* (2004) concluye que la integridad superficial empeora al aumentar el avance o el ángulo de ataque, siendo el ángulo de ataque el factor más influyente. El estudio de Kumar *et al.* (2012) constata la influencia negativa del aumento del avance en la rugosidad superficial, siendo éste el factor de mayor influencia. Desde el punto de vista de la viruta generada, el trabajo de Arai *et al.* (1996) concluye que tanto aumentar el ángulo de inclinación de la herramienta, como aumentar el avance o disminuir la profundidad de corte, favorecen la formación de virutas tubulares helicoidales.

Por último, diversos estudios pretenden modelizar el proceso del refrentado en seco desde distintas ópticas: Robbe-Valloire y Prat (2008) desarrollan un modelo de microgeometría superficial basado en el análisis estadístico de los picos de rugosidad obtenidos; Velasco (2011) plantea una posible solución determinística del problema de optimización de

parámetros de corte; mientras que Bason y Yung (2002) presentan un modelo mecanicista tridimensional de las vibraciones en el dominio de la frecuencia, de interés para la predicción del desgaste de la herramienta de corte.

2.5. TÉCNICAS DE PREDICCIÓN DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL

2.5.1. INTRODUCCIÓN

En el marco actual de competitividad y de creciente demanda de productos de calidad, la predicción de la rugosidad superficial, como una de las características de calidad del producto más significativa, es un objetivo clave para una unidad de fabricación. Para algunas industrias, como la del automóvil y la aeronáutica, la calidad de sus piezas es muy importante debido a las altas exigencias a las que están sujetas. Los ingenieros y los profesionales deben enfrentarse a la consecución de una calidad de producto predefinida considerando las limitaciones de equipos, costes y tiempo. La optimización de parámetros de proceso puede llevar a mejorar la eficiencia consiguiendo los resultados deseados con variaciones aceptables que garanticen un menor coste de fabricación (Montgomery, 2005).

La rugosidad superficial se utiliza ampliamente como un indicador de la calidad del producto y es, en muchos casos, un requisito técnico para partes mecánicas. Así pues, la estimación de la rugosidad superficial se convierte en una cuestión clave para cualquier proceso de mecanizado. La rugosidad superficial se refiere a la desviación de tercer a sexto orden respecto a la superficie nominal. El orden de desviación se define en las normas internacionales (DIN 4760, 1982)(UNE-EN ISO 4287:1999, 1999)(UNE-EN ISO 4287:1999 / AC:2010, 2010)(UNE-EN ISO 4287:1999 / A1:2010, 2010)(UNE-EN ISO 4288:1998, 1998); el primer y segundo orden se refieren a la forma, el tercero y cuarto a las muescas periódicas y el quinto y sexto a la estructura del material.

En términos generales, un acabado superficial razonablemente bueno se desea para mejorar las propiedades tribológicas, la resistencia a la fatiga, la resistencia a la corrosión y

el atractivo estético del producto. Por otra parte, un acabado superficial demasiado bueno puede implicar un aumento significativo en los costes de fabricación. Las investigaciones realizadas hasta la fecha muestran que las condiciones de corte, el desgaste de la herramienta, las propiedades del material de la herramienta y de la pieza de trabajo, así como los parámetros de corte del proceso (incluyendo la velocidad de corte, la profundidad de corte, el avance y la geometría de la herramienta) influyen significativamente en el acabado superficial de las piezas mecanizadas (Figura 2.10).

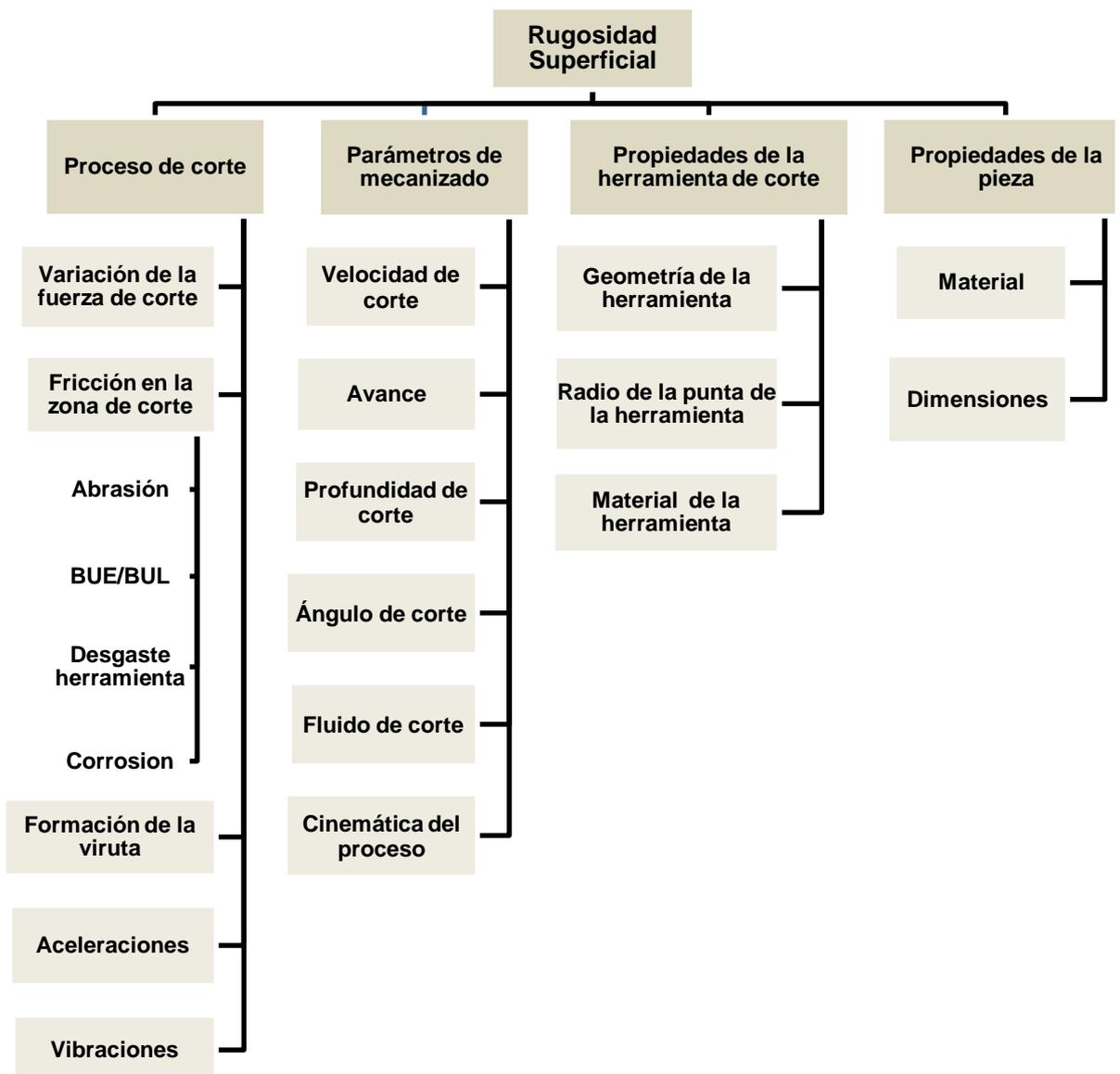


Figura 2.10. Parámetros que afectan a la rugosidad superficial.

A través de los años, y como consecuencia de un esfuerzo combinado de diferentes ramas de la ingeniería, las técnicas de modelado y optimización han experimentado un desarrollo y expansión sustancial. Sin embargo, debido a la propia naturaleza del mecanismo de generación de la rugosidad superficial, puede resultar complejo para los investigadores y profesionales el seleccionar una técnica de optimización adecuada para una operación específica (Benardos y Vosniakos, 2003)(Rubio et al., 2012b).

En este apartado del estado del arte se presentan y discuten las diversas metodologías y estrategias que se adoptan por los investigadores con el fin de predecir la rugosidad superficial. Se consideran la utilidad, las aplicaciones y las limitaciones de las diferentes metodologías y herramientas empleadas.

2.5.2. CLASIFICACIÓN DE LOS ENFOQUES

La clasificación de los diferentes enfoques es una tarea difícil porque hay muchos trabajos que no siguen estrictamente una metodología determinada en su totalidad, sino que, más bien, seleccionan algunos de sus principios básicos y los combinan en un "nuevo enfoque" (Benardos y Vosniakos, 2002).

Para la tarea de optimización de los parámetros de un proceso de mecanizado es necesario comprender los principios relativos a los procesos de corte mediante el desarrollo de un modelo matemático explícito, que puede ser de dos tipos: mecanicista y empírico. Los modelos empíricos son más utilizados debido a la falta de modelos mecanicistas adecuados y aceptables para los procesos de mecanizado.

2.5.2.1. ENFOQUE MECANICISTA

Un modelo mecanicista determina analíticamente la relación entre los parámetros de entrada y salida de cualquier proceso de corte desde un punto de vista teórico, teniendo en cuenta los diferentes aspectos de la teoría de mecanizado (Ehmann y Hong, 1994)(Grzesik, 1996)(Lin y Chang, 1998)(Chen *et al.*, 1998)(Muñoz-Escalona y Cassier, 1998).

Este modelo se supone que es capaz de predecir o simular el perfil de la superficie mecanizada. Sin embargo, como los mecanismos que conducen a la formación de la rugosidad superficial son muy complejos debido a la interacción de un gran número de parámetros (Figura 2.10), aún no se ha encontrado una solución completa.

Existen diversos trabajos en la literatura que también implementan la información proporcionada por diferentes sensores (ópticos y de visión por ordenador, emisión acústica, ultrasonidos y señales de vibración). Esto permite obtener monitorización en tiempo real y utilizar la realimentación del valor de la rugosidad superficial en el sistema de control numérico por ordenador (CNC) para ajustar on-line los parámetros de corte (Lee *et al.*, 2001)(Jang *et al.*, 1996)(Beggan *et al.*, 1999)(Coker y Shin, 1999). Esta información también puede ser utilizada para simular el proceso de generación de la superficie.

2.5.2.2. ENFOQUE EMPÍRICO

El enfoque empírico es una alternativa al enfoque mecanicista en los casos en que no puede haber una formulación aceptable de análisis de la relación causa-efecto. En este enfoque, los ensayos con los factores que se consideran los más importantes se llevan a cabo con el fin de investigar el efecto de cada factor, así como el mecanismo de influencia en la

generación de rugosidad superficial. También es necesario un alto conocimiento de los mecanismos de generación de la rugosidad superficial para alcanzar buenos resultados.

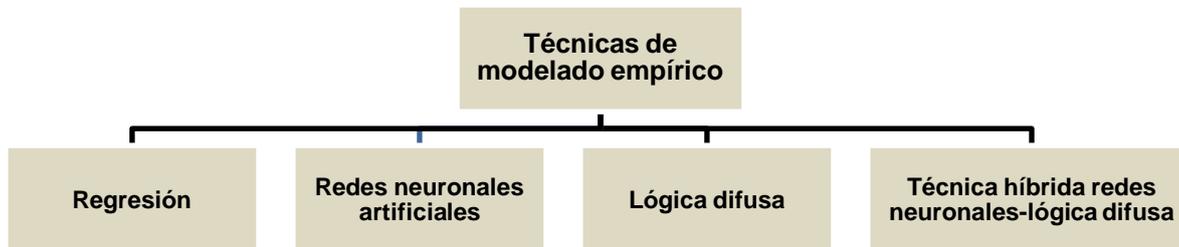


Figura 2.11. Técnicas de modelado empírico. Basada en Mukherjee y Ray (2006).

Para clasificar cada una de las técnicas utilizadas en el enfoque empírico, se considera la clasificación general de las técnicas de optimización proporcionados por Mukherjee y Ray (2006) utilizadas para modelar las diferentes relaciones de parámetros entrada-salida en cualquier proceso (Figura 2.11). A continuación se analiza cada una de ellas.

- **Técnica de regresión estadística**

Permite establecer la relación funcional entre variables de entrada y de salida de un proceso. Esta técnica puede funcionar bien para el desarrollo de modelos muy precisos. Se ha utilizado en diversos estudios para determinar la rugosidad superficial en el mecanizado (Abouelatta y Madl, 2001)(Feng y Wang, 2002)(Ghani y Choudhury, 2002). Sin embargo, no puede describir con precisión las subyacentes relaciones no lineales complejas implicadas en la generación de la rugosidad superficial.

- **Redes neuronales artificiales**

Una red neuronal artificial o ANN (del inglés *Artificial Neural Network*) es un sistema inteligente artificial inspirado en la estructura y funcionamiento de redes neuronales

biológicas. Se trata esencialmente de un modelo matemático que imita el razonamiento humano y la neurobiología.

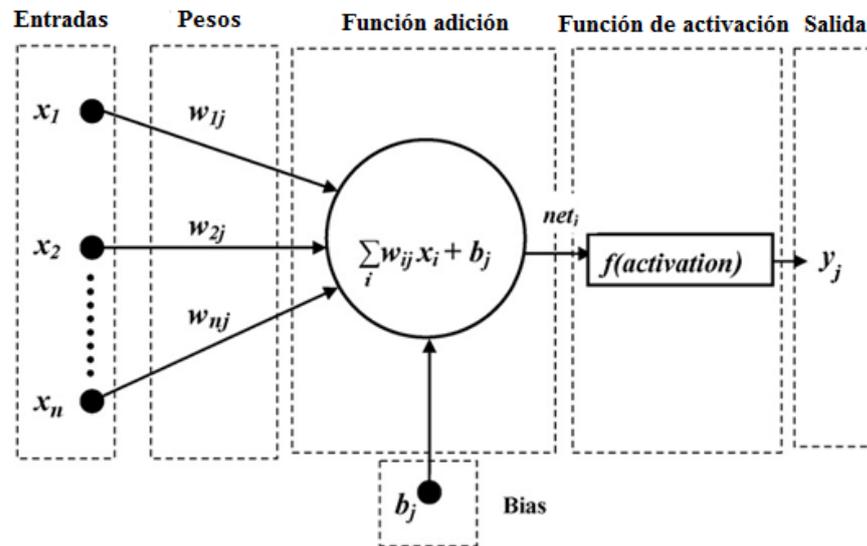


Figura 2.12. Estructura de una neurona artificial. Basada en Karayel (2009).

Se basa en los siguientes supuestos (Petri *et al.*, 1998):

- i. El procesamiento de la información se produce en un número de elementos simples, denominados neuronas (Figura 2.12).
- ii. Las señales se transmiten entre las neuronas a través de enlaces de conexión.
- iii. Cada enlace de conexión tiene un peso asociado que multiplica la señal transmitida.
- iv. Cada neurona aplica una función de activación de la señal de entrada para determinar su señal de salida.

Las neuronas están organizadas en capas: la capa de entrada, las capas ocultas y la capa de salida. La capa de entrada se utiliza para presentar los datos en la ANN y la salida para producir la respuesta de la ANN. Las dos características principales de una ANN son la arquitectura de la red, generalmente relacionada con el tipo de problema considerado, y el método de determinación de los pesos de las conexiones.

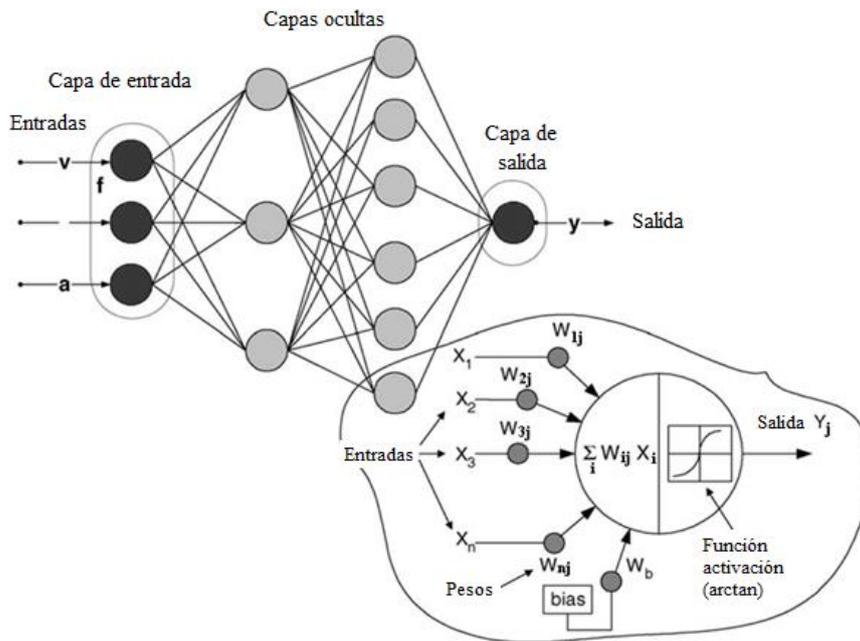


Figura 2.13. Ejemplo de red neuronal artificial y principio matemático de funcionamiento de la neurona. Basada en Cus y Zuperl (2006).

El funcionamiento de una red neuronal se compone de dos fases: la formación (o aprendizaje) y el recuerdo (aplicación). En la formación es necesario ajustar iterativamente los pesos de interconexión con el fin de minimizar los errores de predicción. La Figura 2.13 representa una red neuronal con dos capas ocultas y el principio matemático de funcionamiento (Cus y Zuperl, 2006).

Se ha demostrado que las redes neuronales sirven para hacer una excelente aproximación de las funciones no lineales, aplicándose con éxito para el modelado y optimización de diferentes sistemas. Una ANN es capaz de manejar las complejas relaciones de parámetros entrada-salida en procesos de control de mecanizado. Esta técnica ha sido ampliamente utilizada, sobre todo en trabajos recientes, para establecer modelos de predicción de la rugosidad superficial (Matsumura *et al.*, 1996)(Varghese y Radhakrishnan, 1994)(Azouzi y Guillot, 1997)(Tsai *et al.*, 1999)(Li *et al.*, 1999)(Lin *et al.*, 2001)(Benardos y Vosniakos,

2002)(Grzesik y Brol, 2003)(Wang y Hsu, 2005)(Davim *et al.*, 2008)(Karayel, 2009)(Zain *et al.*, 2010a)(Asiltürk y Çunkaş, 2011b).

Correa *et al.* (2009) examinaron la eficacia de un tipo de redes conocidas como redes bayesianas o BN (del inglés *Bayesian Networks*) en comparación con las redes neuronales clásicas, para predecir la rugosidad superficial en una operación de mecanizado de alta velocidad. Una BN es un modelo probabilístico gráfico que representa un conjunto de variables (nodos) y sus independencias probabilísticas condicionales (codificada en sus arcos). Estos nodos pueden representar cualquier tipo de variable: un parámetro medido, como la rugosidad superficial, una variable latente o una hipótesis. Con el clasificador bayesiano la tasa esperada de errores de clasificación se reduce al mínimo. Los resultados demostraron la superioridad de las redes bayesianas en este campo. En opinión de los autores, estas redes también son más fáciles de interpretar que las redes neuronales clásicas.

El análisis de regresión fue también considerado como segundo modelo de predicción en alguno de los trabajos mencionados (Azouzi y Guillot, 1997)(Tsai *et al.*, 1999)(Wang y Hsu, 2005)(Correa *et al.*, 2009). En estos estudios se establece una comparativa entre las redes neuronales y los análisis de regresión, concluyendo todos ellos con la superioridad de las redes neuronales como modelo de predicción de la rugosidad superficial.

- **Teoría basada en la lógica difusa**

Esta teoría se centra en lo que el sistema debe hacer, en lugar de tratar de modelar cómo funciona. Se puede utilizar en una amplia gama de ámbitos en los que la información es incompleta o imprecisa. Esta técnica se ha utilizado en diferentes investigaciones de procesos de mecanizado (Hashmi *et al.*, 1998)(Ip, 1998). Se basa en la existencia de un tipo de incertidumbre en las variables de decisión del proceso, y supone que muchas de las

decisiones en el control del proceso se encuentran en un ambiente difuso (Zimmerman, 1976). La teoría de conjunto difuso permite la evaluación gradual de la pertenencia de elementos a un conjunto. Un conjunto difuso es un conjunto sin un borde claramente definido que contiene elementos con un grado parcial de pertenencia (por lo general entre 0 y 1). El grado de pertenencia de cada elemento se define por una función de pertenencia o MF (del inglés *Membership Function*). La lógica difusa se basa en reglas *si-entonces* y variables lingüísticas. La MF asocia una ponderación a cada una de las entradas que se procesan, define solapamiento funcional entre las entradas y, finalmente, determina una respuesta de salida. Una ventaja de esta herramienta es que permite la aplicación de conocimiento experto humano en el proceso. El potencial de esta técnica en la predicción de la rugosidad superficial se mostró en varios trabajos (Kwon *et al.*, 2002)(Lou y Chen, 1997)(Chen y Savage, 2001)(Barzani *et al.*, 2015).

En los últimos años, un tipo híbrido de sistema inteligente conocido como redes neuronales difusas o FN (del inglés *Fuzzy Networks*) se ha considerado en numerosos trabajos. Una FN se basa en un sistema difuso que es entrenado por un algoritmo de aprendizaje basado en la teoría de redes neuronales. Estos sistemas tienen la ventaja de combinar la capacidad de aprendizaje de las redes neuronales con la capacidad de razonamiento de la lógica difusa. Se han desarrollado numerosos sistemas neuronales difusos, cada uno con distintos esquemas de aprendizaje, funciones de pertenencia y variables de entrada y salida (Chen y Kumara, 1998)(Javadpour y Knapp, 2003)(Kirby *et al.*, 2006)(Kirby y Chen, 2007)(Abburi y Dixit, 2006)(Jiao *et al.*, 2004).

En el contexto actual de la integración de múltiples sensores, combinar estas dos tecnologías es mejor tanto en velocidad como en precisión. La importancia de la integración entre técnicas de redes neuronales y lógica difusa para el control de procesos en la industria de mecanizado se observó en el trabajo de Kuo y Cohen (1998). Ho *et al.* (2002) propusieron un sistema neuronal difuso adaptativo de inferencia o ANFIS (del inglés

Adaptive Neuronal Fuzzy Inference System) y visión por ordenador para predecir la rugosidad superficial en una operación de torneado. El sistema de visión por computador proporcionó imágenes de la superficie que se analizaron para calcular la media aritmética de los niveles de gris (número de tonos de gris). Este sistema podía predecir eficazmente la rugosidad superficial usando los parámetros de corte (velocidad de corte, avance y profundidad de corte) y el nivel de gris de la imagen de la superficie. En el estudio de Dong y Wang (2011) se considera una optimización de parámetros, conocida como LOO-CV (del inglés *Leave-One-Out Cross Validation*) para encontrar la función de pertenencia más adecuada y las reglas base óptimas del modelo ANFIS para el problema de la predicción de la rugosidad superficial en un proceso de fresado de acabado. Los resultados muestran la gran precisión alcanzada por la combinación de ANFIS con LOO-CV.

2.5.3. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE CORTE ÓPTIMAS O CASI ÓPTIMAS

Los investigadores han desarrollado un gran número de técnicas para encontrar soluciones óptimas o razonablemente próximas al óptimo para el problema de optimización de parámetros.

En términos generales, estas técnicas pueden clasificarse como técnicas de optimización convencionales y no convencionales. El objetivo de las técnicas convencionales es proporcionar una solución óptima local. En las técnicas no convencionales, la búsqueda se centra en proporcionar condiciones casi óptimas de corte. La Figura 2.14 muestra una clasificación general de las diferentes herramientas y técnicas de optimización en los procesos de corte de metal (Mukherjee y Ray, 2006).

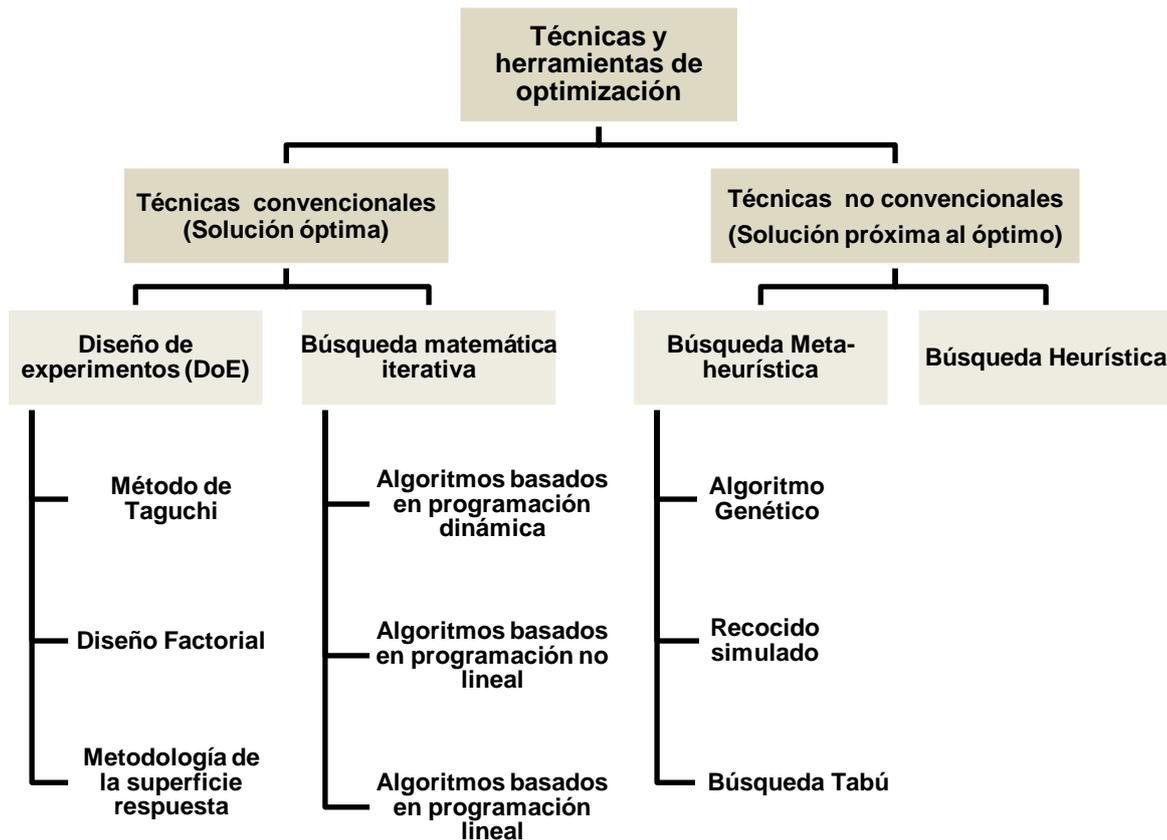


Figura 2.14. Clasificación de las técnicas y herramientas de optimización. Basada en Mukherjee y Ray (2006).

2.5.3.1. TÉCNICAS CONVENCIONALES DE OPTIMIZACIÓN

En lo que se refiere al problema de la predicción de la rugosidad superficial, es posible encontrar en la literatura algunos trabajos relacionados con el diseño factorial (Kopac y Bahor, 2002)(Thomas y Beuchamp, 2003)(El Sinawi y Kashani, 2005) y técnicas de búsqueda matemáticas iterativas (Hassan y Suliman, 1990), pero la metodología de las superficies de respuesta y las técnicas de Taguchi para el diseño de experimentos parecen ser las metodologías más frecuentemente utilizadas para este propósito. Las técnicas basadas en el diseño de experimentos o DoE (del inglés Design of Experiments) consisten en la aplicación sistemática de una metodología aplicable a la planificación de los

experimentos, y en la obtención y análisis de los datos de la variable respuesta, con un uso casi óptimo de los recursos disponibles (Benardos y Vosniakos, 2003).

- **Método de Taguchi**

La filosofía de Taguchi proporciona una reducción considerable de tiempo y recursos para determinar los factores clave que afectan a las operaciones, alcanzando la mejora simultánea de la calidad y los costes de fabricación (Taguchi, 1987). Una clara ventaja de este método es que requiere un menor número de ensayos experimentales. La relación señal a ruido o S/N (del inglés *Signal to Noise*) y la matriz ortogonal son las principales herramientas utilizadas en el diseño robusto de Taguchi (Akhyar *et al.*, 2008).

El diseño de parámetros del método de Taguchi incluye los siguientes pasos (Yang y Tarng, 1998): (i) la identificación de las características de calidad y selección de los parámetros de diseño para ser evaluados, (ii) la determinación del número de niveles de los parámetros de diseño y las posibles interacciones entre ellos; (iii) la selección de la matriz ortogonal apropiada y la asignación de los parámetros de diseño a la matriz, (iv) la realización de los ensayos basados en la disposición de la matriz ortogonal; (v) el análisis de los resultados experimentales usando el análisis de la varianza (ANOVA) y la relación señal a ruido (S/N); (vi) la selección de los niveles óptimos de los parámetros de diseño, y (vii) la verificación de los parámetros de diseño óptimos a través de experimentos de confirmación.

Muchos estudios consideran Taguchi como metodología de aplicación para el problema de predicción de la rugosidad superficial (Davim, 2001)(Manna y Bhattacharyya, 2004)(Tzeng y Jean, 2005)(Nalbant *et al.*, 2007)(Akhyar *et al.*, 2008)(Asiltürk y Akkus, 2011a). El enfoque de Gupta *et al.* (2011) combina con éxito la aplicación del método de Taguchi con el razonamiento lógico difuso para la optimización de múltiples salidas (incluyendo la rugosidad superficial) en un proceso de torneado de alta velocidad. El trabajo de Villeta *et al.* (2011) se

centra en identificar los principales factores que influyen en el torneado en seco de magnesio y en seleccionar las condiciones óptimas de fabricación que dan lugar a una rugosidad superficial mínima. La técnica de optimización utilizada combina la aplicación de las técnicas Taguchi con pruebas estadísticas como la diferencia mínima significativa o LSD (del inglés *Less Significant Difference*). En opinión de los autores, éste es un método de optimización preciso y flexible que podría extenderse al mecanizado de otros materiales y a otros procesos de mecanizado.

- **Metodología de superficie de respuesta**

La metodología de superficie de respuesta o SRM (del inglés *Surface Roughness Methodology*) es una colección de técnicas matemáticas y estadísticas útiles para el modelado y análisis de problemas en los que una respuesta de interés se ve influida por diversas variables y el objetivo es optimizar esta respuesta (Montgomery, 2005). La naturaleza secuencial de la SRM permite al experimentador aprender sobre el proceso o sistema sometido a estudio según avanza la investigación. El procedimiento de diseño de la SRM es el siguiente (Noordin *et al.*, 2004): (i) diseñar una serie de experimentos para mediciones de la respuesta de interés, (ii) desarrollar un modelo matemático de la superficie de respuesta con los mejores ajustes; (iii) encontrar el conjunto óptimo de parámetros experimentales que producen un valor máximo o mínimo de respuesta, y (iv) representar los efectos directos e interactivos de los parámetros de proceso a través de representaciones gráficas de dos y tres dimensiones.

Esta metodología ha sido considerada en diferentes problemas de optimización de procesos, obteniéndose resultados satisfactorios. Sin embargo, este enfoque tiene limitaciones. Las funciones objetivo son difíciles de resolver en problemas altamente no lineales, o cuando hay objetivos múltiples (Carlyle *et al.*, 2000). Otro inconveniente es que la

función objetivo o respuesta debe ser continuamente diferenciable para la determinación de la condición óptima de corte, lo que puede no darse en muchos procesos complejos.

También es digno de mención que las técnicas de SRM se basan en series de experimentación, cuya ejecución puede no ser factible o rentable en muchas situaciones de fabricación. En el trabajo de Steenackers *et al.* (2009), con el fin de hacer frente a algunos de estos inconvenientes, se desarrolló un método de superficie de respuesta adaptativa o ARSM (del inglés *Adaptive Response Surface Methodology*) para problemas de diseño multidimensionales. El algoritmo desarrollado sólo requiere un número limitado de las evaluaciones de diseño, incluso para problemas de diseño complejos. Esta técnica mostró una mejora significativa en el rendimiento con respecto a las técnicas existentes que redundó en una reducción del tiempo típico de entre 4 y 7 veces.

A pesar de las limitaciones inherentes mencionadas, esta técnica ha sido ampliamente utilizada por los investigadores para estudiar la rugosidad superficial (Taramen, 1974)(Alauddin y El-Baradie, 1995)(Mansour y Abdalla, 2002)(Davidson *et al.*, 2008)(Sahin y Motorcu, 2008)(Lalwani *et al.*, 2008)(Dureja *et al.*, 2009)(Bouacha *et al.*, 2010)(Sahoo *et al.*, 2008)(Neşeli *et al.*, 2011). La metodología de superficie de respuesta y el método de Taguchi se combinaron con éxito para desarrollar un modelo que fuese capaz de predecir la influencia de la geometría de la herramienta y las condiciones de corte en la calidad superficial mecanizada en operaciones de fresado (Fuh y Wu, 1995), y para analizar los efectos de los parámetros de corte (velocidad de corte, avance y profundidad de corte) en la rugosidad superficial en una operación de torneado (Ezilarasan *et al.*, 2011).

2.5.3.2. TÉCNICAS NO CONVENCIONALES DE OPTIMIZACIÓN

En los casos en que puede ser extremadamente difícil y/o costoso encontrar el punto óptimo exacto en problemas especialmente complejos, los investigadores pueden considerar técnicas no convencionales y buscar soluciones casi óptimas en lugar de óptimos exactos. Estas técnicas se clasifican en heurísticas y metaheurísticas. Las técnicas heurísticas consisten en una regla o un conjunto de reglas, basadas en información de fácil acceso, en las que se buscan soluciones aceptables a un coste razonable. Un inconveniente de las técnicas heurísticas es que son principalmente técnicas aplicables a problemas específicos. Por su parte, las técnicas metaheurísticas son una alternativa a la naturaleza de problema específico de las heurísticas. Una metaheurística puede ser considerada como "un marco general algorítmico que puede ser aplicado a diferentes problemas de optimización con relativamente pocas modificaciones para que sean adaptados a un problema específico" (Glover, 1990). Hay tres tipos de algoritmos de búsqueda basados en técnicas metaheurísticas, a saber, el algoritmo genético o GA (del inglés *Genetic Algorithm*), recocido simulado o SA (del inglés *Simulated Annealing*), y la búsqueda tabú o TS (del inglés *Tabu Search*), que han sido utilizados por los investigadores en el campo de la optimización de parámetros en procesos de corte.

- **Algoritmos genéticos**

Los algoritmos genéticos son modelos computacionales, inspirados en la evolución, desarrollados como una herramienta para resolver problemas complejos de optimización (Holland, 1992). Esta técnica sigue un ciclo iterativo con el fin de optimizar un problema. El proceso selecciona iterativamente individuos de una población inicial que se someten a alguna forma de transformación (reproducción, cruce o mutación) para crear una nueva población. La nueva población se prueba para ver si cumple con los criterios de detención.

Si lo hace, entonces el proceso se detiene, de lo contrario se realiza otra iteración (Cus y Balic, 2003). Las dos atracciones principales del enfoque GA son la simplicidad de operación y la eficiencia con problemas de optimización complejos, especialmente con respuestas múltiples. La principal desventaja de un GA es que es muy exigente en potencia de cálculo.

Se han desarrollado diferentes modelos predictivos para la rugosidad superficial basados en algoritmos genéticos (Chien y Chou, 2001)(Suresh *et al.*, 2002)(Vallejo y Morales-Menéndez, 2009)(Zain *et al.*, 2010b). Nandi y Pratihar (2004) desarrollaron un sistema experto basado en las redes neuronales difusas para predecir el acabado superficial en una operación de torneado de alta precisión. En este enfoque se desarrolló un controlador óptimo basado en lógica difusa o FLC (del inglés *Fuzzy Logic Controller*), ajustado utilizando algoritmos genéticos. El sistema desarrollado mostró una exactitud bastante razonable para predecir el acabado superficial en una operación de torneado de precisión.

Un modelo híbrido conocido como GONNS (del inglés *Genetically Optimized Neuronal Network System*) fue propuesto por Tansel *et al.* (2006) para la selección de las condiciones óptimas de corte a partir de los datos experimentales cuando modelos matemáticos analíticos o empíricos no están disponibles. GONNS utiliza redes neuronales para representar las relaciones de entrada y salida del sistema considerado. El algoritmo genético obtiene la condición óptima de funcionamiento mediante el uso de las redes. La simplicidad del modelo, la velocidad de la optimización, y la fiabilidad del proceso, incluso con pequeños conjuntos de datos, son las principales ventajas de los GONNS y lo convierten en una herramienta excelente de optimización para operaciones de mecanizado.

En Ho *et al.* (2009), un modelo híbrido, que combina Taguchi con algoritmos genéticos de aprendizaje, se aplica en una red adaptativa basada en ANFIS con el fin de predecir la rugosidad superficial para una operación de fresado de acabado. Los resultados

experimentales muestran que este enfoque híbrido supera a los métodos ANFIS tradicionales en términos de precisión de la predicción. En el trabajo de Tansel *et al.* (2011) se integró con éxito el método Taguchi y GONNS en un intento de cubrir todas las etapas, desde el diseño experimental hasta la optimización compleja.

- ***El recocido simulado***

La técnica de recocido simulado (Kirkpatrick *et al.*, 1983) es una técnica emergente basada en el proceso de recocido en sólidos que se utiliza ampliamente en la optimización de sistemas complejos. El recocido simulado emula el proceso físico mediante el cual poco a poco un sólido es enfriado hasta que finalmente su estructura se "congela", situación que se alcanza en la configuración de mínima energía. Cada paso del algoritmo de recocido simulado intenta reemplazar la solución actual por una nueva solución al azar que puede ser aceptada con una probabilidad que depende tanto de la mejora del valor de la función objetivo como de la disminución de un parámetro global denominado "temperatura". Con el fin de evitar los mínimos locales, se permiten movimientos hacia zonas próximas que empeoran la función objetivo. A medida que disminuye la temperatura, estos movimientos están restringidos. Las características más notables de este método son su aplicabilidad general y su capacidad para obtener soluciones arbitrariamente próximas a un óptimo.

El algoritmo de recocido simulado es fácil de programar, y la implementación de un nuevo problema a menudo sólo requiere muy pocas modificaciones del código existente (Khan *et al.*, 1997). Un inconveniente de este método es que puede requerir mucho tiempo de cálculo para llegar a encontrar soluciones de alta calidad. Esto puede variar en función de la naturaleza y el tamaño del problema de optimización. Diferentes versiones y aplicaciones basadas en este algoritmo han sido utilizadas en la optimización de procesos de mecanizado (Saravanan *et al.*, 2001)(Chen y Tsai, 1996)(Chen y Su, 1998).

En el trabajo de Hagiwara *et al.* (2009) se aplica el recocido simulado para la optimización de una operación de torneado de acabado. Los parámetros a optimizar son la fragilidad de la viruta y la rugosidad superficial. La técnica aplicada muestra rapidez de convergencia y capacidad de evitar puntos óptimos locales.

- **Búsqueda tabú**

Esta técnica basada en algoritmos desarrollados por Glover (Glover, 1990) mejora el funcionamiento de los métodos de búsqueda local mediante el uso de estructuras de memoria con el fin de considerar las soluciones visitadas o el conjunto de normas establecidas. Una posible solución que se ha visitado recientemente o ha violado una regla predefinida se marca como "tabú" y es despreciada por el algoritmo. Aunque la búsqueda tabú se ha aplicado con éxito para ofrecer soluciones casi óptimas en diversos problemas de optimización, son pocos los trabajos en los que se aplica esta técnica para procesos de mecanizado (Kolahan y Liang, 1996)(Mukherjee y Ray, 2008). Las tres técnicas diferentes metaheurísticas de búsqueda mostradas se consideraron en el estudio de Mukherjee y Ray (2008), para la determinación de condiciones casi óptimas para una operación de bruñido en dos etapas. Los resultados computacionales del estudio mostraron la superioridad de la búsqueda tabú.

2.5.4. ANÁLISIS

Como se mencionó en la introducción, la cantidad de parámetros que afectan a la rugosidad superficial es muy amplia. La mayoría de ellos forma parte de cuatro categorías principales: el proceso de corte, los parámetros de mecanizado, las propiedades de la herramienta de corte y las propiedades de la pieza de trabajo (Figura 2.10).

Las Tablas 2.13 a 2.16 proporcionan una visión clara de las diferentes técnicas y herramientas de optimización empleadas en diversos estudios por los investigadores para analizar los diferentes parámetros y fenómenos involucrados en el proceso de generación de rugosidad superficial. Cada una de estas tablas se centra en una de las cuatro categorías principales antes mencionadas. La información sobre las áreas de aplicación y consideraciones especiales de los diferentes enfoques también se aporta con el fin de obtener un análisis más completo. Esta información se proporciona entre paréntesis después de cada estudio con las abreviaturas del proceso de mecanizado correspondiente y un valor numérico que se refiere a cualquier consideración que se estime necesaria. Las correlaciones de las abreviaturas y los valores numéricos con los procesos de mecanizado y las consideraciones especiales respectivamente se muestran en la parte inferior de dichas tablas.

En la mayor parte de las obras analizadas se tienen en cuenta los parámetros de mecanizado en el proceso de optimización (especialmente velocidad de corte, avance y profundidad de corte). Los parámetros que intervienen en los fenómenos de corte se consideran también en una serie de estudios (las vibraciones y la formación de viruta son los más relevantes). En lo que se refiere a la herramienta de corte y las propiedades de la pieza de trabajo, la forma de la herramienta y la dureza de la pieza de trabajo son los más considerados.

Es destacable la cantidad de trabajos en los que se aplican las redes neuronales artificiales, la teoría de conjuntos difusos y el método de Taguchi, sobre todo en las obras más recientes.

Tabla 2.13. Trabajos de modelado y optimización considerando el proceso de corte. Basada en Rubio *et al.* (2012b).

Trabajos de modelado y optimización	Proceso de corte			
	Variación de la fuerza de corte	Fricción en la zona de corte	Formación de viruta	Vibraciones
Enfoque mecanicista		Grzesik, 1996 (T) Beggan <i>et al.</i> , 1999 (T, 3)		Lee <i>et al.</i> , 2001 (FAAV, 1) Jang <i>et al.</i> , 1996 (TD, 2)
Regresión estadística				Abouelatta y Madl, 2001 (T, 1) Ghani y Choudhury, 2002 (T, 1)
Redes neuronales artificiales	Benardos y Vosniakos, 2002 (FF) Correa <i>et al.</i> , 2009 (FAV, 4)	Matsumura <i>et al.</i> , 1996 (T)		Tsai <i>et al.</i> , 1999 (TA, 1)
		Li <i>et al.</i> , 1999 (5)		
Teoría de los conjuntos difusos				Kirby <i>et al.</i> , 2006 (T, 1 and 6) Kirby y Chen, 2007 (T, 1 and 6) Abhuri y Dixit, 2006 (T, 1 and 6)
Método de Taguchi				
Metodología de la superficie de respuesta				
Algoritmo genético				
Recocido simulado			Hagiwara <i>et al.</i> , 2009 (TA)	

Procesos de mecanizado

T: Torneado; TA: Torneado de acabado; TD: Torneado duro; FF: Fresado frontal; FC: Fresado cilíndrico; FAV: Fresado de alta velocidad; FAAV: Fresado de acabado de alta velocidad

Consideraciones especiales

1. Acelerómetro para monitorizar vibraciones
2. Sensor de desplazamiento inductivo
3. Sensor de emisión acústica para monitorizar vibraciones
4. Redes bayesianas
5. Modelo analítico
6. Redes neuronales difusas

Tabla 2.14. Trabajos de modelado y optimización considerando los parámetros de mecanizado. Basada en Rubio et al. (2012b).

Trabajos de modelado y optimización	Parámetros de mecanizado				
	Profundidad de corte	Velocidad de corte	Avance	Ángulo de corte	Fluido refrigerante
Enfoque mecanicista	Ehmann y Hong, 1994 (FC) Lin y Chang, 1998 (T) Muñoz Escalona y Cassier, 1998 (T)				
Regresión estadística	Abouelatta y Madl, 2001 (T)				
	Feng y Wang, 2002 (FT)				
Redes neuronales artificiales	Benardos y Vosniakos, 2002 (FF)	Matsumura et al., 1996 (T)	Benardos y Vosniakos, 2002 (FF)		Benardos y Vosniakos, 2002 (FF)
	Lin et al., 2001 (T) Wang y Hsu, 2005 (M) Davim et al., 2008 (T) Correa et al., 2009 (HSM, 1) Karayel, 2009 (T) Asiltürk y Çunkaş, 2011b (T, 2)				
	Zain et al., 2010a (EM)				
Teoría de los conjuntos difusos	Ho et al., 2002 (T, 3) Jiao et al., 2004 (T, 4) Abhuri y Dixit, 2006 (T, 4) Dong y Wang, 2010 (FA, 5) Barzani et al., 2015 (T, 8)				
	Kirby et al., 2006 (T, 4) Kirby y Chen, 2007 (T, 4)				
Método de Taguchi	Davim, 2001 (T) Asiltürk y Çunkaş, 2011a (TD) Tansel et al., 2011 (F, 6) Gupta et al., 2011 (T, 7)				
	Tzeng y Jean, 2005 (FAV)				
	Nalbant et al., 2007 (T, 7)		Nalbant et al., 2007 (T, 8)		
	Villeta et al., 2011 (T, 9)				
Metodología de la superficie de respuesta	Alauddin y El-Baradie, 1995 (FA)				
	Fuh y Wu, 1995 (FA) Mansour y Abdalla, 2002 (FA) Sahin y Motorcu, 2008 (TD) Lalwani et al., 2008 (TDA) Sahoo et al., 2008 (FA, 10) Dureja et al., 2009 (TD, 8) Bouacha et al., 2010 (TD, 8) Ezilarasan et al., 2011 (TD)				
Algoritmo genético	Nandi y Pratihar, 2004 (UPT, 11) Vallejo y Morales-Menéndez, 2009 (FC)				
	Zain et al., 2010b (FA)				
Recocido simulado	Hagiwara et al., 2009 (TA)		Hagiwara et al., 2009 (TA)		

Procesos de mecanizado

T: Torneado; TA: Torneado de acabado; TD: Torneado duro; TDA: Torneado duro de acabado; TUP: Torneado de ultraprecisión; F: Fresado; FA: Fresado de acabado; FF: Fresado frontal; FC: Fresado cilíndrico; FAV: Fresado de alta velocidad

Consideraciones especiales

1. Redes bayesianas
2. Método de regresión múltiple
3. Sistema adaptativo de inferencia ANFIS y visión por ordenador
4. Redes neuronales difusas
5. Sistema adaptativo de inferencia ANFIS y el método de validación LOO-CV
6. Redes neuronales optimizadas genéticamente (GONNS)
7. Enfoque híbrido basado en Taguchi y en la lógica difusa
8. Análisis de varianza
9. Test estadísticos
10. Análisis fractal
11. Algoritmo genético y lógica difusa

Tabla 2.15. Trabajos de modelado y optimización considerando las propiedades de la herramienta de corte. Basada en Rubio et al. (2012b).

Trabajos de modelado y optimización	Propiedades de la herramienta de corte		
	Material	Geometría	Radio de la punta
Enfoque mecanicista		Ehmann y Hong, 1994 (FC) Lin y Chang, 1998 (T)	Muñoz- Escalona y Cassier, 1998 (T)
Regresión estadística			Abouelatta y Madl, 2001 (T)
Redes neuronales artificiales	Zain et al., 2010a (FA, 1)	Correa et al., 2009 (FAV, 2)	
Teoría de los conjuntos difusos		Chen y Savage, 2001 (FA, 3)	
Método de Taguchi	Tzeng y Jean, 2005 (FAV) Villeta et al., 2011 (T, 5)		Nalbant et al., 2007 (T, 4) Gupta et al., 2011 (T, 6)
Metodología de la superficie de respuesta	Sahin y Motorcu, 2008 (TD)	Fuh y Wu, 1995 (FA)	
Algoritmo genético		Vallejo y Morales-Menéndez, 2009 (FC)	
Recocido simulado			

Procesos de mecanizado

T: Torneado; TD: Torneado duro; FA: Fresado de acabado; FC: Fresado cilíndrico; FAV: Fresado de alta velocidad

Consideraciones especiales

1. Diseño factorial completo
2. Redes bayesianas
3. Redes neuronales difusas con un sistema multisensor de seguimiento
4. Análisis de varianza
5. Test estadísticos
6. Enfoque híbrido basado en el método de Taguchi y la lógica difusa

Tabla 2.16. Trabajos de modelado y optimización considerando las propiedades de la pieza de trabajo. Basada en Rubio *et al.* (2012b).

Trabajos de modelado y optimización	Propiedades de la pieza de trabajo	
	Material	Dimensiones
Enfoque mecanicista	Muñoz- Escalona y Cassier, 1998 (T)	
Regresión estadística	Feng y Wang, 2002 (TA)	Abouelatta y Madl, 2001 (T)
Redes neuronales artificiales	Correa <i>et al.</i> , 2009 (FAV, 1)	
Teoría de los conjuntos difusos	Chen y Savage, 2001 (FA, 2) Barzani <i>et al.</i> , 2015 (T, 4)	
Método de Taguchi		
Metodología de la superficie de respuesta	Sahoo <i>et al.</i> , 2008 (FA, 3) Dureja <i>et al.</i> , 2009 (TD, 4) Bouacha <i>et al.</i> , 2010 (TD, 4)	
Algoritmo genético	Vallejo y Morales-Menéndez, 2009 (FC)	
Recocido simulado		
Procesos de mecanizado		
T: Torneado; TA: Torneado de acabado; TD: Torneado duro; FA: Fresado de acabado; FC: Fresado cilíndrico; FAV: Fresado de alta velocidad		
Consideraciones especiales		
<ol style="list-style-type: none"> 1. Redes bayesianas 2. Redes neuronales difusas con un sistema multisensor de seguimiento 3. Análisis fractal 4. Análisis de varianza 		

2.5.5. DISCUSIÓN

Los enfoques mecanicistas se apoyan en una base teórica que trata de simular el proceso de corte teniendo en cuenta la cinemática, los parámetros de corte y las propiedades de la herramienta. Información adicional proporcionada por los diferentes sensores también se considera en diversos enfoques con el fin de obtener modelos más precisos. El principal inconveniente de estos métodos es que existe una gran cantidad de factores que contribuyen al mecanismo de formación de la rugosidad que no son considerados, y esa es la razón por la que no existe un modelo mecanicista general y preciso para este problema.

Las técnicas estadísticas de modelado empíricas, tales como la regresión, son herramientas que permiten vincular claramente las variables de entrada con las de salida. Sin embargo, en general no son capaces de manejar las complejidades del proceso de generación de rugosidad superficial debido al gran número de variables interdependientes involucradas.

En los procesos automatizados actuales, en los que la información proporcionada por los sensores se integra para la medición y el control, son necesarios modelos de inteligencia artificial para modelar y controlar dichos procesos. Estos modelos de inteligencia artificial (tales como la lógica difusa, redes neuronales, algoritmos genéticos, razonamiento probabilístico, y modelos híbridos entre estos sistemas) pueden representar fenómenos complejos combinados con la capacidad de aprendizaje. Los modelos desarrollados teniendo en cuenta las redes neuronales artificiales y la lógica difusa parecen ser realistas y precisos, tienen la capacidad de incorporar rápidamente nuevos datos disponibles para afinar el resultado y muestran un alto nivel de integración con los ordenadores. Los modelos híbridos que combinan ambas técnicas presentan la ventaja de conjugar la combinación de la capacidad de aprendizaje más eficiente de las redes neuronales con la capacidad de razonamiento avanzado de la lógica difusa. El uso de estas técnicas combinado con otras técnicas más convencionales y modelado analítico puede ser utilizado con el fin de validar, mejorar o corregir los modelos teóricos.

Las técnicas no convencionales han demostrado una mayor flexibilidad que las convencionales. Las técnicas heurísticas y metaheurísticas son técnicas rentables que, en lugar de buscar condiciones de corte óptimas, aportan soluciones con valores razonablemente aceptables para su aplicación. Las técnicas de búsqueda metaheurísticas, tales como algoritmos genéticos, recocido simulado y búsqueda tabú, aunque pueden demandar tiempos de computación altos, pueden ser utilizados de forma muy satisfactoria en conjunción con los modelos ya desarrollados como herramientas de optimización para la predicción de la rugosidad superficial.

Por último, el diseño robusto de Taguchi proporciona una reducción considerable de tiempo y recursos, favoreciendo la mejora simultánea de la calidad y los costes de fabricación. La combinación de las técnicas de Taguchi con pruebas estadísticas o metaheurísticas como herramientas de optimización, también han demostrado su exactitud y flexibilidad.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se desarrolla la base metodológica para la realización de la experimentación y para su posterior análisis. La base de la metodología se sitúa en la búsqueda de un modelo representativo del proceso de estudio.

En el Capítulo 2, relativo al estado del arte, se hacía referencia al importante avance en el desarrollo de métodos de predicción de la rugosidad superficial que permiten la elaboración de modelos matemáticos, pudiendo clasificarse en métodos de tipo mecanicista y empírico. Así mismo, se analizaban las diferentes técnicas de optimización de procesos, de tipo convencional y no convencional, que permiten determinar condiciones operativas óptimas o próximas al óptimo.

La metodología establecida en la presente Tesis Doctoral se fundamenta en una de las técnicas de optimización de procesos convencional más empleadas, el Diseño Estadístico de Experimentos o DoE (del inglés *Design of Experiments*), que permite definir un conjunto de etapas como base para el desarrollo de la experimentación. La aplicación de dichas etapas permite obtener una mayor comprensión del problema y definir una estrategia adecuada para afrontar su análisis. Se ha planteado la utilización del diseño de experimentos de Taguchi (Taguchi, 1987) para que, con el menor número de ensayos (y por tanto de recursos) posibles, se pueda extraer el máximo de información.

La metodología experimental de trabajo desarrollada permite avanzar en el estudio del mecanizado de las aleaciones ligeras. La metodología considerada es aplicable a distintas aleaciones, tipos de herramientas, condiciones de corte y variables de respuesta. Dicha metodología, similar a la mostrada por Montgomery (Montgomery, 2005), permite

sistematizar todo el proceso con el fin de identificar los factores que influyen en mayor medida en la variable a controlar. Las etapas seguidas son:

- i. Planificación pre-experimental.
- ii. Elección del diseño experimental.
- iii. Ejecución del experimento.
- iv. Análisis estadístico.
- v. Conclusiones.

3.2. PLANIFICACIÓN PRE-EXPERIMENTAL

En este paso, todos los factores, así como sus niveles e intervalos, se establecen junto con la variable respuesta. Incluye:

- **Selección de la variable respuesta**

La variable respuesta se debe elegir considerando que sus resultados deben aportar información relevante acerca del proceso de estudio. Partiendo de este supuesto, se escoge como variable respuesta para el presente estudio la rugosidad superficial, por ser la característica más comúnmente utilizada para definir la calidad de las piezas mecanizadas. En concreto, dentro de todos los indicadores de rugosidad superficial, se considera la desviación media aritmética, que ofrece una medida de la rugosidad como media de las distintas rugosidades a lo largo de una determinada longitud de evaluación.

Las expresiones de cálculo de los indicadores de rugosidad aparecen recogidas en la norma UNE-EN ISO 4287:1999 (UNE-EN 4287:1999, 1999). La desviación media aritmética del perfil evaluado, Ra , se define como la media aritmética de los valores absolutos de las ordenadas $Y(x)$ comprendidas en una longitud de muestreo, L (ecuación (3.1)).

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |Y(x)| dx \quad (3.1)$$

La rugosidad superficial suele ser un requerimiento técnico para los productos mecánicos, e incluso puede ser utilizada como referencia para evaluar la estabilidad de un determinado proceso de producción. La relevancia de la rugosidad superficial se puede apreciar en la gran cantidad de propiedades tribológicas y mecánicas que dependen, al menos

parcialmente, de la calidad superficial, tales como: la fricción de la superficie, el desgaste, la transmisión de calor, la capacidad de distribuir y soportar un lubricante, la capacidad de ser recubierta, la resistencia a fatiga o la resistencia a la corrosión (Villete *et al.*, 2012)(Benardos y Vosniakos, 2003). Desde un punto de vista económico, un acabado superficial demasiado bueno puede implicar un aumento significativo en los costes de fabricación.

En la siguiente tabla se muestra una clasificación de los distintos tipos de acabado en función de la desviación media aritmética, la tolerancia dimensional y los costes relativos aproximados para su obtención.

Tabla 3.1. Clasificación de superficies según Ra y tolerancia (ASM, 1989).

Clase	Ra (μm)	Tolerancia adecuada (mm)	Coste relativo aproximado para producirla
Superacabada	0.1	0.0125	40
Pulida	0.2	0.0125	35
Rectificada	0.4	0.025	25
Lisa	0.8	0.050	18
Fina	1.6	0.075	13
Semifina	3.2	0.100	9
Media	6.3	0.175	6
Semidesigual	12.5	0.330	4
Desigual	25	0.635	2
Limpia	50	1.25	1

- **Actividades previas al mecanizado**

Los ensayos de mecanizado se realizarán sobre probetas que deberán prepararse teniendo en cuenta las dimensiones del área de trabajo de los equipos disponibles. Por la variedad de ensayos, ha sido necesaria una organización previa del material a emplear durante los mismos. Se llevan a cabo con anterioridad al mecanizado las siguientes actividades:

- i. Cada herramienta tiene que ser identificada mediante un código alfanumérico del tipo, AAAA_BB_CC donde AAAA identifica el tipo de herramienta, BB la posición que ocupa en la caja (de la 1 a la 10) y CC el filo empleado en el mecanizado (la herramienta permite dos posiciones al colocarla en el portaherramientas; se van a identificar con TP, el filo marcado por el fabricante y con 00 el filo opuesto).
- ii. Las condiciones de corte se identifican con un código alfanumérico similar al anterior, dado por f_{xxx}_Myyy , en donde f_{xxx} es el valor del avance y $Myyy$ el valor del régimen de giro del husillo.
- iii. Cada ensayo se identifica mediante la combinación de los dos códigos alfanuméricos anteriores $f_{xxx}_Myyy_AAAA_BB_CC$. Así pues, un ensayo codificado como $f_{0.04}_N800_HX_1_TP$, sería un ensayo realizado con un avance de 0.04 mm/rev, a un régimen de giro del husillo de 800 rpm, con el filo TP de una herramienta HX, ubicada en la posición 1 de la caja.
- iv. Se ha de preparar un documento con el tamaño de la muestra en el que se recoja el orden de los ensayos con los parámetros de corte y herramientas utilizadas en cada uno de ellos. También se dejará preparado otro documento en el que se llevará a cabo el registro de los valores obtenidos en las mediciones de la variable respuesta tras la realización de cada ensayo. En las Tablas 3.2 y 3.3 se muestran ejemplos de los mismos. V_f , v_m y t_m representan respectivamente la velocidad de avance, la velocidad media de corte y el tiempo de mecanizado para cada ensayo. Estos valores se calculan aplicando las ecuaciones (2.3), (2.4) y (2.7) recogidas en el Capítulo 2.

Tabla 3.2. Documento para el seguimiento de los ensayos de mecanizado.

Nº Ensayo	Codificación	V_f (mm/min)	v_m (m/min)	t_m (s)
	$f_{xxx}_Myyy_AAAA_BB_CC$			

Tabla 3.3. Documento para el registro de datos.

Nº ensayo	Codificación	Repli			Ra(µm)		
		1	2	3	Repli 1	Repli 2	Repli 3
	fxxx_Nyyy_AAAA_BB_CC						

• **Selección de factores, niveles e intervalos**

Por cuestiones prácticas y económicas se hace necesario seleccionar un número reducido de factores controlables dentro del elevado número de factores que intervienen en la rugosidad superficial (Figura 2.10). Para ello es preciso seleccionar aquellos factores que se consideran más influyentes. A la hora de elegir factores, niveles e intervalos, se considera lo siguiente:

- Determinar la influencia de las herramientas de corte forma parte de los objetivos del presente estudio, por lo que el tipo de herramienta debe ser un factor a considerar. El tipo de herramienta y su recubrimiento ejercen influencia en los resultados de rugosidad superficial en el mecanizado de piezas de magnesio, como indican, por ejemplo, los estudios de Gariboldi (2003), Weinert y Lange (2001), y Tönshoff y Winkler (1997).

A la hora de elegir las herramientas de corte, es preciso considerar las tres formas diferentes de adaptación de las herramientas de corte a los requisitos de mecanizado en seco, que puede ser: (i) mediante el uso de un nuevo material de corte, (ii) cambiando la geometría de corte o (iii) mediante la aplicación de recubrimientos de herramientas duros y/o blandos. La última posibilidad es la solución más frecuentemente adoptada (Sahin and Sur, 2004)(Scheerer *et al.*, 2005)(Inspektor *et al.*, 1994)(Tönshoff and Winkler, 1997).

La selección de las herramientas en el presente estudio se lleva a cabo intentando que puedan abarcar el mayor número posible de materiales susceptibles de ser mecanizados por ellas ya que, aunque en este caso concreto se trabaja sobre magnesio, con frecuencia el magnesio se combina con otros materiales formando estructuras híbridas magnesio-aluminio, magnesio-titanio o magnesio-acero sinterizado (Sáenz de Pipaón *et al.*, 2008)(Sáenz de Pipaón *et al.*, 2009).

Así, se escogen tres tipos de herramientas: una sin recubrimiento, especialmente adecuada para aleaciones no férricas, y otras dos con diferentes espesores de recubrimientos a base de carbonitruros de titanio y alúmina, que se utilizan, generalmente, para el mecanizado de otros materiales como aceros y fundiciones, y que podrían ser adecuadas para el mecanizado de piezas híbridas.

- Determinar la influencia de los parámetros de corte forma parte también de los objetivos del presente estudio. La influencia del régimen de giro del husillo y del avance es ampliamente identificada en la literatura especializada (Arai *et al.*, 1996)(Dahlman *et al.*, 2004)(Kumar *et al.*, 2012)(Wojtowicz *et al.*, 2013). En el presente trabajo se establecen tres niveles para evaluar la influencia de ambos factores, estableciendo el rango en función de las características del equipo de mecanizado y tomando como referencia una velocidad de avance máxima de 100 mm/min, considerada adecuada para los procesos de reparación y mantenimiento (Carou, 2013). Así, la velocidad de avance limita las posibles combinaciones de avances y velocidades de giro del husillo, al ser su producto igual a la velocidad de avance.
- Para la profundidad de corte se considera un único nivel debido a que en las operaciones de reparación y mantenimiento consideradas en el presente trabajo este

factor tiene que ser pequeño, ya que, de lo contrario, las piezas podrían terminar estando fuera de tolerancias dimensionales.

- Como en las operaciones de refrentado la velocidad de corte varía linealmente con el radio instantáneo de corte, la zona en la que se realice la medición de rugosidad superficial podría tener influencia en el valor de la rugosidad superficial obtenido. Para posicionar dicha zona de medición, se utilizan dos parámetros a modo de coordenadas polares: el radio de la circunferencia sobre la que se mide, R , y el ángulo que fija la zona de medición sobre dicha circunferencia, θ . Dichos parámetros se consideran posibles factores influyentes y se les asigna también tres niveles.

Así pues, como factores a incluir en el diseño se consideran: la profundidad de corte, d ; el avance, f ; el régimen de giro del husillo, N ; el tipo de herramienta, T ; y el radio y el ángulo que posicionan la zona de medición de la rugosidad superficial, R y θ respectivamente. A todos los factores se les asignan tres niveles, salvo para la profundidad de corte, d , a la que sólo se asigna uno (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Factores, niveles y nomenclatura.

Factor	Niveles	Nomenclatura
Profundidad de corte, d (mm)	1	$d1$
Avance, f (mm/rev)	3	$f1, f2, f3$
Régimen de giro del husillo, N (rpm)	3	$N1, N2, N3$
Tipo de herramienta, T	3	$T1, T2, T3$
Radio de la zona de medición, R (mm)	3	$R1, R2, R3$
Ángulo de la zona de medición, θ (°)	3	$\theta1, \theta2, \theta3$

3.3. ELECCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

En esta etapa, de acuerdo con los objetivos principales establecidos y considerando los recursos disponibles, así como lo discutido en el estado del arte en relación con los métodos de optimización, se selecciona el diseño de experimentos. En este caso, en el que el objetivo es seleccionar las herramientas y las condiciones de corte más adecuadas para el refrentado en seco de piezas de magnesio tomando como criterio de selección la rugosidad superficial obtenida, el mejor diseño de experimentos será el que permita establecer una relación entre la rugosidad superficial obtenida y los tipos de herramienta y las condiciones de corte utilizados.

Se pretende analizar la influencia en la variable respuesta (Ra) de los factores: avance (f), régimen de giro del husillo (N), tipo de herramienta (T), radio de la zona de medición (R) y ángulo de la zona de medición (θ), con tres niveles cada uno. Adicionalmente, se considera de interés analizar también la influencia de las interacciones: régimen de giro-avance ($N*f$), tipo de herramienta-régimen de giro ($T*N$), tipo de herramienta-avance ($T*f$) y avance-radio de la zona de medición ($f*R$).

Para abordar el estudio, se ha seleccionado un diseño ortogonal de Taguchi L_{27} con tres repeticiones anidadas. Se consideran todas las combinaciones posibles de los factores f , N y T , lo que implica realizar 3^3 ensayos, es decir, los 27 ensayos asociados a la matriz ortogonal L_{27} . Las repeticiones se fijan anidando en el diseño los dos factores restantes que posicionan la zona de medición de la rugosidad superficial, R y θ . Para evitar la influencia de factores incontrolables, los ensayos experimentales se llevan a cabo aleatorizando el orden. La matriz ortogonal del diseño descrito y el orden de los ensayos aleatorios se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Matriz ortogonal L_{27} con tres repeticiones anidadas.

Nº ensayo	f	T	N	Repli 1	Repli 2	Repli 3
1	1	1	3	R3 02	R2 01	R1 03
2	3	2	2	R1 02	R3 01	R2 03
3	3	1	2	R1 02	R2 03	R3 01
4	3	1	1	R2 02	R1 01	R3 03
5	3	1	3	R1 03	R3 02	R2 01
6	1	2	3	R3 02	R1 03	R2 01
7	2	1	2	R2 03	R1 02	R3 01
8	3	3	3	R3 02	R2 01	R1 03
9	1	1	2	R2 03	R1 02	R3 01
10	2	3	2	R1 02	R2 03	R3 01
11	1	3	2	R2 03	R1 02	R3 01
12	3	2	3	R3 02	R1 03	R2 01
13	1	3	3	R1 03	R3 02	R2 01
14	2	1	1	R3 03	R2 02	R1 01
15	1	2	1	R3 03	R2 02	R1 01
16	3	3	1	R1 01	R2 02	R3 03
17	1	2	2	R1 02	R3 01	R2 03
18	2	2	1	R1 01	R2 02	R3 03
19	2	3	3	R2 01	R1 03	R3 02
20	1	1	1	R1 01	R2 02	R3 03
21	3	2	1	R1 01	R2 02	R3 03
22	1	3	1	R1 01	R3 03	R2 02
23	2	2	3	R1 03	R3 02	R2 01
24	2	2	2	R1 02	R3 01	R2 03
25	3	3	2	R1 02	R3 01	R2 03
26	2	1	3	R1 03	R2 01	R3 02
27	2	3	1	R1 01	R2 02	R3 03

3.4. EJECUCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

Los ensayos experimentales se llevan a cabo siguiendo los pasos que se muestran a continuación:

- **Actividades previas a los ensayos de refrentado**

Con anterioridad a la realización de los ensayos, se prepara el material, las herramientas y los protocolos que se utilizarán tanto para calcular los valores de los parámetros de corte como para la preparación del registro de datos y observaciones del proceso de mecanizado.

Se comprueba, así mismo, el correcto funcionamiento y calibrado del medidor de rugosidad superficial. Para la toma de mediciones se prepara una plantilla que se utilizará para fijar las distintas zonas de medición de rugosidad superficial consideradas para cada ensayo.

Debido a la posibilidad de ignición del magnesio durante el mecanizado, es preciso disponer también de los medios de extinción adecuados.

- **Ensayos de refrentado**

Estos ensayos incluyen el mecanizado de las piezas de trabajo en ciertas condiciones de avance, régimen de giro del husillo, profundidad de corte y tipos de herramientas.

El procedimiento seguido para la ejecución de dichos ensayos quedará definido por los siguientes pasos:

- i. Posicionar en el torno la probeta a mecanizar.
- ii. Colocar en el portaherramientas la herramienta requerida para el ensayo.

- iii. Seleccionar los parámetros de corte del ensayo: régimen de giro del husillo, avance y profundidad de corte.
- iv. Comprobar que la herramienta y los parámetros de corte del ensayo seleccionados se corresponden con los establecidos en la hoja de control.
- v. Realizar la operación de refrentado, mecanizando la totalidad de la cara considerada.
- vi. Grabar en vídeo los ensayos, y fotografiar con una cámara de alta resolución las virutas obtenidas.
- vii. Retirar la herramienta empleada del portaherramientas, fotografiarla, y guardarla en la caja en la posición destinada a ella.
- viii. Retirar la probeta mecanizada.

- **Medición de la variable respuesta**

En este punto se llevan a cabo las mediciones de la variable de respuesta (en este caso rugosidad superficial, en términos de desviación media aritmética, Ra). Para ello, se utiliza un medidor de rugosidad superficial.

Tras finalizar cada ensayo de refrentado se deja atemperar la pieza a temperatura ambiente. A continuación se llevan a cabo las tres mediciones de rugosidad en las zonas que correspondan en cada caso según el orden aleatorio dispuesto en la Tabla 3.4.

El procedimiento para realizar cada medición seguirá los pasos identificados a continuación:

- i. Colocar la probeta encima del mármol.
- ii. Ajustar la posición de la plantilla utilizada para fijar la zona de medición correspondiente.
- iii. Aproximar y posicionar el palpador del rugosímetro a la zona a medir.

- iv. Realizar la medición de la desviación media aritmética de la rugosidad superficial en la zona correspondiente.
- v. Generar un informe de la medición y guardarlo convenientemente identificado.
- vi. Retirar el palpador del rugosímetro.
- vii. Retirar la plantilla de la probeta.

Los valores de rugosidad superficial R_a obtenidos en cada uno de los ensayos se registran en el documento de datos correspondiente (Tabla 3.3) para su posterior análisis.

3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos así obtenidos se tratan con técnicas estadísticas de acuerdo con el diseño de experimentos utilizado.

Se lleva a cabo un análisis de la varianza (ANOVA) completo para determinar la influencia de cada factor y sus interacciones en la rugosidad superficial. Para identificar los factores influyentes, se realiza el análisis de la varianza de efectos fijos, considerando la F de Snedecor como la prueba estadística.

El ANOVA se realiza siguiendo la secuencia de pasos siguiente:

- i. Cálculo de la suma de cuadrados de cada uno de los factores principales y de las interacciones estimables.
- ii. Cálculo de la suma de cuadrados del error y de la suma de cuadrados del total.
- iii. Cálculo de los grados de libertad de los factores principales e interacciones.
- iv. Cálculo de los cuadrados medios de los factores principales, interacciones y error.
- v. Evaluación del estimador F para todos los factores principales e interacciones, a partir de los cuadrados medios de los factores y del error.
- vi. Definición de un nivel de significación α que determina un nivel de confianza $(1 - \alpha) * 100\%$ y evaluación del valor de la distribución F de Snedecor para cada uno de los factores e interacciones.
- vii. Comparación de los valores de los estimadores F calculados y el valor de F_{α} , aceptando la hipótesis en los casos en los que F_{α} sea superior al estimador F o el p-valor sea superior a α .

La siguiente tabla muestra el cuadro resumen considerado para el análisis ANOVA.

Tabla 3.6. Cuadro resumen del análisis ANOVA.

Fuentes de variación	Grados de libertad (GL)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrados medios (CM)	Estimador F	F_{α}
A	GL_A	SC_A	SC_A/GL_A	CM_A/CM_{Error}	$F_{\alpha} (GL_A/GL_{Error})$
B	GL_B	SC_B	SC_B/GL_B	CM_B/CM_{Error}	$F_{\alpha} (GL_B/GL_{Error})$
C	GL_C	SC_C	SC_C/GL_C	CM_C/CM_{Error}	$F_{\alpha} (GL_C/GL_{Error})$
D	GL_D	SC_D	SC_D/GL_D	CM_D/CM_{Error}	$F_{\alpha} (GL_D/GL_{Error})$
E	GL_E	SC_E	SC_E/GL_E	CM_E/CM_{Error}	$F_{\alpha} (GL_E/GL_{Error})$
AB	GL_{AB}	SC_{AB}	SC_{AB}/GL_{AB}	CM_{AB}/CM_{Error}	$F_{\alpha} (GL_{AB}/GL_{Error})$
AC	GL_{AC}	SC_{AC}	SC_{AC}/GL_{AC}	CM_{AC}/CM_{Error}	$F_{\alpha} (GL_{AC}/GL_{Error})$
BC	GL_{BC}	SC_{BC}	SC_{BC}/GL_{BC}	CM_{BC}/CM_{Error}	$F_{\alpha} (GL_{BC}/GL_{Error})$
CD	GL_{CD}	SC_{CD}	SC_{CD}/GL_{CD}	CM_{CD}/CM_{Error}	$F_{\alpha} (GL_{CD}/GL_{Error})$
Error	GL_{Error}	SC_{Error}	SC_{Error}/GL_{Error}		
Total corregido	GL_T	SC_T			

Para garantizar la validez del análisis ANOVA es preciso comprobar que se cumple la condición de normalidad de los errores del modelo, para lo que se utilizará el método de análisis de la normalidad de los residuales.

Con los resultados obtenidos del ANOVA se desarrollará un modelo estadístico para la varianza que permita obtener la rugosidad superficial esperada para las distintas combinaciones de factores.

De forma adicional, para facilitar la interpretación y análisis de los datos, se recurrirá a la representación gráfica de los resultados obtenidos de la variable respuesta para los diferentes factores e interacciones.

3.6. CONCLUSIONES

En esta última etapa, se establecen las principales conclusiones a partir de los resultados obtenidos en el análisis estadístico. Dicho análisis estadístico debe propiciar un mejor conocimiento del proceso estudiado, facilitando el establecimiento de recomendaciones para futuros estudios.

A raíz del análisis estadístico de datos, se extraen conclusiones relativas a la influencia de los factores de estudio en los resultados, a la importancia de las interacciones entre factores, así como a los rangos recomendables para los factores en función de los resultados deseados.

CAPÍTULO 4: APLICACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se lleva a cabo la aplicación directa de la metodología que se acaba de exponer en el capítulo anterior. Para todas las combinaciones de condiciones de corte y herramientas consideradas en el diseño de experimentos se efectúan las mediciones de la rugosidad superficial sobre las piezas de magnesio AZ91D-F obtenidas por refrentado en seco.

En primer lugar, se detalla el equipo experimental empleado tanto para la realización de la parte experimental como para el análisis de resultados de dicha aplicación.

A continuación, se van a desglosar las diferentes etapas que se han llevado a cabo según la metodología propuesta. En lo referente al análisis de resultados, el método más adecuado es el análisis estadístico, sometiendo los resultados obtenidos en la experimentación al análisis de la varianza (ANOVA). A través del ANOVA será posible evaluar la influencia de los distintos factores y sus interacciones sobre la variable de estudio de la investigación.

Por último, se exponen los resultados obtenidos y se desarrolla un modelo estadístico para la varianza que permita obtener la rugosidad superficial esperada para las distintas combinaciones de factores.

4.2. APLICACIONES

4.2.1. EQUIPO EXPERIMENTAL

El equipo experimental requerido para la realización de los ensayos se compone de: probetas de la aleación de magnesio, una máquina-herramienta, herramientas de corte, equipos de monitorización y equipo de medición de la rugosidad superficial.

Las operaciones de refrentado se realizan sobre probetas cilíndricas de la aleación AZ91D-F de 110 mm diámetro y 120 mm de longitud inicial. En cada ensayo se comprueba que la longitud de la probeta es adecuada para garantizar que se encuentra bien amarrada en el plato de garras, que no necesita contrapunto y que la operación se puede llevar a cabo en condiciones de seguridad.

La aleación AZ91D-F es la aleación de colada a presión más común, utilizándose en más del 90% de todos los productos de fundición de magnesio. Se trata de una aleación de magnesio-aluminio-zinc, que presenta una buena combinación de propiedades mecánicas, colabilidad y resistencia a la corrosión. En lo negativo se podría destacar que tiene poca resistencia a la fluencia, comenzando a fluir a temperaturas superiores a 100°C. Tiene su temperatura máxima de operación en 125°C (Aghion *et al.*, 2001). Este hecho no ha sido óbice para que el uso de la aleación AZ91D-F se haya incrementado significativamente en componentes estructurales que operan a baja temperatura.

Las principales propiedades y la composición de dicha aleación se recogen en las Tablas 4.1 y 4.2.

Tabla 4.1. Principales propiedades mecánicas de la aleación AZ91D-F (MATWEB, s.f.).

Densidad	1810 kg/m ³
Dureza Brinell	63
Resistencia última a tracción	230MPa
Elongación	3%
Módulo de elasticidad	44.8GPa
Límite elástico a compresión	165MPa
Coefficiente de Poisson	0.350
Impacto de Charpy	2.70J
Resistencia a la fatiga	97MPa- 5.10 ⁸ ciclos
Módulo de cizalla	17GPa
Fuerza de cizallamiento	140MPa

Tabla 4.2. Composición de la aleación AZ91D-F (% en masa).

Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Zn
8.30-9.70	<=0.03	<=0.005	90.00	0.15-0.50	<=0.002	<=0.10	0.35-1.00

En el mecanizado se emplean tres tipos de herramientas de idéntica geometría del fabricante SECO® (SECO, 2014) (Figura 4.1). El primer tipo de herramienta, con referencia del fabricante HX, es una herramienta sin recubrimiento, de base carburo de wolframio con cobalto (WC-Co) adecuada para mecanizar metales no féreos. Las otras dos herramientas presentan recubrimientos de distinto espesor aplicados por deposición química en fase de vapor (CVD). En concreto, la herramienta con referencia del fabricante TP200 presenta un recubrimiento de Ti(C,N) + Al₂O₃ + TiN, mientras que el recubrimiento de la herramienta con referencia TP2500 es de Ti(C,N) + Al₂O₃. Ambas se utilizan, generalmente, para el mecanizado de otros materiales, especialmente aceros, aceros inoxidable y fundiciones, y podrían ser adecuadas para el mecanizado de piezas híbridas en las que el magnesio se combina con otros materiales tales como aluminio, titanio y acero (Sáenz de Pipaón *et al.*, 2008)(Sáenz de Pipaón *et al.*, 2009). Estas herramientas también se han considerado en anteriores estudios de mecanizado de piezas de magnesio (Rubio *et al.*, 2011)(Villetea *et al.*, 2011)(Carou, 2013)(Rubio *et al.*, 2012a)(Rubio *et al.*, 2014b).

Según la norma ISO 1832:2012 (ISO 1832:2012, 2012), los tres tipos de herramientas de corte empleadas tienen denominaciones DCMT 11T308-F2-HX, DCMT 11T308-F2-TP200 y DCMT 11T308-F2-TP2500, donde DCMT 11T308 hace referencia a su geometría (Figura 4.2), F2 al tipo de rompevirutas (en este caso, para operaciones de semidesbaste y acabado), y HX, TP200 y TP2500 al material de la herramienta o a la calidad del tipo de recubrimiento, en el caso de las dos últimas.

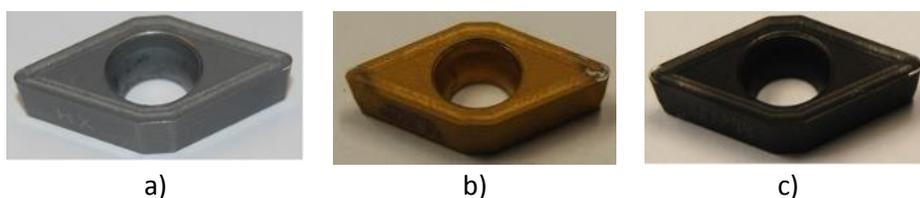


Figura 4.1. Tipos de herramientas empleadas: a) HX, b) TP200 y c) TP2500.

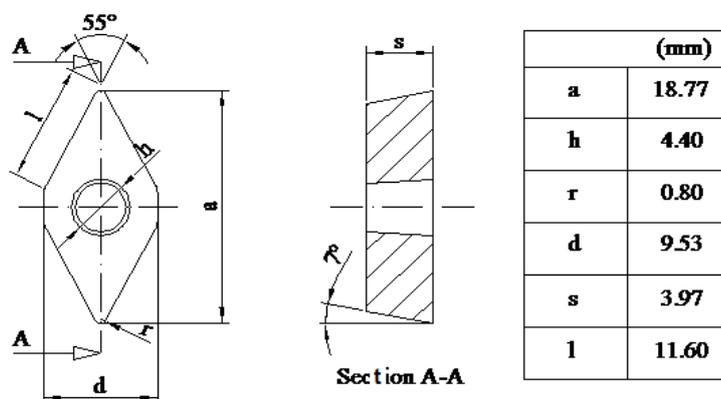


Figura 4.2. Geometría de las herramientas empleadas.

Como se ha mencionado anteriormente, el magnesio presenta riesgo de ignición y, por tanto, se puede producir un incendio durante su mecanizado. Además, el fuego no se puede extinguir con agua debido a la formación de atmósferas explosivas de hidrógeno; por lo tanto, deben disponerse medios adecuados para evitar posibles daños cuando el magnesio es mecanizado. En este caso concreto, se prepararon un extintor de incendios de tipo D y un recipiente con arena seca.

Las operaciones de refrentado de las barras cilíndricas de magnesio se llevaron a cabo en un torno paralelo modelo Pinacho L-1/200 (Figura 4.3.). Las características del torno incluyen un rango de 32 a 1800 rpm para el régimen de giro del husillo, y un rango de avances desde 0.018 a 0.44 mm/rev para las operaciones de refrentado.

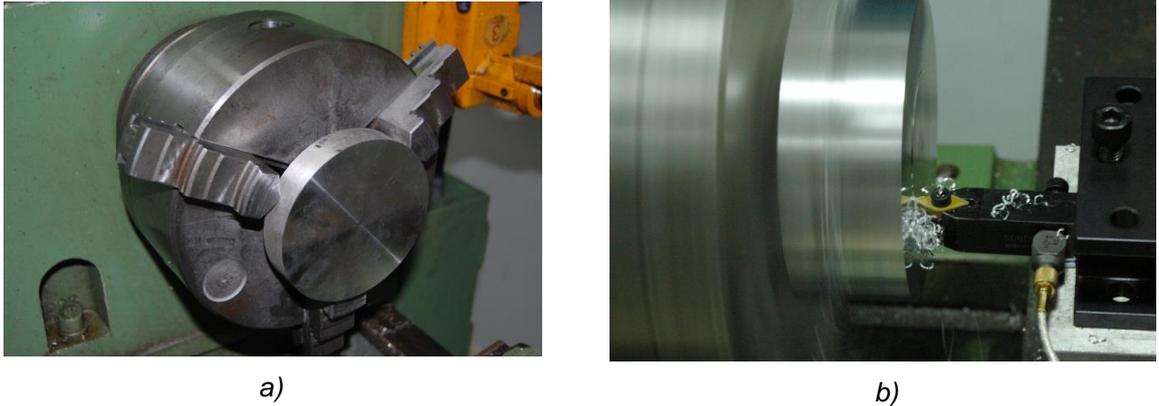


Figura 4.3. Pieza de trabajo: a) en el torno y b) durante ensayo de refrentado.

Para observar las pruebas de mecanizado realizadas, se han tomado videos y fotografías de las herramientas sistemáticamente durante las pruebas con una cámara digital de alta resolución (Sony Cyber-shot DSC-P100).

Después de cada ensayo se efectuaron las mediciones de la rugosidad superficial de la pieza utilizando un rugosímetro Mitutoyo Surf-test SJ 401.

Para cada ensayo considerado en el diseño de experimentos, la rugosidad superficial se midió en tres zonas diferentes de la cara de la probeta mecanizada para poder analizar la posible variación de la rugosidad superficial a lo largo de la superficie mecanizada. Para posicionar cada una de las zonas de medición, se asignaron tres valores posibles a los parámetros R y θ . Para el primero, R , se consideraron tres radios de valores: $R1 = 9.17$ mm, $R2 = 27.50$ mm y $R3 = 45.83$ mm. Para el segundo, θ , que fija el ángulo de la zona de

medición, también se consideran tres niveles, a saber: $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 120^\circ$ y $\theta_3 = 240^\circ$. La Figura 4.4 ilustra las distintas zonas de medición.

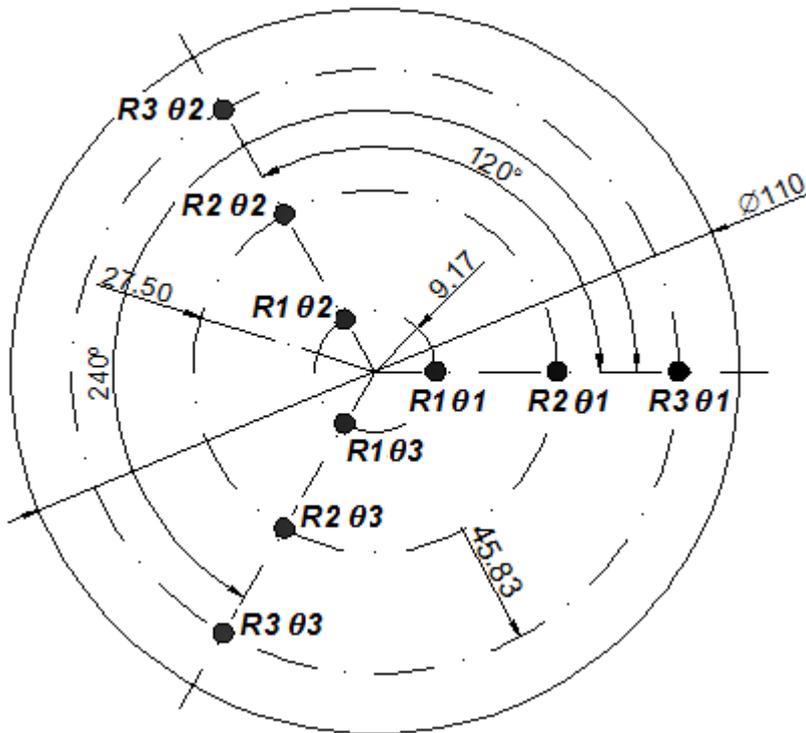
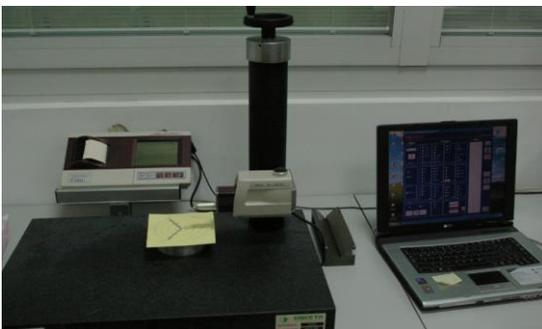
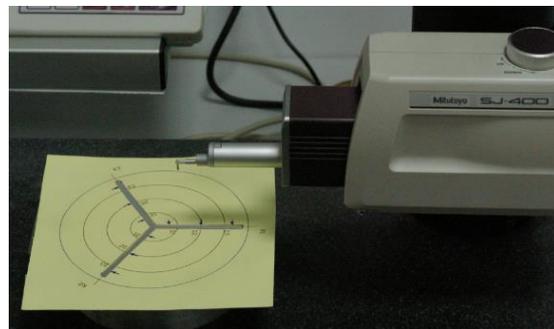


Figura 4.4. Posicionamiento de las zonas de medición.

En la Figura 4.5 se muestran imágenes del proceso de medición de la rugosidad tras un ensayo mediante el uso de la plantilla para fijar las zonas de medición correspondientes.



a)



b)

Figura 4.5. a) Equipo de medición de la rugosidad superficial y b) plantilla utilizada para el posicionamiento de las zonas de medición.

4.2.2. DEFINICIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

Los niveles de los parámetros de corte en los ensayos experimentales se eligieron teniendo en cuenta que las operaciones de reparación y mantenimiento de las aleaciones de magnesio se llevan a cabo normalmente a valores bajos del avance, del régimen de giro del husillo y de la profundidad de corte. Así, los tres niveles seleccionados para el avance, f , fueron 0.04, 0.08 y 0.12 mm/rev. Para el régimen de giro del husillo, N , los tres niveles considerados fueron 280, 500 y 800 rpm. El valor de profundidad de corte, d , se mantuvo constante a 0.25 mm, ya que como se comentó previamente, este trabajo se centra en operaciones de reparación y mantenimiento en las que dicha profundidad tiene que ser pequeña para seguir cumpliendo con las especificaciones de diseño en cuanto a las tolerancias dimensionales.

El régimen de giro del husillo, el avance, la profundidad de corte, la herramienta, el radio y el ángulo que posicionan la zona de medición, se consideraron previamente como factores potencialmente influyentes y, por lo tanto, incluidos en el diseño experimental. La Tabla 4.3 muestra los factores, nomenclatura y niveles considerados para el diseño experimental.

Tabla 4.3. Factores, nomenclatura y niveles para el diseño de experimentos.

Factor	Nomenclatura	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Avance (mm/rev)	f	0.04	0.08	0.12
Régimen de giro del husillo (rpm)	N	280	500	800
Profundidad de corte (mm)	d	0.25		
Herramienta	T	HX	TP200	TP2500
Radio de la zona de medición (mm)	R	9.17	27.50	45.83
Ángulo de la zona de medición (°)	θ	0	120	240

Una vez establecidos los niveles de los distintos factores es posible definir el plan de experimentos definitivo a llevar a cabo, generando la hoja de seguimiento de los ensayos (Tabla 4.4) según el modelo recogido en el Capítulo 3 (Tabla 3.1). V_f , v_m y t_m representan respectivamente la velocidad de avance, la velocidad media de corte y el tiempo de mecanizado para cada ensayo.

Tabla 4.4. Hoja de seguimiento de los ensayos.

Nº Ensayo	Codificación	V_f (mm/min)	v_m (m/min)	t_m (s)
1	f0.04_N800_HX_1_TP	32	138.23	101
2	f0.12_N500_TP200_1_TP	60	86.39	54
3	f0.12_N500_HX_1_00	60	86.39	54
4	f0.12_N280_HX_2_TP	33.6	48.38	96
5	f0.12_N800_HX_2_00	96	138.23	34
6	f0.04_N800_TP200_1_00	32	138.23	101
7	f0.08_N500_HX_3_TP	40	86.39	81
8	f0.12_N800_TP2500_1_TP	96	138.23	34
9	f0.04_N500_HX_3_00	20	86.39	162
10	f0.08_N500_TP2500_1_00	40	86.39	81
11	f0.04_N500_TP2500_2_TP	20	86.39	162
12	f0.12_N800_TP200_2_TP	96	138.23	34
13	f0.04_N800_TP2500_2_00	32	138.23	101
14	f0.08_N280_HX_4_TP	22.4	48.38	145
15	f0.04_N280_TP200_2_00	11.2	48.38	289
16	f0.12_N280_TP2500_3_TP	33.6	48.38	96
17	f0.04_N500_TP200_3_TP	20	86.39	162
18	f0.08_N280_TP200_3_00	22.4	48.38	145
19	f0.08_N800_TP2500_3_00	64	138.23	51
20	f0.04_N280_HX_4_00	11.2	48.38	289
21	f0.12_N280_TP200_4_TP	33.6	48.38	96
22	f0.04_N280_TP2500_4_TP	11.2	48.38	289
23	f0.08_N800_TP200_4_00	64	138.23	51
24	f0.08_N500_TP200_5_TP	40	86.39	81
25	f0.12_N500_TP2500_4_00	60	86.39	54
26	f0.08_N800_HX_5_TP	64	138.23	51
27	f0.08_N280_TP2500_5_TP	22.4	48.38	145

Es preciso aclarar que las condiciones de corte se han expresado en unidades comúnmente empleadas en los talleres de fabricación en lugar de las correspondientes del Sistema Internacional de unidades (SI) con el fin de hacer una descripción más intuitiva de los valores utilizados. La equivalencia de unidades con las del SI se recoge en el Anexo I.

4.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.3.1. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA VARIABLE RESPUESTA

Para cada una de las mediciones realizadas, el equipo de medición de la rugosidad superficial genera un certificado como el mostrado en la Figura 4.6.

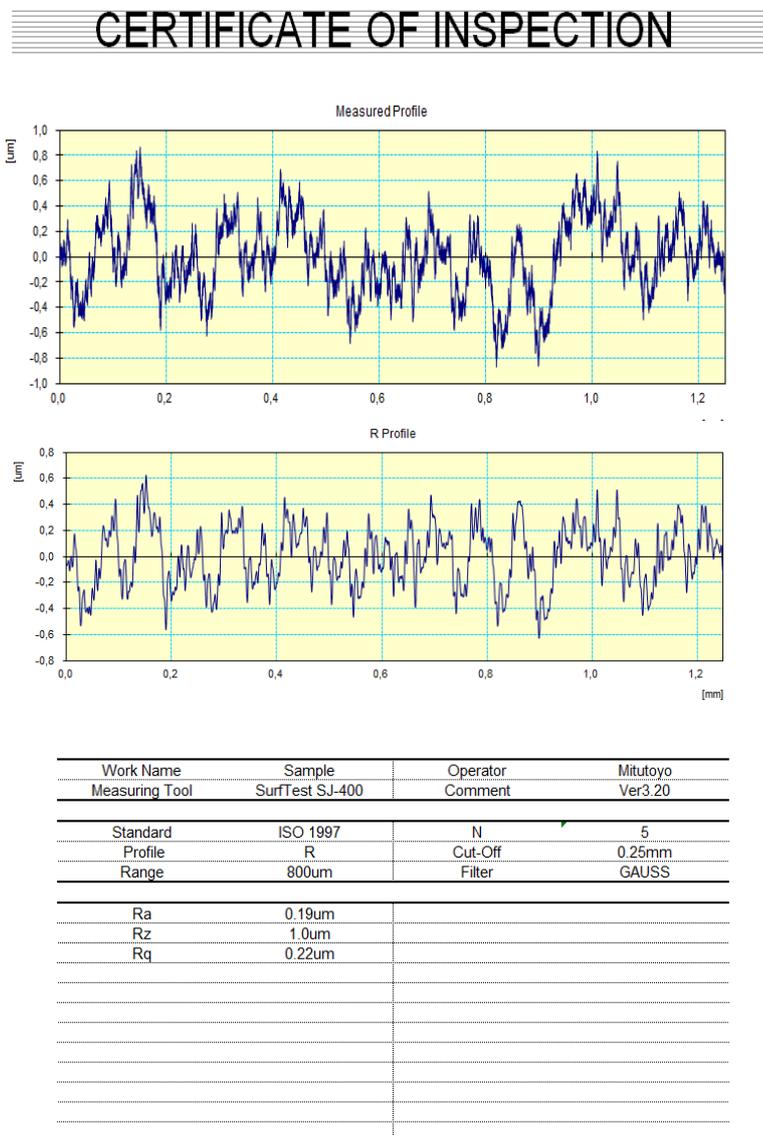


Figura 4.6. Ejemplo de certificado de medición de Ra.

Los resultados de los valores de la desviación media aritmética de la rugosidad superficial obtenidos en cada uno de los ensayos realizados se muestran en la Tabla 4.5. Los certificados de medición obtenidos para cada una de las mediciones de rugosidad efectuadas se recogen en el Anexo II.

Tabla 4.5. Resultados de la rugosidad superficial medida R_a (μm).

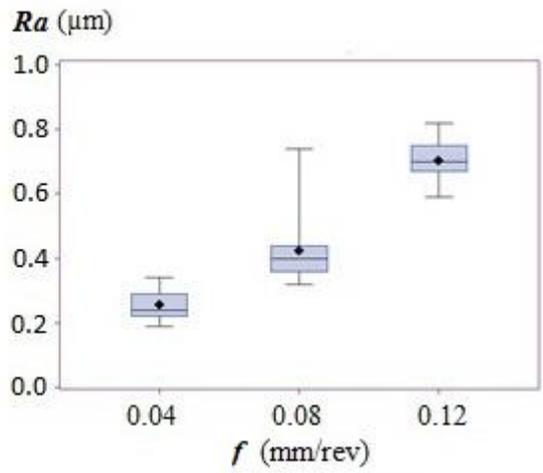
Nº Ensayo	Factor			Rugosidad superficial medida, R_a (μm)		
	f	T	N	Repli 1	Repli 2	Repli 3
1	0.04	HX	800	0.34	0.22	0.28
2	0.12	TP200	500	0.64	0.71	0.68
3	0.12	HX	500	0.78	0.76	0.73
4	0.12	HX	280	0.82	0.76	0.75
5	0.12	HX	800	0.74	0.78	0.76
6	0.04	TP200	800	0.22	0.22	0.24
7	0.08	HX	500	0.45	0.49	0.44
8	0.12	TP2500	800	0.68	0.71	0.68
9	0.04	HX	500	0.23	0.28	0.24
10	0.08	TP2500	500	0.74	0.73	0.71
11	0.04	TP2500	500	0.29	0.31	0.24
12	0.12	TP200	800	0.71	0.69	0.73
13	0.04	TP2500	800	0.24	0.24	0.24
14	0.08	HX	280	0.44	0.41	0.40
15	0.04	TP200	280	0.22	0.21	0.22
16	0.12	TP2500	280	0.67	0.62	0.70
17	0.04	TP200	500	0.32	0.31	0.34
18	0.08	TP200	280	0.41	0.33	0.41
19	0.08	TP2500	800	0.36	0.41	0.42
20	0.04	HX	280	0.28	0.27	0.29
21	0.12	TP200	280	0.63	0.61	0.59
22	0.04	TP2500	280	0.24	0.19	0.20
23	0.08	TP200	800	0.32	0.37	0.36
24	0.08	TP200	500	0.38	0.32	0.36
25	0.12	TP2500	500	0.68	0.66	0.68
26	0.08	HX	800	0.32	0.38	0.40
27	0.08	TP2500	280	0.37	0.34	0.37

4.3.2. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS RESULTADOS

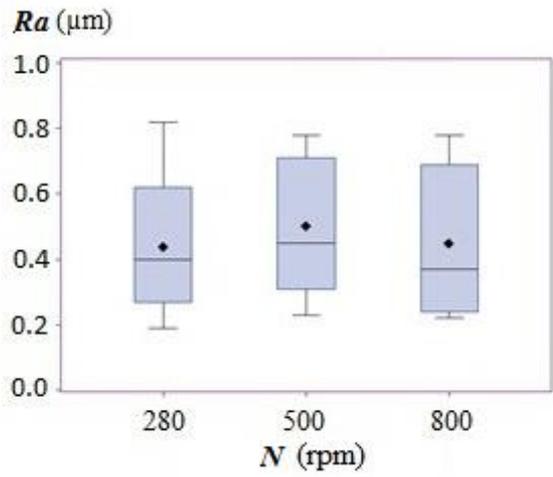
Se representa, en primer lugar, la influencia de los factores avance, f , tipo de herramienta, T , y régimen de giro del husillo, N , sobre la variable respuesta, Ra , mediante gráficos de cajas y bigotes.

En los gráficos de cajas y bigotes, la información sobre los valores mínimo y máximo es proporcionada por los extremos de los bigotes, mientras que las cajas suministran información acerca de los cuartiles Q1 (25%), Q2 o mediana (50%) y Q3 (75%). También informan acerca de la posible existencia de valores atípicos y dan idea de la simetría de la distribución.

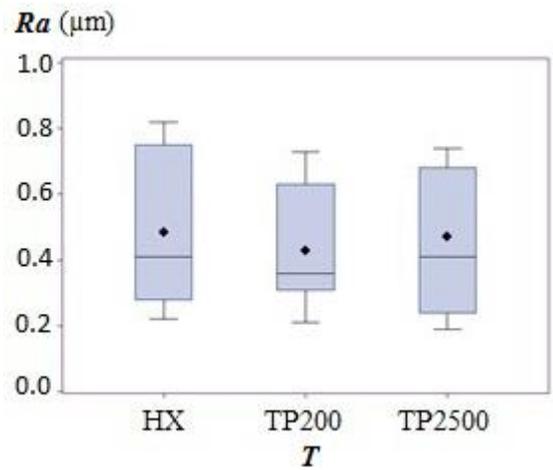
En la Figura 4.7 se muestra la dispersión del avance, del régimen de giro del husillo y del tipo de herramienta cuando se consideran de forma aislada. Del análisis de los gráficos de cajas y bigotes se puede decir que: el avance es el factor que más claramente influye en el acabado superficial, empeorando la rugosidad superficial conforme aumenta el avance. Para el resto de factores, las diferencias entre los distintos niveles no se muestran tan significativas. En relación con el factor régimen de giro del husillo, en el gráfico se aprecia un ligero empeoramiento de los valores de la rugosidad superficial para el valor intermedio de 500 rpm en relación con los otros valores ensayados. Por último, respecto al factor tipo de herramienta, puede decirse que la que tiene el recubrimiento TP200 se comporta ligeramente mejor que los otros dos tipos de herramientas ensayados.



a)



b)



c)

Figura 4.7. Gráficos de cajas y bigotes de la rugosidad superficial en términos de Ra frente a los factores: a) avance, b) régimen de giro del husillo y c) tipo de herramienta.

En los gráficos representados a continuación, se recoge la influencia de distintas interacciones para su análisis: la interacción régimen de giro del husillo-avance, N^*f ; la interacción radio de la zona de medición-avance, R^*f ; y la interacción tipo de herramienta-avance, T^*f (Figura 4.8). En todas las interacciones se aprecia el claro incremento de los valores de la rugosidad superficial según aumenta el avance. Se vuelve a constatar también el buen comportamiento de la herramienta TP200, así como los valores ligeramente superiores de la rugosidad superficial para el régimen de giro intermedio (500 rpm).

Al visualizar la interacción entre el radio de la zona de medición y el avance, se aprecia como, fijado el nivel de avance, apenas existen diferencias entre los valores de Ra alcanzados en los tres niveles considerados para el radio de la zona de medición.

A la vista de la influencia que el avance presenta en la variable respuesta, se analiza también la interacción tipo de herramienta-régimen de giro, T^*N , considerando de forma aislada cada uno de los niveles de avance contemplados en el diseño de experimentos (Figura 4.9).

Los mejores valores del acabado superficial se alcanzan con la herramienta TP2500, con avance bajo (0.04 mm/rev) y con el nivel de régimen de giro del husillo bajo (280 rpm). Para valores altos de avance (0.12 mm/rev), la herramienta HX alcanza los valores mayores de rugosidad superficial. Destaca también el notable incremento de la rugosidad superficial cuando se combina avance intermedio (0.08 mm/rev), régimen de giro intermedio (500 rpm) y tipo de herramienta TP2500.

Fijado el avance, para el régimen de giro superior del husillo (800 rpm) hay menos dispersión de los resultados. Es decir, las tres herramientas consideradas proporcionan valores de Ra similares.

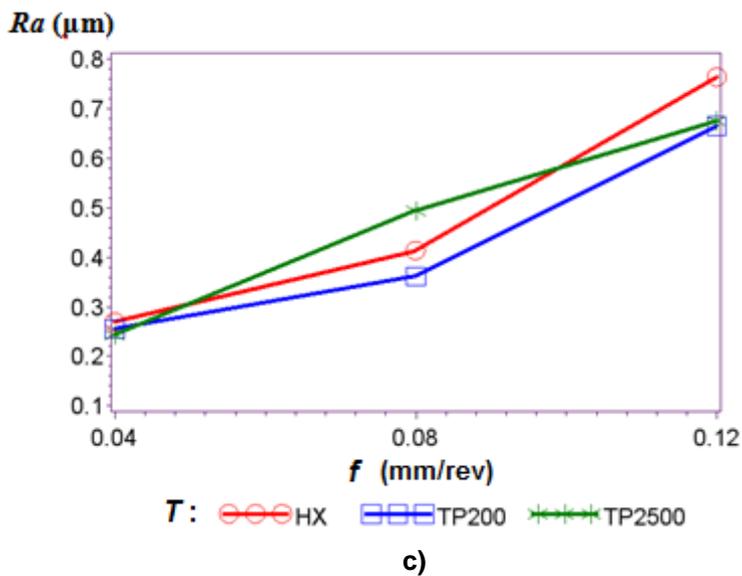
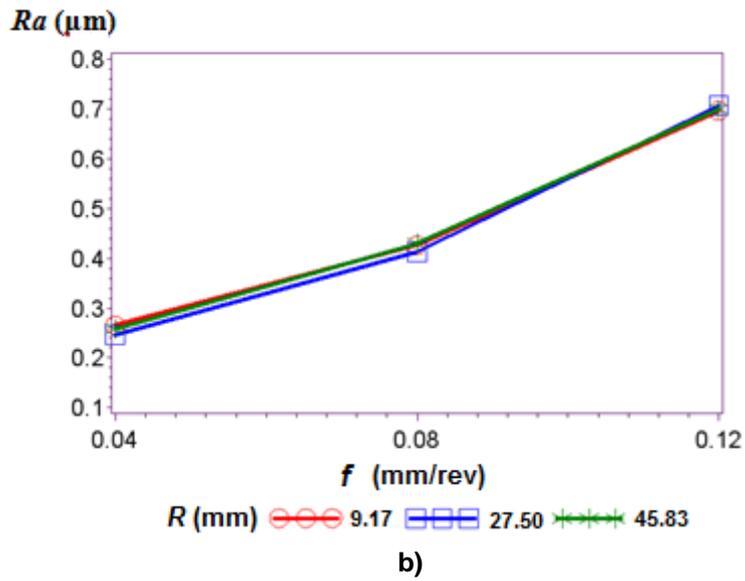
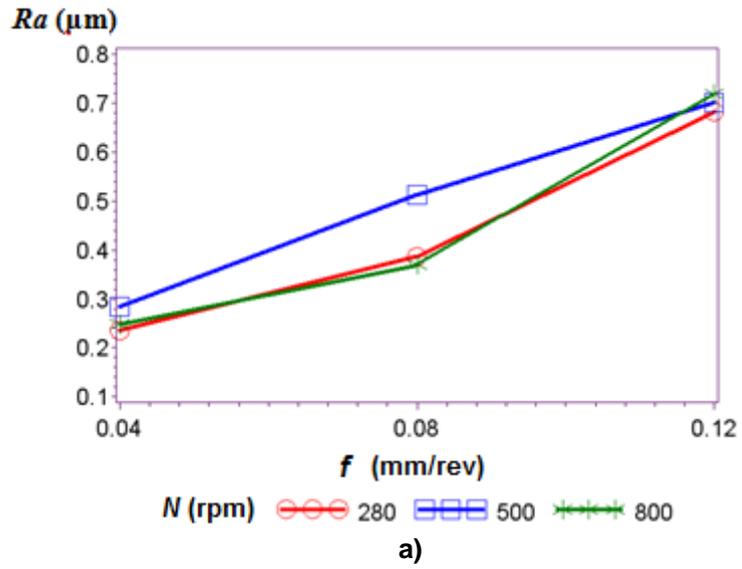


Figura 4.8. Rugosidad superficial en términos de Ra considerando: a) la interacción $N \cdot f$; b) la interacción $R \cdot f$ y c) la interacción $T \cdot f$.

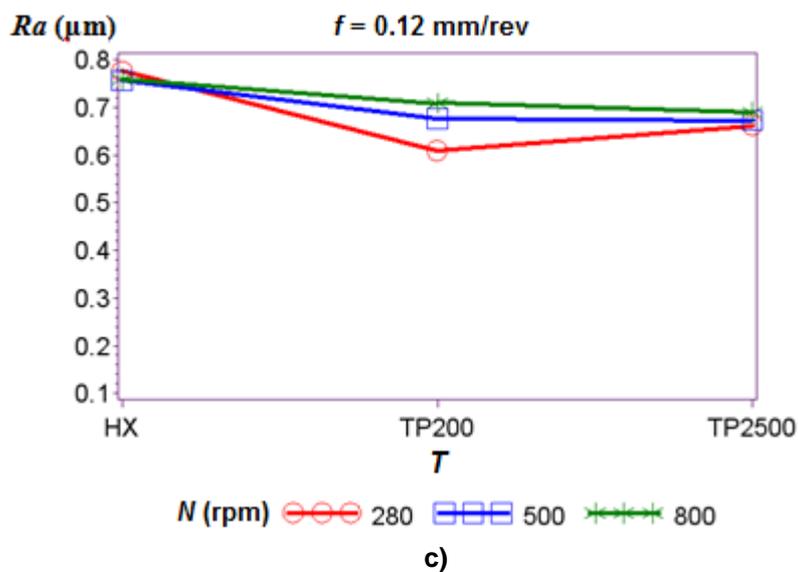
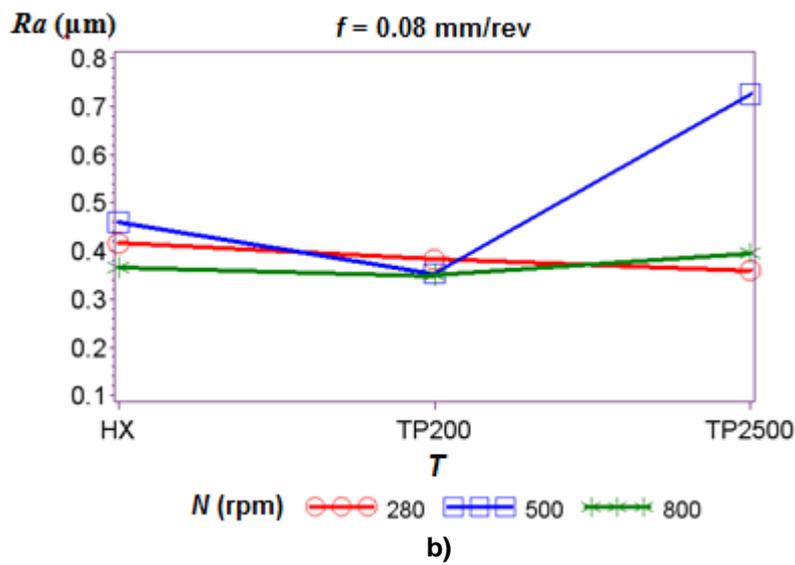
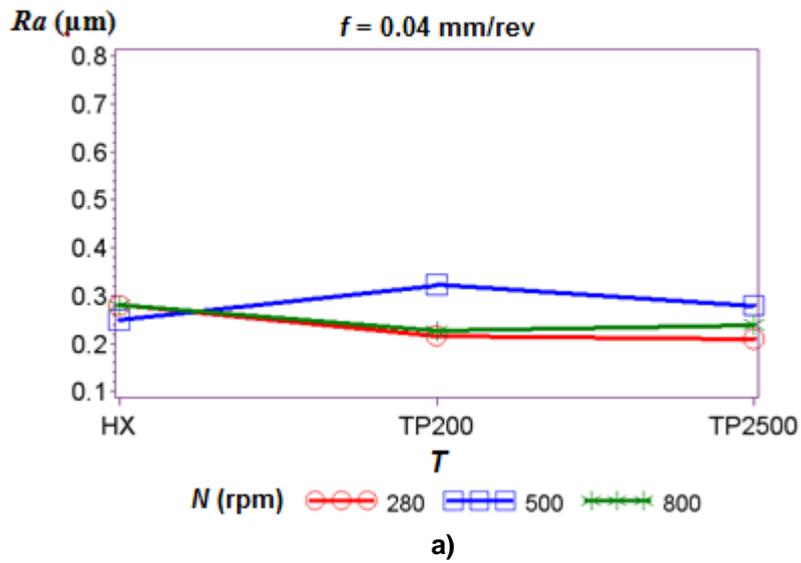


Figura 4.9. Rugosidad superficial en términos de R_a considerando la interacción $T*N$ para un avance, f , de: a) 0.04 mm/rev , b) 0.08 mm/rev y c) 0.12 mm/rev .

4.3.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Con todos los resultados de la variable respuesta, Ra , obtenidos en los ensayos, se procede a realizar un análisis estadístico de la varianza (ANOVA) de efectos fijos. Para ello se emplea el programa de análisis estadístico SAS® (SAS®, 2004).

En un primer momento se lleva a cabo un análisis completo de la varianza (ANOVA inicial), con el fin de conocer el nivel de influencia de los distintos factores e interacciones a analizar en la variabilidad de Ra . Los resultados iniciales del ANOVA se muestran en las siguientes tablas. La información proporcionada en la última columna de las Tablas 4.6 y 4.8, representa la probabilidad de que la distribución F de Snedecor tenga un valor mayor que el valor F calculado.

Tabla 4.6. Resultados globales del ANOVA inicial.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Pr > F
<i>Modelo</i>	26	3.06381449	0.11783902	40.26	<0.0001
<i>Error</i>	54	0.15805465	0.00292694		
<i>Total corregido</i>	80	3.22186914			

Tabla 4.7. Ra y medidas de dispersión para el ANOVA inicial.

Desviación media aritmética	R- cuadrado	Coefficiente de variación	Raíz cuadrada del error cuadrático medio
0.460617	0.950943	11.74537	0.054101

Tabla 4.8. Resultados detallados del ANOVA inicial.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Pr > F
<i>T</i>	2	0.04425441	0.02212720	7.56	0.0013
<i>N</i>	2	0.06410082	0.03205041	10.95	0.0001
<i>f</i>	2	2.71871491	1.35935745	464.43	<0.0001
<i>R</i>	2	0.00131810	0.00065905	0.23	0.7991
θ	2	0.00152004	0.00076002	0.26	0.7723
<i>f</i> * <i>R</i>	4	0.00303650	0.00075912	0.26	0.9027
<i>T</i> * <i>f</i>	4	0.09161776	0.02290444	7.83	<0.0001
<i>T</i> * <i>N</i>	4	0.05986079	0.01496520	5.11	0.0014
<i>N</i> * <i>f</i>	4	0.06270912	0.01567728	5.36	0.0010
<i>Error</i>	54	0.15805465	0.00292694		
<i>Total corregido</i>	80	3.22186914			

El ANOVA inicial permite extraer las siguientes conclusiones:

- i. Se destaca el hecho de que el modelo planteado es significativo, al obtenerse un p-valor inferior a 0.0001 (Tabla 4.6).
- ii. De acuerdo con los parámetros de dispersión el modelo posee un buen ajuste: R-cuadrado próximo a la unidad y raíz cuadrada del error cuadrático medio reducida, aunque con una amplia variabilidad como indica el coeficiente de variación (Tabla 4.7).
- iii. El análisis detallado de los distintos factores e interacciones muestra cómo el grado de significación varía ampliamente, obteniéndose un rango de p-valores entre <0.0001 y 0.9027 (Tabla 4.8).

Para discriminar los factores e interacciones significativos desde un punto de vista estadístico, se considera la probabilidad de que la distribución F de Snedecor tenga un valor mayor que el valor F calculado (p-valor). En el presente estudio se considera un nivel de

significación α de 0.05, de tal manera que aquellos factores e interacciones en los que el p-valor supere 0.05, se considera que no son estadísticamente significativos.

El análisis ANOVA se lleva a cabo eliminando un factor cada vez siguiendo el criterio mencionado. Las siguientes tablas muestran los resultados finales del ANOVA una vez despreciados todos los factores e interacciones estadísticamente no significativos

Tabla 4.9. Resultados globales del ANOVA final.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Pr > F
<i>Modelo</i>	18	3.05808148	0.16989342	64.31	<0.0001
<i>Error</i>	62	0.16378765	0.00264174		
<i>Total corregido</i>	80	3.22186914			

Tabla 4.10. Ra y medidas de dispersión para el ANOVA final.

Desviación media aritmética	R- cuadrado	Coefficiente de variación	Raíz cuadrada del error cuadrático medio
0.460617	0.949164	11.15847	0.051398

Tabla 4.11. Resultados detallados del ANOVA final.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Pr > F
<i>T</i>	2	0.04557284	0.02278642	8.63	0.0005
<i>N</i>	2	0.06459506	0.03229753	12.23	<0.0001
<i>f</i>	2	2.73520247	1.36760123	517.69	<0.0001
<i>T*f</i>	4	0.09080494	0.02270123	8.59	<0.0001
<i>T*N</i>	4	0.05941235	0.01485309	5.62	0.0006
<i>N*f</i>	4	0.06249383	0.01562346	5.91	0.0004
<i>Error</i>	62	0.16378765	0.00264174		
<i>Total corregido</i>	80	3.22186914			

Con el análisis de varianza se encontró que:

- i. Los parámetros que fijan la zona de medición, R y θ , no son estadísticamente influyentes.
- ii. El avance, f , es el factor que más influencia tiene en la rugosidad superficial.
- iii. En un grado mucho menor y por este orden, tienen también influencia estadística: la interacción tipo de herramienta-avance, $T*f$, régimen de giro del husillo, N , la interacción régimen de giro del husillo-avance, $N*f$, la interacción de tipo de herramienta-régimen de giro del husillo, $T*N$, y el tipo de herramienta, T .

A partir del ANOVA final es posible analizar la contribución, expresada en porcentaje, de cada una de las fuentes de variación con relación a la variabilidad explicada por el modelo (ρ_1) y a la variabilidad total (ρ_2), a partir de las siguientes expresiones:

$$\rho_1 = \frac{SC_{fuente\ de\ variación}}{SC_{modelo}} * 100 \quad (4.1)$$

$$\rho_2 = \frac{SC_{fuente\ de\ variación}}{SC_{modelo} + SC_{error}} * 100 \quad (4.2)$$

donde $SC_{fuente\ de\ variación}$, SC_{modelo} y SC_{error} representan, respectivamente, la suma de cuadrados de la fuente de variación considerada en cada caso, la suma de cuadrados del modelo y la suma de cuadrados del error.

La Tabla 4.12 muestra la contribución porcentual de los factores que se encontró que podrían influir en la variabilidad estadística de Ra .

Tabla 4.12. Porcentaje de contribución de los factores e interacciones a la variabilidad de R_a .

Fuente de variación	ρ_1 (%)	ρ_2 (%)
f	89.4%	84.9%
$T*f$	3.0%	2.8%
N	2.1%	2.0%
$N*f$	2.0%	1.9%
$T*N$	1.9%	1.8%
T	1.5%	1.4%
Total	100%	94.9%

La contribución del avance a la variabilidad destaca claramente por encima de las demás fuentes de variación, explicando el 89.4% de la variabilidad del modelo y el 84.9% de la variabilidad total. Cada una de las restantes fuentes de variación no supera el 3% de contribución a la variabilidad del modelo ni a la variabilidad total.

Los resultados obtenidos mediante el ANOVA final permiten desarrollar un modelo estadístico para la varianza, empleando las seis fuentes de variación más influyentes. La variabilidad de la rugosidad superficial del ANOVA es modelada por la siguiente ecuación:

$$y_{ijk} = \mu + f_i + T_j + N_k + (Tf)_{ij} + (Nf)_{ik} + (TN)_{jk} + \varepsilon_{ijk} \quad (4.3)$$

donde: μ es la media; f_i , T_j y N_k , representan el efecto de los factores de avance, tipo de herramienta y el régimen de giro del husillo respectivamente; $(Tf)_{ij}$, $(Nf)_{ik}$ y $(TN)_{jk}$ las interacciones tipo de herramienta-avance, régimen de giro del husillo-avance y tipo de herramienta-régimen de giro del husillo respectivamente; y, por último, ε_{ijk} representa el error del modelo. La Tabla 4.13 incluye estimaciones de los parámetros del modelo dadas por la ecuación (4.3).

Tabla 4.13. Estimación de los parámetros en el modelo de la ecuación (4.3).

Parámetro		Estimación	Error estándar	Valor t	Pr> t
Media	μ	0.6788	0.0249	27.27	<0.0001
f 0.04	f_1	-0.4578	0.0313	-14.63	<0.0001
f 0.08	f_2	-0.2519	0.0313	-8.05	<0.0001
f 0.12	f_3	0	.	.	.
T HX	T_1	0.1037	0.0313	3.32	0.0015
T TP200	T_2	0.02	0.0313	0.64	0.5249
T TP2500	T_3	0	.	.	.
N 280	N_1	-0.05630	0.0313	-1.80	0.0768
N 500	N_2	0.0467	0.0313	1.49	0.1408
N 800	N_3	0	.	.	.
T HX* f 0.04	$(Tf)_{1,1}$	-0.0622	0.0343	-1.82	0.0742
T TP200* f 0.04	$(Tf)_{1,2}$	0.0222	0.0343	0.65	0.5190
T TP2500* f 0.04	$(Tf)_{1,3}$	0	.	.	.
T HX* f 0.08	$(Tf)_{2,1}$	-0.1689	0.0343	-4.93	<0.0001
T TP200* f 0.08	$(Tf)_{2,2}$	-0.1222	0.0343	-3.57	0.0007
T TP2500* f 0.08	$(Tf)_{2,3}$	0	.	.	.
T HX* f 0.12	$(Tf)_{3,1}$	0	.	.	.
T TP200* f 0.12	$(Tf)_{3,2}$	0	.	.	.
T TP2500* f 0.12	$(Tf)_{3,3}$	0	.	.	.
N 280* f 0.04	$(Nf)_{1,1}$	0.0233	0.0343	0.68	0.4984
N 500* f 0.04	$(Nf)_{1,2}$	0.0533	0.0343	1.56	0.1247
N 800* f 0.04	$(Nf)_{1,3}$	0	.	.	.
N 280* f 0.08	$(Nf)_{2,1}$	0.0522	0.0343	1.52	0.1326
N 500* f 0.08	$(Nf)_{2,2}$	0.1600	0.0343	4.67	<0.0001
N 800* f 0.08	$(Nf)_{2,3}$				
N 280* f 0.12	$(Nf)_{3,1}$	0	.	.	.
N 500* f 0.12	$(Nf)_{3,2}$	0	.	.	.
N 800* f 0.12	$(Nf)_{3,3}$	0	.	.	.
T HX* N 280	$(TN)_{1,1}$	0.0533	0.0343	1.56	0.1247
T HX* N 500	$(TN)_{1,2}$	-0.09778	0.0343	-2.85	0.0059
T HX* N 800	$(TN)_{1,3}$	0	.	.	.
T TP200* N 280	$(TN)_{2,1}$	0.0056	0.0343	0.16	0.8717
T TP200* N 500	$(TN)_{2,2}$	-0.0956	0.0343	-2.79	0.0070
T TP200* N 800	$(TN)_{2,3}$	0	.	.	.
T TP2500* N 280	$(TN)_{3,1}$	0	.	.	.
T TP2500* N 500	$(TN)_{3,2}$	0	.	.	.
T TP2500* N 800	$(TN)_{3,3}$	0	.	.	.

En el ANOVA se asume que los errores del modelo siguen una distribución normal, siendo ésta una hipótesis básica para garantizar su validez. Es necesario, por lo tanto, comprobar que se cumple la condición de normalidad en el modelo planteado. Para ello, habitualmente, se recurre al análisis de la normalidad de los residuales.

Los residuales del modelo se obtienen como diferencia entre los valores previstos y los obtenidos. Los valores de los residuales obtenidos a partir del modelo se representan gráficamente frente a los valores estimados de la desviación media aritmética (Figura 4.10) y frente al orden de los ensayos (Figura 4.11). En los dichos gráficos no se aprecia evidencia clara de la existencia de cualquier patrón o heterocedasticidad.

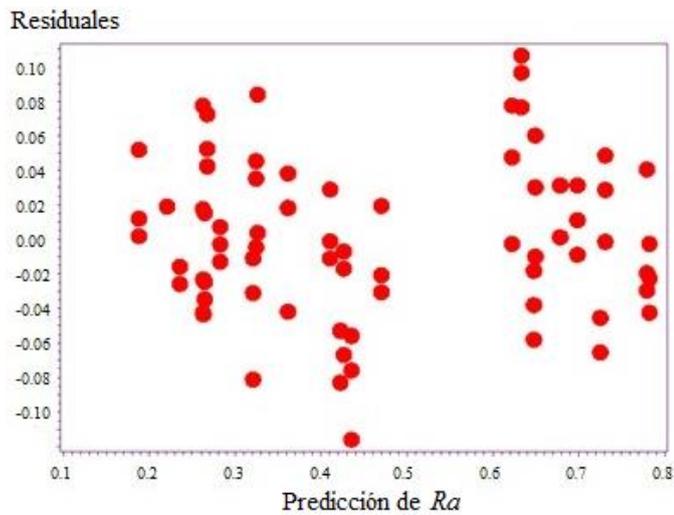


Figura 4.10. Residuales frente a la predicción de R_a .

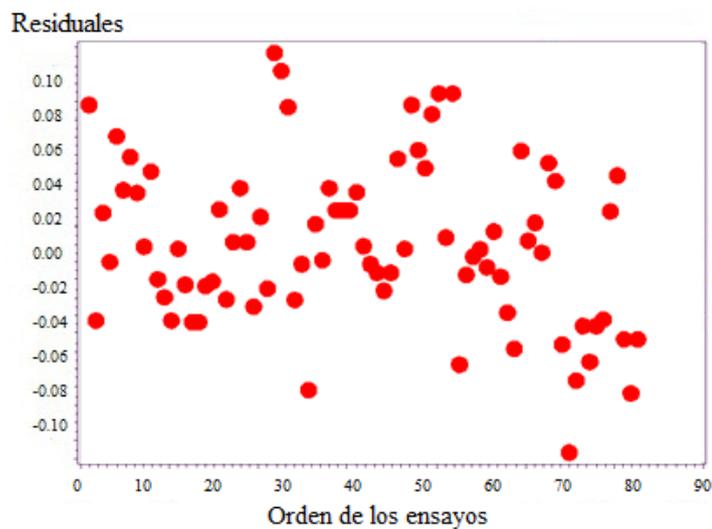


Figura 4.11. Residuales frente al orden de los ensayos.

Para comprobar la normalidad de los residuales se recurre, de forma adicional, a los test de normalidad Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Cramer-von Mises y Anderson-Darling (Tabla 4.14). Los resultados de dichos test muestran que no existe evidencia de ausencia de normalidad.

Tabla 4.14. Test de normalidad.

Test	Estadístico		p-valor	
Shapiro-Wilk	W	0.991488	Pr<W	0.8761
Kolmogorov-Smirnov	D	0.062836	Pr>D	>0.1500
Cramer-von Mises	W-Sq	0.03453	Pr>W-Sq	>0.2500
Anderson-Darling	A-Sq	0.232754	Pr>A-Sq	>0.2500

En la siguiente gráfica se aprecia que la distribución de los residuales del modelo se ajusta a una distribución normal $N(\mu;\sigma) = N(0;0.0452)$.

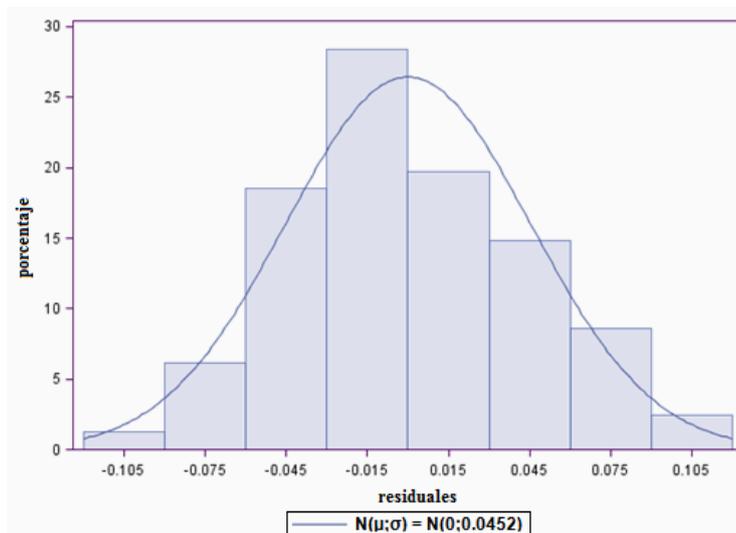


Figura 4.12. Distribución de los residuales y distribución $N(0;0.0452)$.

4.3.4. OPTIMIZACIÓN

El modelo de la ecuación (4.3) y las estimaciones de los parámetros ilustrados en la Tabla 4.13 se utilizaron para identificar la combinación óptima de avance, régimen de giro del husillo y tipo de herramienta, basados en la rugosidad superficial esperada. La Tabla 4.15 recoge, ordenados de menor a mayor⁷, los valores de la rugosidad superficial esperada, Rae , para todas las combinaciones posibles de los tres factores.

La combinación de tipo de herramienta y parámetros de corte que minimizan la rugosidad superficial esperada es un avance de 0.04 mm/rev, un régimen de giro del husillo de 280 rpm, y un tipo de herramienta *TP2500*.

Sin embargo, como las diferencias entre estas condiciones de mecanizado y las condiciones siguientes en el ranking son poco significativas, atendiendo a las cuestiones económicas, podrían considerarse combinaciones posteriores en las que el régimen de giro es superior.

A la vista de los resultados obtenidos, sería posible el uso de los tres recubrimientos de herramientas probados, e incluso, aumentar algunas de las condiciones de corte cuando el único material de la pieza mecanizada es el magnesio, como en este caso, ya que se cumplen, e incluso mejoran, los requisitos de Ra normales requeridos en los principales campos de aplicación de las aleaciones de magnesio, como el sector aeronáutico y el aeroespacial, donde, por lo general, se consideran adecuados valores de Ra de hasta 1.6 μm (ANSI/ASME B46.1-2009, 2010). Sin embargo, otros estudios experimentales (Villeta *et al.*, 2012)(Sáenz de Pipaón, 2013) realizados con piezas híbridas de aluminio-magnesio,

⁷ Se emplean tres cifras significativas a efectos de facilitar la ordenación de los resultados. A nivel práctico, lo razonable sería reducir la precisión de la estimación a la del equipo de medición. En el caso del equipo Mitutoyo Surftest SJ 401, sería suficiente emplear dos cifras significativas.

titanio-magnesio o de acero-magnesio, cada vez más habituales en este tipo de industrias, han demostrado que las condiciones de corte se tienen que mantener en el rango considerado en este trabajo, debido a que los valores de rugosidad superficial alcanzados en los otros materiales (principalmente en el titanio y el acero) son más elevados que los que se obtienen en el caso del magnesio.

Tabla 4.15. Ranking de combinación de parámetros en función de la rugosidad superficial esperada, R_{ae} .

Factor			R_{ae} (μm)
f (mm/rev)	T	N (rpm)	
0.04	TP2500	280	0.188
0.04	TP2500	800	0.221
0.04	TP200	280	0.236
0.04	HX	800	0.263
0.04	TP200	800	0.263
0.04	HX	500	0.265
0.04	TP200	500	0.268
0.04	HX	280	0.283
0.04	TP2500	500	0.321
0.08	TP200	800	0.325
0.08	TP200	280	0.326
0.08	HX	800	0.362
0.08	HX	280	0.411
0.08	TP2500	280	0.423
0.08	TP2500	800	0.427
0.08	TP200	500	0.436
0.08	HX	500	0.477
0.12	TP2500	280	0.623
0.08	TP2500	500	0.634
0.12	TP200	280	0.648
0.12	TP200	500	0.650
0.12	TP2500	800	0.679
0.12	TP200	800	0.699
0.12	TP2500	500	0.726
0.12	HX	500	0.731
0.12	HX	280	0.780
0.12	HX	800	0.783

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

5.1. CONCLUSIONES

5.1.1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los sectores industriales que trabajan con componentes estructurales, tales como la industria aeronáutica, la aeroespacial y la de automoción, están orientando sus esfuerzos a la reducción del consumo de energía. Este objetivo se ha convertido en una prioridad para favorecer un desarrollo sostenible, tanto en términos económicos como medioambientales. Para ello, se están reemplazando materiales tradicionales como el acero y la fundición, por termoplásticos y metales más ligeros. En este contexto, el magnesio y sus aleaciones se han constituido en una alternativa a los materiales tradicionales, debido, principalmente, a su reducida densidad y su buena relación peso/resistencia mecánica.

El creciente uso del magnesio y sus aleaciones en piezas fabricadas mediante procesos de mecanizado demanda un mayor conocimiento de los mismos. Por lo general, este tipo de piezas presentan geometrías complejas, con exigentes especificaciones dimensionales y de rugosidad superficial, que implican un encarecimiento de los costes de fabricación. Cuando estas piezas han sufrido cualquier daño, se hace necesario llevar a cabo operaciones de reparación y mantenimiento. Para optimizar dichas operaciones es preciso determinar las mejores combinaciones de las condiciones de corte y de las herramientas que permitan minimizar tiempos y costes.

En esta Tesis Doctoral se presenta un estudio experimental, basado en el análisis de la rugosidad superficial, para seleccionar las herramientas y condiciones de corte para llevar a cabo operaciones de mantenimiento mediante refrentado en seco de piezas de la aleación de magnesio AZ91D-F.

A continuación se recogen las conclusiones que permite establecer el trabajo desarrollado a lo largo de la presente Tesis Doctoral. Dichas conclusiones son de carácter general y particular. Las de carácter general surgen del estudio realizado en los capítulos 2 y 3, *Estado del arte* y *Metodología* respectivamente. Las de carácter particular se extraen del trabajo desarrollado en el capítulo 4, *Aplicaciones y análisis de resultados*.

5.1.2. CONCLUSIONES DE TIPO GENERAL

Las principales conclusiones de tipo general identificadas son las siguientes:

- Las aleaciones ligeras en general, y las de magnesio en particular, están adquiriendo gran importancia en sectores industriales como el de la automoción, el aeronáutico o el aeroespacial, debido a los beneficios económicos y medioambientales que reporta su uso al reducir el peso de vehículos y aeronaves.
- La buena relación peso/resistencia mecánica del magnesio y sus aleaciones, en conjunción con los avances tecnológicos desarrollados en el campo de las aleaciones de magnesio, está favoreciendo su creciente uso en múltiples aplicaciones en industrias tan diversas como la electrónica, la médica, la deportiva o la del acero, además de las industrias del transporte ya mencionadas.
- La posibilidad de reciclar el magnesio utilizando un 5% de la energía necesaria para obtener el material primario, obteniéndose un material que presenta las mismas características físicas, químicas y mecánicas que el material original, está potenciando aún más su uso por favorecer un desarrollo sostenible. A su vez, está propiciando una fuerte expansión de la industria de reciclaje del magnesio.

- Uno de los aspectos que más limita el uso de las aleaciones de magnesio es su baja resistencia a la corrosión, que hace necesario en algunos casos recurrir a recubrimientos por anodización y tratamientos químicos para mejorar sus prestaciones. Esta baja resistencia a la corrosión favorece, por otra parte, su uso como ánodo de sacrificio y también en la industria médica, por tratarse de un material bioabsorbible.
- El magnesio y sus aleaciones presentan una excelente maquinabilidad, pudiéndose utilizar valores elevados de velocidad de corte, de avance y de profundidad de corte.
- Debido a que el magnesio posee una temperatura de ignición inferior a su temperatura de fusión, en su mecanizado existe riesgo de ignición. Por otra parte, en contacto con el agua puede formar atmósferas de hidrógeno potencialmente explosivas, lo que dificulta su lubricación/refrigeración con fluidos de corte base agua.
- Los avances en el campo de los materiales de corte han permitido que el mecanizado en seco se extienda a áreas en las que los lubricantes se consideraban esenciales. El mecanizado en seco es deseable, en general, desde un punto de vista medioambiental; y para el mecanizado del magnesio, en particular, al evitar el riesgo que implica su contacto con el agua.
- Los mecanismos que conducen a la formación de la rugosidad superficial son muy complejos debido a la interacción de un gran número de parámetros, lo que justifica que aún no se haya encontrado un modelo mecanicista que aporte una solución completa. Aun así, cabe destacar el importante avance tanto en el desarrollo de métodos de predicción de la rugosidad superficial, ya sean de tipo mecanicista o

empírico; como en el constante perfeccionamiento de las diferentes técnicas de optimización de procesos, de tipo convencional y no convencional, que permiten determinar condiciones operativas óptimas o próximas al óptimo.

- La metodología experimental de trabajo desarrollada, que se fundamenta en el Diseño Estadístico de Experimentos, permite avanzar en el estudio del mecanizado de las aleaciones ligeras. Se ha planteado su desarrollo para que, con el menor número de ensayos (y por tanto de recursos) posible, se pueda extraer el máximo de información. La metodología es aplicable a distintas aleaciones, tipos de herramientas, condiciones de corte y variables de respuesta.
- La escasa información encontrada relativa a operaciones de refrentado en seco, en particular para aleaciones de magnesio, dificulta llevar a cabo una comparación objetiva con otros trabajos.

5.1.3. CONCLUSIONES DE TIPO PARTICULAR

Las principales conclusiones de tipo particular derivan de lo contemplado en el capítulo de *Aplicaciones y análisis de resultados*.

Los ensayos de refrentado en seco realizados sobre piezas de magnesio de la aleación AZ91D-F, se llevaron a cabo en base a una metodología basada en el diseño de experimentos, tomando como variable respuesta la rugosidad superficial, por ser la característica más comúnmente utilizada para definir la calidad de las piezas mecanizadas.

Para el diseño de experimentos se identificaron los factores que podrían ser fuentes de variabilidad de la rugosidad superficial. Fueron establecidos como factores influyentes la

profundidad de corte, el avance, el régimen de giro del husillo, el tipo de herramienta, así como los dos parámetros que posicionan las zonas de medición de la rugosidad superficial. Se consideraron tres niveles para cada factor influyente, a excepción de la profundidad de corte, para la cual se tomó un único nivel.

Con el fin de analizar la influencia de los seis factores considerados, cinco con tres niveles cada uno y uno con uno con uno, se seleccionó para este estudio un diseño ortogonal de Taguchi L₂₇ con tres replicaciones anidadas.

Los datos obtenidos fueron analizados por medio del método de análisis de la varianza. En base a dicho análisis, se desarrolló un modelo estadístico para calcular de forma aproximada el valor de la rugosidad superficial. Dicho modelo permite establecer una clasificación de las mejores combinaciones de factores analizados sobre la base de la rugosidad superficial esperada, y sirve, por lo tanto, como un medio para la selección de las mejores condiciones de corte y tipo de herramientas para un cierto rango de rugosidad superficial.

Las principales conclusiones de tipo particular extraídas de dicho análisis son las siguientes:

- El factor avance, f , es el principal responsable, y con mucha diferencia, de la variabilidad en la rugosidad. A mayor valor de f mayor rugosidad y viceversa (al menos en el rango de valores estudiados).
- En un grado mucho menor, y por este orden, tienen también influencia estadística: la interacción tipo de herramienta-avance, T^*f , régimen de giro del husillo, N , la interacción régimen de giro del husillo-avance, N^*f , la interacción de tipo de herramienta-régimen de giro del husillo, T^*N , y el tipo de herramienta, T .

- Los dos parámetros considerados para fijar las zonas de medición, R y θ , no son estadísticamente influyentes. Esto significa que no hay evidencia estadística de la variación significativa de la rugosidad superficial a lo largo de la cara mecanizada de la pieza de trabajo.
- El análisis ANOVA permite establecer un modelo para la varianza que incluye a las fuentes de variación más influyentes: avance, régimen de giro del husillo y tipo de herramienta, así como las interacciones tipo de herramienta-avance, régimen de giro del husillo-avance y tipo de herramienta-régimen de giro del husillo. Dicho modelo permite realizar una estimación de los resultados de la desviación media aritmética, R_{ae} , para las distintas condiciones operativas.
- Según la rugosidad esperada por el modelo desarrollado, la combinación óptima de los tres factores avance, régimen de giro del husillo y tipo de herramienta, al menos la que proporciona la menor rugosidad superficial, es: 0.04 mm/rev, 280 rpm y TP2500.

Lo expuesto hasta aquí recoge las conclusiones generales y particulares extraídas directamente de la revisión bibliográfica y de los ensayos llevados a cabo. A efectos prácticos, la interpretación de las anteriores conclusiones teniendo en cuenta factores tecnológicos, económicos y medioambientales permite establecer, a su vez, las siguientes conclusiones adicionales:

Para este tipo de operaciones sería posible utilizar los tres tipos de herramienta ensayados, e incluso, se podrían aumentar algunas de las condiciones de corte ya que los valores de R_a obtenidos son inferiores a los valores máximos permitidos en los principales campos de

aplicación de las aleaciones de magnesio como, por ejemplo, en los sectores industriales aeronáutico y aeroespacial.

Realizar la reparación o el mantenimiento de las piezas en el menor tiempo posible siempre es deseable, ya que implica ahorrar en costes de máquina, de operario y de aquéllos derivados de no estar operativa la máquina o componente del que se ha extraído la pieza en reparación. Para conseguir incrementar la velocidad de avance, y con ello disminuir el tiempo de mecanizado, se puede optar por aumentar el régimen de giro del husillo, aumentar el avance o aumentar ambos simultáneamente. A la luz de lo comentado previamente en base a los valores de Ra obtenidos, para este tipo de operaciones podría plantearse incrementar tanto el avance como el régimen de giro del husillo. No obstante, la influencia del régimen de giro se ha mostrado claramente inferior a la del avance, obteniéndose, además, buenos resultados de rugosidad con el nivel superior utilizado (800 rpm). Así pues, a la hora de reducir los tiempos de mecanizado, parece aconsejable priorizar el incremento del régimen de giro sobre el del avance.

5.2. DESARROLLOS FUTUROS

El campo del conocimiento en el que se desenvuelve la presente Tesis Doctoral es de notable amplitud y complejidad. En las últimas décadas se han producido importantes avances en el ámbito de la optimización de los procesos del mecanizado gracias a los esfuerzos de investigadores y al propio interés de la industria del mecanizado.

A partir de los resultados obtenidos en el modelo para el proceso de refrentado en seco de piezas de magnesio desarrollado, se considera oportuno señalar algunas posibles líneas de desarrollo futuro, que incluirían:

- La metodología experimental desarrollada para este trabajo de refrentado en seco de magnesio, así como los resultados obtenidos, pueden ser empleados como base de posteriores trabajos, en los que se podría profundizar en el análisis de la influencia de los distintos factores e interacciones presentes en este tipo de mecanizado. Para ello, se podría considerar la misma variable respuesta seleccionada en el presente estudio (Ra), o bien otra u otras variables, que podrían incluir, por ejemplo, fuerzas, vibraciones, emisión acústica, energía audible, vida de la herramienta o potencia consumida en el proceso de mecanizado, por citar sólo algunas de las más habituales.

En esta línea, las investigaciones futuras podrían permitir llegar a conocer más a fondo la influencia de las herramientas y de las condiciones de corte en el proceso de refrentado en seco tanto del magnesio como de otros tipos de materiales que se ensayaran como, por ejemplo, las aleaciones de aluminio, las aleaciones de titanio o los compuestos de matriz metálica.

- A la vista de los resultados del presente estudio, por tratarse de procesos de reparación y mantenimiento con unas condiciones de corte poco exigentes, la posibilidad de ignición del magnesio disminuye, facilitando la aplicación del mecanizado en seco. No obstante, existe un amplio campo de estudio de los diferentes sistemas de lubricación/refrigeración, con los distintos métodos de aplicación disponibles, como pueden ser la refrigeración criogénica, la refrigeración mediante gases o la utilización de lubricantes sólidos. Una posible línea de investigación podría ser la evaluación de estos sistemas de lubricación/refrigeración en los procesos de reparación y mantenimiento.

Resultaría conveniente, de forma adicional, analizar también la validez de estos sistemas para procesos de producción en serie de piezas nuevas. Para ello se recomienda el estudio de los rangos operativos de los distintos métodos de lubricación/refrigeración, que permitan realizar el refrentado de piezas de magnesio evitando la generación de procesos de ignición.

- Conocer la distribución de temperaturas en las piezas de magnesio durante su mecanizado, podría ser también una herramienta útil con el fin de minimizar el riesgo que presentan las aleaciones de magnesio de inflamarse. Para ello, se propone el estudio de la temperatura en las operaciones de refrentado, tanto para aleaciones de magnesio como para componentes híbridos, mediante técnicas como la termografía.
- El uso de componentes híbridos en sectores industriales como el de la automoción, el aeronáutico o el aeroespacial está ampliamente extendido, siendo la geometría de las piezas utilizadas, en general, complejas, ya que pueden disponer de agujeros, canales de lubricación, molduras y/o ranuras. Con el fin de analizar el proceso de modo más ajustado a la realidad industrial, sería conveniente desarrollar nuevas

líneas de investigación para operaciones de refrentado, tanto en el ámbito de la fabricación de piezas como en el del mantenimiento. Dichos desarrollos futuros podrían incluir: operaciones de refrentado intermitente; operaciones de refrentado de componentes híbridos fabricados con combinaciones de distintos materiales, que incluyan acero con titanio, aluminio y/o magnesio; y operaciones que combinen las dos anteriores.

BIBLIOGRAFÍA

Abouelatta, O.B.; Madl, J. (2001) Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations. *Journal of Materials Processing Technology*, 118: 269–277.

Abhuri, N.R.; Dixit, U.S. (2006) A knowledge-based system for the prediction of surface roughness in turning process. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22: 363-372.

ACEA: European automobile manufacturers association (2014) [fecha de consulta: 13 Diciembre 2014]. Disponible en: < <http://www.acea.be/statistics/tag/category/key-figures>>.

Adler, D.P.; Hii, W.W.S.; Michalek, D.J.; Sutherland, J.W. (2006) Examining the role of cutting fluids in machining and efforts to address associated environmental/health concerns. *Machining Science and Technology*, 10(1): 23-58.

Aghion, E.; Bronfin, B.; Eliezer, D. (2001) The role of the magnesium industry in protecting the environment. *Journal of Materials Processing Technology*, 117(3): 381-385.

Akhyar, G.; Che Haron, C.H.; Ghani, J.A. (2008) Application of Taguchi method in the optimization of turning parameters for surface roughness. *International Journal of Science Engineering and Technology*, 1(3): 60-66.

Alauddin, M.; El-Baradie, M.A.; Hashmi, M.S.J. (1995) Computer-aided analysis of a surface roughness model for end milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 55: 123–127.

ANSI/ASME B46.1-2009 (2010) Surface texture: surface roughness, waviness and lay, ASME, New York.

Arai, M.; Sato, S.; Ogawa, M.; Shikata, H. (1996) Chip control in finish cutting of magnesium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 62(4): 341-344.

Arrazola, P.J.; Kortabarria, A.; Madariaga, A.; Esnaola, J.A.; Fernandez, E.; Cappellini, C.; Ulutan, D.; Özel, T. (2014) On the machining induced residual stresses in IN718 nickel-based alloy: Experiments and predictions with finite element simulation. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 41: 87-103.

Asiltürk, I.; Akkuş, H. (2011a) Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method. *Measurement*, 44: 1697-1704.

Asiltürk, I.; Çunkaş, M. (2011b) Modeling and prediction of surface roughness in turning operations using artificial neural network and multiple regression method. *Expert Systems with Applications*, 38: 5826-5832.

Askeland, D.R.; Fulay, P.P.; Wright, W.J. (2011) *The Science and Engineering of Materials*. CENGAGE Learning (6th Ed.), Boston.

ASM (1989) *ASM Handbook - Machining* (Vol. 16). ASM International.

ASM (1991) *ASM Handbook - Heat treating* (Vol. 4). ASM International.

ASTM B275 (2005) *Standard practice for codification of certain nonferrous metals and alloys, cast and wrought*. ASTM, Philadelphia.

Avallone, E.; Baumeister, T. (1996) *Marks' standard handbook for mechanical engineers*. McGraw Hill (10th Ed.), New York.

Avedesian, M.; Baker, H. (1999) *Magnesium and magnesium alloys (ASM speciality handbook)*. ASM International, Materials Park, Ohio.

Azouzi, R.; Guillot, M. (1997) On-line prediction of surface finish and dimensional deviation in turning using neural network based sensor fusion. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37: 1201–1217.

Balout, B.; Songmene, V.; Masounave, J. (2007) An experimental study of dust generation during dry drilling of pre-cooled and pre-heated workpiece materials. *Journal of Manufacturing Processes*, 9(1): 23-34.

Ballerini, G.; Bardi, U.; Lavacchi, A.; Migliorini D. (2001) *Magnesium alloys for structural automotive applications*. Proceedings of the 7th International Conference on hi-tech cars and engines, Modena.

Barroso, S.; Ibáñez, J. (2008) *Introducción al conocimiento de los materiales*. Colección Cuadernos de la UNED (2^a Ed., 5^a Reimpresión), UNED, Madrid.

Barzani, M.M.; Zalnezhad, E.; Sarhan, A.A.D., Farahany, S., Ramesh, S. (2015) Fuzzy logic based model for predicting surface roughness of machined Al–Si–Cu–Fe die casting alloy using different additives-turning. *Measurement*, 61: 150–161.

Bason, E. C.; Yung, C. S. (2002) A comprehensive chatter prediction model for face turning operation including tool wear effect. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42: 1035–1044.

Beggan, C.; Woulfe, M.; Young, P.; Byrne, G. (1999) Using acoustic emission to predict surface quality. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15: 737–742.

Benardos, P.G.; Vosniakos, G.C. (2002) Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 18: 343–354.

Benardos, P.G.; Vosniakos, G.C. (2003) Predicting surface roughness in machining: a review. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, 43: 833-844.

Bhowmick, S.; Alpas, A.T. (2011) The role of diamond-like carbon coated drills on minimum quantity lubrication drilling of magnesium alloys. *Surface & Coatings Technology*, 205(23-24): 5302-5311.

Bhowmick, S.; Lukitsch, M.J.; Alpas, A.T. (2010) Dry and minimum quantity lubrication drilling of cast magnesium alloy (AM60). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(5): 444-457.

Blawert, C.; Hort, N.; Kainer, K.V. (2004) Automotive applications of magnesium and its alloys. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 57(4): 397-408.

Bouacha, K.; Yallese, M.A.; Mabrouki, T.; Rigal, J-F. (2010) Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 28: 349–361.

Braga, D.U.; Diniz, A.E.; Miranda, G.W.A.; Coppini, N.L. (2002) Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminum–silicon alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 122(1): 127-138.

Çakır, O.; Kiyak, M.; Altan, E. (2004) Comparison of gases applications to wet and dry cuttings in turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 153–154: 35-41.

Carlyle, W.M.; Montgomery, D.C.; Runger, G.C. (2000) Optimization problem and method in quality control and improvement. *Journal of Quality Technology*, 32: 1–17.

Carrilero, M.S.; Bienvenido, R.; Sánchez J.M.; Álvarez, M.; González, A.; Marcos, M. (2002) A SEM and EDS insight into the BUL and BUE differences in the turning processes of AA2024 Al–Cu alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(2): 215-220.

Carou, D. (2013) Estudio experimental para determinar la influencia de la refrigeración/lubricación en la rugosidad superficial en el torneado intermitente a baja velocidad de piezas de magnesio. Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería de Construcción y Fabricación, UNED, Madrid.

Catón, P.D. (1991) Magnesium-an old material with new applications. *Materials Design*, 2(6): 309-316.

Chawla, S.L.; Gupta, R.K. (1993) *Materials selection for corrosion control*. ASM International, Materials Park, Ohio.

Chen, L. (2008) Study on prediction of surface quality in machining process. *Journal of Materials Processing Technology*, 205: 439-450.

Chen, Y.T.; Kumara, S.R.T. (1998) Fuzzy logic and neural network for design of process parameters: A grinding process application. *International Journal of Production Research*, 36: 395–415.

Chen, C.-C.A.; Liu, W.C.; Duffie, N.A. (1998) A surface topography model for automated surface finishing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38: 543–550.

Chen, J.C.; Savage, M. (2001) Fuzzy-net-based multilevel in-process surface roughness recognition system in milling operations. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17: 670–676.

Chen, M.C.; Su, C.T. (1998) Optimization of machining conditions for turning cylinder stocks into continuous finish profiles. *International Journal of Production Research*, 36: 2115–2130.

Chen, M.C.; Tsai, D.M. (1996) A simulated annealing approach for optimization of multi-pass turning operations. *International Journal of Production Research*, 34: 2803–2825.

Cherubini, F.; Raugei, M.; Ulgiati, S. (2008) LCA of magnesium production: Technological overview and worldwide estimation of environmental burdens. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(8-9): 1093-1100.

Chien, W.T.; Chou, C.Y. (2001) The predictive model for machinability of 304 stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 118: 442–447.

Coca, P.; Rosique, J. (1992) *Ciencia de materiales*. Ediciones Pirámide, Madrid.

Coit, D.W.; Jackson, B.T.; Smith, A.E. (1998) Static neural network process models: Considerations and case studies. *International Journal of Production Research*, 36: 2953–2967.

Coker, S.A.; Shin, Y.C. (1996) In-process control of surface roughness due to tool wear using a new ultrasonic system. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 36: 411–422.

Comisión Europea (2007) Informe de la Comisión, al Parlamento Europeo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de Regiones sobre la aplicación de la Directiva 2000/53/CE relativa a los vehículos al final de su vida útil durante el periodo 2002-2005. Comisión de las Comunidades Europeas.

Correa, M.; Bielza, C.; Pamies-Teixeira, J. (2009) Comparison of Bayesian networks and artificial neural networks for quality detection in a machining process. *Expert Systems with Applications*, 36: 7270–7279.

Cus, F.; Balic, J. (2003) Optimization of cutting process by GA approach. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 19, 113–121.

Cus, F.; Zuperl, U. (2006) Approach to optimization of cutting conditions by using artificial neural networks. *Journal of Materials Processing Technology*, 173: 281-290.

Czerwinski, F. (2008) Magnesium injection moulding. Springer Science Business Media, LLC, Boston.

Dahlman, P.; Gunnberg, F.; Jacobson, M. (2004) The influence of rake angle, cutting feed and cutting depth on residual stresses in hard turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 147: 181–184.

Davidson, M.J.; Balasubramanian, K.; Tagore, G.R.N. (2008) Surface roughness prediction of flow-formed AA6061 alloy by design of experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, 202: 41-46.

Davim, J.P. (2001) A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, 116: 305–308.

Davies, G. (2003) Magnesium. *Materials for automotive bodies*, Elsevier, London.

Davim, J.P.; Gaitonde, V.N.; Kamik, S.R. (2008) Investigations into the effect of cutting conditions on surface roughness in turning of free machining steel by ANN models. *Journal of Materials Processing Technology*, 205: 16-23.

De Agustina, B.; Saá, A.; Marcos, M.; Rubio, E.M. (2011) Analysis of the machinability of aluminium alloys UNS A97050-T7 and UNS A92024-T3 during short dry turning tests. *Advanced Materials Research*, 264-265: 931-936.

De Damborenea, J. (2007) *Nuevos materiales en la sociedad del siglo XXI*, capítulo 2: Nuevos materiales metálicos. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas CNIM-CSIC, Madrid.

Deetz, J. (2005) The use of wrought magnesium in bicycles. *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 57(5): 50-53

Denkena, B.; Lucas, A. (2007) Biocompatible magnesium alloys as absorbable implant material. Institute of Production Engineering and Machine Tools, University of Hannover, Hannover.

Department of Trade and Industry- U.K. (2005) MAG TECH 1: Magnesium alloys and processing technologies for lightweight transport applications – a mission to Europe. Global Watch Mission Report, september/october 2004.

Dhar, N.R.; Paul, S.; Chattopadhyay, A.B. (2002) The influence of cryogenic cooling on tool wear, dimensional accuracy and surface finish in turning AISI 1040 and E4340C steels. *Wear*, 249(10-11): 932-942.

DIN 4760 (1982) Form deviations; concepts; classification system. Deutsches Institut Fuer Normung.

Diniz, A.E.; Filho, J.C. (1999) Influence of the relative positions of tool and workpiece on tool life, tool wear and surface finish in the face milling process. *Wear*, 232: 67–75.

Diniz, A.E.; Gomes, D.M.; Braghini, A.Jr. (2005) Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 159: 240.

Dong, M.; Wang, N. (2011) Adaptive network-based fuzzy inference system with leave-one-out cross-validation approach for prediction of surface roughness. *Applied Mathematical Modeling*, 35: 1024–1035.

Du, J.; Han, W.; Peng, Y. (2010) Life cycle greenhouse gases, energy and cost assessment of automobiles using magnesium from Chinese Pidgeon process. *Journal of Cleaner Production*, 18(2): 112-119.

Dureja, J.S.; Gupta, V.K.; Sharma, V.S. and Dogra, M. (2009) Design optimization of cutting conditions and analysis of their effect on tool wear and surface roughness during hard turning of AISI-H11 steel with a coated—mixed ceramic tool. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 223, 11: 1441-1453.

Ehmann, K.F.; Hong, M.S. (1994) A generalized model of the surface generation process in metal cutting. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 43: 483–486.

El-Sinawi, A.H.; Kashani, R. (2005) Improving surface roughness in turning using optimal control of tool's radial position. *Journal of Materials Processing Technology*, 167: 54–61.

Eliezer, D.; Aghion, E.; Froes, F.H. (1998) Magnesium science, technology and applications. *Advanced Performance Materials*, 5(3): 201–212.

Eliezer, D.; Alves, H. (2002) Corrosion and oxidation of magnesium alloys. *Handbook of materials selection*, John Wiley & Sons Inc., New York.

Ezilarasan, C.; Senthil, V.S.; Velayudham, A.; Palanikumar, K (2011) Modeling and analysis of surface roughness on machining of Nimonic C-263 alloy by PVD coated carbide insert. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21: 1986-1994.

Fang, F.Z.; Lee, L.C.; Liu, X.D. (2005) Mean flank temperature measurement in high speed dry cutting of a magnesium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 167(1): 119-123.

Feng, C.X.J.; Wang, X. (2002) Development of empirical models for surface roughness prediction in finish turning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 20: 348–356.

Friedrich, H.E.; Mordike, B.L. (2006) *Magnesium technology: metallurgy, design data-automotive applications*. Springer Science & Business Media, Berlin.

Froes, F.H.; Eliezer, D.; Aghion, E. (1998). The science, technology, and applications of magnesium. *Journal Of the Minerals, Metals & Materials Society*, 50(9): 30-34.

Fuh, K.; Wu, C.F. (1995) A proposed statistical model for surface quality prediction in end milling of Al alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 35: 1187–1200.

Garcés, G.; Pérez, P. (2009) Nuevos avances en el moldeo de aleaciones de magnesio. *Revista digital Deformación y Chapa*, Diciembre 2009 [fecha de consulta: 13 Diciembre 2014]. Disponible en: <<http://www.interempresas.net/Deformacion-y-chapa/Articulos/36007-Nuevos-avances-en-el-moldeo-de-aleaciones-de-magnesio.html>>.

Gariboldi, E. (2003) Drilling a magnesium alloy using PVD coated twist drills. *Journal of Materials Processing Technology*, 134(3): 287-295.

- Ghani, A.K.; Choudhury, I.A. (2002) Study of tool life, surface roughness and vibration in machining nodular cast iron with ceramic tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 127: 17–22.
- Gil, F.J.; Manero, J.M.; Rodriguez, D.; Aparicio, C. (2001) *Aleaciones ligeras*. Ediciones de la Universidad Politécnica de Cataluña S.L., Barcelona.
- Glover, F. (1990) Tabu search: A tutorial. *Interfaces*, 20: 74–94.
- González, S.; Pellicer, E.; Fornell, J.; Blanquer, A.; Barrios, L.; Ibañez, E.; Solsona, P.; Suriñach, S.; Baró, D.; Nogués, C.; Sort, J.(2012) Improved mechanical performance and delayed corrosion phenomena in biodegradable Mg-Zn-Ca alloys through Pd-alloying. *Journal of the Mechanical Behaviour of Biomedical Materials*, 6: 53-62.
- Grzesik, W. (1996) A revised model for predicting surface roughness in turning. *Wear*, 194: 143–148.
- Grzesik, W.; Brol, S. (2003) Hybrid approach to surface roughness evaluation in multistage machining processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 134: 265–272.
- Grzesik, W. (2008) *Advanced machining processes of metallic materials*, Elsevier, Amsterdam.
- Gupta, A.; Singh, H.; Aggarwal, A. (2011) Taguchi-fuzzy multi output optimization (MOO) in high speed CNC turning of AISI P-20 tool steel. *Expert Systems with Applications*, 38: 6822–6828.
- Gutiérrez, J. (2013) Diversidad energética en un transporte sostenible. 1^{er} Simposio FUNSEAM: La sostenibilidad de los combustibles. © Repsol, Dirección de Tecnología, Enero 2013 [fecha de consulta: 3 Junio 2014]. Disponible en: <<http://www.funseam.com/files>>.
- Hagiwara, M.; Chen, S.; Jawahir, I.S. (2009) Contour finish turning operations with coated grooved tools: Optimization of machining performance. *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 332-342.
- Hashmi, K.; El Baradie, M.A.; Ryan, M. (1998) Fuzzy logic based intelligent selection of machining parameter. *Computers & Industrial Engineering*, 35: 571–574.

Hassan, G.A.; Suliman, S.M.A. (1990) Experimental modeling and optimization of turning medium carbon steel. *International Journal of Production Research*, 28: 1057–1065.

Hausmann, C.; Beffort, O.; Polasek, V.; Degischer, H.P.; Schulz, P.; Ristow, L. (1998) Manufacturing of magnesium structures selectively reinforced by MMC inserts. *Proceedings of 4th International Conference on Magnesium alloy and their applications*, April 28-30. Wolfsburg, Germany.

Heath, P.J. (2001) Developments in applications of PCD tooling. *Journal of Materials Processing Technology*, 116(1): 31-38.

Herraiz, M. (2012) General Motors inicia una investigación para emplear magnesio en la producción de vehículos, Octubre 2012 [fecha de consulta: 21 Febrero 2014]. Disponible en: < <http://www.tecmovia.com/2012/10/24/>>.

Ho, S.-Y.; Lee, K.-C.; Chen, S.-S.; Ho, S.-J. (2002) Accurate modeling and prediction of surface roughness by computer vision in turning operations using an adaptive neuro-fuzzy inference system. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42: 1441–1446.

Ho, W.-H.; Tsai, J.-T.; Lin, B.-T.; Chou, J.-H. (2009) Adaptive network-based fuzzy inference system for prediction of surface roughness in end milling process using hybrid Taguchi-genetic learning algorithm. *Expert Systems with Applications*, 36: 3216–3222.

Holland, J. H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT Press, Massachusetts.

Huang, J.; Arbel, T.; Ligeski, L.; McCaffey, J.; Kulkarni, S.; Jones, J.; Pollock, T.; Decker, R.; LeBeau, S. (2010) On mechanical properties & microstructure of TTMP wrought Mg alloys. *Magnesium Technology 2010*, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society): 489-493.

Hung, N.P.; Loh, N.L.; Xu, Z.M. (1996) Cumulative tool wear in machining metal matrix composites. Part II: Machinability. *Journal of Materials Processing Technology*, 58: 114-120.

ICAO (2013) Environmental report. International Civil Aviation Organization ICAO, October 2013.

Inspektor, A.; Bauer, C.E.; Oles, E.J. (1994) Superhard coatings for metal cutting applications. *Surface and Coatings Technology*, 68-69: 359-368.

Ip, W.L.R. (1998) A fuzzy basic material removal optimization strategy for sculptured surface machining using ball-nosed cutters. *International Journal of Production Research*, 36: 2553-2571.

ISO 16220:2005 (2005) Magnesium and magnesium alloys - Magnesium alloy ingots and castings. International Organization for Standardization, Geneva.

ISO 16220:2005/Amd 1:2007 (2007) Magnesium and magnesium alloys - Magnesium alloy ingots and castings. Amendment 1: Additional alloys. International Organization for Standardization, Geneva.

ISO 1832:2012 (2012) Indexable inserts for cutting tools - Designation. International Organization for Standardization, Geneva.

ISO 3685-1993 (1993) Tool-life testing with single-point turning tools. International Organization for Standardization, Geneva.

Jang, D.Y.; Choi, Y.G.; Kim, H.G.; Hsiao, A. (1996) Study of the correlation between surface roughness and cutting vibrations to develop an on-line roughness measuring technique in hard turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 36: 453-464.

Javadpour, R.; Knapp, G.M. (2003) A fuzzy neural network approach to machine condition monitoring. *Computers & Industrial Engineering*, 45: 323-330.

Jiao, Y.; Lei, S.; Pei, Z.J.; Lee, E.S. (2004) Fuzzy adaptive networks in machining process modeling: Surface roughness prediction for turning operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44: 1643–1651.

Khan, Z.; Prasad, B.; Singh, T. (1997) Machining condition optimization by genetic algorithms and simulated annealing. *Computers Operations Research*, 24(7): 647-657.

Karayel, D. (2009) Prediction and control of surface roughness in CNC lathe using artificial neural network. *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 3125-3137.

Keipke, R.; Buchkremer-Hermanns, H.; Weiß, H.; Ren, H. (1997). Machining of hypereutectic Al-Si alloy with CVD diamond coated Si₃N₄. Inserts. *Materials and Manufacturing Processes*, 13(4): 603-610.

Kim, J.J.; Han, D.S. (2008) Recent developments and applications alloys in the Hyundai and Kia motors corporation. *Materials transactions*, 49(5): 894-897.

Kirby, E.D.; Chen, J.C.; Zhang, J.Z. (2006) Development of a fuzzy-nets-based in-process surface roughness adaptive control system in turning operations. *Expert Systems with Applications*, 30: 592-604.

Kirby, E.D.; Chen, J.C. (2007) Development of a fuzzy-nets-based surface roughness prediction system in turning operations. *Computers & Industrial Engineering*, 53: 30-42.

Kirkpatrick, K.; Gelett, C.D.; Vecchi, M.P. (1983) Optimization by simulated annealing. *Sciences*, 220: 671–680.

Kleiner, M.; Geiger, M.; Klaus, A. (2003) Manufacturing of lightweight components by metal forming. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52(2): 521-542.

Klocke, F.; Eisenblätter, G. (1997) Dry cutting. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 46(2): 519-526.

Kolahan, F.; Liang, M. (1996) A tabu search approach to optimization of drilling operations. *Computers & Industrial Engineering*, 31: 371–374.

Kopac, J.; Bahor, M.; Sokovic, M. (2002) Optimal machining parameters for achieving the desired surface roughness in fine turning of cold pre-formed steel workpieces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42: 707–716.

Kulekci, M.K. (2008) Magnesium and its alloys applications in automotive industry. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39: 851–865.

Kumar, K.A.; Ratnam, Ch.; Murthy, B.S.N.; Ben, B.S.; Reddy, K.R.R.M. (2012) Optimization of surface roughness in face turning operation in machining of EN-8. *International Journal of Engineering Science & Advanced Technology*, 2(4): 807-812.

Kuo, R.Y.; Cohen, P.H. (1998) Manufacturing process control through integration of neural network and fuzzy model. *Fuzzy Sets and Systems*, 98: 15–31.

Kwon, Y.; Fisher, G.W. (2002) Fuzzy neuron adaptive modeling to predict surface roughness under process variations in CNC turning. *Journal of Manufacturing Systems*, 21(6): 440-450.

Lalwani, D.I.; Mehta, N.K.; Jain, P.K. (2008) Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel. *Journal of Material Processing Technology*, 206: 167-179.

Lee, K.Y.; Kang, M.C.; Jeong, Y.H.; Lee, D.W. Kim, J.S. (2001) Simulation of the surface roughness and profile in high speed end milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 113: 410–415.

Lahres, M.; Müller-Hummel, P.; Doerfel, O. (1997) Applicability of different hard coatings in dry milling aluminium alloys. *Surface and Coatings Technology*, 91(1-2): 116-121.

Li, X.P.; lynkaran, K.; Nee, A.Y.C. (1999) A hybrid machining simulator based on predictive theory and neural network modeling. *Journal of Materials Processing Technology*, 89–90: 224–230.

Lin, S.C.; Chang, M.F. (1998) A study on the effects of vibrations on the surface finish using a surface topography simulation model for turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38: 763–782.

Lin, W.S.; Lee, B.Y.; Wu, C.L. (2001) Modeling the surface roughness and cutting force for turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 108: 286–293.

Lou, S.J.; Chen, J.C. (1997) In-process surface recognition of a CNC milling machine using the fuzzy nets method. *Computers & Industrial Engineering*, 33: 401–404.

Magnesium Elektron (2012) Service & innovation in magnesium. E-design manual [en línea] [fecha de consulta: 3 Enero 2015]. Disponible en: <<http://www.serviceandinnovationinmagnesium.com>>.

Manna, A.; Bhattacharyya, B. (2004) Investigation for optimal parametric combination for achieving better surface finish during turning of Al/SiC-MMC. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 23: 658–665.

McKeen, T. (2010) *Advanced gas cooled reactors. Nuclear energy materials and reactors (Vol.2)*, ADI Limited, Fredericton, Canada. [fecha de consulta: 13 Diciembre 2014]. Disponible en: <<http://www.eolss.net/sample-chapters/c08/e3-06-02-05.pdf>>.

Mansour, A.; Abdalla, H. (2002) Surface roughness model for end milling: a semi-free cutting carbon casehardening steel (EN32) in dry condition. *Journal of Materials Processing Technology*, 124: 183–191.

Martín, R.; Rodríguez de Francisco, P.; Sanz, A.; González, I. (2003) *Sistemas de Producción*, ETSI Aeronáuticos, Madrid.

Matsumura, T.; Sekiguchi, H.; Usui, E. (1996) An evaluation approach of machine tool characteristics with adaptive prediction. *Journal of Materials Processing Technology*, 62: 440-447.

MATWEB (s.f.) *Material property data [en línea]* [fecha de consulta: 11 Septiembre 2014]. Disponible en: <<http://www.matweb.com>>.

Mayers, R.H.; Carter, W.H. (1973) Response surface technique for dual response system. *Technometrics*, 15: 301–317.

Melde, K.F. (1959) Magnesium in aircraft tooling. *Institution of Production Engineers Journal*, 38(9): 480-484.

Mg Showcase issue 1 (2007) International Magnesium Association, May 2007.

Mg Showcase issue 3 (2007) International Magnesium Association, December 2007.

Mg Showcase issue 4 (2008) International Magnesium Association, March 2008.

Mg Showcase issue 19 (2012) International Magnesium Association, Spring 2012

Montgomery, D.C. (2005) *Design and analysis of experiments*, 6th Edition, Wiley: New York.

Mordike, B.L.; Ebert, T. (2001) Magnesium. Properties – applications – potential. *Materials Science and Engineering: A*, 302: 37-45.

Mukherjee, I.; Ray, P.K. (2006) A review of optimization techniques in metal cutting processes. *Computers & Industrial Engineering*, 50: 15–34.

Mukherjee, I.; Ray, P.K. (2008) Optimal process design of two-stage multiple responses grinding processes using desirability functions and metaheuristic technique. *Applied Soft Computing*, 8: 402–421

Muñoz, C.; Vidal, R.; Justel, D.; Garrarín, D.; Franco, V. (2009) New strategies for improved End-of-Life of vehicles. 5th International Conference on Industrial Ecology, 2009 ISIE Conference, Lisbon.

Muñoz, C.; Justel, D.; Sanfelix, J.; Franco, V.; Garraín, D.; Vidal, R (2010) Estimación de la reducción del consumo de combustible en vehículos como consecuencia de la reducción del peso. XIV Congreso Internacional de Proyectos de Ingeniería: 2357-2368, Madrid.

Muñoz-Escalona, P.; Cassier, Z. (1998) Influence of the critical cutting speed on the surface finish of turned steel. *Wear*, 218: 103–109.

NADCA (2009) Product specification standards for die castings. North American Die Casting Association, 7th Edition, Wheeling, Illinois.

Nalbant, M.; Gökkaya, H.; Sur, G. (2007) Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. *Materials and Design*, 28: 1379–1385.

Nandi, A.K.; Pratihari, D.K. (2004) An expert system based on FBFN using a GA to predict surface finish in ultra-precision turning. *Journal of Material Processing Technology*, 155-156: 1150-1156.

Neşeli, S.; Yalidz, S.; Türkeş, E. (2011) Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology. *Measurement*, 44: 580–587.

Noordin, M.Y.; Venkatesh, V.C.; Sharif, S.; Elting, S.; Abdullah, A. (2004) Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide tools when turning AISI 1045 steel. *Journal of Material Processing Technology*, 145: 46–58.

Nouari, M; List, G; Girot, F; Coupard, D. (2003) Experimental analysis and optimisation of tool wear in dry machining of aluminium alloys. *Wear*, 255: 1359-1368.

Oliveira, A. J.; Diniz, A. E.; Ursolino, D. J. (2009) Hard turning in continuous and interrupted cut with PCBN and whisker-reinforced cutting tools. *Journal of Material Processing Technology*, 209: 5762.

OPTI (2003) *Materiales para el transporte y la energía. Tendencias tecnológicas a medio y largo plazo*. Observatorio de prospectiva tecnológica industrial, Ministerio de Ciencia y Tecnología.

Ostrovsky, I.; Henn, Y. (2007) Present state and future of magnesium application in aerospace industry. International Conference "New challenges in aeronautics", ASTEC'07, August 19-22, Moscow.

Outeiro, J.C.; Rossi, F.; Fromentin, G.; Poulachon, G.; Germain, G.; Batista, A.C. (2013) Process mechanics and surface integrity induced by dry and cryogenic machining of AZ31B-O magnesium alloy. *Procedia CIRP*, 8: 487 – 492.

Petri, K.L.; Billo, R.E.; Bidanda, B. (1998) A neural network process model for abrasive flow machining operations. *Journal of Manufacturing Science*, 17: 52–64.

Plano, S. (2002) NANOMAG: Development of innovative nanocomposites coatings for magnesium component protection. Sustainable production: the role of nanotechnologies, 5th Framework Program, Octubre 2002, Copenhagen.

Polmear, I.J. (2005) *Light alloys. From traditional alloys to nanocrystals*. 4th Edition, Elsevier-Butterworth-Heinemann, Oxford, United Kingdom.

Polmear, I.J. (1995) *Light Alloys. Metallurgy of the light metals*, 3rd Edition, Arnold, London.

Pu, Z.; Outeiro, J.C.; Batista, A.C.; Dillon Jr, O.W.; Puleo, D.A., Jawahir, I.S. (2012) Enhanced surface integrity of AZ31B Mg alloy by cryogenic machining towards improved functional performance of machined components. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 56: 17-27.

Rahim, E.A.; Sasahara, H. (2011) An analysis of surface integrity when drilling Inconel 718 using palm oil and synthetic ester under MQL condition. *Machining Science and Technology*, 15(1): 76-90.

Rajshekhar, L.; Prasad, K.; Mohankumar G. C. (2013) Machinability studies of low alloy steels by face turning method: An experimental investigation. *Procedia Engineering*, 64: 632 – 641.

Rao, D.N.; Krishna, P.V. (2008) The influence of solid lubricant particle size on machining parameters in turning. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48(1): 107–111.

Rahman, M.; Kumar, A.S.; Salam, M.U. (2002) Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42(5): 539–547.

Reddy, N.S.K.; Nouari, M.; Yang, M. (2010) Development of electrostatic solid lubrication system for improvement in machining process performance. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 50(9): 789–797.

Parlamento europeo y Consejo europeo (2007) Reglamento (CE) nº 715/2007 del Parlamento Europeo y del Consejo de 20 de junio de 2007 sobre la homologación de tipo de los vehículos de motor por lo que se refiere a las emisiones procedentes de turismos y vehículos comerciales ligeros (Euro 5 y Euro 6) y sobre el acceso a la información relativa a la reparación y el mantenimiento de los vehículos, Diario Oficial de la Unión Europea-DOUE de 29 de junio de 2007.

Robbe-Valloire, F.; Prat, M. (2008) A model for face-turned surface microgeometry. Application to the analysis of metallic static seals. *Wear*, 264: 980–989.

Ross, P.J. (1996) Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design, Mc-Graw Hill, New York.

Rubio, E.M.; Sáenz de Pipaón, J.M.; Villeta, M.; Sebastian, M.A. (2011) Study of surface roughness of pieces of magnesium UNS M11311 obtained by dry turning using ANOVA. *Advanced Materials Research*, 264-265: 967-972.

Rubio, E.M.; Valencia, J.L.; Carou, D.; Saá, A.J. (2012a) Inserts selection for intermittent turning of magnesium pieces. *Applied Mechanics and Materials*, 217-219: 1581-1591.

Rubio, E.M.; Valencia, J.L.; de Agustina, B.; Saá, A.J. (2014a) Tool selection based on surface roughness in dry facing repair operations of magnesium pieces. *International Journal of Materials and Product Technology*, 48(1-4): 116-134.

Rubio, E.M.; Valencia, J.L.; Carou, D.; Saá, A.J. (2014b) Comparative analysis of sustainable cooling systems in intermittent turning of magnesium pieces. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 15(5): 929-940.

Rubio, E.M.; Valencia, J.L.; Saá, A.J.; Carou, D. (2013) Experimental study of the dry facing of magnesium pieces based on the surface roughness. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 14(6): 995-1001.

Rubio, E.M.; Villeta, M.; Saá, A.J.; Carou, D. (2012b) Analysis of main optimization techniques in predicting surface roughness in metal cutting processes. *Applied Mechanics and Materials*, 217-219: 2171-2182.

Saá, A.J.; de Agustina, B.; Marcos, M.; Rubio, E.M. (2009) Experimental study of dry turning of UNS A92024-T3 aluminium alloy bars based on surface roughness. *Proceedings of the 3rd Manufacturing Engineering Society International Conference (MESIC)*, June 17-19, Alcoy, Spain.

Sáenz de Pipaón (2013) *Diseño y fabricación de probetas de componentes híbridos con aleaciones de magnesio para ensayos de mecanizado*. Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería de Construcción y Fabricación, UNED, Madrid.

Sáenz de Pipaón, J. M.; Rubio, E. M.; Villeta, M.; Sebastián, M.A. (2008) Influence of cutting conditions and tool coatings on the surface finish of magnesium workpieces obtained by dry turning, *Proceedings of the 19th International DAAAM Symposium*, October 22-25, Vienna.

Sáenz de Pipaón, J. M.; Rubio, M., E. M.; Villeta, M.; Sebastián, M.A. (2009) Innovative production machines and systems. *Proceedings of the 5th I*PROMS Virtual International Conference*, July 6-17, Scotland.

Sahin, Y.; Motorcu, A.R. (2008) Surface roughness model in machining hardened steel with cubic boron nitride cutting tool. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 26: 84–90.

Sahin, Y.; Sur, G. (2004) The effect of Al₂O₃, TiN and Ti(C,N) based CVD coatings on tool wear in machining metal matrix composites. *Surface and Coatings Technology*, 179(2-3): 349-355.

Sahoo, P.; Barman, T.K.; Routara, B.C. (2008) Fractal dimension modeling of surface profile and optimization in CNC end milling using response surface method. *International Journal of Manufacturing Research*, 3: 360-377.

Salahshoor M.; Guo Y.B. (2011) Surface integrity of biodegradable orthopaedic magnesium-calcium alloy by high-speed dry face milling. *Production Engineering*, 5: 641-650.

Sánchez, J.M.; Rubio, E.M.; Alvarez, M.; Sebastián, M.A.; Marcos, M. (2005) Microstructural characterisation of material adhered over cutting tool in the dry machining of aerospace alloys. *Journal of Materials Processing and Technology*, 164-165: 911-918.

Saravanan, R.; Ashokan, P.; Sachithanandam, M. (2001) Comparative analysis of conventional and non-conventional optimization technique for CNC-turning process. *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, 17: 471–476.

SAS® (2004) Statistical Analysis System software, version 9.1 for Windows, SAS Institute Inc., Cary, North Carolina.

Scheerer, H.; Hoche, H.; Broszeit, E.; Schramm, B.; Abele, E.; Berger, C. (2005) Effects of chromium to aluminium content on the tribology in dry machining using (Cr,Al)N coated tools. *Surface and Coatings Technology*, 200: 203-207.

Schumann, S. (2005) The paths and strategies for increased magnesium applications in vehicles. *Materials Science Forum*, 488-489: 1-8.

Seco (2014) Catalogue and technical guide.

Settireni, L.; Faga M.G. (2008) Nanostructured cutting tools coatings for machining titanium. *Machining Science and Technology*, 12(2): 158–169.

Shaji, S.; Radhakrishnan, V. (2003) An investigation on solid lubricant moulded grinding wheels. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43(9): 965-972.

Sharma, V.S.; Dogra, M.; Suri, N.M. (2009) Cooling techniques for improved productivity in turning. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49(6): 435-453.

Shokrani, A.; Dhokia, V.; Newman, S.T. (2012) Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 57: 83–101.

Schultz, M. (1985) *Body/Chassis: a Century of Progress*. Popular Mechanics, 59.

Sreejith, P.S; Ngoi, B.K.A. (2000) Dry machining: Machining of the future. *Journal of Materials Processing Technology*, 101(1-3): 287-291.

Steenackers, G.; Presezniak, F.; Guillaume, P. (2009) Development of an adaptive response surface method for optimization of computation-intensive models. *Computers & Industrial Engineering*, 57: 847-855.

Suresh, P.V.S.; Venkateswara Rao, P.; Deshmukh, S.G. (2002) A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42: 675–680.

Taguchi, G. (1987) *System of experimental design*. American Supplier Institute, New York.

Tansel, I.N.; Gülmez, S.; Demetgul, M.; Aykut, Ş. (2011) Taguchi Method–GONNS integration: Complete procedure covering from experimental design to complex optimization. *Expert Systems with Applications*, 38: 4780–4789.

Tansel, I.N.; Ozcelik, B.; Bao, W.Y.; Chen, P.; Rincon, D.; Yang, S.Y.; Yenilmez, A. (2006) Selection of optimal cutting conditions by using GONNS. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46: 26-35.

Taramen, K. (1974) Multi machining output-multi independent variable turning research by response surface methodology. *International Journal of Production Research*, 12: 233–245.

Tempelman, E. (2011) Multi-parametric study of the effect of materials substitution on life cycle energy use and waste generation of passenger car structures. *Transportation Research Part D*, 16(7): 479-485.

Tharumarajah, A.; Koltun, P. (2007) Is there an environmental advantage of using magnesium components for light-weighting cars?, *Journal of Cleaner Production*, 15: 1007-1013.

Thiele, J.D.; Melkote, S.N. (1999) Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 94: 216–226.

Thomas, M.; Beuchamp, Y. (2003) Statistical investigation of modal parameters of cutting tools in dry turning. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43: 1093-1106.

Tomac, N.; Tønnessen, K. (1991) Formation of flank build-up in cutting magnesium alloys. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 40(1): 79.

Tönshoff, H.K.; Winkler, J. (1997) The influence of coating in machining of magnesium. Institute for production Engineering and Machine Tools, University of Hannover, Hannover.

Totemeier, T.C. (2004) Related designations, *Smithells metals reference book*, 8th Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, United Kingdom.

Tsai, Y.H.; Chen, J.C.; Lou, S.J. (1999) An in-process surface recognition system based on neural networks in end milling cutting operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39: 583–605.

Tzeng, Y.; Jean, M. (2005) Dimensional quality optimization of high-speed CNC milling process with dynamic quality characteristic. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 21: 506–517.

UNE-EN ISO 4287:1999 (1999). Especificación geométrica de productos (GPS) - Calidad superficial: Método del perfil. Términos, definiciones y parámetros del estado superficial, AENOR, Madrid.

UNE-EN ISO 4287:1999 / AC:2010 (2010). Especificación geométrica de productos (GPS) - Calidad superficial: Método del perfil. Términos, definiciones y parámetros del estado superficial, AENOR, Madrid.

UNE-EN ISO 4287:1999 / A1:2010 (2010). Especificación geométrica de productos (GPS) - Calidad superficial: Método del perfil. Términos, definiciones y parámetros del estado superficial. Modificación 1: Número de picos, AENOR, Madrid.

UNE-EN ISO 4288:1998 (1998) Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Reglas y procedimientos para la evaluación del estado superficial, AENOR, Madrid.

UNE-EN 1754:1998 (1998) Magnesio y aleaciones de magnesio. Ánodos, lingotes y piezas moldeadas de magnesio y de aleaciones de magnesio. Sistema de designación. Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid.

U.S. Geological Survey (2013) Mineral commodity summaries, January 2013, Reston, Virginia.

U.S. Geological Survey (2014) Mineral commodity summaries, February 2014, Reston, Virginia.

Vallejo, A. J.; Morales-Menendez, R. (2009) Cost-effective supervisory control system in peripheral milling using HSM. *Annual Reviews in Control*, 34(1): 155-162.

Varghese, S.; Radhakrishnan, V. (1994) A multi sensor approach to inprocess monitoring of surface roughness. *Journal of Materials Processing Technology*, 44: 353–362.

Velasco, M.A. (2011) Optimization of machining parameters in turning operations. *Intekhnia*, 6(2): 13-23.

Villeta, M.; Agustina, B.; Sáenz de Pipaón, J.M.; Rubio, E.M. (2012) Efficient optimization of machining processes based on technical specifications for surface roughness: Application to magnesium pieces in the aerospace industry. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(9-12): 1237-1246.

Villeta, M.; Rubio, E.M.; Sáenz de Pipaón, J.M.; Sebastián, M.A. (2011) Surface finish optimization of magnesium pieces obtained by dry turning based on Taguchi techniques and statistical tests. *Materials and Manufacturing Processes*, 26(12): 1503-1510.

Wang, J.; Liu, Y.B.; An, J.; Wang, L.M. (2008) Wear mechanism map of uncoated HSS tools during drilling die-cast magnesium alloy. *Wear*, 265(5-6): 685-691.

Wang, S.G.; Hsu, Y.L. (2005) One-pass milling machining parameter optimization to achieve mirror surface roughness. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 193(1): 177-181.

Wang, Z.Y.; Rajurkar, K.P. (2000) Cryogenic machining of hard-to-cut materials. *Wear*, 239(2): 168-175.

Weinert, K.; Inasaki, I.; Sutherland, J. W.; Wakabayashi, T. (2004) Dry machining and minimum quantity lubrication. *CIRP Annals–Manufacturing Technology*, 53(2): 511-537.

Weinert, K.; Lange, M. (2001) Machining of magnesium matrix composites. *Advanced Engineering Materials*, 3(12): 975-979.

Westengen, H. (2001) Magnesium alloys: properties and applications. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Elsevier, Oxford, United Kingdom.

Wikivalec (s.f.) Wikimedia commons [en línea] [fecha de consulta: 13 Diciembre 2014]. Disponible en: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Esquema_thixomolding.jpg>.

Wojtowicz, N.; Danis, I.; Monies, F.; Lamesle, P.; Chieragati, R. (2013) The influence of cutting conditions on surface integrity of a wrought magnesium alloy. *Procedia Engineering*, 63: 20-28.

Yan, C.; Bai, R.X.; Gu, Y.T.; Ma, W.J. (2006) Investigation on mechanical behaviour of AM60 magnesium alloys. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 31(2): 398-401.

Yang, W.H.; Tarng, Y.S. (1998) Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*, 84: 122–129.

Yildiz, Y.; Nalbant, M. (2008) A review of cryogenic cooling in machining processes. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48(9): 947-964.

Yuan, S.M.; Yan, L.T.; Liu, W.D.; Liu, Q. (2011) Effects of cooling air temperature on cryogenic machining of Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(3): 356-362.

Zain, A.M.; Haron, H.; Sharif, S. (2010a) Prediction of surface roughness in the end milling machining using Artificial Neural Network. *Expert Systems with Applications*, 37: 1755–1768.

Zain, A.M.; Haron, H.; Sharif, S. (2010b) Application of GA to optimize cutting conditions for minimizing surface roughness in end milling machining process. *Expert Systems with Applications*, 37: 4650–4659.

Zhao, N.; Hou, J.; Zhu, S. (2011) Chip ignition in research on high-speed face milling AM50A magnesium alloy. *Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE)*, Inner Mongolia.

Zimmerman, H.J. (1976) Description and optimization of fuzzy system. *International Journal of General Systems*, 2: 209–215.

ANEXOS

ANEXO I: CONVERSIÓN DE UNIDADES

A lo largo de la presente Tesis Doctoral, en lugar de utilizar las unidades del Sistema Internacional (SI), se han utilizado las unidades más típicas de talleres y catálogos de fabricantes por ser más intuitivas. En la siguiente tabla se recogen las equivalencias de las unidades empleadas para el avance, f , el régimen de giro del husillo, N , la profundidad de corte, d , la velocidad de avance, V_f , y la velocidad media de corte, v_m .

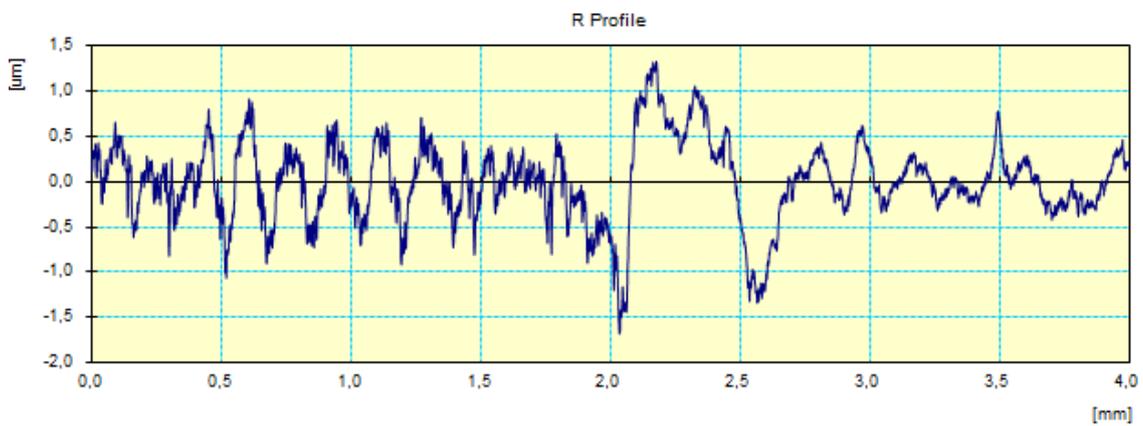
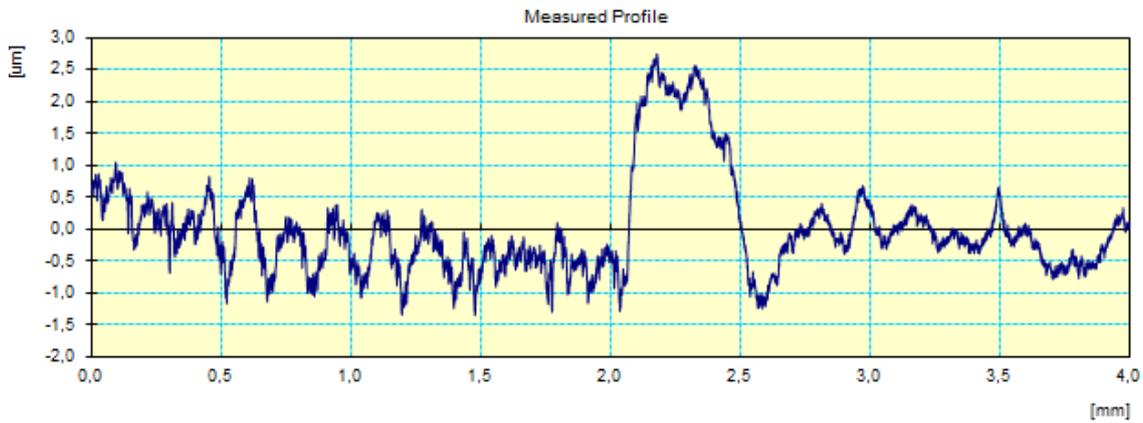
Tabla A1.1. Equivalencia de las unidades empleadas con las unidades del SI.

	Unidades empleadas	Conversión a unidades del SI
Avance (f)	mm/rev	1 mm/rev = $1/(2 * \pi * 1000)$ m/rad
Régimen de giro del husillo (N)	rpm	1 rpm = $(2 * \pi) / 60$ rad/s
Profundidad de corte (d)	mm	1 mm = 1/1000 m
Velocidad de avance (V_f)	mm/min	1 mm/min = $1/(60 * 1000)$ m/s
Velocidad media de corte (v_m)	m/min	1 m/min = 1/60 m/s

ANEXO II: MEDIDAS DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL

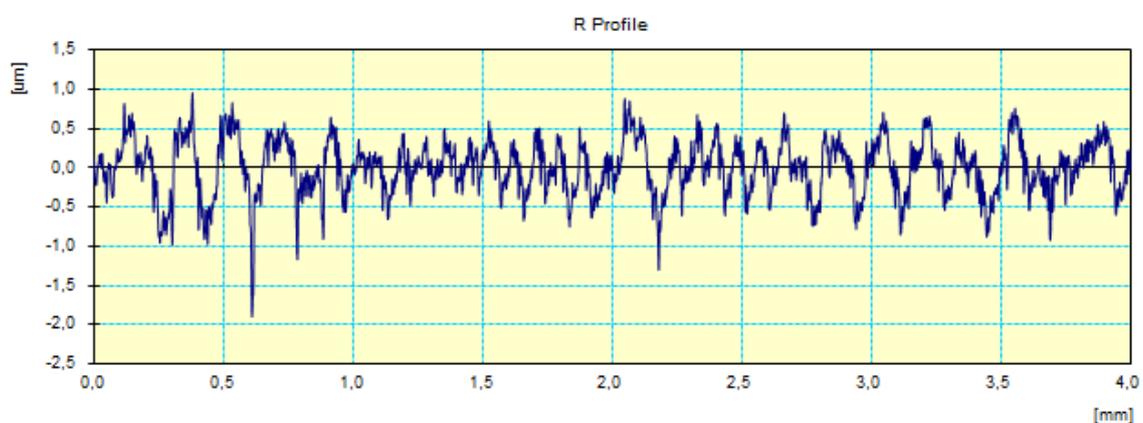
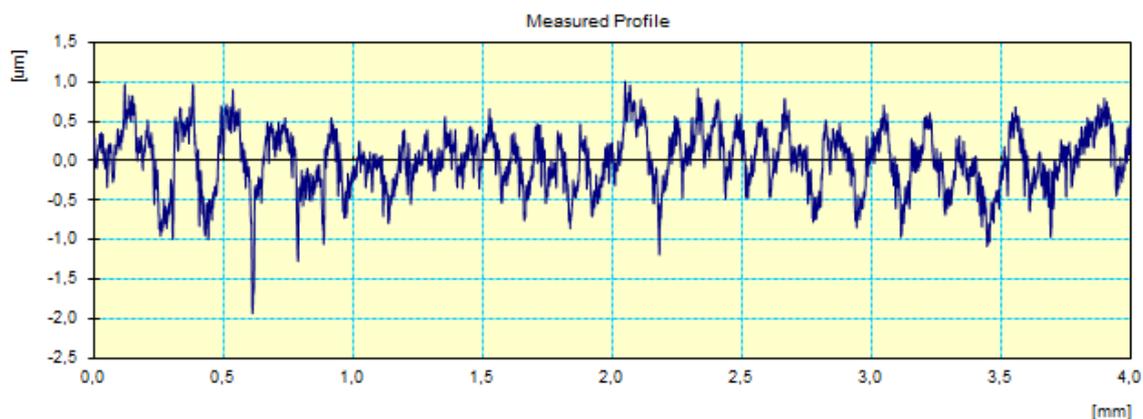
En el presente anexo se recogen los gráficos y valores de rugosidad superficial obtenidos en todos los ensayos para cada una de las replicaciones consideradas, tal y como han sido obtenidos del software del equipo de medición de rugosidad empleado (SJ401 de Mitutoyo). Las unidades de medida de la rugosidad superficial están expresadas en “um” en lugar de “ μm ”.

Ensayo nº1. Replicación 1



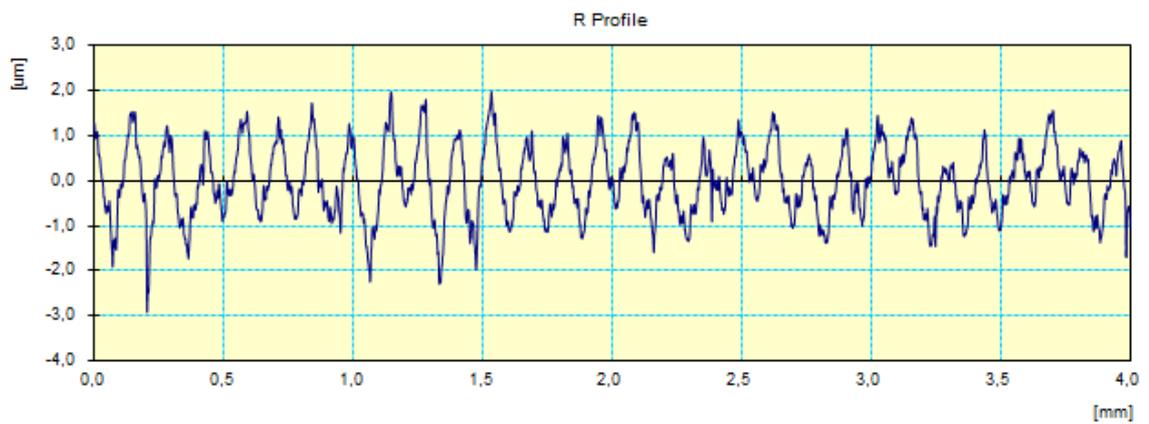
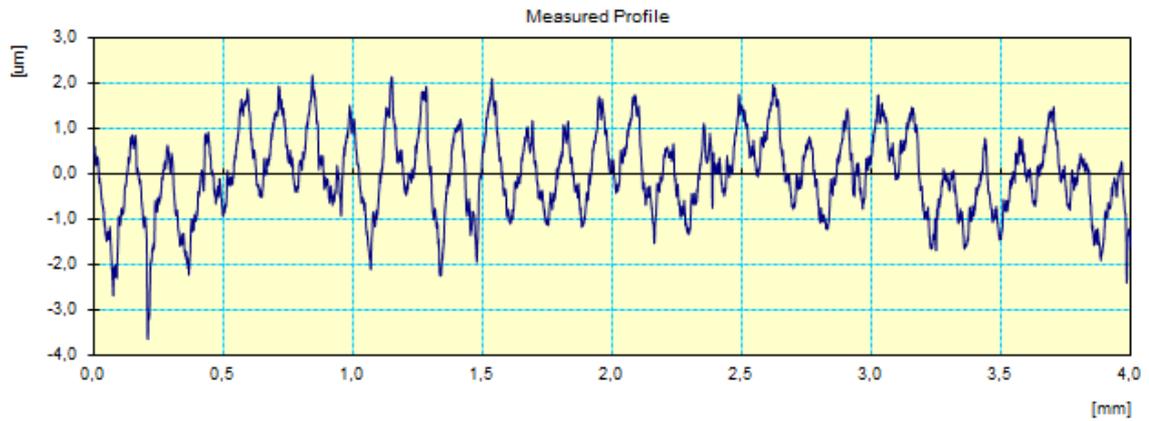
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800um	Filter	GAUSS
Ra	0.34um		
Rz	2.0um		
Rq	0.42um		

Ensayo nº1. Replicación 3



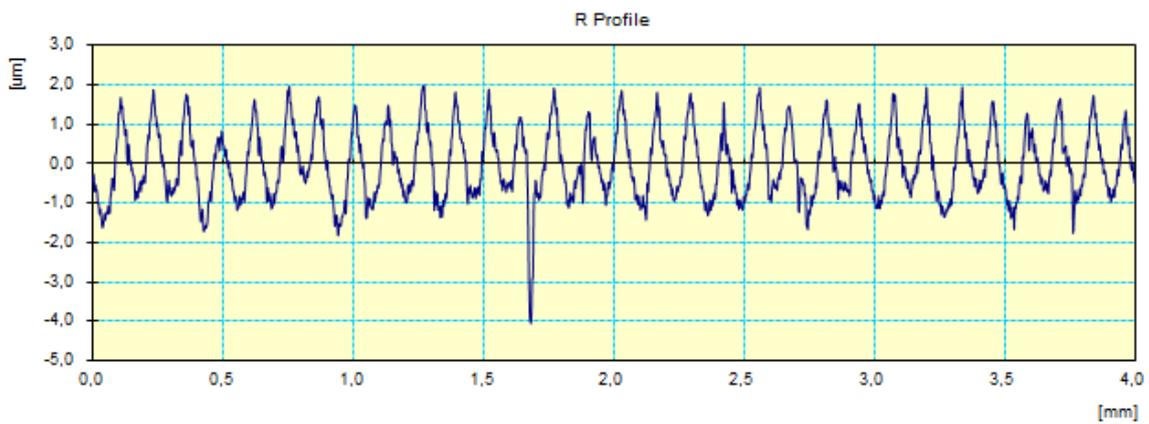
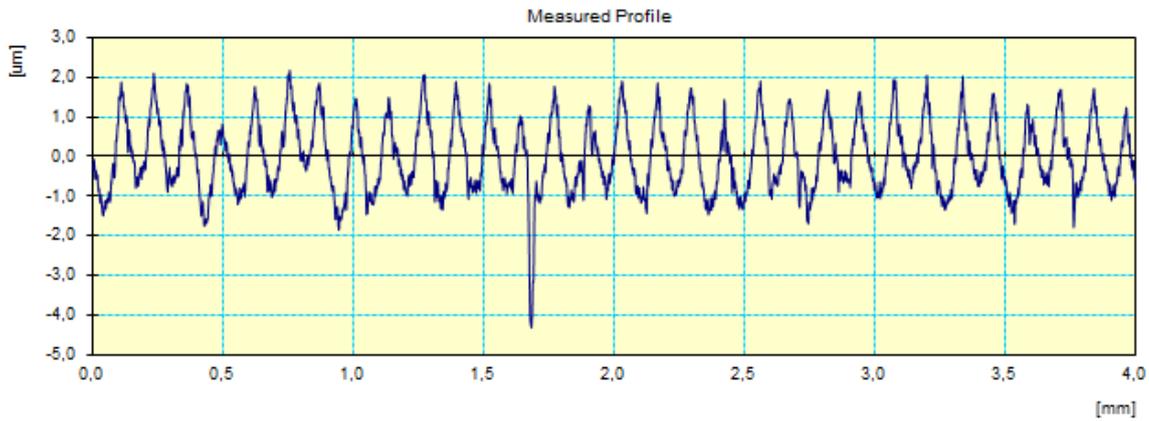
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	0.28µm		
Rz	2.0µm		
Rq	0.35µm		

Ensayo nº2. Replicación 1



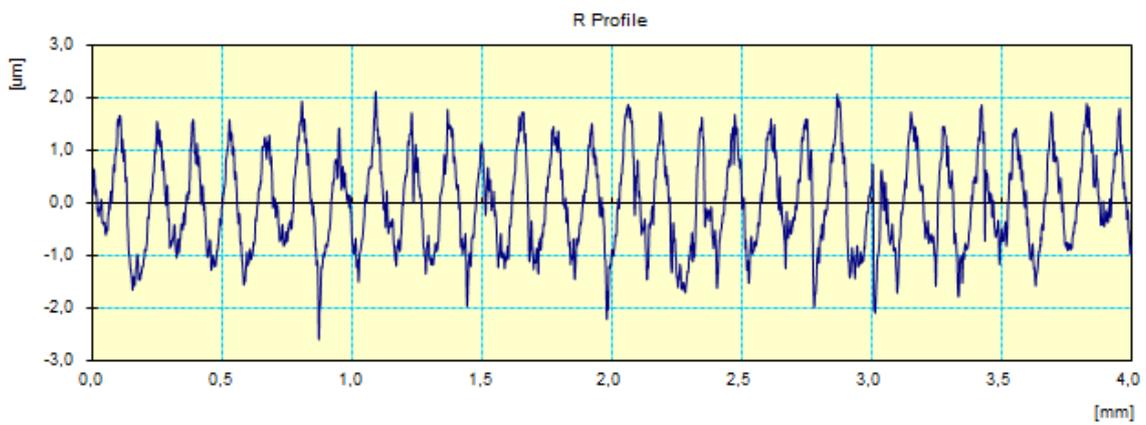
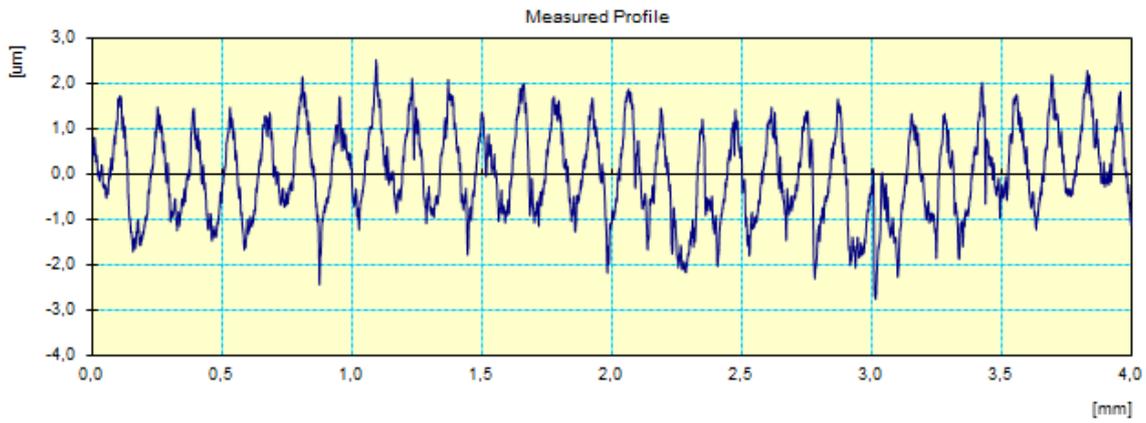
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	0.64µm		
Rz	3.6µm		
Rq	0.77µm		

Ensayo nº3. Replicación 3



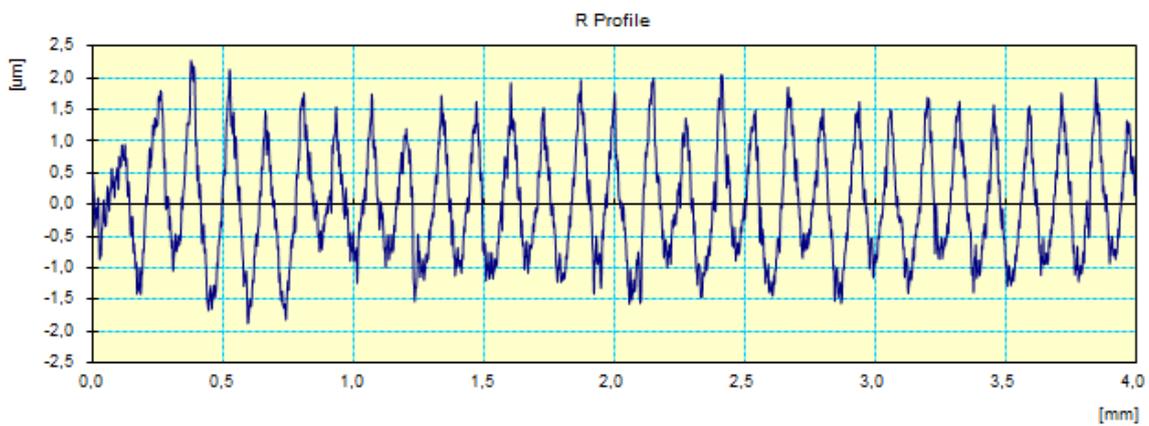
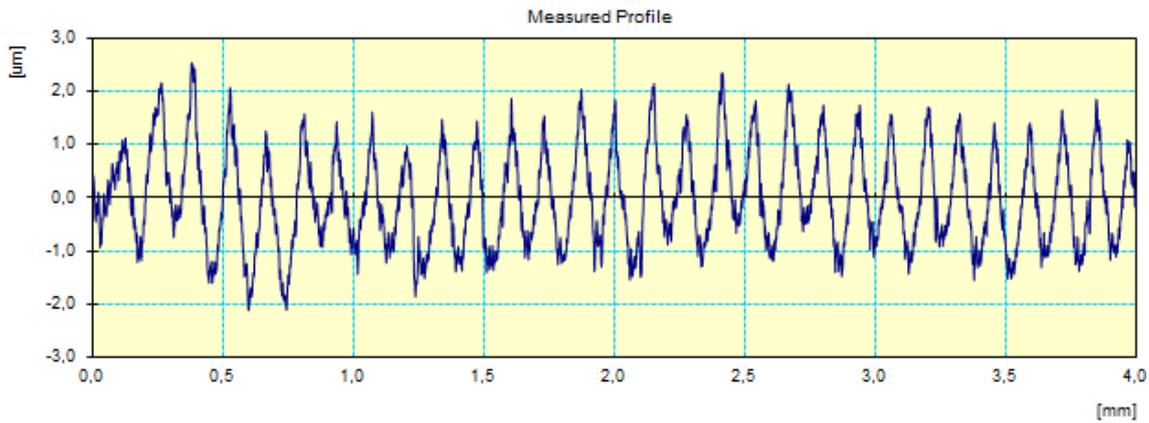
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800um	Filter	GAUSS
Ra	0.73um		
Rz	4.2um		
Rq	0.88um		

Ensayo nº4. Replicación 2



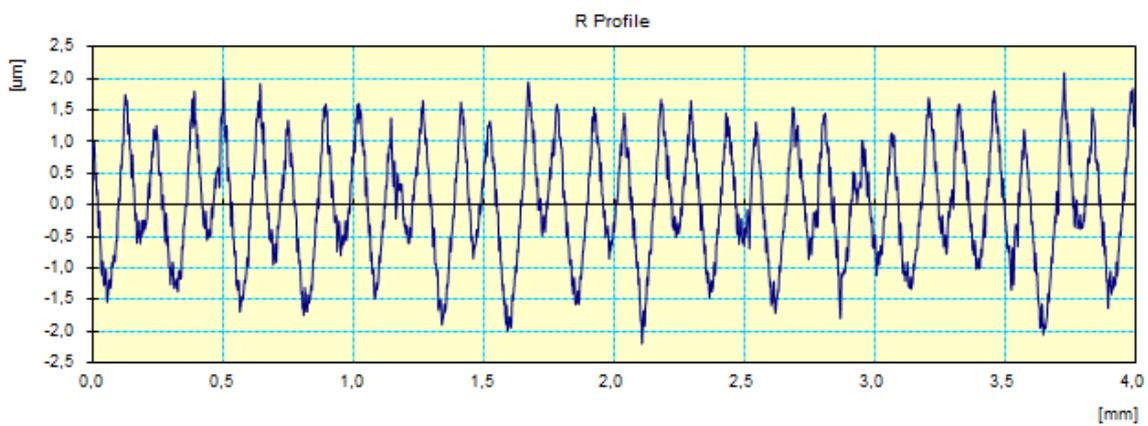
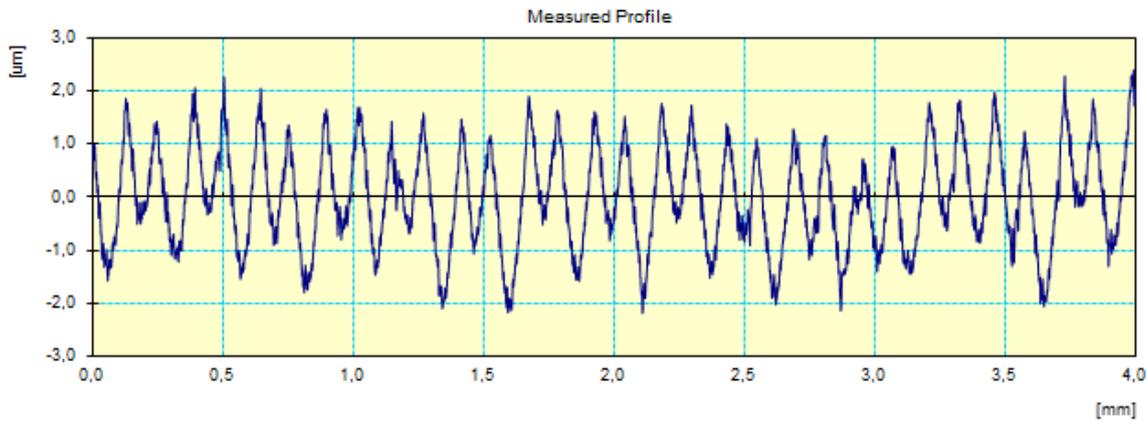
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	0.76µm		
Rz	4.0µm		
Rq	0.90µm		

Ensayo nº5. Replicación 1



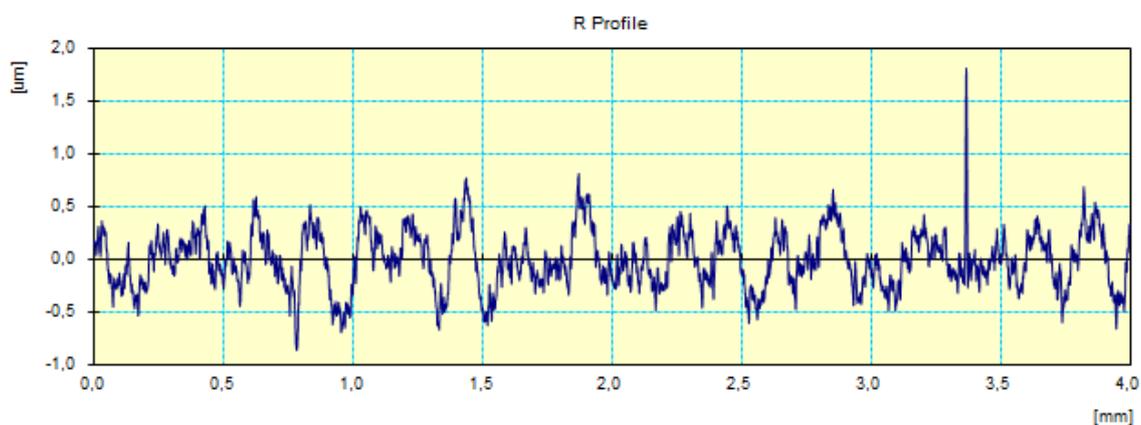
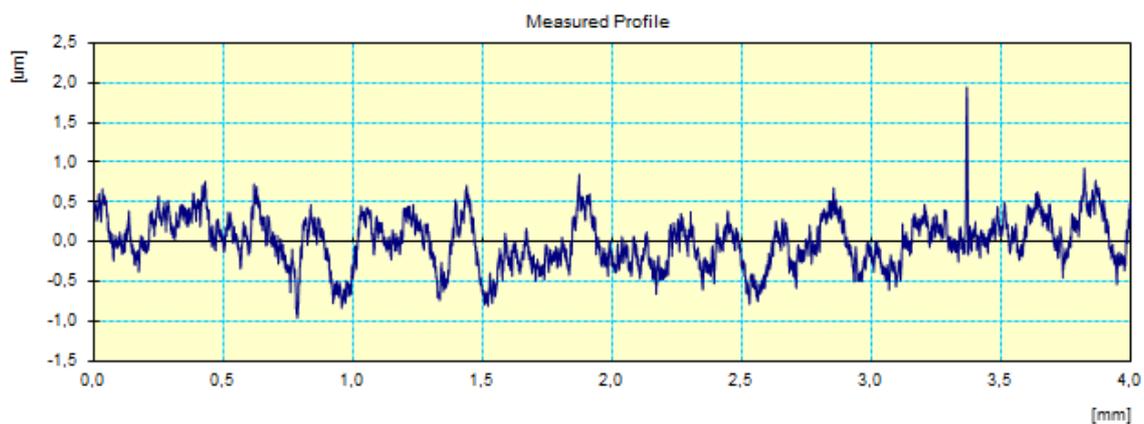
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	0.74µm		
Rz	3.6µm		
Rq	0.88µm		

Ensayo nº5. Replicación 3



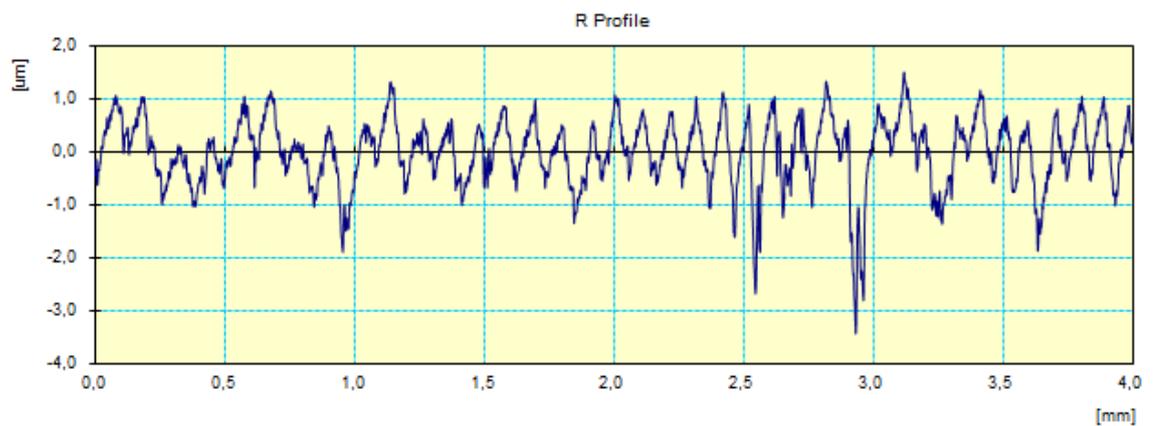
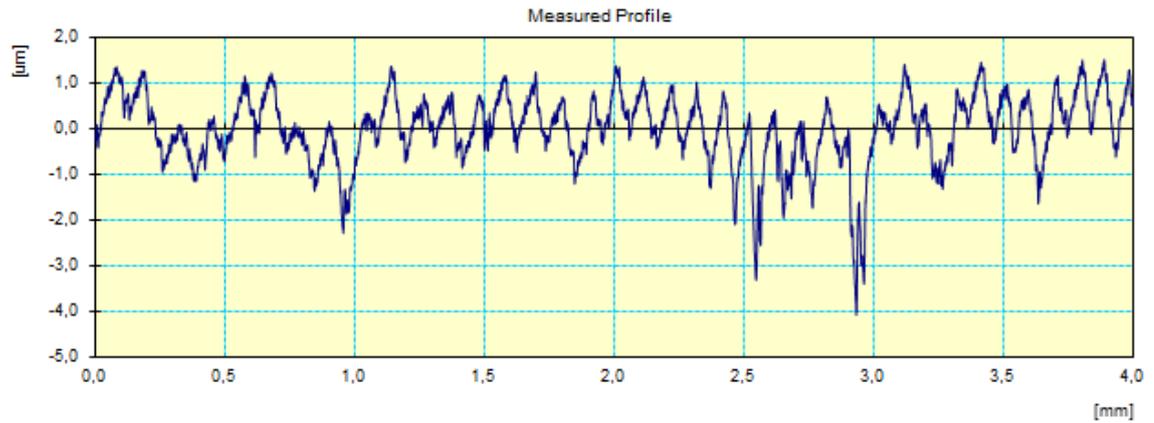
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	0.76µm		
Rz	3.8µm		
Rq	0.90µm		

Ensayo nº6. Replicación 2



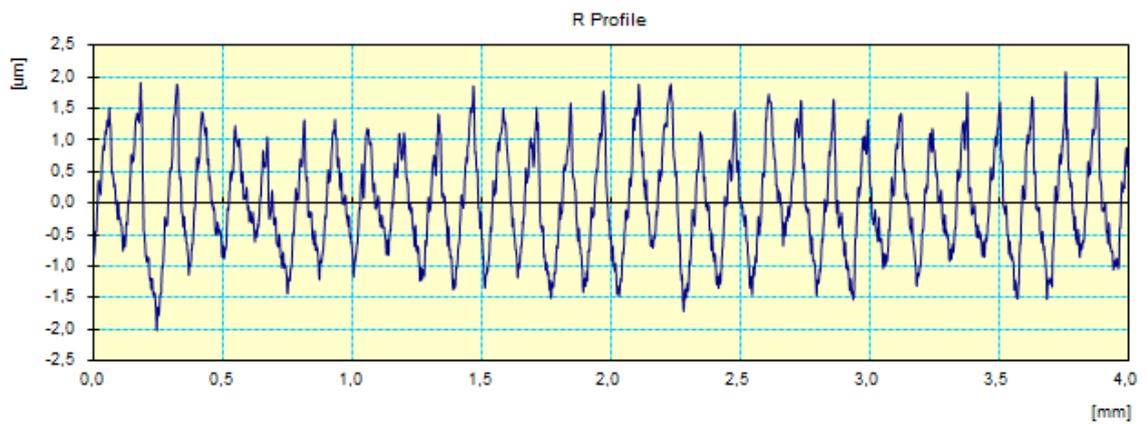
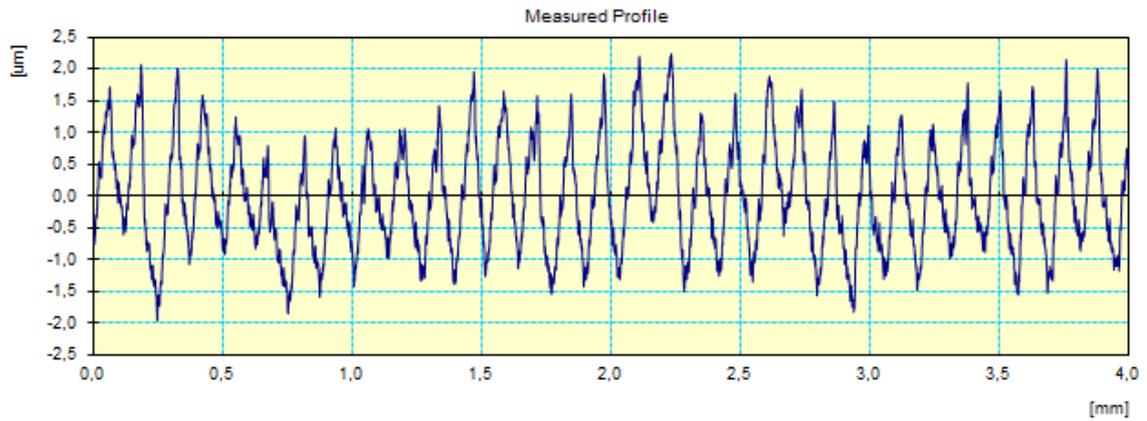
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800um	Filter	GAUSS
Ra	0.22um		
Rz	1.6um		
Rq	0.27um		

Ensayo nº7. Replicación 2



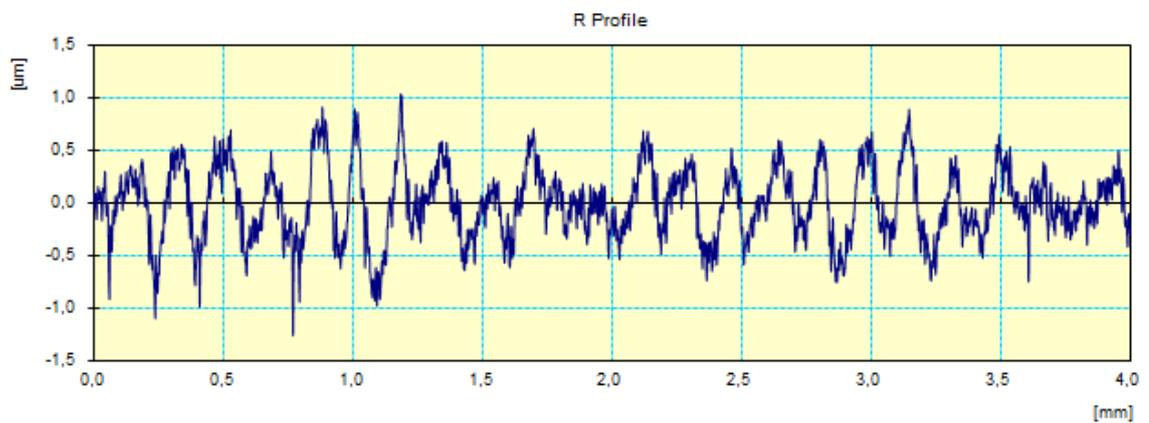
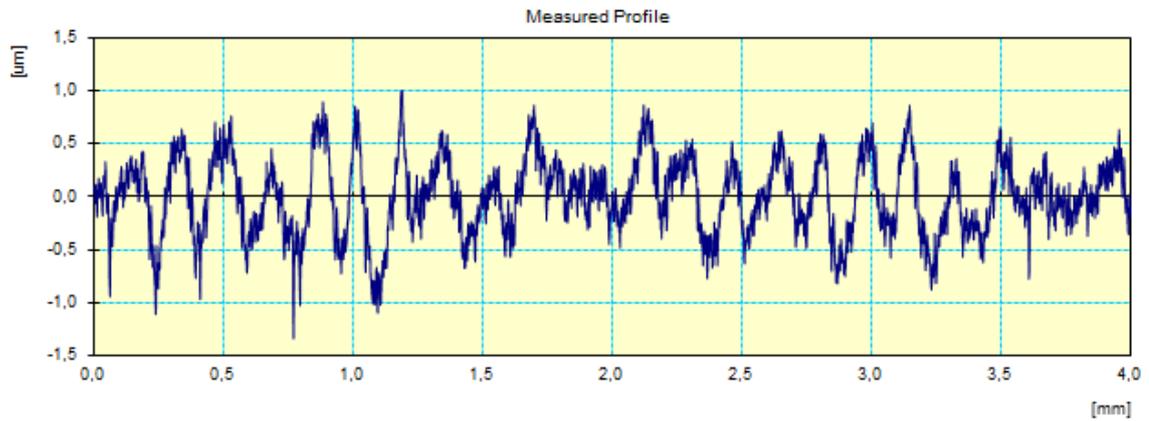
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800um	Filter	GAUSS
Ra	0.49um		
Rz	3.2um		
Rq	0.62um		

Ensayo nº8. Replicación 1



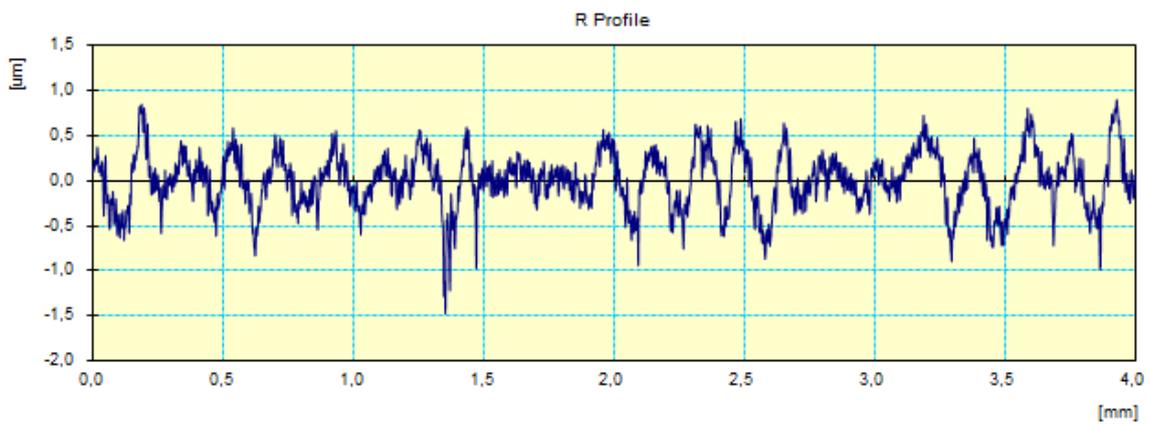
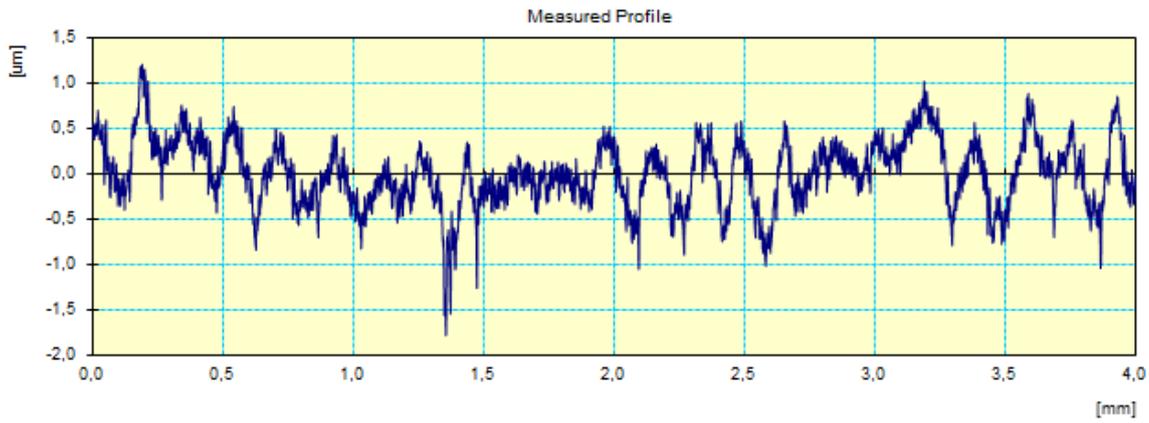
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	0.68µm		
Rz	3.5µm		
Rq	0.81µm		

Ensayo nº9. Replicación 2



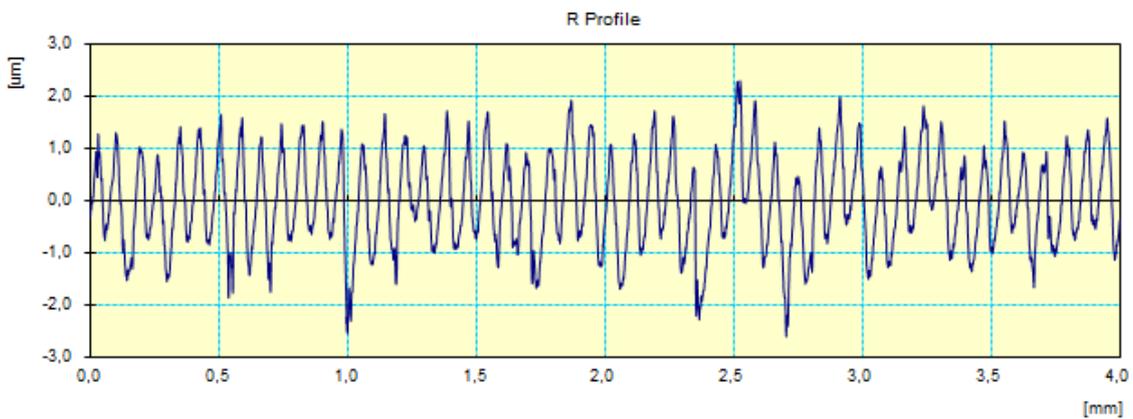
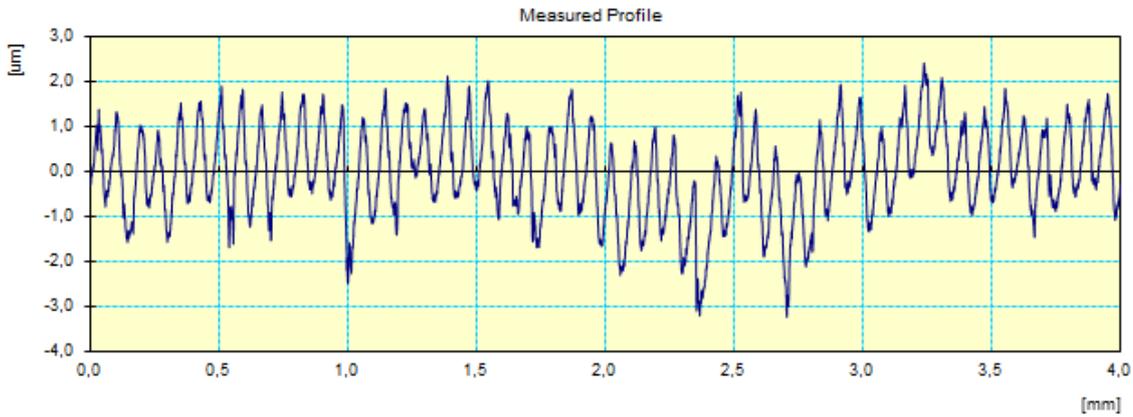
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	0.28µm		
Rz	1.7µm		
Rq	0.34µm		

Ensayo nº9. Replicación 3



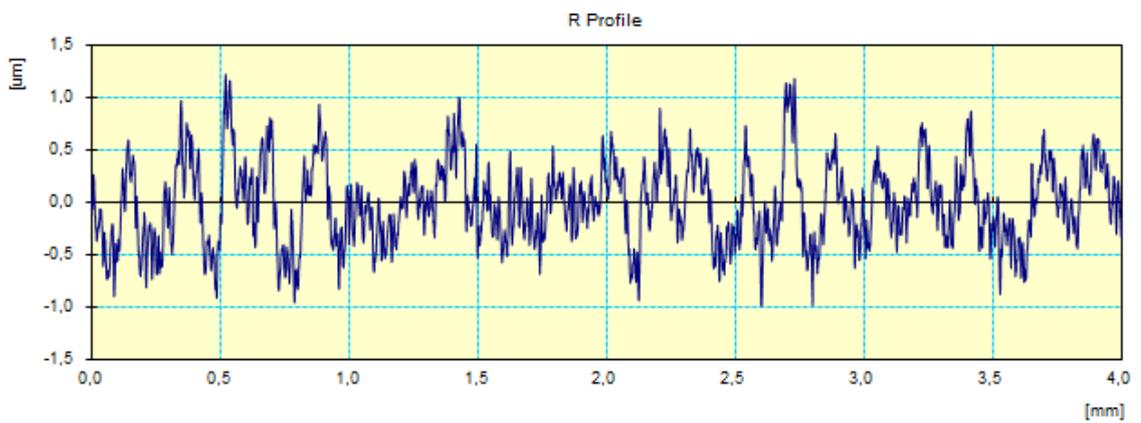
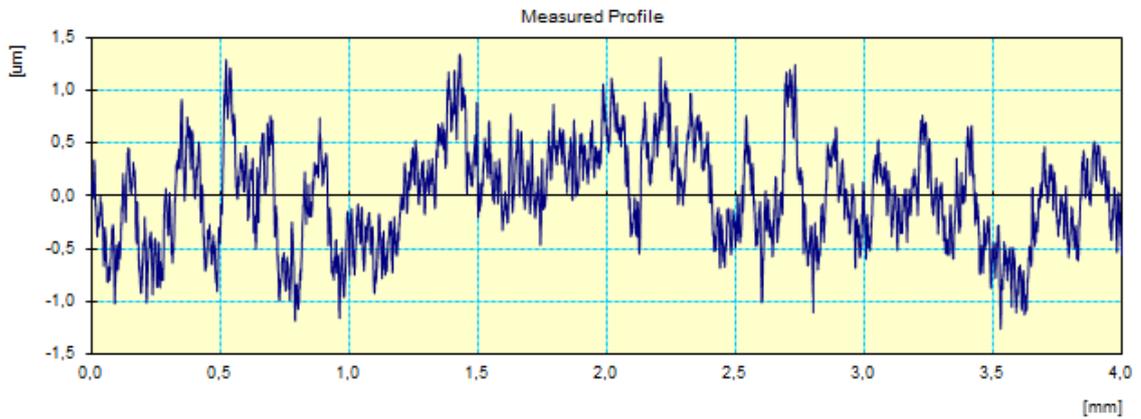
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	0.24µm		
Rz	1.8µm		
Rq	0.31µm		

Ensayo nº10. Replicación 2



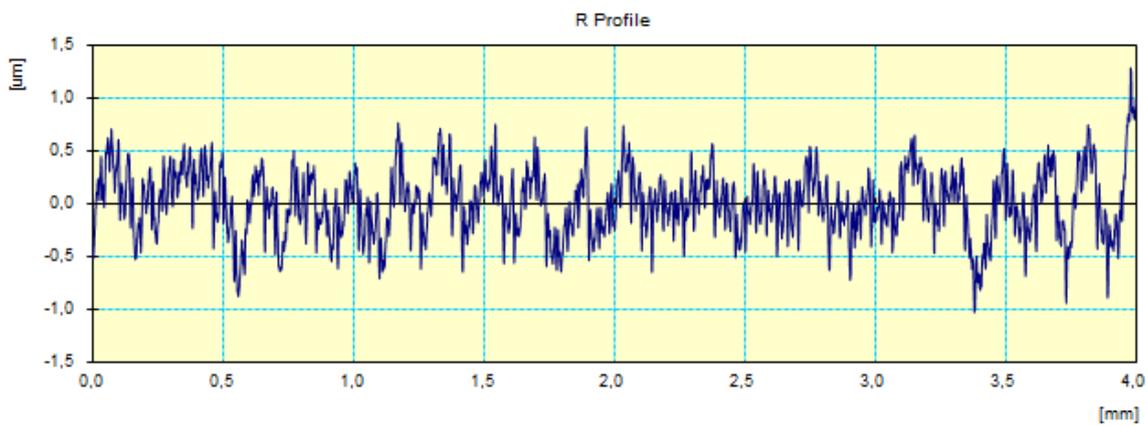
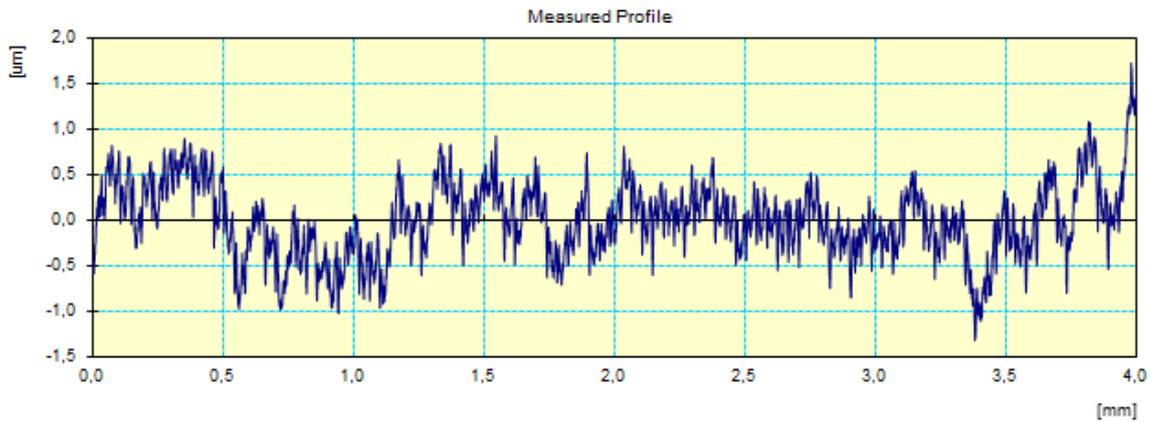
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	0.73µm		
Rz	4.1µm		
Rq	0.88µm		

Ensayo nº11. Replicación 2



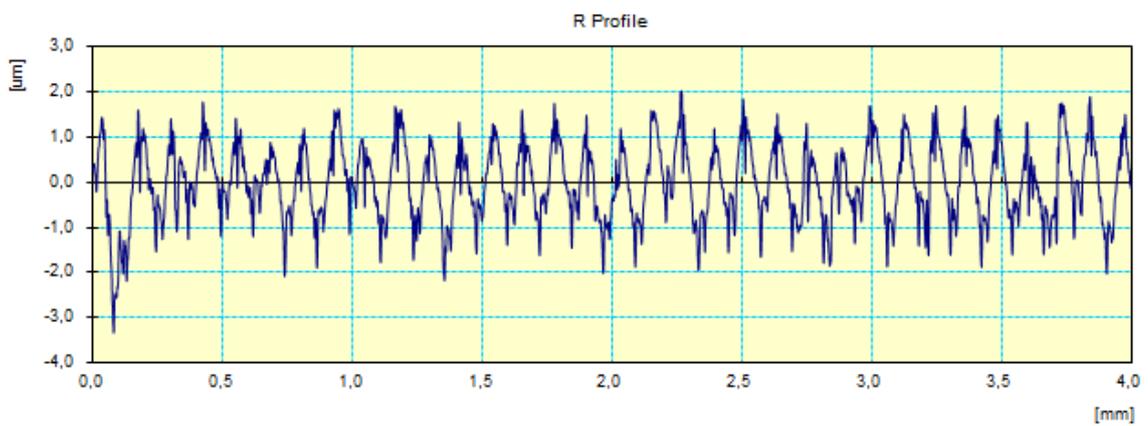
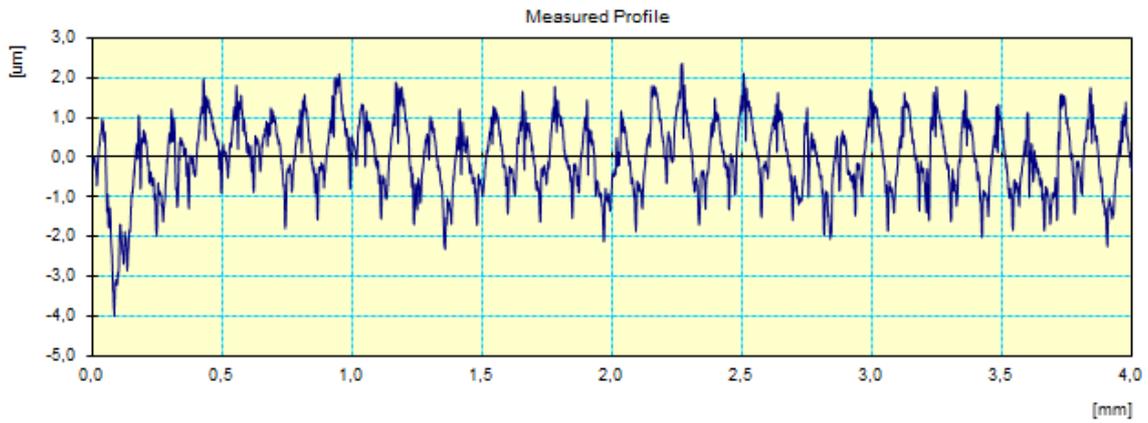
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	0.31µm		
Rz	2.0µm		
Rq	0.38µm		

Ensayo nº11. Replicación 3



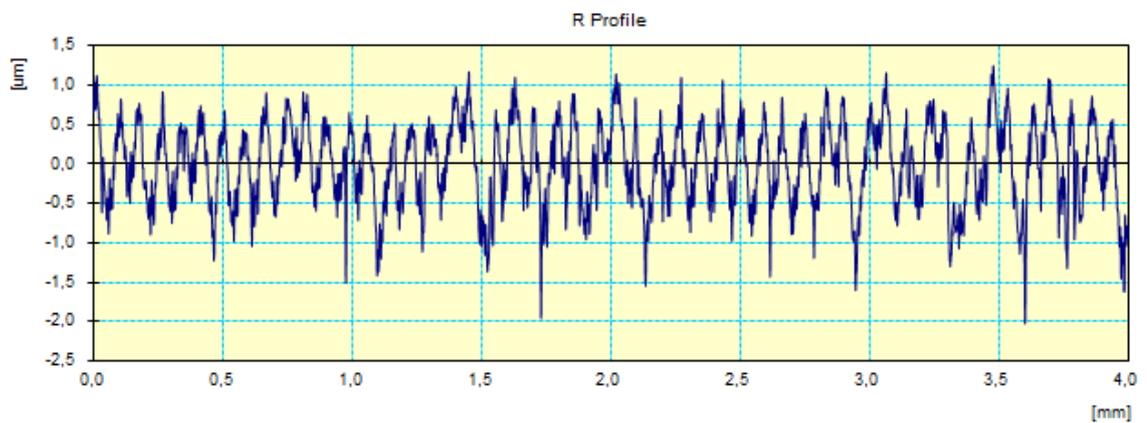
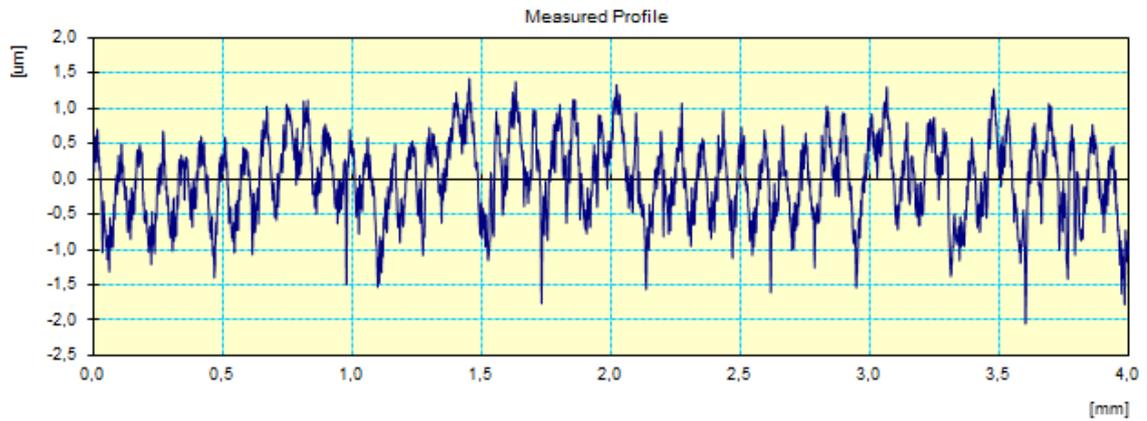
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	0.24µm		
Rz	1.6µm		
Rq	0.30µm		

Ensayo nº12. Replicación 2



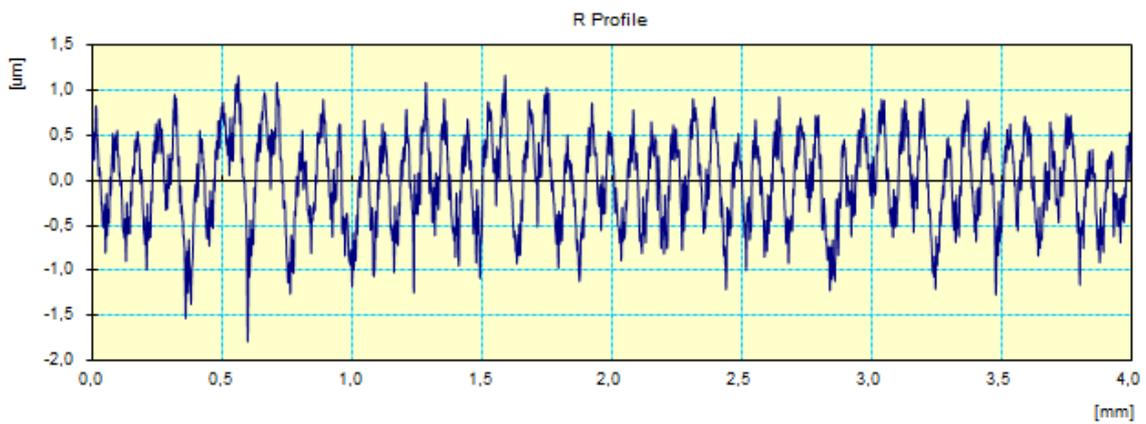
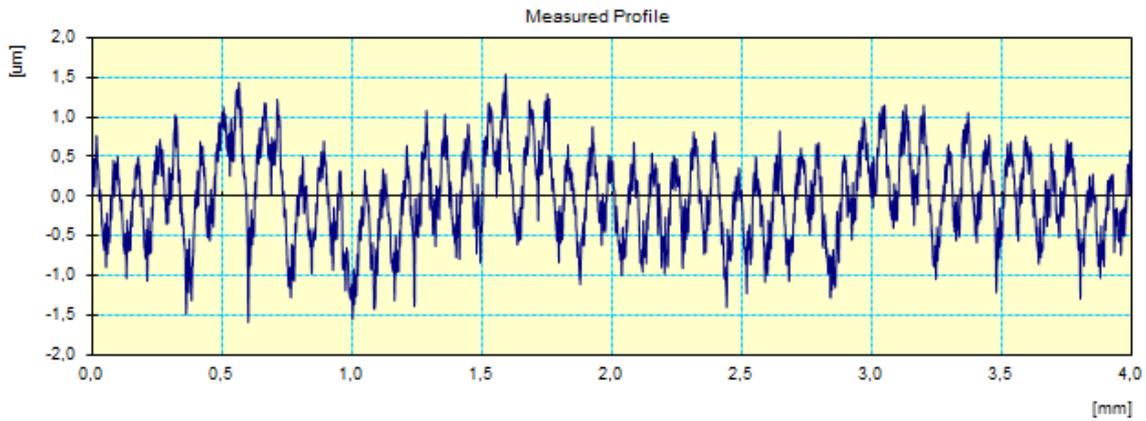
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	0.69µm		
Rz	4.1µm		
Rq	0.84µm		

Ensayo nº14. Replicación 1



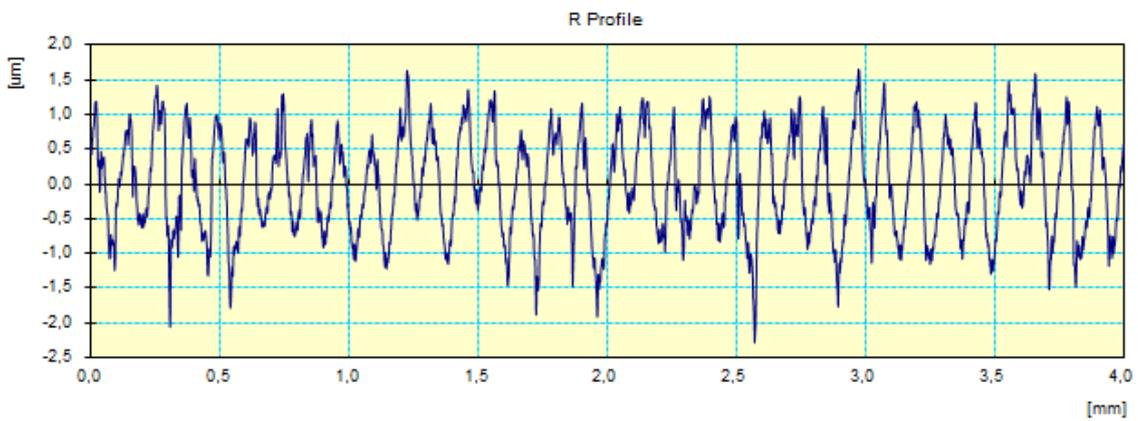
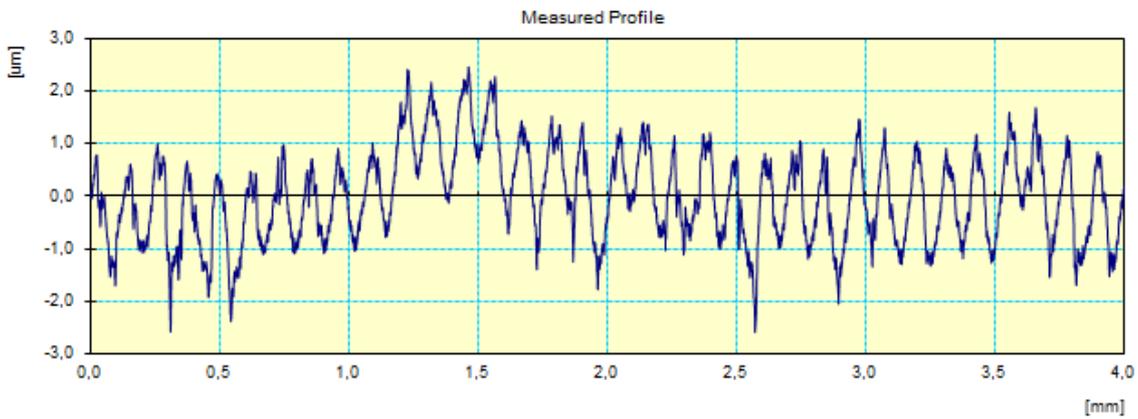
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	0.44µm		
Rz	2.8µm		
Rq	0.52µm		

Ensayo nº14. Replicación 2



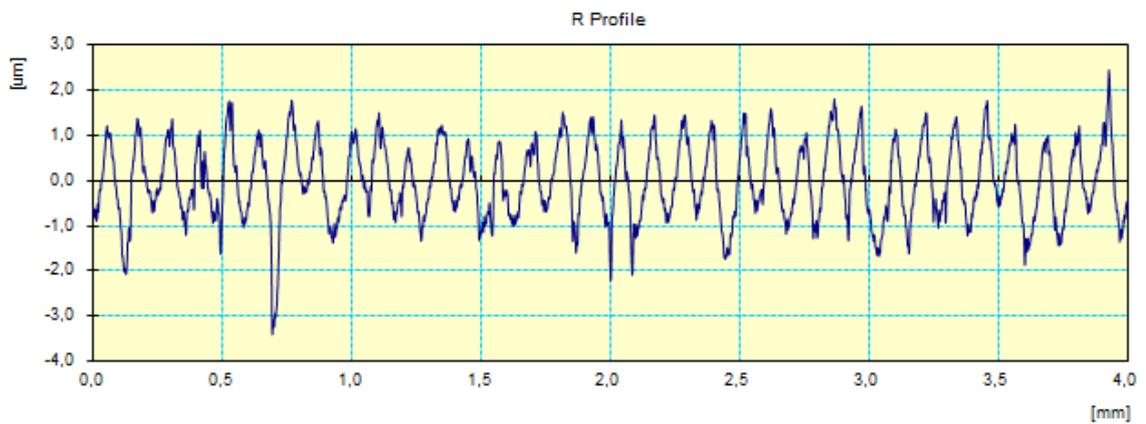
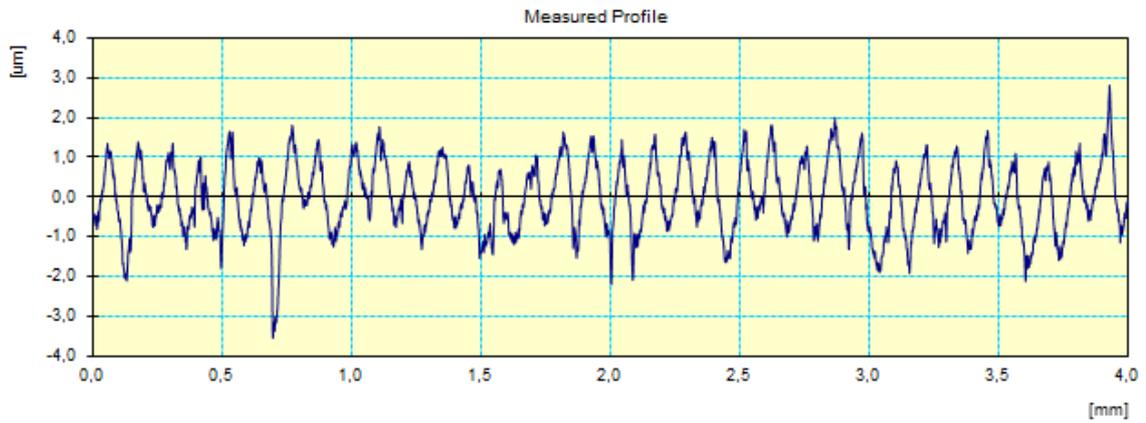
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	0.41µm		
Rz	2.4µm		
Rq	0.48µm		

Ensayo nº16. Replicación 2



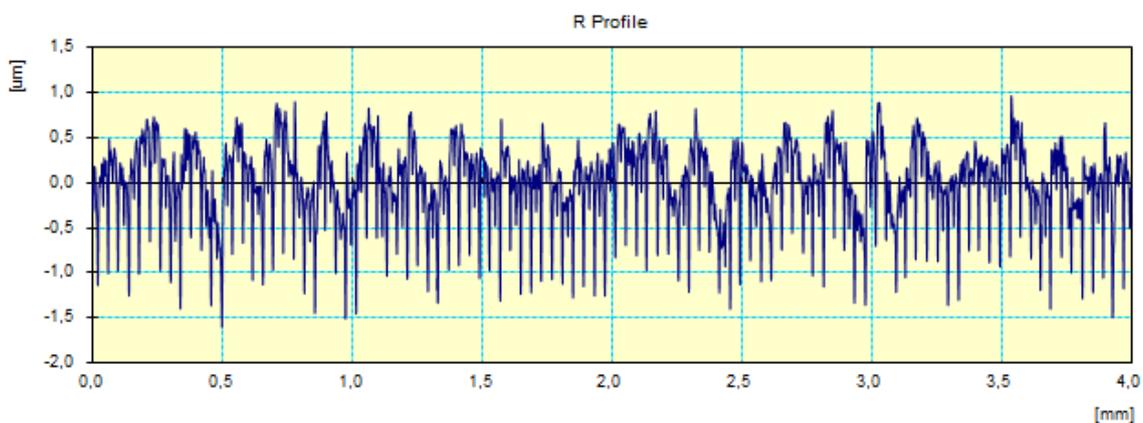
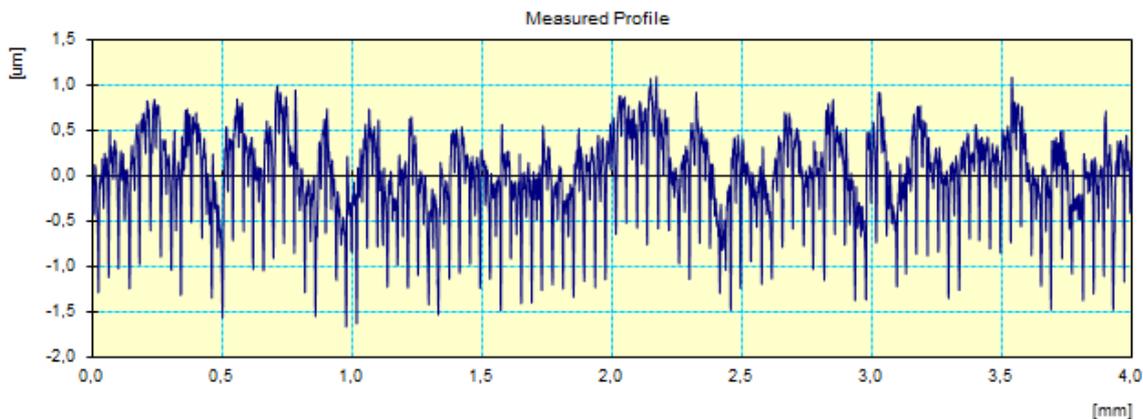
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	0.62µm		
Rz	3.3µm		
Rq	0.72µm		

Ensayo nº16. Replicación 3



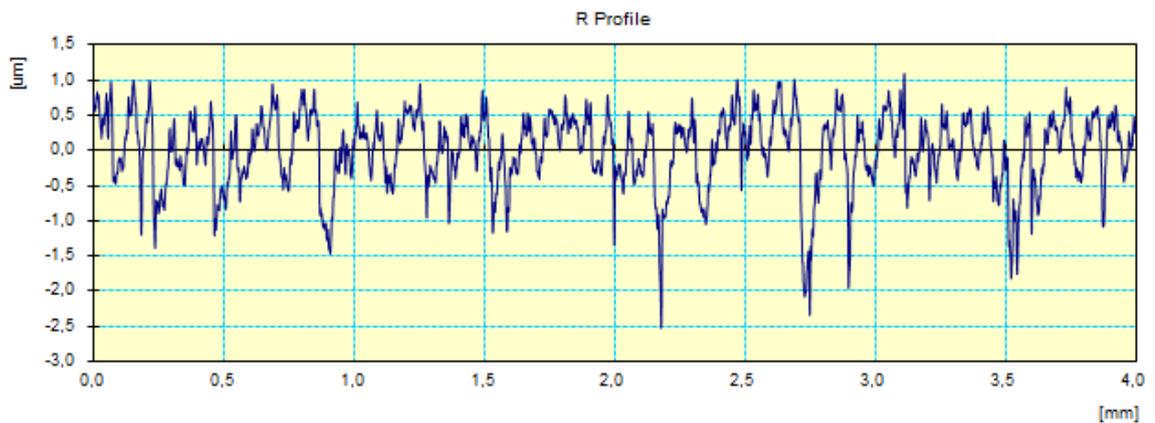
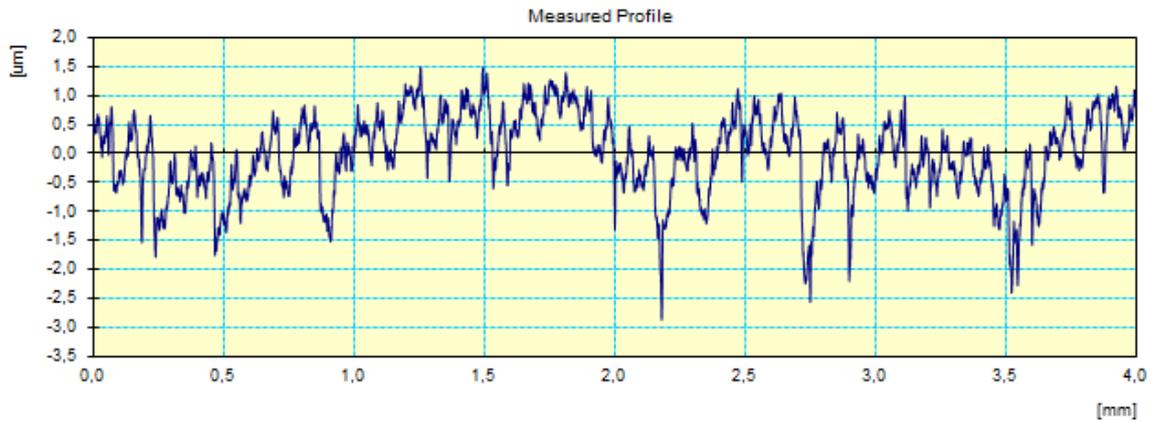
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800um	Filter	GAUSS
Ra	0.70um		
Rz	3.9um		
Rq	0.84um		

Ensayo nº17. Replicación 1



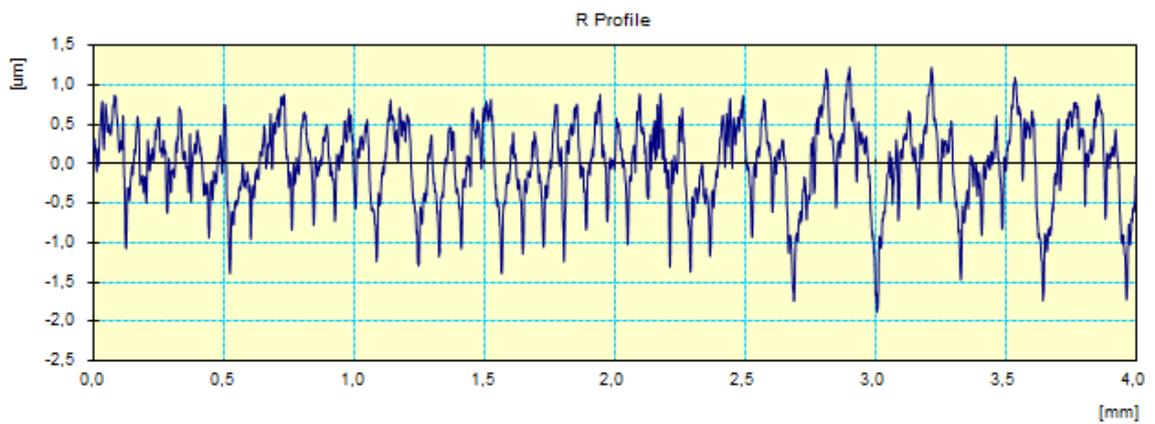
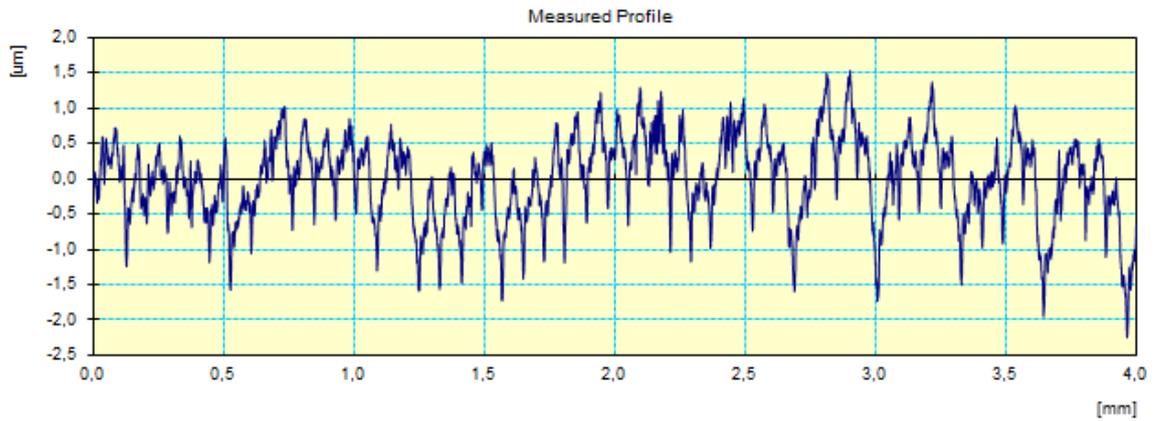
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800um	Filter	GAUSS
Ra	0.32um		
Rz	2.3um		
Rq	0.42um		

Ensayo nº18. Replicación 3



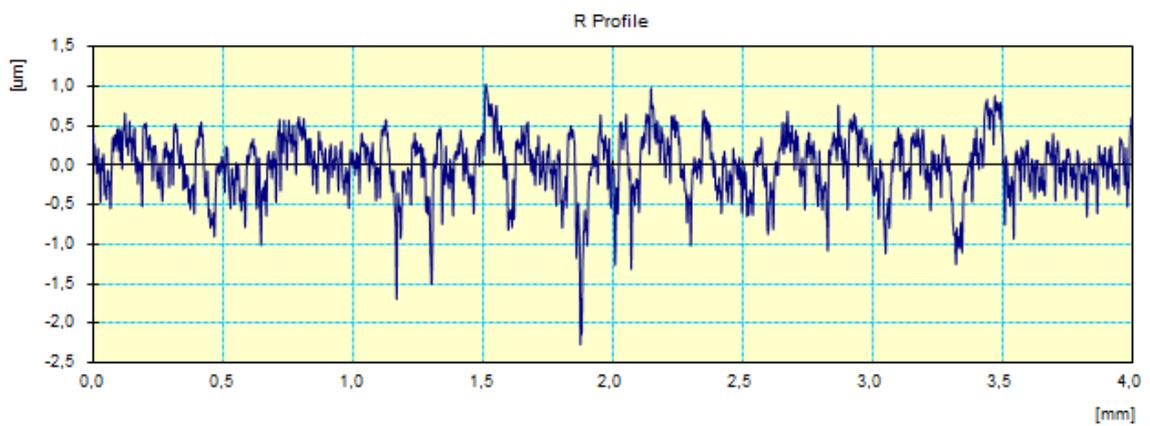
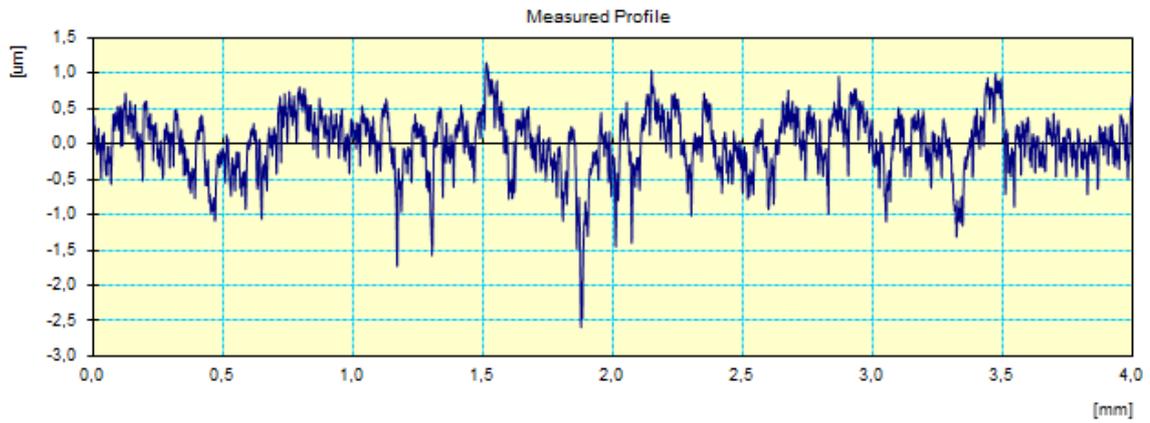
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	0.41µm		
Rz	2.9µm		
Rq	0.52µm		

Ensayo nº19. Replicación 2



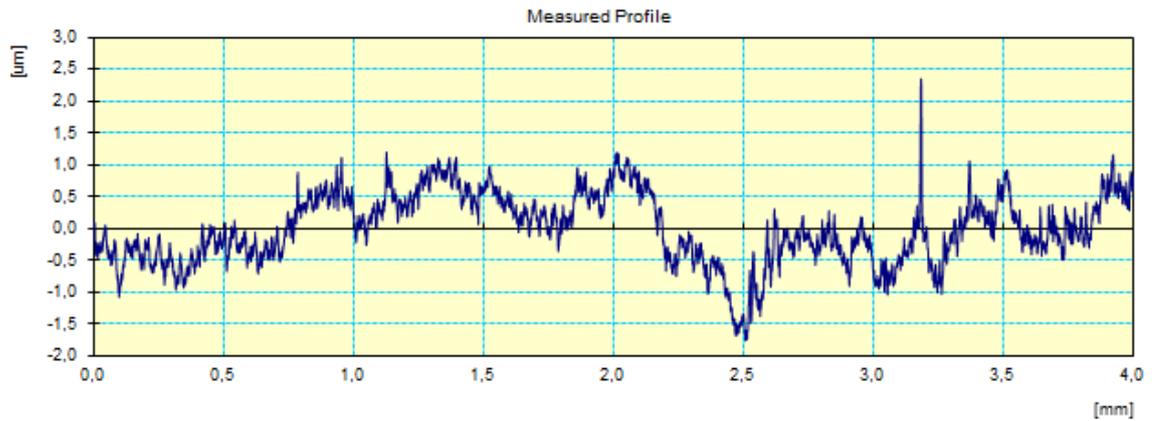
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	0.41µm		
Rz	2.6µm		
Rq	0.51µm		

Ensayo nº20. Replicación 3



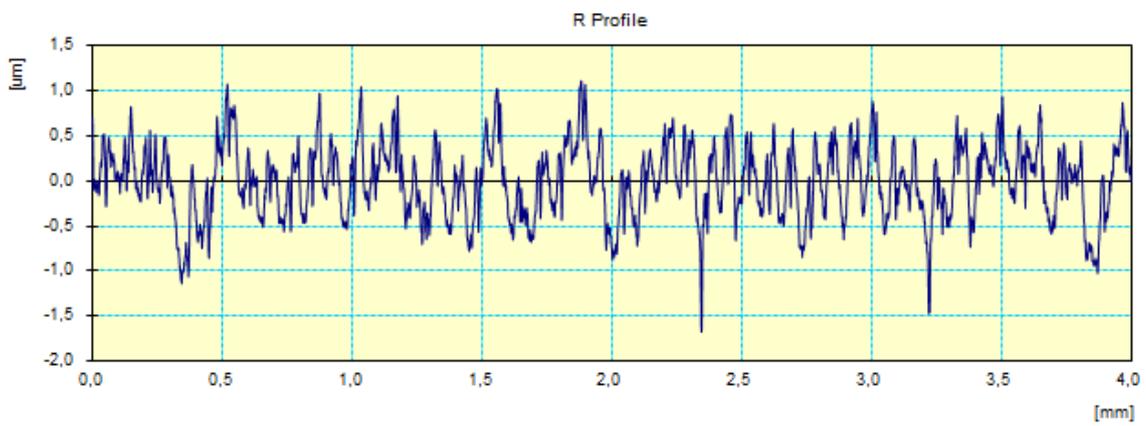
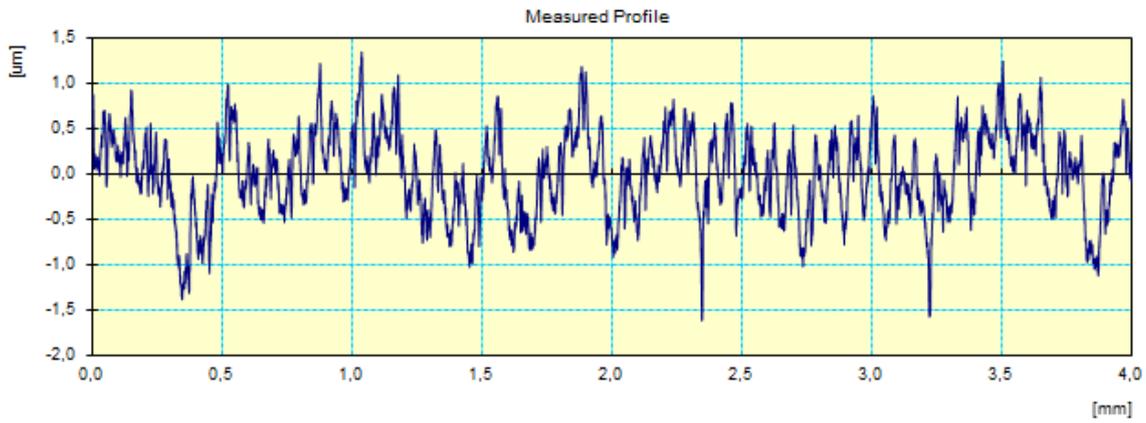
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800um	Filter	GAUSS
Ra	0.29um		
Rz	2.3um		
Rq	0.37um		

Ensayo nº22. Replicación 1



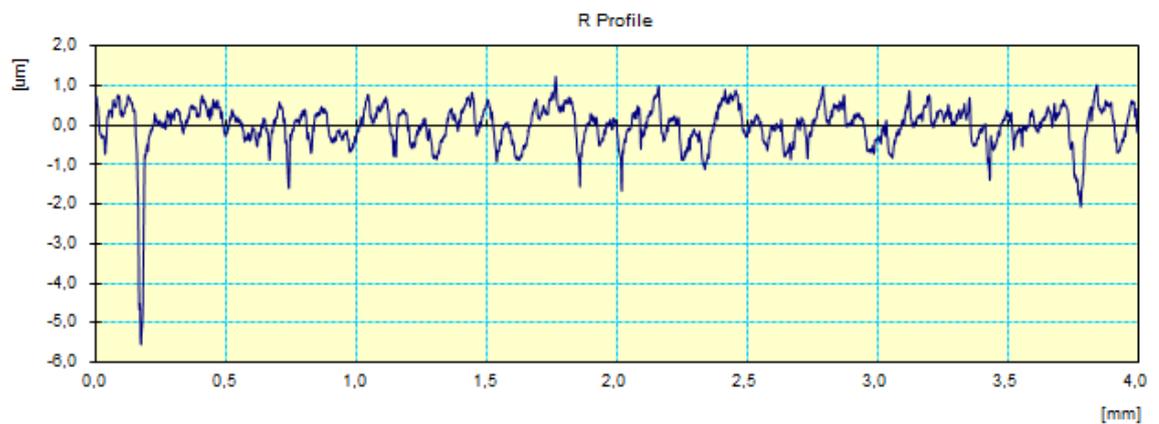
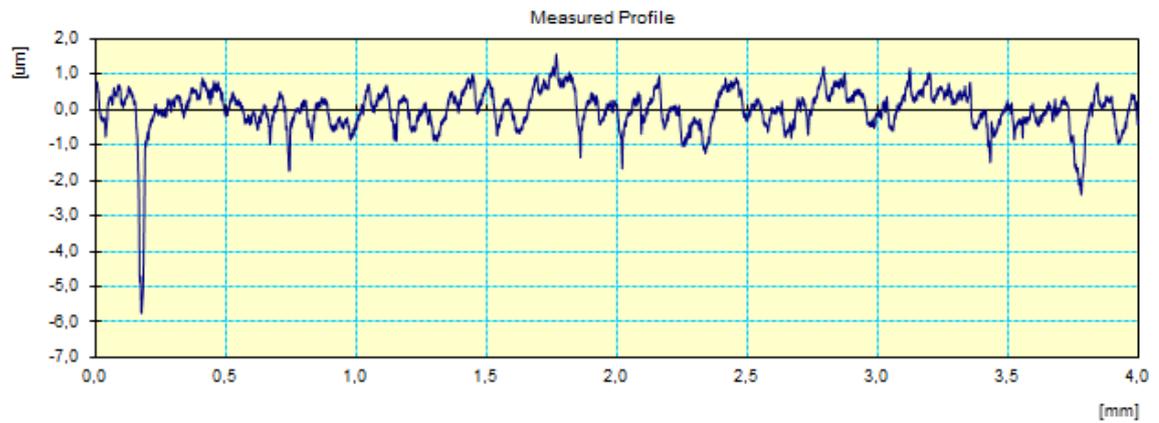
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	0.24µm		
Rz	1.9µm		
Rq	0.30µm		

Ensayo nº23. Replicación 1



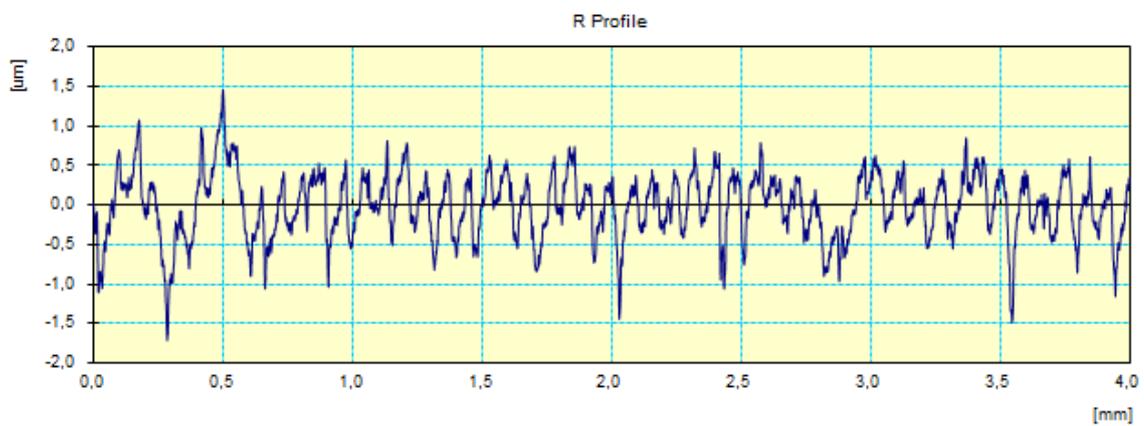
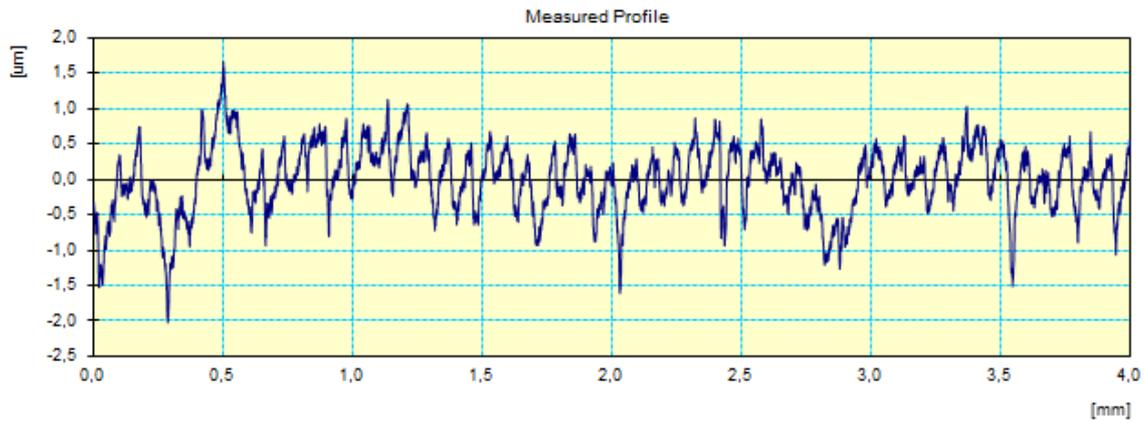
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	0.32µm		
Rz	2.2µm		
Rq	0.40µm		

Ensayo nº24. Replicación 1



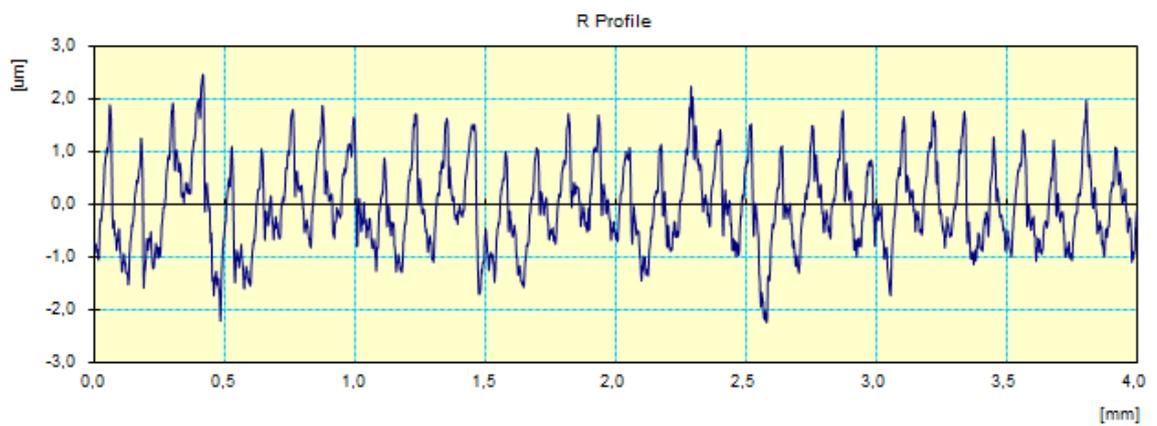
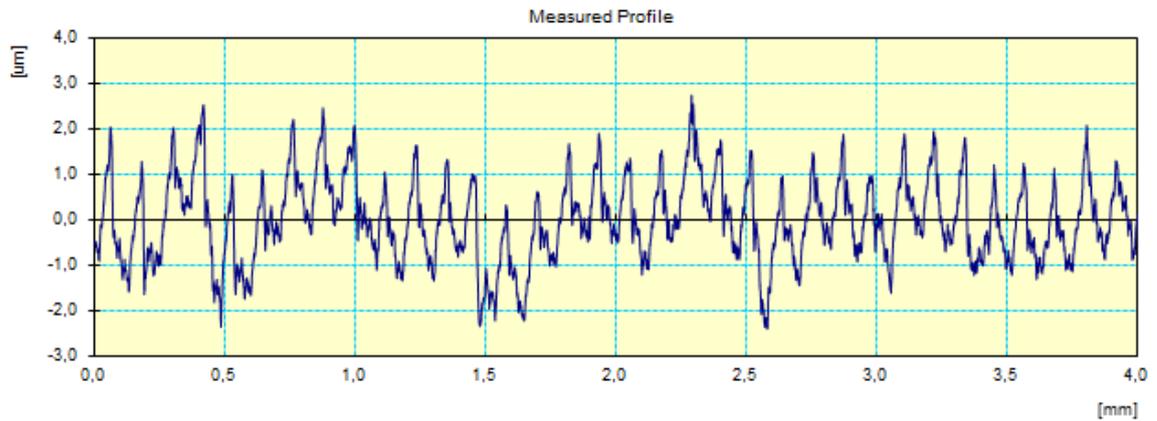
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800um	Filter	GAUSS
Ra	0.38um		
Rz	3.2um		
Rq	0.54um		

Ensayo nº24. Replicación 2



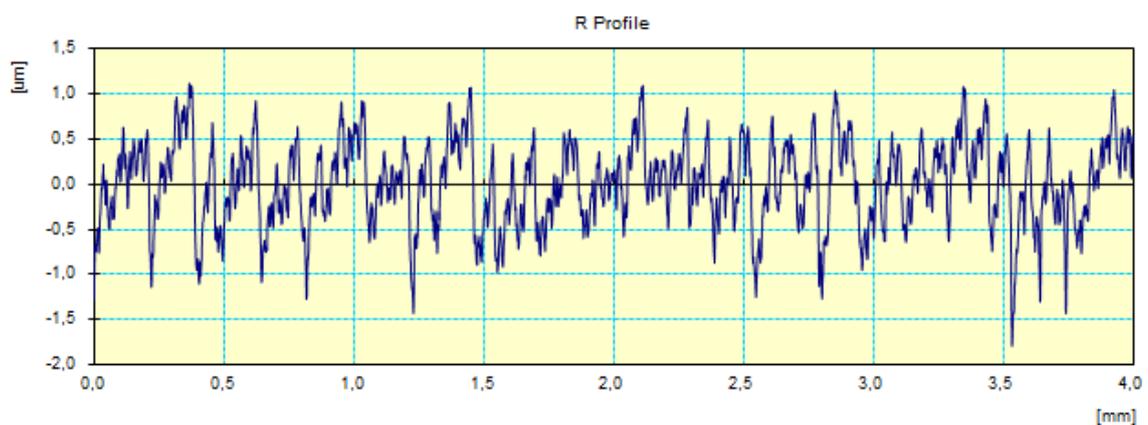
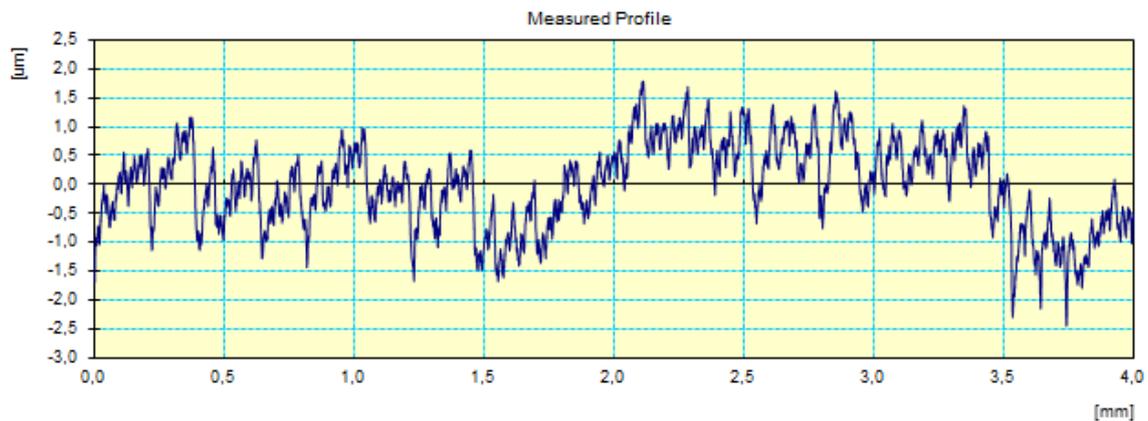
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	0.32µm		
Rz	2.3µm		
Rq	0.40µm		

Ensayo nº25. Replicación 2



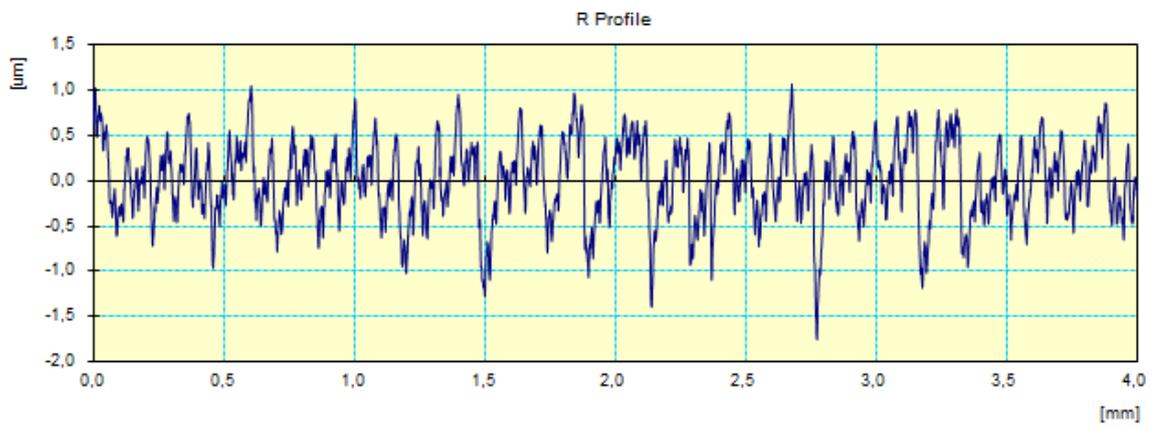
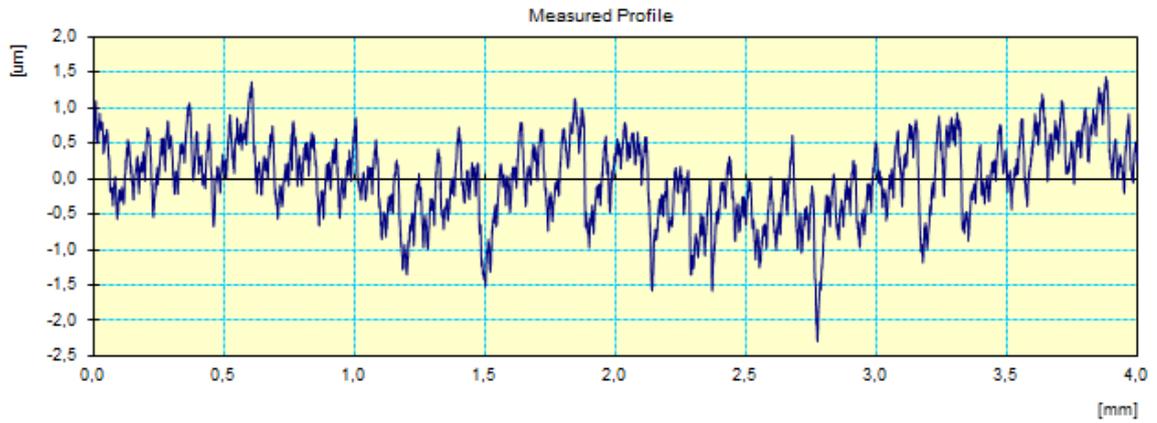
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	0.66µm		
Rz	3.9µm		
Rq	0.81µm		

Ensayo nº27. Replicación 1



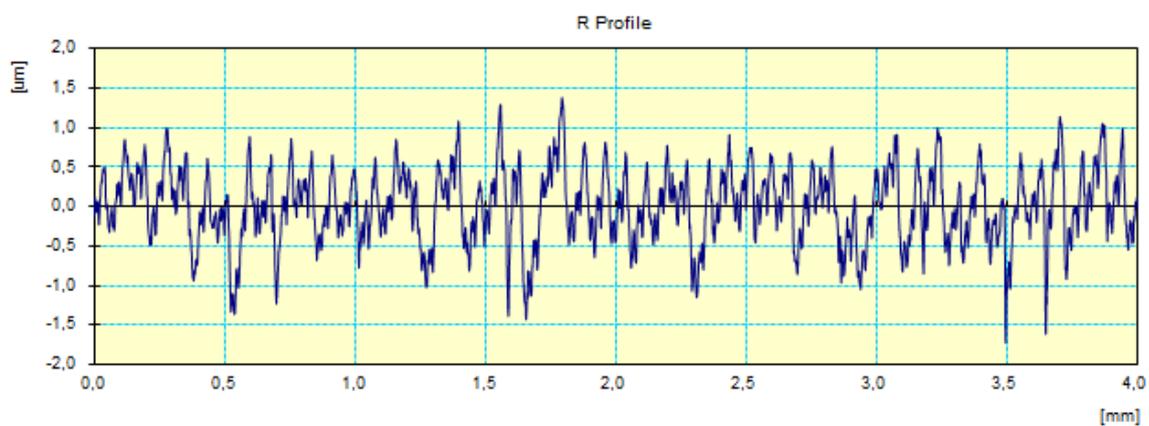
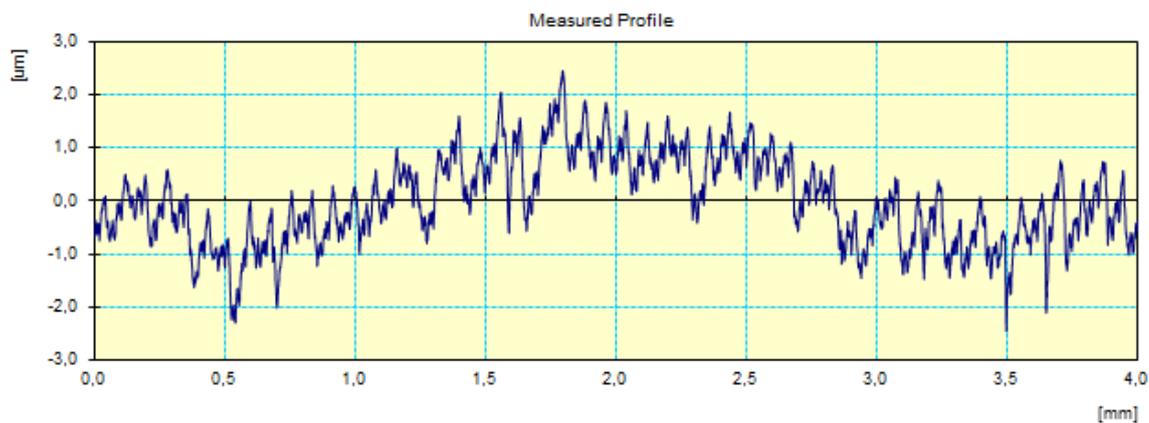
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800um	Filter	GAUSS
Ra	0.37um		
Rz	2.4um		
Rq	0.46um		

Ensayo nº27. Replicación 2



Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	0.34µm		
Rz	2.3µm		
Rq	0.42µm		

Ensayo nº27. Replicación 3



Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	0.37µm		
Rz	2.5µm		
Rq	0.47µm		

