

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

**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

DIEGO CAROU PORTO
Ingeniero Industrial

Madrid-2013

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

**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

Presentada por: D. Diego Carou Porto (Ingeniero Industrial)
Dirigida por: Dña. Eva María Rubio Alvir

Tribunal calificador:
Presidente:
Vocales

Vocal-secretario:

Madrid-2013

AGRADECIMIENTOS

Entendiendo el presente trabajo como la conclusión de un periodo formativo, resulta de justicia presentar mi gratitud hacia todas las personas que han contribuido de una forma u otra a mi formación a lo largo de los años.

Quisiera agradecer a Dña. Eva María Rubio Alvir por su apoyo, estímulo y dirección del periodo de investigación, Tesis y artículos. Desde que la conozco he tenido la fortuna de aprender mucho con ella. Gracias, Eva!

A D. Adolfo Saá Sarria y Dña. Beatriz de Agustina Tejerizo por su colaboración en la elaboración de los artículos asociados a la investigación.

Al Departamento de Ingeniería de Construcción y Fabricación de la E.T.S. Ingenieros Industriales de la UNED por su soporte, especialmente, para la realización de la parte experimental.

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 REF2012-ICF01.

Al Grupo Antolin Magnesio S.L. por el material cedido para el desarrollo de la investigación.

A D. Xosé Henrique Vázquez Vicente, por su constante ayuda, por todo lo que he aprendido con él y por hacerme pensar.

Y, finalmente, a mi familia. Especialmente a mis padres, Diego y Lucinda. Sin ellos sería imposible.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	- 1 -
1.1 Contexto general.....	- 3 -
1.2 Motivación.....	- 6 -
1.3 Hipótesis de partida.....	- 8 -
1.4 Objetivos.....	- 9 -
1.5 Estructura.....	- 10 -
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE.....	- 11 -
2.1 Introducción.....	- 13 -
2.2 Magnesio y sus aleaciones.....	- 20 -
2.2.1 Generalidades del magnesio.....	- 20 -
2.2.2 Aleaciones de magnesio.....	- 26 -
2.2.3 Generalidades de las aleaciones de magnesio.....	- 26 -
2.2.4 Designación de las aleaciones de magnesio.....	- 30 -
2.2.5 Principales aplicaciones del magnesio y sus aleaciones.....	- 33 -
2.3 Sistemas de refrigeración/lubricación.....	- 37 -
2.3.1 Refrigeración/lubricación convencional.....	- 37 -
2.3.2 Mecanizado en seco.....	- 42 -
2.3.3 Sistema con mínima cantidad de lubricante.....	- 45 -
2.3.4 Refrigerantes/lubricantes criogénicos.....	- 48 -
2.3.5 Refrigerantes/lubricantes sólidos.....	- 51 -
2.3.6 Refrigerantes/lubricantes gaseosos.....	- 53 -
2.4 El mecanizado de magnesio.....	- 55 -
2.4.1 Generalidades.....	- 55 -
2.4.2 Herramientas.....	- 58 -
2.4.2.1 Materiales base.....	- 58 -
2.4.2.2 Recubrimientos.....	- 64 -
2.4.2.3 Recomendaciones para la selección de las herramientas a emplear en el mecanizado de magnesio y sus aleaciones.....	- 68 -
2.4.3 Temperatura e ignición del magnesio.....	- 70 -
2.4.4 Aplicaciones de los sistemas de refrigeración en el mecanizado del magnesio.....	- 74 -
2.5 Mecanizado discontinuo.....	- 77 -
2.5.1 Generalidades.....	- 77 -
2.5.2 Principales trabajos sobre mecanizado discontinuo.....	- 80 -
2.5.2.1 Materiales para las herramientas.....	- 80 -
2.5.2.2 Mecanismos de fallo.....	- 83 -
2.5.2.3 Otros estudios.....	- 86 -
2.6 Resumen.....	- 87 -
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	- 89 -
3.1 Introducción.....	- 91 -
3.2 Planificación pre-experimental.....	- 95 -
3.2.1 Reconocimiento y definición del problema objeto de estudio.....	- 95 -
3.2.2 Selección de los factores, niveles y rangos.....	- 96 -
3.2.3 Selección de la variable de respuesta.....	- 99 -
3.3 Elección del diseño experimental.....	- 104 -
3.4 Ejecución del experimento.....	- 112 -
3.5 Control del experimento.....	- 115 -
3.6 Análisis estadístico.....	- 116 -

3.7	Conclusiones.....	- 118 -
3.8	Resumen.	- 119 -
CAPÍTULO 4: APLICACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		- 121 -
4.1	Introducción.....	- 123 -
4.2	Aplicaciones.	- 125 -
4.2.1	Equipos.....	- 125 -
4.2.2	Definición de los experimentos.....	- 132 -
4.3	Análisis de resultados.	- 136 -
4.3.1	Resultados.....	- 136 -
4.3.2	Análisis de la varianza.....	- 138 -
4.3.3	Modelo para la varianza.	- 144 -
4.3.4	Optimización.	- 148 -
4.3.5	Análisis de factores e interacciones.....	- 151 -
4.3.5.1	Avance.	- 151 -
4.3.5.2	Tipo de interrupción.....	- 155 -
4.3.5.3	Tipo de herramienta.	- 156 -
4.3.5.4	Caudal de mínima de cantidad de lubricante.....	- 157 -
4.3.5.5	Velocidad de giro del husillo.	- 159 -
4.3.5.6	Interacción avance*caudal de mínima cantidad de lubricante.	- 161 -
4.3.5.7	Interacción tipo de herramienta*tipo de interrupción.	- 162 -
4.4	Resumen.	- 165 -
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS.....		- 167 -
5.1	Conclusiones.....	- 169 -
5.1.1	Conclusiones de tipo general.....	- 170 -
5.1.2	Conclusiones de tipo particular.	- 172 -
5.2	Desarrollos futuros.....	- 174 -
CAPÍTULO 6: REFERENCIAS.....		- 177 -
6.1	Introducción.....	- 179 -
6.2	Referencias.	- 180 -
6.3	Otras fuentes documentales.	- 204 -
Apéndices.....		- 205 -
A.1	Composición y propiedades de algunas aleaciones de magnesio.....	- 207 -
A.2	Recomendaciones operativas para el mecanizado de magnesio.....	- 210 -

ÍNDICE DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

Expresión	Descripción
AA	Asociación del aluminio (<i>Aluminum Association</i>)
AFM	Microscopio de fuerza atómica (<i>Atomic Force Microscopy</i>)
AFNOR	Asociación francesa de normalización (<i>Association Française de Normalisation</i>)
AISI	Instituto americano del hierro y el acero (<i>American Iron and Steel Institute</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 pruebas y materiales (<i>American Society for Testing and Materials</i>)
BSI	Institución británica de estándares (<i>The British Standards Institution</i>)
CBN	Nitruro de boro cúbico (<i>Cubic Boron Nitride</i>)
CFRP	Polímeros reforzados con fibras de carbono (<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>)
CM	Cuadrados medios
CVD	Deposición de vapor química (<i>Chemical Vapour Deposition</i>)
DIN	Instituto alemán para la normalización (<i>Deutsches Institut für Normung</i>)
EN	Euronorma
FRP	Polímeros reforzados con fibras (<i>Fiber Reinforced Polymer</i>)
GFRP	Polímeros reforzados con fibras de vidrio (<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>)
GL	Grados de libertad
HCP	Hexagonal compacta (<i>Hexagonal Close-Packed</i>)
HSS	Acero rápido (<i>High Speed Steel</i>)
HVOF	Oxígeno-combustible a alta velocidad (<i>High Velocity Oxygen Fuel</i>)
ISO	Organización internacional para la estandarización (<i>International Organization for Standardization</i>)
JIS	Estándares industriales japoneses (<i>Japanese Industrial Standards</i>)
MMC	Compuesto de matriz metálica (<i>Metal Matrix Composite</i>)
MQC	Mínima cantidad de refrigerante (<i>Minimal Quantity Cooling</i>)
MQL	Mínima cantidad de lubricante (<i>Minimum Quantity Lubrication</i>)
NDM	Mecanizado casi seco (<i>Near Dry Machining</i>)
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PC	Policarbonato (<i>Polycarbonate</i>)
PC/ABS	Policarbonato acrilonitrilo-butadieno-estireno (<i>Polycarbonate-Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>)
PCBN	Nitruro de boro cúbico policristalino (<i>Polycrystalline Cubic Boron Nitride</i>)
PCD	Diamante policristalino (<i>PolyCrystalline Diamond</i>)
PE	Polietileno (<i>Polyethylene</i>)
PMMA	Polimetilmetacrilato (<i>Polymethyl methacrylate</i>)
PP	Polipropileno (<i>Polypropylene</i>)

Índice de abreviaturas y siglas

PS	Poliestireno (<i>Polystyrene</i>)
PSp	Spray de plasma (<i>Plasma Spray</i>)
PVD	Deposición de vapor física (<i>Physical Vapour Deposition</i>)
PYME	Pequeña y mediana empresa
SAE	Sociedad de ingenieros del automóvil (<i>Society of Automotive Engineers</i>)
SC	Suma de cuadrados
SI	Sistema Internacional
STM	Microscopio de efecto túnel (<i>Scanning Tunneling Microscopy</i>)
TIC	Tecnologías de información y comunicación
TR	Tierras raras
TS	Spray térmico (<i>Thermal Spray</i>)
UNS	Sistema de numeración unificado (<i>Unified Numbering System</i>)

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

Expresión	Descripción
ρ_1	Porcentaje de contribución a la variabilidad del modelo
ρ_2	Porcentaje de contribución a la variabilidad total
a	Avance de la herramienta
c	Caudal de mínima cantidad de lubricación
C	Constante ecuación de Taylor
C_p	Calor específico
g	Generatriz
h	Tipo de herramienta
i	Tipo de interrupción
l	Longitud
L_m	Longitud de mecanizado
n	Velocidad de giro del husillo
p	Profundidad de corte
R_a	Desviación media aritmética del perfil evaluado
R_{ae}	Desviación media aritmética del perfil evaluado esperada
$R_{máx}$	Rugosidad superficial máxima teórica
R_s	Rugosidad superficial de Ståhl
R_{ai}	Rugosidad superficial media ideal
R_h	Radio de punta de la herramienta
R_q	Desviación media cuadrática del perfil evaluado
T	Vida de la herramienta
v	Velocidad de corte

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Propiedades físicas del magnesio puro (99,9% en peso) (Westengen, 2001). - 21 -

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas del magnesio puro (99,9% en peso) (Westengen, 2001). - 21 -

Tabla 2.3 Propiedades del magnesio en comparación con otros materiales estructurales como el acero, aluminio y titanio (Kleiner *et al.*, 2003). - 22 -

Tabla 2.4 Evolución del precio del magnesio en el periodo 2007-2011 (Kramer, 2012). - 23 -

Tabla 2.5 Denominación de los elementos aleantes (ASM, 1990) (ASTM, 2005). - 31 -

Tabla 2.6 Denominación de la condición (tratamiento) de la aleación (ASM, 1990). - 31 -

Tabla 2.7 Principales designaciones de la aleación AZ81A. Basada en Totemeier (2004). - 32 -

Tabla 2.8 Comparativa de las funciones de algunos fluidos de corte (Kundrák *et al.*, 2006). - 40 -

Tabla 2.9 Comparación de maquinabilidad de diversos materiales (Polmear, 2005). - 55 -

Tabla 3.1 Variables, niveles y designaciones. - 98 -

Tabla 3.2 Ratios Rq/Ra para los principales procesos de mecanizado (ASM, 1989). - 102 -

Tabla 3.3 Rangos de Ra para los principales procesos de mecanizado (ASM, 1989). - 102 -

Tabla 3.4 Clasificación de superficies según Ra y tolerancia (ASM, 1989). - 103 -

Tabla 3.5 Efectos principales e interacciones para el diseño de 7 factores. - 105 -

Tabla 3.6 Combinaciones para el diseño factorial 2^3 - 107 -

Tabla 3.7 Designación niveles longitud y generatriz. - 110 -

Tabla 3.8 Conjunto de factores e interacciones estimables. - 110 -

Tabla 3.9 Plan de experimentos. - 111 -

Tabla 3.10 Documento de registro de las mediciones de la experimentación. - 114 -

Tabla 3.11 Cuadro resumen del análisis ANOVA. - 117 -

Tabla 4.1 Composición de la aleación AZ91D-F (% en masa) (MATWEB, 2012). - 125 -

Tabla 4.2 Principales propiedades mecánicas de la aleación AZ91D-F (MATWEB, 2012). - 125 -

Tabla 4.3 Variables y niveles de estudio. - 133 -

Tabla 4.4 Hoja de seguimiento de ensayos. - 134 -

Tabla 4.5 Resultados de Ra obtenidos tras los ensayos de torneado intermitente. - 137 -

Tabla 4.6 Resultados globales del ANOVA inicial. - 138 -

Tabla 4.7 Media de la Ra y medidas de dispersión para el ANOVA inicial. - 138 -

Tabla 4.8 Resultados detallados del ANOVA inicial. - 139 -

Tabla 4.9 Resultados globales del ANOVA final. - 141 -

Tabla 4.10 Media de la Ra y medidas de dispersión para el ANOVA final. - 141 -

Tabla 4.11 Resultados detallados del ANOVA final. - 142 -

Tabla 4.12 Porcentajes de variabilidad explicada por cada efecto significativo. - 143 -

Tabla 4.13 Estimadores para cada efecto del modelo. - 145 -

Tabla 4.14 Test de normalidad para los residuales del modelo. - 147 -

Tabla 4.15 Valores de la Ra esperados por el modelo. - 148 -

Tabla 4.16 Valores de la rugosidad superficial media ideal. - 153 -

Tabla A.1.1 Composición y propiedades de algunas aleaciones de magnesio forjadas (barras y formas extruidas) (ASM, 1990). - 207 -

Tabla A.1.3 Composición y propiedades de algunas aleaciones de magnesio de fundición a alta presión (ASM, 1990). - 208 -

Tabla A.1.4 Composición y propiedades de algunas aleaciones de magnesio de fundición en moldes de arena y permanentes (ASM, 1990). - 209 -

Tabla A.2.1 Parámetros de corte en el torneado y mandrinado para las aleaciones de magnesio (ASM, 1989). . - 210 -

Tabla A.2.2 Parámetros de corte en el taladrado y en otras operaciones para las aleaciones de magnesio (ASM, 1989). - 210 -

Tabla A.2.3 Parámetros de corte en el fresado frontal y fresado periférico para las aleaciones de magnesio (ASM, 1989). - 211 -

Tabla A.2.4 Parámetros de corte en el fresado para las aleaciones de magnesio (ASM, 1989). - 211 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Evolución histórica de los materiales de ingeniería. Basada en Ashby y Johnson (2010). - 13 -

Figura 2.2 Joseph Black (izquierda) (UOF, 2012) y Sir Humphry Davy (derecha) (BBC, 2012). - 14 -

Figura 2.3 Cristal de magnesio ultrafino desde dos perspectivas (IOE, 2012). - 15 -

Figura 2.4 Evolución del mercado mundial de lubricantes en el periodo 2007-2011 (Fuchs, 2012). - 18 -

Figura 2.5 Distribución geográfica del mercado mundial de lubricantes en 2011 (Fuchs, 2012). - 18 -

Figura 2.6 Índice de precios del magnesio y otras materias primas (1950-2010) (Yellishetty *et al.*, 2011). - 24 -

Figura 2.7 Costes comparados (2003) del magnesio frente a otros materiales (Polmear, 2005). - 24 -

Figura 2.8 Tendencias en el desarrollo de las aleaciones de magnesio. Basada en Mordike y Ebert (2001). - 27 -

Figura 2.9 Aplicaciones de compuestos de matriz metálica en piezas de automóvil (Teti, 2002). - 28 -

Figura 2.10 Bloque motor V6 de 3 litros construido con magnesio (Tharumarajah y Koltun, 2007). - 34 -

Figura 2.11 Zonas de desgaste de la herramienta de corte (Avallone y Baumeister, 1996). - 58 -

Figura 2.12 Evolución velocidad de corte de las herramientas (Heath, 2001). - 59 -

Figura 2.13 Dureza en función de la temperatura para distintas herramientas (Ezugwu *et al.*, 2003). - 60 -

Figura 2.14 Dureza y resistencia a la abrasión a altas temperaturas, en relación con la tenacidad y resistencia al
combado (Heath, 2001). - 60 -

Figura 2.15 Zonas de generación de calor en el corte ortogonal (List *et al.*, 2005) (Yildiz y Nalbant, 2008). - 70 -

Figura 2.16 Tipos de mecanizado. Basada en Beswick (2002). - 78 -

Figura 3.1 Modelo general para un proceso o sistema (Montgomery, 2005). - 92 -

Figura 3.2 Perfil genérico de rugosidad. - 101 -

Figura 4.1 Diseño de la probeta continua. - 126 -

Figura 4.2 Diseño de la probeta discontinua de ranura 15 mm. - 127 -

Figura 4.3 Diseño de la probeta discontinua de ranura 30 mm. - 127 -

Figura 4.4 Conjunto de probetas. - 128 -

Figura 4.5 Conjunto torno con probeta *i2*. - 128 -

Figura 4.6 Sistema de mínima cantidad de lubricante. - 129 -

Figura 4.7 Dimensiones geométricas de la plaquita (SECO, 2012). - 130 -

Figura 4.8 Rugosímetro de superficies Mitutoyo SurfTest SJ 401. - 131 -

Figura 4.9 Posición de las generatrices sobre la base de la probeta. - 133 -

Figura 4.10 Certificado de medición de *Ra* para el primer punto de medición del primer. - 136 -

Figura 4.11 *p* valores asociados a las fuentes de variación. - 140 -

Figura 4.12 Residuales del modelo frente a los valores estimados de *Ra*. - 146 -

Figura 4.13 Residuales del modelo frente al orden de los ensayos. - 146 -

Figura 4.14 Distribución de los residuales y distribución $N(0; 0,0665)$ - 147 -

Figura 4.15 Contribución del avance en la variabilidad total de la *Ra*. - 151 -

Figura 4.16 *Ra* estimada frente avance. - 152 -

Figura 4.17 *Ra* estimada, *Rae*, *Ra* Stâhl, *Ras*, y *Ra* ideal, *Rai* frente al avance. - 153 -

Figura 4.18 Contribución del tipo de interrupción en la variabilidad total de la desviación media aritmética. - 155 -

Figura 4.19 *Ra* estimada frente al tipo de interrupción. - 156 -

Figura 4.20 Contribución del tipo de herramienta en la variabilidad total de la desviación media aritmética. - 157 -

Figura 4.21 *Ra* estimada frente al tipo de herramienta. - 157 -

Figura 4.22 Contribución del caudal MQL en la variabilidad total de la desviación media aritmética. - 158 -

Figura 4.23 *Ra* estimada frente al caudal de mínima cantidad de lubricante. - 158 -

Figura 4.24 Contribución de la velocidad de giro del husillo en la variabilidad total de la desviación media
aritmética. - 159 -

Figura 4.25 *Ra* estimada frente a la velocidad de giro del husillo. - 160 -

Figura 4.26 Contribución de la interacción avance*caudal de mínima cantidad de lubricante en la variabilidad total
de la desviación media aritmética. - 161 -

Figura 4.27 *Ra* estimada para la interacción avance*caudal de mínima cantidad de lubricante. - 162 -
Figura 4.28 Contribución de la interacción tipo de herramienta*tipo de interrupción en la variabilidad total de la
desviación media aritmética..... - 163 -
Figura 4.29 *Ra* estimada para la interacción tipo de interrupción*tipo de herramienta..... - 163 -

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto general.

Ya en el Pleistoceno, el *homo habilis* demostró poseer la capacidad de desarrollar herramientas rudimentarias que facilitaban el desarrollo de sus actividades cotidianas. Desde la utilización de la piedra para la fabricación de herramientas con las que dar forma a la madera (Suh, 1980), las herramientas han evolucionado notablemente siguiendo un camino paralelo al descubrimiento y desarrollo de los materiales, impulsado por el conocimiento acumulado y la necesidad de progresar.

Sin embargo, no sería hasta el año 1750 cuando el mundo estaría preparado para afrontar un fuerte desarrollo económico basado en el progreso tecnológico, debido a que hasta ese momento el conocimiento existente no era suficiente para el surgimiento de un cambio centrado en la tecnología (Mokyr, 2005). Así, la existencia de un mayor conocimiento fue uno de los factores que propiciaron la Revolución Industrial (finales del siglo XVIII-comienzos del siglo XIX), durante la que se produce la aparición de las modernas máquinas herramienta, pudiendo citar ejemplos como la máquina de mandrinado de John Wilkinson o la máquina de torneado de Henry Maudslay. El papel que jugará la tecnología en el desarrollo económico durante los siglos XIX y XX resulta clave (Mokyr, 2005) (Moriwaki, 2008).

La importancia del sector industrial dentro de la actividad económica durante los siglos XIX y XX se ve afectada por dos profundos procesos de cambio a finales del siglo XX: el proceso de desindustrialización originado por la crisis de los años 1970 y el proceso de terciarización de la economía (Maroto-Sánchez y Cuadrado-Roura, 2009). Recientemente, surgen conceptos que explican de mejor modo las tendencias de cambio que se vienen produciendo en las últimas décadas. En este sentido, denominaciones como sociedad de la información (May, 2000) o economía del conocimiento (Heng *et al.*, 2012) presentan la realidad de una sociedad en la que los materiales han perdido peso como elemento clave de input en la economía en favor de la información/conocimiento, debido al fuerte desarrollo tecnológico experimentado en campos como el de los semiconductores, las telecomunicaciones e Internet (Castellacci, 2006). En este contexto de cambio, las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) son un elemento central para explicar el incremento de la productividad desde los años 90 (Oulton, 2012). Esta tendencia, fundamental en los países avanzados, lleva al desarrollo de una nueva estructura de la actividad con un mayor peso del sector terciario, incrementándose el peso de los servicios en la economía en términos de empleo, valor añadido y

comercio internacional (Evangelista *et al.*, 2012). Esta evolución puede observarse en la Unión Europea. Así, durante el periodo 1999-2009, la contribución de la industria al valor añadido bruto de la Unión Europea se vio reducida desde el 22,5% al 17,9% (European Union, 2011). Paralelamente, como consecuencia de la globalización de las cadenas de suministro, se produce un gran desarrollo del sector industrial en los países en desarrollo (Duflou *et al.*, 2012).

A pesar de los cambios estructurales que han llevado a las economías más desarrolladas a reducir el peso de sus sectores industriales, el papel que juega la industria en el desarrollo económico continua siendo importante. Así lo atestiguan los datos disponibles para el año 2007, en el que existían en la Unión Europea de los 27 un total de 20,9 millones de pequeñas y medianas empresas (PYMES) dedicadas a actividades no financieras, que empleaban a 133,8 millones de personas y que generaban 6.146.000 millones de euros de valor añadido. Dentro de este grupo de empresas, el sector manufacturero era el de mayor tamaño en términos de empleo, 34,5 millones de empleados, y valor añadido, 1.813.000 millones de euros (European Union, 2011).

El desarrollo de nuevos procesos de fabricación en las últimas décadas, como el de prototipado rápido (Kruth *et al.*, 1998), no ha conseguido arrebatarse a los procesos de fabricación mediante arranque de material la posición dominante entre los distintos procesos de fabricación (Jawahir *et al.*, 2011).

El enorme progreso socio-económico producido gracias al desarrollo del sector industrial a partir de la Revolución Industrial es cuestionado en la segunda mitad del siglo XX mediante el concepto de sostenibilidad, definido por primera vez en el Informe Brundtland (1987), aunque años antes, el Club de Roma, fundado en 1968, ya había mostrado su preocupación por el modelo de crecimiento basado en las actividades industriales y su relación con otros factores: población, producción de alimentos, recursos naturales y contaminación. Posteriormente, será la Cumbre de Río (1992), celebrada por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) la que desarrolle las estrategias incorporadas en el informe Brundtland. En particular, aquellas que avanzan en el desarrollo de un modelo de producción sostenible, como (O'Brien, 1999):

- a) Procesos de producción más eficientes, en términos de uso de energía y recursos.
- b) Estrategias preventivas.
- c) Tecnologías de producción limpias y procedimientos a lo largo del ciclo de vida del producto.
- d) Minimización o supresión de los desperdicios.

Tras el Informe Brundtland y la Cumbre de Río el concepto de desarrollo sostenible se ha extendido ampliamente en la sociedad y ha adquirido un estatus predominante en las políticas ambientales, mientras que en el ámbito de las corporaciones se observa un mayor interés por el desarrollo sostenible a partir del año 2000. A pesar de los avances producidos en materia medioambiental en los últimos 40 años: desarrollo de nuevas tecnologías, nuevos hábitos de consumo, creación de nuevas instituciones, acuerdos multinacionales e incremento de la conciencia medioambiental, la realidad muestra que este progreso es insuficiente con relación al impacto ecológico, por ejemplo, en lo relativo al cambio climático o a la pérdida de biodiversidad (Meadows *et al.*, 2004) (Zaccai, 2012).

1.2 Motivación.

El papel central del conocimiento en la búsqueda de soluciones a los principales problemas medioambientales de la humanidad, específicamente, en el desarrollo de tecnologías con menores efectos perjudiciales para el medio ambiente es ampliamente reconocido (Ehrlich *et al.*, 1999).

El desarrollo tecnológico y el conocimiento científico acumulado permiten afrontar el reto de desarrollar un modelo de producción sostenible en un campo complejo como es el de los procesos de fabricación mediante arranque de material. En estos procesos intervienen una gran cantidad de disciplinas de la ciencia-tecnología y la ingeniería, desde la ciencia y tecnología de materiales hasta el diseño de máquinas, pasando por la física-mecánica o la transmisión de calor.

Los procesos de fabricación mediante arranque de material requieren elevadas cantidades de energía y consumen una gran cantidad de recursos, fundamentalmente agua y minerales. Adicionalmente, el empleo de fluidos de corte, peligrosos para el medio ambiente, para mejorar los mecanismos de corte por medio de la lubricación y refrigeración del conjunto herramienta-pieza, sitúa a los procesos de mecanizado por arranque de material dentro del grupo de procesos que deben avanzar en el camino de la sostenibilidad.

De acuerdo con lo anterior y asumiendo la necesidad de reducir el impacto negativo de los procesos industriales en el medio ambiente, la principal motivación de la presente Tesis Doctoral es avanzar en el desarrollo de procesos de fabricación sostenibles. En particular, procesos más eficientes en términos de uso de recursos y generación de desperdicios, con un menor impacto ambiental.

La importancia industrial de sectores como el de la automoción y el aeronáutico, unida a la tendencia a reducir el peso de los componentes para lograr un menor consumo de energía y una reducción de las emisiones de CO₂ a la atmósfera, justifican el desarrollo de investigaciones en el campo del mecanizado de materiales ligeros. En este sentido, el magnesio y sus aleaciones constituyen una de las mejores alternativas a los materiales (aceros y hierro) empleados tradicionalmente en la producción de componentes para la industria del transporte.

Específicamente, resulta de interés el estudio de la aplicación de materiales ligeros en los procesos de mantenimiento/reparación de piezas para los sectores de la automoción y la aeronáutica. Estos procesos se caracterizan por el empleo de regímenes de producción menos

exigentes que los utilizados en la producción de nuevas piezas, por lo que se prevé una mejor adaptación de los materiales ligeros a este tipo de procesos.

La reducción de la utilización de fluidos de corte como elemento de refrigeración/lubricación constituye un elemento central de cara a la consecución de procesos de producción sostenibles.

Finalmente, la creciente complejidad de las piezas a producir, exigen que las investigaciones realizadas en los procesos de mecanizado incorporen esta complejidad por medio del empleo de métodos de estudio distintos al tradicional mecanizado continuo. En este sentido, el mecanizado discontinuo (interrumpido e intermitente) resulta un tipo de proceso adecuado para evaluar la idoneidad de los materiales ligeros en la fabricación de piezas complejas que cuenten con distintos tipos de discontinuidades en su geometría.

1.3 Hipótesis de partida.

La definición de la hipótesis de partida surge como consecuencia del trabajo realizado durante el periodo de investigación previo, dentro del programa de doctorado, centrado en el análisis de los sistemas de refrigeración/lubricación avanzados como alternativas a los métodos tradicionales de mecanizado con fluidos de corte.

El conocimiento de los principales sistemas de refrigeración/lubricación y las ventajas identificadas que ofrecen sobre el mecanizado mediante refrigeración/lubricación convencional, para un amplio abanico de procesos y condiciones operativas, permite plantear la hipótesis de que el sistema de refrigeración/lubricación empleado influirá en los resultados obtenidos durante el mecanizado discontinuo. En particular, influirá en el torneado intermitente del magnesio.

Finalmente, se destaca que la hipótesis de partida queda reflejada en el título de la presente Tesis Doctoral: “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”. No obstante, la hipótesis definida se evaluará para unos supuestos concretos, como también queda reflejado en el título. Concretamente, para el torneado a baja velocidad y, exclusivamente, evaluado a través de la rugosidad superficial de las piezas producidas.

1.4 Objetivos.

La definición de los objetivos se configura alrededor de dos tipos de objetivos diferenciados: de tipo general y de tipo particular.

El objetivo de tipo general es el análisis y comprobación de la hipótesis de partida, de acuerdo con las motivaciones indicadas para el desarrollo de la presente investigación: estudio de los procesos de mecanizado discontinuo a baja velocidad de materiales ligeros, como el magnesio. Así, se define:

- **Objetivo general:** conocer la influencia que ejerce la elección del sistema de refrigeración/lubricación en los resultados de rugosidad superficial obtenidos durante el torneado intermitente a baja velocidad de piezas de magnesio.

Adicionalmente, se establecerán un conjunto de objetivos particulares derivados del objetivo general. Estos objetivos pueden ser de tipo fundamental para el desarrollo del objetivo general y también de tipo complementario.

Entre los objetivos particulares fundamentales para el alcance del objetivo general se establece conocer:

- a) Las características del magnesio y sus aleaciones.
- b) Las características y aplicaciones de los principales sistemas de refrigeración/lubricación.
- c) Los fundamentos del mecanizado del magnesio y sus aleaciones.
- d) Las particularidades de los procesos de mecanizado de tipo discontinuo.
- e) Las principales técnicas de análisis que permitan evaluar la hipótesis de partida.

Adicionalmente, se definen los siguientes objetivos particulares, complementarios al estudio de la influencia del sistema de refrigeración/lubricación empleado:

- a) Conocer y evaluar la influencia de los principales factores que pueden afectar a la rugosidad superficial de las piezas mecanizadas.
- b) Desarrollar un método que permita seleccionar las condiciones operativas del proceso que ofrezcan los mejores resultados de rugosidad superficial.

1.5 Estructura.

El desarrollo de la presente Tesis Doctoral se divide en seis capítulos y dos apéndices, detallándose su contenido a continuación:

- a) Capítulo 1: Introducción. Presenta una introducción general al tema de estudio, mostrando el contexto general, la motivación, la hipótesis de partida definida, los objetivos perseguidos y la estructura del trabajo.
- b) Capítulo 2: Estado del arte. Desarrolla el marco teórico a través de los temas fundamentales del problema de estudio: el material de trabajo, los sistemas de refrigeración/lubricación, las particularidades de los procesos de mecanizado de magnesio y las características del proceso de mecanizado discontinuo.
- c) Capítulo 3: Metodología. Define la estrategia utilizada para evaluar la hipótesis de partida, estableciendo el conjunto de actividades necesarias para analizar experimentalmente el proceso de estudio.
- d) Capítulo 4: Aplicaciones y análisis de resultados. Muestra el desarrollo práctico de la experimentación definida mediante la metodología, los principales resultados obtenidos y su posterior análisis mediante técnicas estadísticas.
- e) Capítulo 5: Conclusiones y desarrollos futuros. Recoge el conjunto de hechos más significativos de los capítulos anteriores. Además, presenta las principales líneas de trabajo que se podrían desarrollar a partir del trabajo desarrollado en la presente Tesis Doctoral y que permitirían profundizar en el desarrollo del campo del conocimiento del estudio.
- f) Capítulo 6: Referencias. Recopila el conjunto de referencias bibliográficas, entre otras, artículos científicos publicados en actas de congresos y revistas, libros, y los demás tipos de fuentes documentales consultados.
- g) Apéndices. Recoge un conjunto de tablas en las que se presenta la composición y propiedades de algunas de las aleaciones de magnesio; así como, un conjunto de tablas que recogen recomendaciones para distintos procesos de mecanizado de magnesio.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción.

La evolución histórica de la utilización y desarrollo de los materiales de ingeniería muestra claras tendencias a lo largo de los años. Así, es posible distinguir periodos en los que sobresalía ampliamente el uso de las cerámicas y cristales junto a los polímeros y elastómeros en la prehistoria, y periodos como el comprendido por, aproximadamente, los años 1940 y 1980 en los que la importancia relativa de los metales era notable. La importancia obtenida por los metales a mediados del siglo XX, especialmente, gracias a la aparición, hacia el año 1850, del acero, decae en las décadas siguientes debido al empuje de otros tipos de materiales. En un contexto de fuerte desarrollo de los metales, en la primera parte del siglo XX surgen los aceros aleados y las aleaciones ligeras (Ashby y Johnson, 2010).

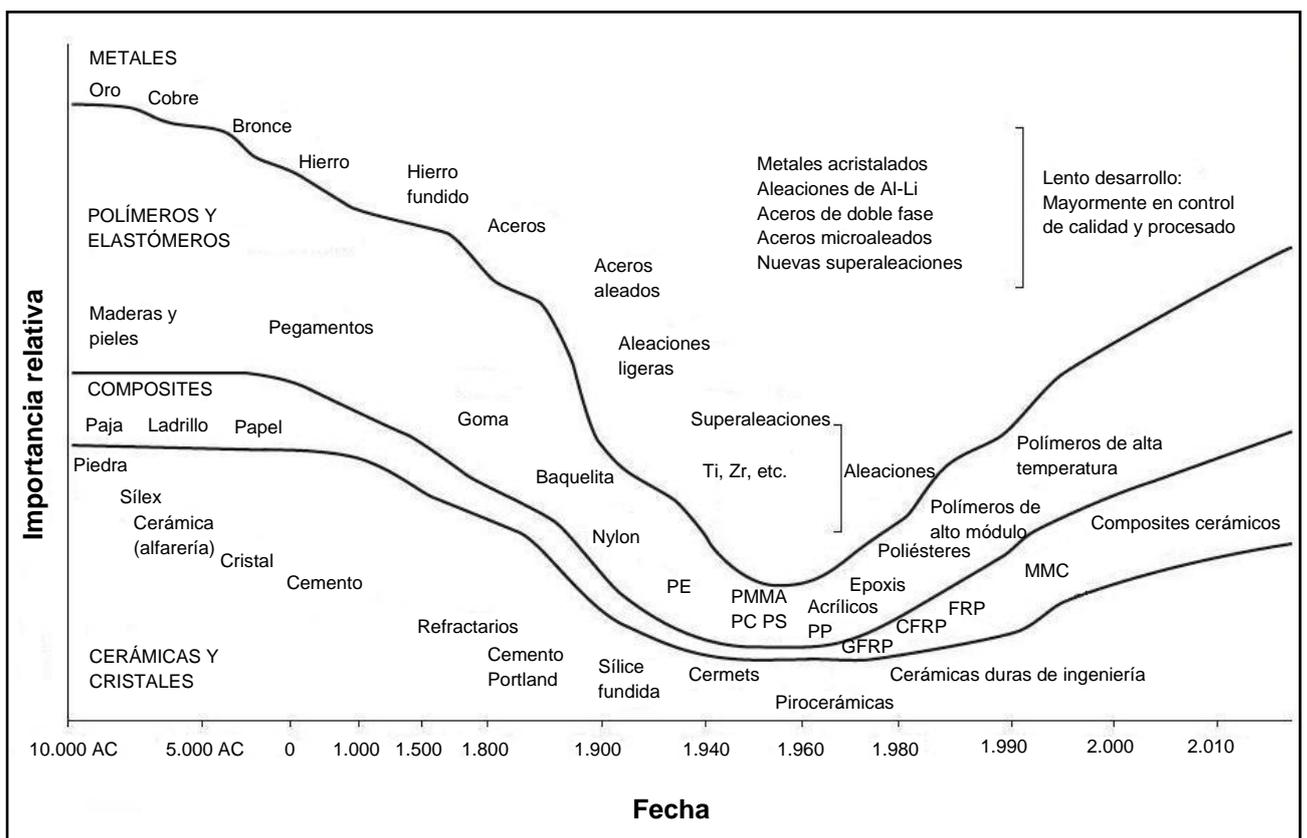


Figura 2.1 Evolución histórica de los materiales de ingeniería. Basada en Ashby y Johnson (2010).

Durante el periodo de desarrollo de los metales se realizará el descubrimiento del magnesio. Más allá de otro tipo de consideraciones, la importancia del magnesio radica en su carácter de elemento esencial para la vida humana. Este hecho, conocido a partir de estudios que

evaluaron la problemática de la deficiencia de magnesio en el organismo de animales y humanos, se data en la primera mitad del siglo XX. Así, el magnesio es un mineral necesario en el organismo humano para el desarrollo de una amplia variedad de funciones fisiológicas, encontrándose en el cuerpo humano en cantidades entre 20 y 28 gramos (Vormann, 2003).

Las primeras aplicaciones del magnesio se remontan a tiempos antiguos y se vinculan al uso medicinal mediante aguas minerales ricas en magnesio. Sin embargo, no sería hasta el siglo XVII cuando, en Inglaterra, se descubre el uso catártico del sulfato de magnesio en el agua mineral (sales de Epsom) (Vormann, 2003).

La historia del magnesio como elemento químico se enmarca en el periodo durante el que fueron descubiertos la inmensa mayoría de los elementos químicos conocidos actualmente, el periodo que comprende los siglos XVIII y XIX. Concretamente, la historia del magnesio se inicia en 1754-55, en Edimburgo (Escocia), cuando Joseph Black, durante su investigación sobre la descomposición del calcio y el carbonato de magnesio, reconoció que el magnesio (magnesia) era una sustancia separable. Posteriormente, el descubrimiento de Joseph Black sería reconocido en el “*Traité Élémentaire de Chimie*” de Antoine Lavoisier (Holywell, 2005).

No sería hasta el año 1808 cuando el magnesio fue obtenido como metal puro por Sir Humphry Davy a través de sus trabajos con la electrolisis. Por otra parte, Antoine Bussy investigaría en 1828 el aislamiento del magnesio mediante técnicas químicas, preparando cloruro de magnesio anhídrido, por medio de la cloración en presencia de carbono, que después se reduce mediante potasio (Holywell, 2005).

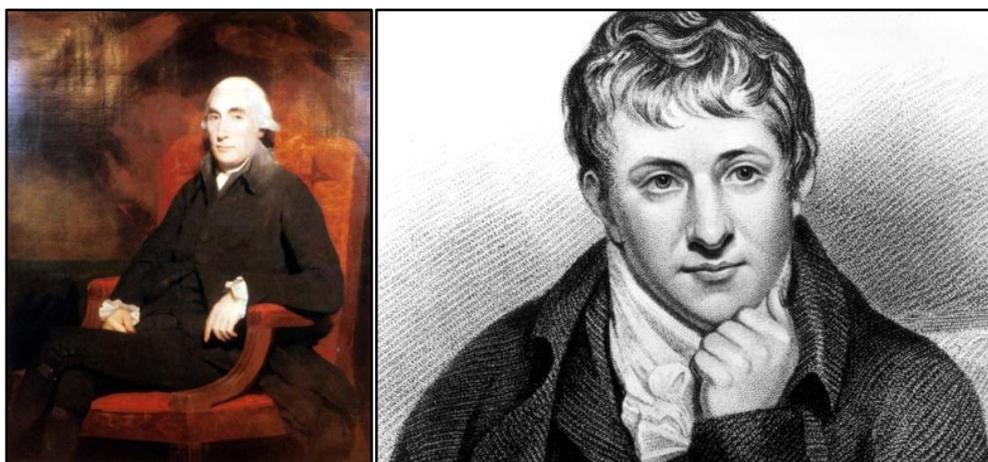


Figura 2.2 Joseph Black (izquierda) (UOF, 2012) y Sir Humphry Davy (derecha) (BBC, 2012).

Las líneas de investigación térmica y electroquímica serían desarrolladas por Justus von Liebig y Michael Faraday. En 1833, el asistente de Sir Humphry Davy, Michael Faraday, lograría producir magnesio mediante electrolisis a partir de $MgCl_2$, aunque sería Robert Bundsen quien desarrollaría la electrolisis del magnesio a nivel comercial en 1852. La producción de magnesio en aquella época era reducida y se limitaba a aplicaciones en la pirotecnia o en el campo de la fotografía. Las primeras aplicaciones del magnesio serían presentadas en la exposición universal de Londres de 1862 (Holywell, 2005) (Witte, 2010).

El magnesio es uno de los principales elementos en la Tierra, estando entre los más abundantes componentes del sistema corteza-manto, junto a otros como el aluminio, calcio y hierro, representando una composición del 1,93% en masa de la corteza terrestre (McDonough, 2001) (Gray y Luan, 2002). Igualmente, el magnesio ocupa un lugar destacado en la composición del agua marina. Se estima que el magnesio existente en el agua marina representa un 0,13% en masa en la composición de los océanos (Gray y Luan, 2002).

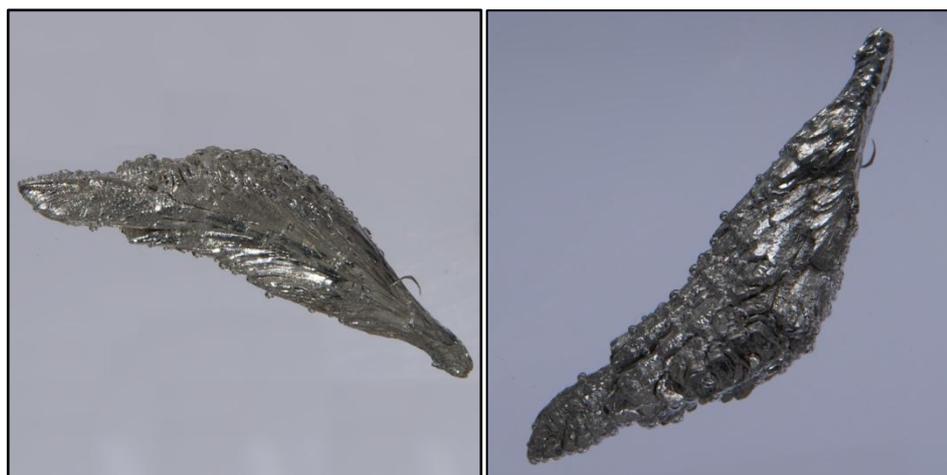


Figura 2.3 Cristal de magnesio ultrafino desde dos perspectivas (IOE, 2012).

Debido a la alta reactividad del magnesio, la forma natural de encontrarlo en la naturaleza es en forma de compuestos. Los más habituales son los clorhidratos: en el agua marina ($MgCl_2 \cdot 12H_2O$), en salmueras y en depósitos salados como carnalita ($MgCl_2 \cdot KCl \cdot 6H_2O$), y los carbonatos: en las piedras dolomitas ($MgCO_3 \cdot CaCO_3$) y magnesita ($MgCO_3$). También es posible encontrar magnesio en minerales superficiales o en flujos de desechos (Kipouros y Sadoway, 2001).

La obtención del magnesio se puede realizar por diversos métodos, citándose, los electrolíticos: acuosos (desarrollados por Dow Chemical Company), que emplean $MgCl_2$ preparado a partir de agua marina, y no acuosos (desarrollados por I.G. Farbenindustrie, Norsk Hydro y Vami), que emplean $MgCl_2$ anhídrido (Castrillejo *et al.*, 1997).

Otra opción para la obtención de magnesio es el empleo de procesos térmicos, como el proceso Pidgeon, el Magnetherm y el de Bolzano (o Bagley o Brasmag) (Cherubini *et al.*, 2008). Destaca el fuerte desarrollo del proceso Pidgeon en la industria china, con menores costes de inversión que los procesos electrolíticos (Du *et al.*, 2010) (Ingarao *et al.*, 2011).

La utilización del magnesio en usos industriales encuentra sus primeras referencias en la I y II Guerra Mundial, en aplicaciones dentro de la industria aeronáutica militar y en la industria nuclear. Tras la II Guerra Mundial el magnesio afrontó un largo periodo de desinterés como material estructural, apreciable en las cifras de consumo de magnesio que alcanzan las 228.000 t en 1944, para, posteriormente, caer al entorno de las 10.000 t/año. No obstante, durante el periodo posterior a la II Guerra Mundial sobresalen algunas aplicaciones puntuales del magnesio, como la fabricación del Volkswagen Beetle¹ (Mordike y Ebert, 2001).

El desinterés de la industria por el magnesio lleva a una reducción del número de aplicaciones del magnesio, como muestra el estudio comparativo entre 1966 y el periodo 1981-1992 realizado por F. Hehmann. Así, el empleo del magnesio en los mercados occidentales ha visto reducido su número de aplicaciones desde 198 hasta 161 (estimadas). Adicionalmente, si se agrupan determinadas aplicaciones en la industria del automóvil, la cifra de 161 podría situarse en 125. En particular, la mayor reducción se sitúa en la industria aeronáutica y armamentística (misiles), pasando de las 96 aplicaciones del año 1966 a las 23 aplicaciones del periodo 1981-1992, mientras que se observan incrementos en la demanda de aplicaciones para el transporte en superficie (Polmear, 2005).

El interés por el magnesio reaparece en las últimas décadas. Así, lo atestiguan las cifras de consumo: 360.000 t en 1998 y 600.000 t en 2003, interés incrementado gracias al fuerte desarrollo de la industria china del magnesio (Mordike y Ebert, 2001) (Tharumarajah y Koltun, 2007) (Du *et al.*, 2010). El desarrollo de la industria de producción de magnesio lleva a alcanzar, a 31 de diciembre de 2011, una capacidad de producción de 1.380.000 t, siendo la estimación de la producción mundial primaria en 2011 de 771.000 t. Destaca especialmente, el caso de China,

¹ Las cifras de producción de magnesio suelen expresarse en unidades derivadas del kg (t) debido a su magnitud. La conversión al S.I. se realiza mediante la siguiente equivalencia: 1 t = 1.000 kg.

correspondiéndole 1.120.000 t de la capacidad de producción y 661.000 t de la producción primaria (Kramer, 2012).

La reducida densidad del magnesio lo hace especialmente recomendable para la industria del transporte, responsable de un porcentaje elevado de las emisiones de gases de efecto invernadero. En un contexto de creciente preocupación por los efectos medioambientales de la actividad industrial, los estados vienen desarrollando normativas que tienden a limitar el consumo de combustible de los vehículos. En particular, desde 1975, proyectada hacia el año 2030, se observa una tendencia en los Estados Unidos que ha llevado a una reducción del consumo de combustible por vehículo aunque, en términos comparativos, las exigencias en otras regiones como la Unión Europea, China o Japón son incluso mayores (Witik *et al.*, 2011) (Cheah y Heywood, 2011).

La reducción del peso de los vehículos es una de las posibles estrategias para disminuir el consumo de combustible, estimándose que una reducción de 100 kg en un vehículo puede generar un ahorro entre 0,3 y 0,4 litros en un trayecto de 100 km. Según diversos estudios, el potencial de ahorro en el peso de los vehículos podría situarse entre el 20 y el 38% (Cheah y Heywood, 2011).

El empleo del magnesio en los distintos sectores industriales necesita el desarrollo de procesos de producción adecuados a sus características específicas. En particular, los procesos de mecanizado por arranque de material, ampliamente empleados en la industria, deberán adaptarse para el empleo de magnesio y sus aleaciones.

Uno de los elementos clave bajo la perspectiva de la producción sostenible, dentro de los procesos de mecanizado y, más concretamente, en el mecanizado de magnesio, es el empleo de fluidos de corte como elemento de refrigeración/lubricación. La importancia de los lubricantes, en particular, de los fluidos de corte en la actividad industrial resulta clara al observar las cifras de consumo de lubricantes. Así, según el informe anual de 2011 del grupo Fuchs, uno de los líderes mundiales en la provisión de lubricantes, el consumo mundial de lubricantes en 2011 se situó en 35.100 millones de kg, habiéndose incrementado un 9% con relación al año 2009; pero todavía por debajo de las cifras anteriores a la crisis. Concretamente, la cifra de consumo de 2011 se sitúa más de un 5% por debajo de la del año 2007, como se puede apreciar en la Figura 2.4 (Fuchs, 2012).

Un análisis detallado del mercado de lubricantes, según áreas geográficas, permite observar un claro dominio por parte de la región Asia-Pacífico y resto del mundo sobre América y Europa, con un constante incremento de la demanda entre 2007 y 2011. Así, en la Figura 2.5 se puede ver la distribución regional de la demanda de lubricantes para el año 2011.

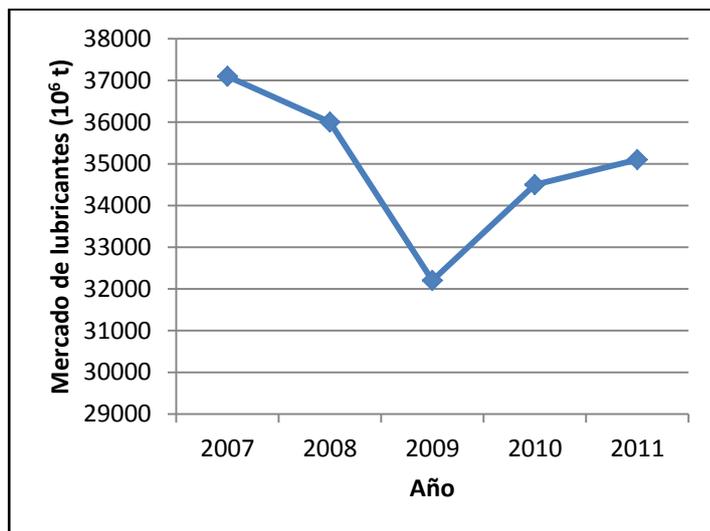


Figura 2.4 Evolución del mercado mundial de lubricantes en el periodo 2007-2011 (Fuchs, 2012).

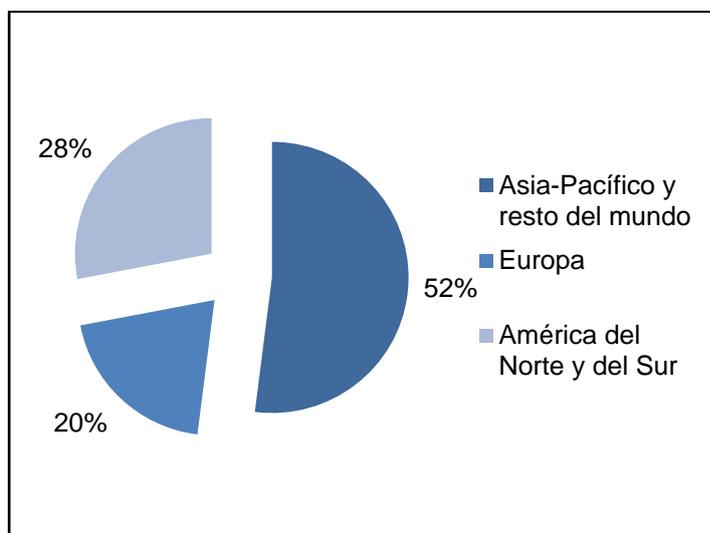


Figura 2.5 Distribución geográfica del mercado mundial de lubricantes en 2011 (Fuchs, 2012).

En relación con el consumo mundial de fluidos de corte se identifican estimaciones que lo sitúan en aproximadamente 2.420 millones de litros por año, de los que 1.260 millones de

litros se destinan a procesos de mecanizado y 750 millones de litros a procesos de estampación (Marksberry y Jawahir, 2008). Por otra parte, Chang *et al.* (2006) cifran el consumo de fluidos de corte en los procesos de mecanizado en 1.284 millones de litros por año².

² Las cifras de consumo de fluidos se pueden encontrar tanto en unidades de masa como en unidades de volumen. Su relación está definida por la densidad. En el Sistema Internacional (SI) la unidad de masa es el kg y la de volumen el m³. No obstante, resulta usual emplear el litro (l) como unidad de volumen. Su conversión al SI. se realiza empleando la siguiente equivalencia: 1 m³ = 1.000 l.

2.2 Magnesio y sus aleaciones.

2.2.1 Generalidades del magnesio.

El magnesio puro posee una estructura cristalina hexagonal compacta o HCP (del inglés *Hexagonal Close-Packed*) que dificulta la posibilidad de deformarlo plásticamente a temperatura ambiente, debido a la restricción del desplazamiento según los planos basales, mientras que a temperaturas elevadas otros planos de deslizamiento se convierten en operativos. Por ello, las aleaciones de magnesio se forman con temperaturas superiores a los 226,7°C³. En general, entre 343,3 y 510°C. Otra de las características que le proporciona la estructura HCP es la anisotropía para sus propiedades mecánicas, lo cual dificulta su conformado en frío. De este modo, el moldeo se convierte en el método más adecuado para conformar el magnesio (Campbell, 2006).

Las principales propiedades físicas y mecánicas del magnesio puro (99,9% en peso) se muestran en la Tabla 2.1 y en la Tabla 2.2. Entre las propiedades físicas más destacables se encuentra su baja densidad y del conjunto de propiedades mecánicas se puede extraer la idea de que el magnesio es un material blando y mecánicamente débil (Westengen, 2001).

En comparación con algunos de los principales materiales estructurales: acero, aluminio y titanio, las propiedades del magnesio lo hacen altamente competitivo cuando se consideran la resistencia y rigidez específica, la resistencia a la abolladura y la rigidez de la celda, debido a su reducida densidad. Así, la ligereza del magnesio lo hace recomendable en la fabricación de piezas cuando el peso juegue un papel importante, permitiendo mejorar notablemente los resultados obtenidos por otros materiales ligeros como el aluminio (Kleiner *et al.*, 2003).

³ Resulta habitual emplear como unidad de la temperatura el grado Celsius, a pesar de que no es la unidad de temperatura del SI. Su conversión al SI se realiza mediante la siguiente expresión: $T^{\circ}(\text{K}) = T^{\circ}(\text{°C}) + 273,15$.

Tabla 2.1 Propiedades físicas del magnesio puro (99,9% en peso) (Westengen, 2001).

Propiedad	Valor
Punto de fusión (°C)	650 ± 2
Punto de ebullición (°C)	1.107 ± 10
Calor latente de fusión (Jkg ⁻¹)	0,37 x 10 ⁶
Calor latente de evaporación (Jkg ⁻¹)	5,25 x 10 ⁶
Calor de combustión (Jkg ⁻¹)	25,1 x 10 ⁶
Calor específico a 20°C (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)	1.030
Calor específico a 600°C (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)	1.178
Resistividad eléctrica a 20°C (Ωm)	4,45 x 10 ⁻⁸
Conductividad térmica a 25°C (Wkg ⁻¹ K ⁻¹)	155
Coefficiente lineal de expansión térmica a 20°C (K ⁻¹)	25,2 x 10 ⁻⁶
Densidad a 20°C (kgm ⁻³)	1.738
Densidad a 600°C (kgm ⁻³)	1.622
Densidad a 600°C (sólido) (kgm ⁻³)	1.650
Densidad a 600°C (líquido) (kgm ⁻³)	1.580
Cambio de volumen durante la solidificación (%)	4,2
Cambio de volumen en el enfriamiento de 650°C a 20°C (%)	5

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas del magnesio puro (99,9% en peso) (Westengen, 2001).

Propiedad	Molde de arena (*)	Extrusión (*)	Laminado duro	Recocido
Resistencia a tracción (MPa)	90	165 – 205	180 - 220	160 - 195
Límite elástico (MPa)	21	69 – 105	115 - 140	90 - 105
Resistencia a compresión (MPa)	21	34 – 55	105 - 115	69 - 83
Elongación 50 mm (%)	2 – 6	5 – 8	2 - 10	3 - 15
Dureza Brinell (500 kp y 10 mm) ⁴	30	35	45 - 47	40 - 41

(*) Para un espesor de 13 mm

La siguiente tabla muestra una comparativa de las propiedades del magnesio frente a otros materiales empleados en procesos de fabricación, pudiendo observarse cómo se incrementa la competitividad del magnesio al considerar las propiedades específicas:

⁴ El ensayo de dureza Brinell se realiza mediante una bola de acero de 10 mm que proporciona una fuerza de 500 kp al material. La conversión a unidades del SI se realiza mediante la siguiente equivalencia: 1 kp = 9,81 kgm/s² y 1 mm = 10⁻³ m.

Tabla 2.3 Propiedades del magnesio en comparación con otros materiales estructurales como el acero, aluminio y titanio (Kleiner *et al.*, 2003).

Propiedad	Acero	Aluminio	Magnesio	Titanio
Densidad (kgm^{-3})	7.830	2.800	1.740	4.500
Módulo de Elasticidad (GPa)	210	70	45	110
Resistencia a tracción (10^6 Nm^{-2})	300 - 1.200	150 - 680	100 - 380	910 - 1.190
Resistencia específica (10^3 Nmkg^{-1})	38 - 153	54 - 243	57 - 218	202 - 264
Rigidez específica (10^6 Nmkg^{-1})	26,8	25,0	25,9	24,4
Resistencia a la abolladura ($\text{N}^{1/2}\text{m}^2\text{kg}^{-1}$)	4,4	9,3	11,2	7,7
Rigidez a la celda ($\text{N}^{1/3}\text{m}^{7/3}\text{kg}^{-1}$)	7,6	14,7	20,4	10,6

El magnesio posee un amplio conjunto de ventajas que posibilitan su empleo en diferentes aplicaciones. Entre las principales ventajas se citan (Mordike y Ebert, 2001):

- a) Densidad más baja entre todos los materiales estructurales.
- b) Alta resistencia específica.
- c) Buena aptitud para el moldeo, adecuación para moldes de alta presión.
- d) Validez para el mecanizado (fresado/torneado) a altas velocidades.
- e) Buena soldabilidad bajo atmósfera controlada.
- f) Mejor resistencia a la corrosión en el caso del magnesio puro.
- g) Buena disponibilidad.
- h) Frente a los materiales poliméricos: mejores propiedades mecánicas, resistencia al envejecimiento, mejor conductividad eléctrica y térmica, y reciclado.

De igual modo, el magnesio presenta una serie de desventajas que deben tenerse en cuenta. Así, se identifican (Mordike y Ebert, 2001) (Kleiner *et al.*, 2003):

- a) Pobre resistencia a fluencia para temperaturas superiores a 100°C.
- b) Baja resistencia a la corrosión debida: a la influencia del ambiente, a su alta electronegatividad en comparación con el aluminio y el acero, o a las variaciones en las sollicitaciones (corrosión debida a rotura por estrés).
- c) Bajo módulo de elasticidad.

- d) Elevada contracción durante la solidificación.
- e) Dificultad para ser trabajado en frío y rigidez.
- f) Alta reactividad química.

Uno de los factores principales que limitan el uso del magnesio es su coste, debido a que la producción del magnesio y la fabricación de componentes, en sectores como la automoción, son actividades intensivas en capital (Du *et al.*, 2010).

El análisis de costes de las materias primas, en particular del magnesio, debe considerar la volatilidad de los precios ligada a la evolución de la situación económica, así como a los ciclos de la minería: aperturas y cierres de minas (Yellishetty *et al.*, 2011). En la siguiente tabla se muestra la evolución de los precios del magnesio durante el periodo 2007-2011, permitiendo apreciar claramente su fuerte volatilidad, incluso durante el mismo año (Kramer, 2012):

Tabla 2.4 Evolución del precio del magnesio en el periodo 2007-2011 (Kramer, 2012).

Año	Coste por unidad de peso (\$/kg)
2007	4,41 - 5,51
2008	6,72 - 7,17
2009	4,85 - 5,29
2010	5,18 - 5,51
2011	4,52 - 4,85

Ampliando el marco temporal, el análisis de los precios de los metales durante el periodo 1972-2007 identifica a las características de los metales como el principal componente de la volatilidad de sus precios, explicando alrededor de dos tercios de la misma, mientras que alrededor de un tercio se puede asociar a las condiciones macroeconómicas. La comparativa con el periodo 1900-1971 muestra un crecimiento considerable de la importancia del impacto de la economía global a lo largo del tiempo (Chen, 2010).

La siguiente gráfica presenta la evolución de los precios del magnesio en comparación con los precios de otras materias primas: cobre, plomo y titanio, pudiendo apreciarse la diferente evolución a lo largo del tiempo. En relación con los precios del magnesio, después de afrontar un periodo de 30 años de caída, en 2005 cambia la tendencia, experimentando una fuerte subida hasta 2010 (Yellishetty *et al.*, 2011).

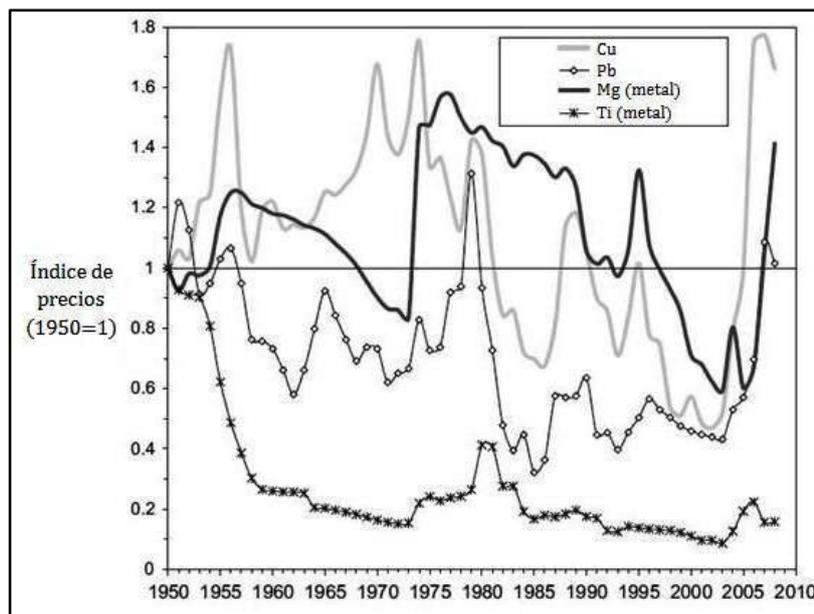


Figura 2.6 Índice de precios del magnesio y otras materias primas (1950-2010) (Yellishetty *et al.*, 2011).

La siguiente gráfica presenta una comparativa de los costes del magnesio frente a otros materiales, con los datos relativizados al coste del acero (toma el valor unidad):

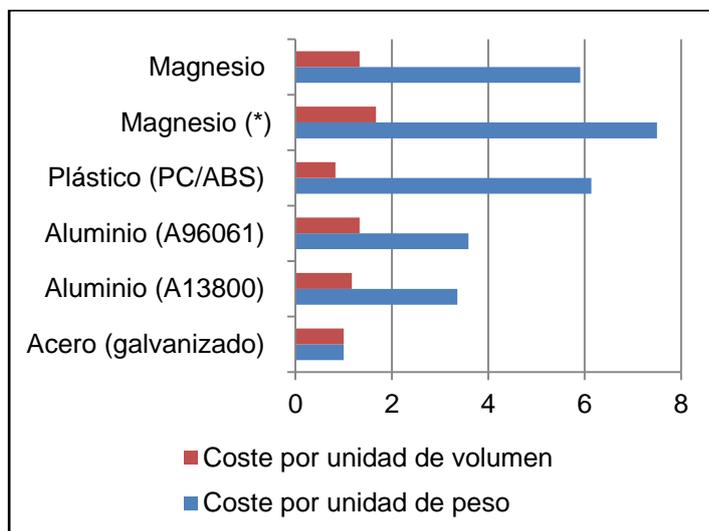


Figura 2.7 Costes comparados (2003) del magnesio frente a otros materiales (Polmear, 2005).

(*) Coste del magnesio en el año 2002

A pesar de la volatilidad de los precios de las materias primas, en la anterior comparativa, presentada por Polmear (2005), se puede apreciar como las importantes diferencias de coste, en términos de coste por unidad de peso, se reducen en gran medida al considerar el coste por unidad de volumen, debido a la favorable densidad del magnesio.

2.2.2 Aleaciones de magnesio.

2.2.3 Generalidades de las aleaciones de magnesio.

La necesidad de mejorar las características del magnesio puro lleva al desarrollo de las aleaciones de magnesio. La utilización de distintos elementos para formar aleaciones se debe a las distintas características que proporcionan a la aleación resultante.

Los elementos aleantes pueden influir en el comportamiento en fundición y moldeo de la aleación. En este sentido, elementos como el aluminio, el cobre o las tierras raras permiten mejorar la moldeabilidad, y otros, como el calcio, el iodo o el zirconio ofrecen buenas propiedades en cuanto al refinado de grano. Igualmente, otros aleantes permiten mejorar las propiedades mecánicas y tecnológicas de las aleaciones, como es el caso del calcio, el manganeso o el silicio en la mejora de la resistencia a fluencia (Polmear, 2005).

Adicionalmente, debe considerarse la influencia de los elementos aleantes en el comportamiento ante la corrosión de la aleación. Por ejemplo, elementos como el manganeso, las tierras raras o el iodo permiten mejorar el comportamiento ante la corrosión, mientras que otros como la plata, el calcio o el hierro tienen un comportamiento perjudicial (Polmear, 2005).

Las diferentes propiedades de los elementos aleantes, unidas a los diferentes requerimientos de la industria, llevan a la generación de distintas líneas de desarrollo para las aleaciones de magnesio. En este sentido, la Figura 2.8 muestra las principales tendencias según busquen mejorar la resistencia específica, la ductilidad, la resistencia a fluencia u otras propiedades como el módulo elástico, el desgaste, la expansión térmica o la fluencia.

Los aleantes empleados en las aleaciones convencionales no permiten mejorar algunas propiedades como, por ejemplo, las constantes elásticas (Mordike y Ebert, 2001). Por ello, se han venido desarrollado los compuestos de matriz metálica o MMC (del inglés *Metal Matrix Composite*) desde la década de los años 70. Su aplicación inicialmente se centra en el sector aeronáutico, aunque posteriormente su uso se extiende a aplicaciones en automoción y en las industrias electrónica y médica (Teti, 2002) (Kılıçkap *et al.*, 2005).

La composición de los materiales compuestos de matriz metálica posee principalmente una base de aluminio, magnesio o titanio, y son reforzados mediante fibras, cortas o largas, y partículas, usualmente de alúmina, grafito o carburo de silicio (Teti, 2002) (Kılıçkap *et al.*,

2005). Además de producir mejoras en el módulo elástico, el empleo de compuestos MMC también puede permitir mejorar la resistencia al desgaste, la rigidez específica, la fluencia y la expansión térmica (Pahutová *et al.*, 1999). No obstante, su utilización se ve limitada debido a los elevados costes de las fibras de refuerzo y del proceso de producción (Hufenbach *et al.*, 2006). Adicionalmente, es preciso considerar que el mecanizado puede ocasionar desgastes elevados en las herramientas de corte debido a la dureza de los elementos de refuerzo empleados (Weinert y Lange, 2001).

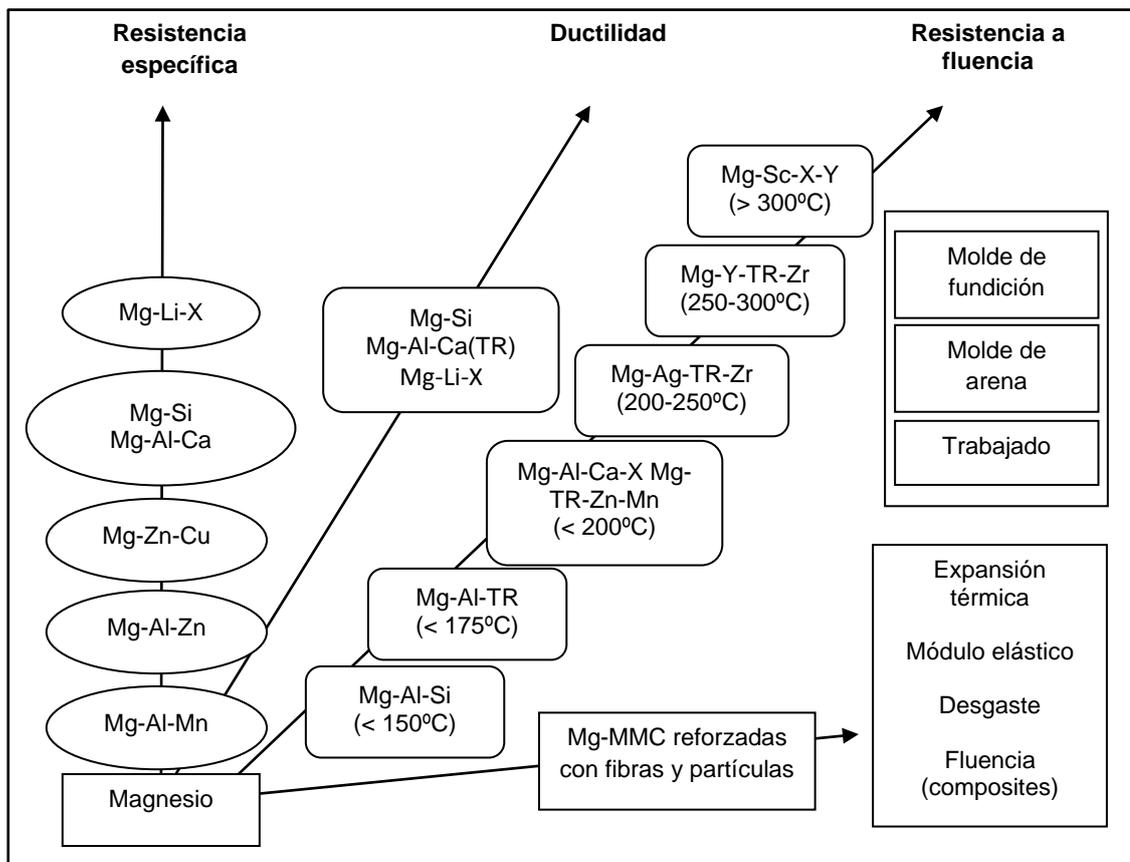


Figura 2.8 Tendencias en el desarrollo de las aleaciones de magnesio. Basada en Mordike y Ebert (2001).

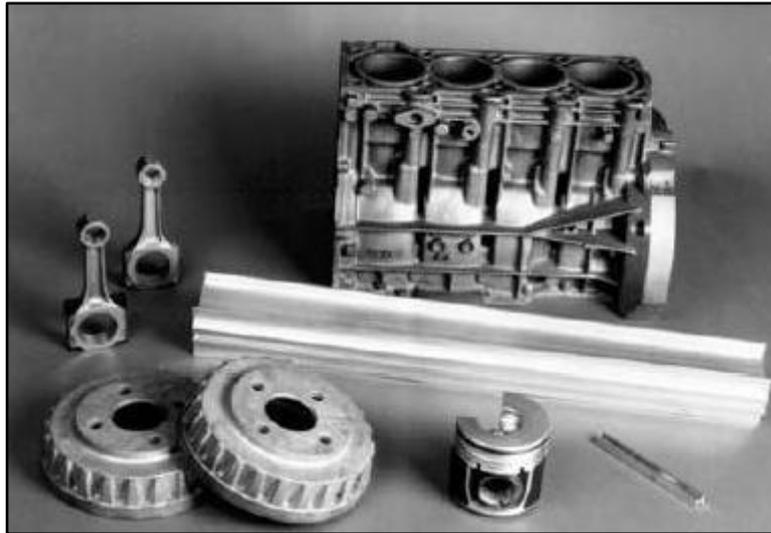


Figura 2.9 Aplicaciones de compuestos de matriz metálica en piezas de automóvil (Teti, 2002).

Las aleaciones de magnesio se pueden clasificar según su método de producción en aleaciones forjadas y aleaciones de fundición (Polmear, 2005), siendo el método de producción más usual el moldeo por inyección a presión (Mordike y Ebert, 2001). A continuación se presentan los principales tipos de aleaciones⁵ (ASM, 1990):

- a) Aleaciones forjadas: barras, palanquillas, piezas con forma, alambres, chapas, placas y piezas forjadas.
- b) Aleaciones de fundición: a alta presión, y en moldes de arena y moldes permanentes.

Por otra parte, las aleaciones de magnesio también se pueden dividir en dos grupos en función de que contengan o no zirconio. La importancia del zirconio radica en su tendencia a formar compuestos estables con algunos de los elementos aleantes más usuales, como el aluminio y el manganeso. A pesar de esto, el empleo del zirconio permite obtener aleaciones que poseen buenas propiedades mecánicas, tanto a temperatura ambiente como a temperaturas elevadas. Las principales aleaciones según esta clasificación son (Polmear, 2005):

- a) Aleaciones libres de zirconio de base: Mg-Al, Mg-Zn, Mg-Zn-Cu y Mg-TR-Zn.
- b) Aleaciones con zirconio de base: Mg-Zn-Zr, Mg-TR-Zn-Zr, Mg-Th, Mg-Ag y Mg-Y.

⁵ Adicionalmente, el Apéndice A.1 incorpora un grupo de tablas en las que se incluye la composición y propiedades de algunas de las principales aleaciones de magnesio.

La temperatura ejerce una importante influencia en las propiedades mecánicas de las aleaciones de magnesio. Así, a temperaturas bajas, las aleaciones mejoran las propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción, el límite elástico y la dureza, aunque se reduce la ductilidad. Sin embargo, a elevadas temperaturas las propiedades mecánicas empeoran, reduciéndose el límite elástico y la resistencia última de las aleaciones (ASM, 1990).

El desarrollo de las aleaciones de magnesio está produciendo nuevos tipos de aleaciones como: AX51, AX52, AX81, AXE522, AJ52 o AJ62. La comparación de las propiedades de estas aleaciones con las aleaciones de magnesio empleadas habitualmente: AZ91, AS21, AS41 y AE42; y la aleación de aluminio: A380, muestra cómo la resistencia a fluencia de las nuevas aleaciones, entre 150 y 175°C, es superior. Asimismo, en general, las nuevas aleaciones son más resistentes a la corrosión (Polmear, 2005).

Otro conjunto de aleaciones desarrolladas en las últimas décadas son las basadas en el sistema Al-Mg con la incorporación del escandio, en proporciones entre 0,25 y 0,35%. Este tipo de aleaciones permite mejorar las propiedades mecánicas en comparación con las aleaciones de Al-Mg tradicionales (Filatov *et al.*, 2000). Adicionalmente, se pueden citar otros tipos de aleaciones como los grupos Mg-Al-Ca, Mg-TR-Zn-Zr, Mg-Sc-Mn y Mg-Y-TR-Zr, aunque su aplicación en sectores como el de la automoción ha encontrado dificultades, tanto por su elevado coste como por su insuficiente resistencia a temperaturas elevadas (Ye y Liu, 2004).

2.2.4 Designación de las aleaciones de magnesio.

De igual modo que sucede con la mayoría de los materiales de ingeniería, a excepción de los cerámicos, composites, cristales y polímeros que se suelen denominar según sus nombres propios, la designación de las aleaciones de magnesio se realiza mediante normas estandarizadas en función de la composición y las propiedades del material (Ion, 2005).

Tradicionalmente, los materiales se han designado siguiendo normas definidas por organismos de países como Alemania (DIN), Estados Unidos (AA, AISI, ASME, ASTM, o SAE), Francia (AFNOR), Japón (JIS) o Reino Unido (BSI). Estas normas siguen en uso en la actualidad a pesar de los esfuerzos que se realizan por armonizar las designaciones, tanto en Europa, mediante la Euronorma (EN), como internacionalmente, mediante la norma ISO (Ion, 2005). A continuación se describen los criterios de designación para dos de los sistemas más habituales: ASTM y UNS.

La designación de las aleaciones de magnesio según la norma ASTM se realiza a partir de las cuatro partes siguientes (ASM, 1990):

- a) Primera parte: formada por un código de dos letras que hace referencia a los dos principales elementos aleantes de la aleación, según la denominación de la Tabla 2.5.
- b) Segunda parte: formada por un código de dos números enteros que hace referencia a los porcentajes de cada uno de los elementos aleantes de la primera parte.
- c) Tercera parte: consiste en una letra del alfabeto que se emplea para diferenciar distintos tipos de aleación que poseen porcentajes idénticos de los dos elementos aleantes principales.
- d) Cuarta parte: se compone de una letra y un número que indica la condición o tratamiento en la que se encuentra la aleación, según la denominación recogida en la Tabla 2.6. La cuarta parte se separa del resto mediante un guión.

Tabla 2.5 Denominación de los elementos aleantes (ASM, 1990) (ASTM, 2005).

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

Tabla 2.6 Denominación de la condición (tratamiento) de la aleación (ASM, 1990).

Designación	Tipo de Tratamiento
F	Sin tratamiento.
O	Recocido.
H10 y H11	Ligeramente endurecidos por deformación.
H23, H24 y H26	Endurecido por deformación parcialmente recocido.
T4	Tratamiento térmico de solubilización.
T5	Sólo envejecido artificialmente.
T6	Tratamiento térmico de solubilización y envejecido artificialmente.
T8	Tratamiento térmico de solubilización, trabajado en frío y envejecido artificialmente.

Por otra parte, la clasificación UNS, desarrollada por ASTM y SAE, designa a los materiales empleando un código alfanumérico compuesto por una letra, que identifica el grupo de aleaciones al que pertenece, y un número de cinco cifras, derivado de las designaciones SAE-AISI, mediante el que se representa la composición química (Ion, 2005). La clasificación UNS no hace referencia al método de obtención del material (Smith, 2005).

Las aleaciones de magnesio, según la clasificación UNS, se encuadran dentro del grupo de aleaciones y metales no ferrosos, comenzando su designación por la letra M (Smith, 2005).

A modo de ejemplo, a continuación se pueden observar las distintas designaciones para la aleación AZ81A (designación ASTM) (Totemeier, 2004):

Tabla 2.7 Principales designaciones de la aleación AZ81A. Basada en Totemeier (2004).

Designación	Sistema de designación
M11810	UNS
AZ81A	ASTM
Mg8AlZn	ISO
MAG1	BSI
G-Mg8AlZn1 (3.5912)	DIN
MC2	JIS
G-A9	AFNOR

2.2.5 Principales aplicaciones del magnesio y sus aleaciones.

En la actualidad la utilización del magnesio se concentra principalmente en tres tipos de aplicaciones: aleaciones de aluminio (43%), moldes de inyección (33%) y desulfuración de acero (10%) (Cherubini *et al.*, 2008).

En su composición pura, el magnesio se emplea en diversas aplicaciones entre las que se destaca su utilización como elemento aleante en aluminio, zinc, plomo y otros materiales no féreos, como desulfurante del acero y hierro, en la producción de hierro fundido nodular, como agente reductor en la producción de berilio, hafnio, titanio, uranio o zirconio, y como agente químico en diversos procesos (ASM, 1990) (Westengen, 2001).

Otras aplicaciones del magnesio son el uso en química orgánica (reacción de Grignard), en pirotecnia, tanto como magnesio puro como aleado con aluminio, en protección contra la corrosión, actuando como cátodo protector, y en la construcción de baterías y pilas (ASM, 1990).

El fuerte desarrollo que se ha venido produciendo en el campo de las aleaciones de magnesio hace posible el empleo del magnesio en sectores diversos como el aeronáutico, el automóvil, la industria electrónica o la industria médica.

En el campo de la industria de la automoción, el magnesio encuentra múltiples aplicaciones debido a su reducida densidad. Se estima que en el año 2005 un vehículo occidental medio de unos 1500 kg incorporaba 4 kg de magnesio, alcanzados gracias a una tendencia de incremento del uso del magnesio con tasas anuales del 15% en los años precedentes. Esta tendencia se prevé que se prolongue en los próximos años, estimándose un consumo de 50 kg de magnesio por vehículo para el año 2015. No obstante, la utilización de magnesio resulta pobre al compararla con la del aluminio o los materiales plásticos, que se sitúa en 120 kg para cada uno (Kulekci, 2008) (Polmear, 2005).

Adicionalmente, la utilización de magnesio en la construcción de vehículos aporta otros importantes beneficios como una mayor resistencia al choque y a la abolladura en comparación con el aluminio, o una mayor capacidad de amortiguar ruidos y vibraciones (Du *et al.*, 2010).

La utilización del magnesio en la construcción de vehículos se produce en diversas piezas como: ruedas (aleaciones AM60A y AZ81A), bombas (AZ91), colectores de admisión (AZ91), cubiertas para las transmisiones (AZ91 y AZ81A), cubiertas de los cilindros (AZ91B), caja de

cambios (ZE41A), suspensiones (ZE41A) y chasis (ZE41A) (Ion, 2005) (Trojanová *et al.*, 2009). También se emplea habitualmente en otras piezas como: asiento, sistema de admisión de aire, volante, columna de dirección, tablero de mandos (viga transversal de soporte), bastidor y depósito, por citar sólo los más relevantes (Mordike y Ebert, 2001) (Tharumarajah y Koltun, 2010).

De especial interés es el caso del bloque del motor ya que constituye la parte más pesada de los automóviles. Las exigencias de reducción de peso en los vehículos lleva a la sustitución de los tradicionales motores de hierro fundido por otras alternativas como el aluminio, que permite reducir el peso un 66%, o el magnesio, que puede llevar a una reducción del peso de hasta un 75% (Tharumarajah y Koltun, 2007). En la siguiente figura se puede observar un bloque de motor V6 de 3 litros construido con magnesio:

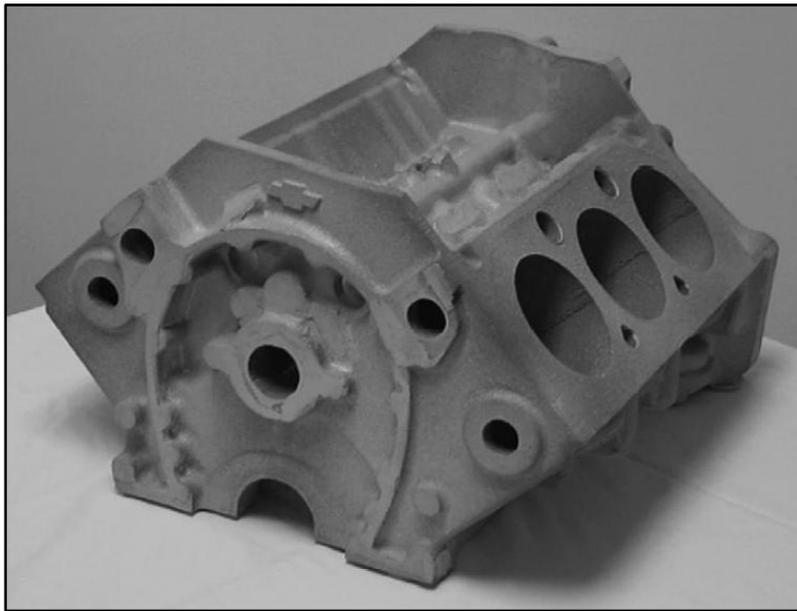


Figura 2.10 Bloque motor V6 de 3 litros construido con magnesio (Tharumarajah y Koltun, 2007).

Entre las aplicaciones del magnesio en la construcción de automóviles se señalan los ejemplos de diversos fabricantes como: Ferrari, en el modelo 550 Maranello, para las ruedas (Froes *et al.*, 1998); Mazda, en el modelo Mazda R360 (1955), para la caja de la transmisión, la caja del embrague, la cubierta delantera del motor y el depósito del aceite del motor; Toyota, entre los años 1980-1999, para las barras superiores y la rueda central de la transmisión, las barras de los pedales de freno, las cubiertas de los cilindros, los discos de las ruedas y el marco

de la ventana del cuadro de mandos; Honda, entre 1980 y 1990, para las cubiertas de los cilindros, los discos de las ruedas, la cubierta del colector de admisión y el cárter de aceite; o Ford, en los años 90, en aplicaciones como los colectores de admisión, los frenos, las bancadas, las cubiertas de válvulas, las columnas de dirección y las suspensiones (Funatani, 2000) (Cole y Sherman, 1995). Vehículos modernos como el BMW serie 5, de 2003, o el Audi 6, de 2011, también emplean magnesio en la construcción de sus estructuras, en combinación con otros materiales como aluminio, acero y/o materiales compuestos (Tempelman, 2011).

Las aleaciones de magnesio también encuentran un campo de aplicación en las competiciones deportivas de motor, por ejemplo, en el motociclismo. La fabricación de ruedas para las motocicletas mediante magnesio fundido o forjado resulta competitiva con relación a la utilización de compuestos de carbono (Kleiner *et al.*, 2003). Por otra parte, el magnesio también ha sido empleado en los automóviles de Fórmula 1. Concretamente, en las cubiertas de los engranajes de los automóviles (Davies, 2003).

Dentro del campo de las aplicaciones aeronáuticas, en la década de los 50 se destaca la utilización del magnesio en el desarrollo de una amplia variedad de elementos auxiliares para el proceso de construcción de los aviones Boeing 707 (Melde, 1959). Por otra parte, el desarrollo de soluciones para el fuselaje de los aviones ha ido abandonándose, quedando el empleo del magnesio limitado a motores y transmisiones, especialmente, para helicópteros (Polmear, 2005). En esta línea, se señala la utilización de la aleación WE43 para la construcción de la caja de engranajes de los helicópteros MD500 y MD600 de McDonnell Douglas (Davies, 2003) (Froes *et al.*, 1998), o la aleación QE22, en la horquilla de las ruedas delanteras de los aviones de combate anglo-franceses Jaguar (Charles *et al.*, 1997). La aleación QE22A también es empleada habitualmente para la construcción de cajas de engranajes en estructuras de aviones (Ion, 2005).

Otro campo de aplicación del magnesio es su uso en misiles y aplicaciones aeroespaciales. Se destaca el uso de la aleación EZ33 en los cohetes de investigación “Skylark”, así como el uso de distintas formas de magnesio en la producción de numerosas piezas de los misiles estadounidenses (Froes *et al.*, 1998) (Eliezer *et al.*, 1998).

Otras aplicaciones diversas se pueden encontrar en campos como los dispositivos electrónicos: carcasas de móviles y cubiertas para ordenadores; aplicaciones deportivas: cuadros y llantas para bicicletas, arcos de tiro y bates de beisbol; u otras, como herramientas de mano y escaleras (Deetz, 2005) (Polmear, 2005) (Pfeifer, 2009) (Ion, 2005).

Finalmente, el magnesio también encuentra aplicaciones en la medicina, gracias a su bajo peso y su inherente biocompatibilidad, como su utilización en implantes (Gray y Luan, 2002). El magnesio, tanto puro como formando aleaciones, ha sido empleado en distintos tipos de implantes en animales y humanos durante los últimos 130 años (Witte, 2010).

2.3 Sistemas de refrigeración/lubricación.

2.3.1 Refrigeración/lubricación convencional.

Durante los procesos de mecanizado se genera una gran cantidad de calor en la zona de trabajo, por una parte, debido a que la energía requerida para deformar al material se convierte en calor y, por otra parte, a que también se disipa el calor producido por la fricción entre la herramienta y el material. Para evitar que las temperaturas alcanzadas sean excesivas y reducir la fricción, tradicionalmente, se ha recurrido a la utilización de fluidos de corte debido a sus funciones lubricantes y refrigerantes.

El empleo de fluidos de corte en el mecanizado proporciona importantes ventajas, entre las que se destacan (Avallone y Baumeister, 1996) (Nouari *et al.*, 2003):

- a) Mantener la herramienta refrigerada, previniendo que se alcancen temperaturas para las cuales disminuye la dureza y la resistencia a abrasión de la misma.
- b) Reducir la fricción y el desgaste, alargando la vida de las herramientas y mejorando el acabado superficial de la pieza mecanizada.
- c) Reducir el consumo de energía.
- d) Disminuir la temperatura en la zona de corte y la distorsión térmica de la pieza.
- e) Retirar la viruta de la zona de corte.
- f) Proteger las superficies mecanizadas contra la corrosión del ambiente.

La eficacia del fluido de corte está condicionada por diversas cuestiones como: tipo de operación de mecanizado, material de trabajo y condiciones operativas (De Chiffre y Belluco, 2000). La influencia que ejerce el fluido de corte en la temperatura alcanzada en el material resulta evidente, identificándose una reducción de la temperatura al incrementar el caudal de fluido empleado (Zhong *et al.*, 2010a).

A pesar de las ventajas que el uso de los fluidos de corte aporta a los procesos de mecanizado, también existen inconvenientes asociados a su uso que deben ser considerados. Entre las principales desventajas se señalan:

a) Coste.

Los costes asociados al uso de fluidos de corte se deben a la compra, instalación y puesta a punto del equipo de suministro, al coste de los propios fluidos, al sistema de mantenimiento y al tratamiento de los residuos generados (Adler *et al.*, 2006).

Según estudios realizados por la industria alemana de la automoción, los costes asociados al empleo de fluidos de corte se estiman entre el 7 y el 17% del coste total de producción de la pieza. En contraste, los costes asociados a las herramientas se estiman entre el 2 y el 4% (Klocke y Eisenblätter, 1997). Estudios más recientes en la industria del automóvil inciden en los mayores costes asociados a los fluidos de corte en comparación con los de las herramientas, representando el 18% y el 7% del coste total, respectivamente (Sánchez *et al.*, 2010).

b) Impacto medioambiental.

Otro de los inconvenientes de los fluidos de corte es la posibilidad de ejercer un impacto negativo en el medio ambiente al ser manipulados inadecuadamente, pudiendo causar daños en el terreno o en los recursos hídricos (Diniz y Oliveira, 2004). Adicionalmente, debe considerarse la posibilidad de generación de polución debido a los procesos de descomposición/disociación de los fluidos de corte cuando se generan elevadas temperaturas durante el mecanizado (Yildiz y Nalbant, 2008).

c) Riesgos para los operarios.

Una importante desventaja del empleo de los fluidos de corte está asociada a su posible incidencia en la salud de los operarios; pudiendo ocasionar problemas en la piel o en el aparato respiratorio por contacto directo o inhalación de los vapores que desprenden los mismos (Aggarwal *et al.*, 2008).

Los fluidos de corte pueden ser clasificados en los siguientes grupos:

a) Aceites puros.

Existen diversos tipos, entre los que se destacan los aceites minerales, los aceites grasos y las mezclas de aceites minerales con otros componentes. Son productos que no se mezclan con agua. Pueden ser formulados con aditivos o sin aditivos. Los aceites minerales poseen reducidas propiedades lubricantes, pero su coste es reducido. El uso de los aceites grasos está en declive. En general, su formulación se realiza a partir de manteca de cerdo y aceite de colza. Por su parte,

las mezclas surgen como una estrategia para generar productos adecuados para procesos de mecanizado exigentes. En este sentido, se pueden considerar, entre otros, mezclas de aceites minerales y aceites grasos, aceites minerales y aceites grasos sulfurados, y aceites minerales y parafina clorada (El Baradie, 1996).

- b) Fluidos de base acuosa.
- 1) Aceites emulsificables.

También suelen denominarse aceites solubles, emulsiones o fluidos de corte emulsificables. Combinan las buenas propiedades lubricantes de los aceites con las buenas propiedades refrigerantes del agua (Jain y Shukla, 1997) (El Baradie, 1996). Generalmente, incorporan en su composición entre el 1 y el 20% de aceite (Štěpina y Veselý, 1992).

Las propiedades del agua como su reducido coste, su capacidad de transferencia de calor y el hecho de que no es inflamable, hacen que sea un componente ideal para ser empleado en los fluidos de corte. Debido a las buenas propiedades refrigerantes que poseen los aceites emulsificables, resultan efectivos en los mecanizados a alta velocidad y bajas presiones de corte, en los que se generan temperaturas elevadas en la zona de corte (Stachowiak y Batchelor, 2005).

Entre las ventajas de los aceites emulsificables se identifican el coste, la importante reducción de calor obtenida y la obtención de unas condiciones de trabajo más limpias (El Baradie, 1996).

- 2) Sintéticos y semisintéticos.

Los fluidos sintéticos son soluciones químicas formadas a partir de sustancias inorgánicas y/o otros materiales mezclados en agua, pero que no incluyen aceites minerales en su formulación (El Baradie, 1996). Las principales ventajas que ofrecen se basan en sus buenas propiedades refrigerantes, buena lubricidad, mayor vida útil y bajo impacto medioambiental (Jain y Shukla, 1997). Se destaca a los hidrocarburos sintéticos, como las polialfaolefinas, diésteres, polyol ésteres, alquil benceno o poli-alquil glicoles (Avallone y Baumeister, 1996).

Por otra parte, los fluidos de corte semisintéticos son similares a las soluciones sintéticas, pero incorporan pequeñas cantidades de aceites emulsificables (Avallone y Baumeister, 1996). La concentración de aceite en los fluidos semisintéticos suele situarse entre el 10 y el 15% (Cookson, 1977).

A continuación se comparan las principales funciones requeridas a los fluidos de corte: lubricación, refrigeración y capacidad limpiadora, para aceite, aire, emulsión y la alternativa de mecanizar en seco, señalándose también el calor específico:

Tabla 2.8 Comparativa de las funciones de algunos fluidos de corte (Kundrák *et al.*, 2006).

Tipo de fluido	c _p (kJ/kgK)	Función		
		Refrigerante	Lubricante	Limpiadora
Emulsión	4,18	Excelente	Buena	Excelente
Aceite	1,92	Buena	Excelente	Buena
Aire	1,04	Débil	No	Débil
Seco		No	No	No

La elección del tipo de fluido es un elemento clave del proceso de mecanizado. Así, la experimentación realizada durante el taladrado de acero inoxidable, mediante tres tipos distintos de emulsiones: aceite mineral, aceite vegetal y solución semisintética, muestra como las mejores tasas de mecanizado se logran con el aceite vegetal, a excepción del caso de la velocidad de corte de 20 m/min⁶, para la que la solución semisintética proporciona los mejores resultados. En general, la solución semisintética se comporta mejor que el aceite mineral, pero a mayor velocidad de corte el aceite mineral proporciona los mejores resultados (Routio y Säynätjoki, 1995).

Para mejorar las propiedades de los fluidos de corte se suele recurrir al empleo de aditivos. No obstante, su coste elevado sólo hace recomendable su uso cuando se pueden aprovechar economías de escala (Sloman, 2003). Entre los principales aditivos se destacan: modificadores de fricción, de presión extrema, sólidos en suspensión, emulsificantes, inhibidores de corrosión, inhibidores de oxidación, antiespumantes y antibacterianos (ASM, 1992).

La aplicación de los fluidos de corte en el mecanizado se lleva a cabo mediante distintos métodos, entre los que se señalan los siguientes:

⁶ Usualmente la velocidad de corte se expresa en m/min. La conversión al SI se realiza mediante la siguiente equivalencia: 1 m/min = (1/60) m/s.

a) Enfriamiento por inundación.

Es el método más habitual. El caudal de fluido aplicado va desde los 10 – 20 l/min (herramientas monofilo) hasta los 230 l/min (herramientas multifilo)⁷. Se recomienda emplear boquillas múltiples para mejorar los efectos de la refrigeración (Avallone y Baumeister, 1996).

b) Sistemas de alta presión.

La alta presión es empleada cuando se requiere una rápida disminución de la temperatura en la zona de corte e incluso para romper virutas, generalmente, durante el mecanizado a elevadas velocidades de corte. Se pueden emplear diferentes rangos de presión, en combinación con diferentes ratios de flujo de refrigerante. Así, es posible trabajar con presiones superiores a los 150 MPa y flujos inferiores a 6 l/min o presiones inferiores a los 30 MPa y flujos de hasta 50 l/min (Ezugwu, 2005) (Courbon *et al.*, 2009).

La influencia del método de aplicación, concretamente, del caudal y de la presión del fluido es analizada por Diniz *et al.* (2010), observando la importancia de la velocidad de corte empleada para evaluar la eficacia de los distintos sistemas de refrigeración/lubricación. En particular, se observa como la refrigeración a alta presión y reducido caudal proporciona vidas de la herramienta más prolongadas, por encima del mecanizado en seco, refrigeración/lubricación convencional y refrigeración a alta presión y elevado caudal.

Los efectos negativos que tienen los fluidos de corte, unidos al incremento de legislación medioambiental (López de Lacalle *et al.*, 2006), en un entorno social e industrial cada vez más sensibilizado con el medio ambiente, llevan a los centros de investigación, a la industria y a las universidades, a investigar y trabajar en alternativas a la refrigeración/lubricación convencional. No obstante, en determinados procesos no es posible suprimir el uso de los fluidos de corte. Por ello, es importante que la selección de fluidos incorpore factores de evaluación del impacto ambiental asociado. Un ejemplo de modelo de toma de decisiones que incorpora aspectos de impacto ambiental es el propuesto por Tan *et al.* (2002). Este modelo sitúa como objetivos en la selección del fluido la calidad, el coste, el tiempo, el consumo de recursos e el impacto ambiental.

⁷ Los valores de caudal para la refrigeración/lubricación convencional suelen presentarse en l/min. La conversión a unidades del SI se realiza mediante la siguiente equivalencia: 1 l/min = $(10^{-3}/60)$ m³/s.

2.3.2 Mecanizado en seco.

El mecanizado en seco es el objetivo final para lograr procesos de mecanizado respetuosos con el medio ambiente, constituyendo una alternativa adecuada frente al mecanizado mediante fluidos de corte siempre que se consigan alcanzar los mismos tiempos de operación, vida de la herramienta y calidad de las piezas.

El desarrollo tecnológico en el campo del mecanizado, visible en cuestiones como la constante evolución de las herramientas de corte (geometría y recubrimientos) y mejoras en los materiales de trabajo, permite avanzar en la eliminación de la refrigeración mediante fluidos de corte (Klocke y Eisenblätter, 1997).

De especial interés resultan los avances producidos en el campo de los recubrimientos. La misión de los recubrimientos consiste en suplir las funciones que desempeñan los fluidos de corte. En particular, en lo referente a aquellas que permiten alargar la vida de la herramienta. En relación con el uso de recubrimientos, durante el mecanizado en seco de una aleación de níquel-cromo, el fuerte desgaste de las herramientas de carburo cementado hace recomendable la utilización de recubrimientos para su mecanizado, siendo el nitruro de aluminio-titanio (TiAlN) el que muestra un mejor comportamiento (Devillez *et al.*, 2007).

A pesar de los avances producidos en las últimas décadas, el mecanizado en seco todavía no resulta una técnica adecuada para todos los tipos de procesos necesarios en la industria hoy en día (Kelly y Cotterell, 2002). En este sentido, Weinert *et al.* (2004) estudian la adecuación del mecanizado en seco y sistema de refrigeración de mínima cantidad de lubricante o MQL (del inglés *Minimum Quantity Lubrication*) para distintos tipos de procesos y materiales, no siendo recomendable el mecanizado en seco en todos los casos analizados. En el mismo sentido, Filipovic y Stephenson (2006) indican que el taladrado en seco puede generar una distorsión térmica excesiva y una pobre vida de las herramientas. Asimismo, el mecanizado en seco no resulta ser una técnica adecuada en el taladrado de aleaciones de aluminio-silicio, debido a la ductilidad de la pieza que hace que las virutas se peguen a la herramienta en un breve periodo de corte (Dhar *et al.*, 2006).

La herramienta de corte juega un papel relevante en el mecanizado en seco, debiendo adaptarse al sustrato empleado, y poseer una geometría y recubrimiento adecuado al trabajo a realizar.

La ausencia de fluidos de corte en el mecanizado tiene como principales inconvenientes la generación de calor, la aparición de mecanismos de adhesión, la fricción en el conjunto herramienta-pieza y una mayor dificultad en el proceso de evacuación de las virutas. No obstante, el mecanizado en seco ofrece algunas ventajas como la ausencia de choques térmicos (Klocke y Eisenblätter, 1997).

La aplicación del mecanizado en seco requiere el conocimiento de la influencia de los parámetros de corte y sus interrelaciones, así como los límites de aplicación de la técnica. Uno de los factores de relevancia en el proceso 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).

En relación con la vida de la herramienta, la literatura especializada recoge diversa experimentación que desaconseja el mecanizado en seco debido al excesivo desgaste generado en la herramienta en comparación con otros sistemas, como la refrigeración/lubricación convencional y el sistema MQL (Diniz y Micaroni, 2002) (Diniz y Oliveira, 2004). Así, ensayos realizados mediante mecanizado en seco, sobre acero, ofrecen tasas de eliminación de viruta inferiores a las obtenidas en ensayos similares realizados empleando aceite sintético con un 6% de concentración de agua, para distintas velocidades de corte y avances. No obstante, a medida que se incrementa el avance de la herramienta o, simplemente, avance, se reducen las diferencias entre ambos sistemas. Asimismo, la rugosidad superficial obtenida en el mecanizado en seco mejora la obtenida mediante refrigeración/lubricación convencional (Diniz y Micaroni, 2002).

Por otra parte, otros ensayos realizados utilizando mecanizado en seco, sobre acero, una herramienta de nitruro de boro cúbico policristalino o PCBN (del inglés *Polycrystalline Cubic Boron Nitride*) y una velocidad de corte de 110 m/min, muestran un menor desgaste del flanco de la herramienta que el obtenido con refrigeración/lubricación convencional, sistema de refrigeración MQL y refrigeración gaseosa mediante aire comprimido. Ensayando mecanizado en seco, refrigeración/lubricación convencional y sistema MQL para diferentes velocidades de corte se obtienen resultados aproximados entre mecanizado en seco y sistema MQL, en términos de desgaste del flanco de la herramienta, obteniéndose en el caso del mecanizado mediante refrigeración/lubricación convencional desgastes del flanco de la herramienta superiores. De manera similar, los resultados de rugosidad superficial permiten identificar, en términos

generales, un peor comportamiento de la refrigeración/lubricación convencional en comparación con el mecanizado en seco y el sistema MQL (Diniz *et al.*, 2003).

2.3.3 Sistema con mínima cantidad de lubricante.

El sistema de refrigeración/lubricación con mínima cantidad de lubricante, MQL o NDM (del inglés *Minimum Quantity Lubrication* y *Near Dry Machining*, respectivamente) es una alternativa más ecológica y eficiente económicamente a la refrigeración/lubricación convencional. De acuerdo con Weinert *et al.* (2004), se puede realizar una división en los sistemas de refrigeración/lubricación según se emplee una emulsión de agua más aceite, denominándose entonces sistema de mínima cantidad de refrigeración o MQC (del inglés *Minimum Quantity Cooling*) o aceite, llamándose entonces de mínima cantidad de lubricación, MQL o NDM⁸.

El objetivo principal del sistema MQL consiste en reducir drásticamente la utilización de lubricante durante el mecanizado, pudiendo emplear niveles unas 10.000 veces inferiores a los utilizados en la refrigeración/lubricación convencional, pasando de flujos aplicados con orden de magnitud en l/min a flujos con orden de magnitud en ml/h (10-50 ml/h)⁹ (Weinert *et al.*, 2004) (Sharma *et al.*, 2009).

Con relación al tipo de fluido de corte, su selección no se realiza exclusivamente en función de sus propiedades primarias (refrigeración, lubricación y evacuación de viruta) sino que también es preciso atender a propiedades secundarias como la biodegradabilidad (aceites de base vegetal o ésteres sintéticos), estabilidad frente a la oxidación y estabilidad en el almacenamiento. Con relación a las propiedades secundarias se destaca la superioridad del polyol ester (biodegradable sintético) sobre los aceites vegetales (Weinert *et al.*, 2004). La aplicación de aceites de tipo vegetal, concretamente aceite de palmera, en el sistema MQL muestra mejores resultados que la utilización de ésteres de tipo sintético, de mayor coste, en términos de microdureza, defectos superficiales, deformación debajo de la superficie y rugosidad superficial, para las distintas condiciones operativas evaluadas. Estas mejoras se justifican en la mayor viscosidad del aceite de palmera (Rahim y Sasahara, 2011).

El empleo del sistema MQL ofrece dificultades debido al amplio rango de parámetros que se pueden modificar en su aplicación: tipo de fluido, configuración de las boquillas, caudales o presiones, lo cual dificulta la predicción de los posibles resultados del proceso. Por ello, es

⁸ En la presente Tesis Doctoral se empleará exclusivamente el término MQL.

⁹ Los valores de caudal para la refrigeración mediante el sistema MQL se suelen presentar en l/min. La conversión a unidades del SI se realiza mediante la siguiente equivalencia: 1 ml/h = $(10^{-6}/60^2)$ m³/s.

interesante presentar el modelo que plantean Marksberry y Jawahir (2008), para la evaluación de los resultados previstos en el mecanizado de metales mediante el sistema MQL. El modelo utiliza como criterio la vida de la herramienta. Así, el planteamiento realizado consiste en la corrección de la ecuación para mecanizado en seco planteada previamente por Jawahir *et al.* (1995) y Li *et al.* (1997), incorporando el efecto del sistema MQL.

Los resultados obtenidos mediante el sistema MQL son ampliamente recogidos en la literatura especializada. Así, diversos experimentos indican cómo el sistema MQL ofrece mejoras con relación a la vida de la herramienta. En particular, el desgaste obtenido es inferior al generado en el mecanizado en seco (Kishawy *et al.*, 2005) (Kang *et al.*, 2008) (Sreejith, 2008).

En general, sucede lo mismo cuando se compara el desgaste de la herramienta obtenido empleando el sistema MQL y la refrigeración/lubricación convencional (Kishawy *et al.*, 2005) (Kang *et al.*, 2008). Otras investigaciones ofrecen resultados de desgaste próximos entre ambos sistemas (Braga *et al.*, 2002). En contraste, la investigación de Da Silva *et al.* (2011) indica que la refrigeración/lubricación convencional realizada con un caudal de fluido reducido, 0,25 l/min, permite mejorar los resultados obtenidos mediante el sistema MQL (60 ml/h) y la refrigeración/lubricación convencional con un caudal de 4,6 l/min. Del mismo modo, alguna experimentación muestra una reducción del desgaste al emplear la refrigeración/lubricación convencional en relación con el sistema MQL (Obikawa *et al.*, 2008). En particular, se identifica que para avances o velocidades de corte elevadas el desgaste se incrementa notablemente al utilizar el sistema MQL (Rahman *et al.*, 2002).

La rugosidad superficial obtenida en el mecanizado mediante el sistema MQL también resulta mejor a la obtenida con otros sistemas como la refrigeración/lubricación convencional o el mecanizado en seco (Kamata y Obikawa, 2007) (Liao y Lin, 2007).

La temperatura del caudal de aire empleado en el sistema MQL ejerce una moderada influencia en el desgaste de la herramienta y en rugosidad superficial obtenida. Así, la experimentación realizada mediante diferentes sistemas de refrigeración/lubricación: mecanizado en seco, refrigeración/lubricación convencional y sistema MQL con diferentes temperaturas de aire, indica que la reducción de la temperatura del aire en el sistema MQL permite mejorar los resultados de desgaste de la herramienta y la rugosidad superficial de la pieza mecanizada. En particular, al emplear una temperatura para el aire de -15°C (Yuan *et al.*, 2011).

Finalmente, el sistema MQL permite obtener mejores resultados en procesos de mecanizado difíciles de llevar a cabo, como el taladrado de aluminio, en comparación con el mecanizado en seco. En este sentido, experimentaciones con mecanizado en seco y sistema MQL con una pequeña cantidad de agua, muestran cómo el taladrado mediante el sistema MQL requiere de menores pares y fuerzas. Además, la adhesión de material también es inferior (Bhowmick y Alpas, 2008).

2.3.4 Refrigerantes/lubricantes criogénicos.

La utilización de materiales criogénicos en los procesos de refrigeración/lubricación, con aplicación en diversos campos como: medicina, automoción, producción, electrónica o industria aeroespacial se ha convertido en una alternativa adecuada al empleo de fluidos de corte (Yildiz y Nalbant, 2008).

Se denominan materiales criogénicos a aquellos que son empleados a muy bajas temperaturas (inferiores a -150°C), siendo el principal referente el nitrógeno líquido, que desde los años 50 viene probándose como fluido de corte (Yildiz y Nalbant, 2008).

El mecanizado mediante materiales criogénicos usualmente produce cambios en las propiedades de la pieza a mecanizar y/o en la herramienta de corte debido a la disminución de la temperatura, lo cual puede facilitar el mecanizado con relación al realizado a temperatura ambiente (Shokrani *et al.*, 2012).

Las características del nitrógeno líquido son muy distintas a las de los fluidos de corte empleados tradicionalmente. En concreto, posee una viscosidad baja y no se adhiere fácilmente a las superficies de los materiales, debido a su tendencia a no humedecerse. Asimismo, se evapora rápidamente en el aire (Hong *et al.*, 2001). De este modo, la utilización del nitrógeno líquido se basa fundamentalmente en sus propiedades como refrigerante aunque también han sido identificadas sus propiedades como lubricante (Hong, 2006).

El nitrógeno líquido se obtiene mediante un proceso de destilación fraccionada a partir del aire líquido, siendo una importante ventaja su abundancia en la atmósfera (aproximadamente un 78%). Además, entre sus características principales se destaca que no desprende olor y que no es tóxico (Yildiz y Nalbant, 2008).

Los métodos de aplicación de los refrigerantes criogénicos se pueden agrupar en los cuatro tipos siguientes (Yildiz y Nalbant, 2008):

a) Preenfriamiento criogénico.

El objetivo es modificar las características de la pieza o de las virutas, pasando de dúctil a frágil, mediante un proceso de enfriamiento previo a la mecanización. Dicho enfriamiento se puede producir mediante baño en recinto cerrado o sistema de inundación.

Los inconvenientes de este método: incremento de las fuerzas de corte y procesos de abrasión, así como cambios dimensionales y un elevado consumo de refrigerante criogénico hacen que sea difícil de llevar a la práctica en las líneas de producción.

b) Enfriamiento criogénico indirecto.

El método persigue enfriar el punto de corte mediante la conducción de calor entre la zona de corte y una cámara de refrigerante criogénico que se encuentra en la cara de la herramienta o en el portaherramientas. En este caso no se aplica refrigerante directamente a la pieza o a la herramienta. El refrigerante, al no entrar en contacto con la pieza, no provoca cambios en las propiedades de la pieza. No obstante, la eficacia del método queda fuertemente condicionada por la distancia entre la cámara y el punto de mayor temperatura, así como por la conductividad térmica del material de la herramienta.

c) Enfriamiento criogénico mediante spray y chorro.

El enfriamiento se produce a través de boquillas que inyectan el refrigerante de modo directo al conjunto herramienta-viruta. En contraposición con los sistemas de aplicación de chorro general a la zona de corte, el empleo de boquillas permite ajustar más eficientemente el refrigerante aplicado según las necesidades del proceso. Así, se disponen de micro-boquillas que alimentan de refrigerante al flanco o a la cara de desprendimiento de la herramienta, que es donde se generan las mayores temperaturas durante el proceso. También es posible alimentar ambas caras al mismo tiempo mediante dos boquillas.

d) Tratamiento criogénico.

Es un proceso similar al tratamiento térmico con calor en el que las piezas se enfrían hasta la temperatura criogénica durante un periodo determinado de tiempo. Posteriormente, se lleva a las piezas a la temperatura ambiente, logrando incrementar la resistencia al desgaste y aumentar la estabilidad dimensional.

La aplicación de la refrigeración criogénica es ampliamente recogida en la literatura especializada. Así, diversos experimentos de mecanizado realizados mediante refrigeración criogénica presentan mejoras con relación a la vida de la herramienta. En particular, el desgaste obtenido es inferior al generado en el mecanizado en seco (Paul *et al.*, 2001) (Dhar y Kamruzzaman, 2007) (Venugopal *et al.*, 2007).

Con relación a la calidad de las piezas mecanizadas, diversa experimentación indica que los resultados de rugosidad superficial obtenidos con la refrigeración criogénica mejoran a los obtenidos con el mecanizado en seco (Paul *et al.*, 2001) (Paul y Chattopadhyay, 2006) (Dhar *et al.*, 2002) (Dhar y Kamruzzaman, 2007) (Jerold y Kumar, 2011).

La elección de la zona a aplicar el refrigerante juega un papel importante en la temperatura en la herramienta y en el coeficiente de fricción. Así, cuando el refrigerante es aplicado únicamente en la cara de incidencia la máxima temperatura alcanzada supera ampliamente a la obtenida cuando se dirige el refrigerante hacia la cara de desprendimiento. Asimismo, la combinación de las dos refrigeraciones reduce todavía más la máxima temperatura alcanzada. De igual modo, sucede con el coeficiente de fricción, obteniéndose su valor máximo para refrigeración en la cara de incidencia, seguido por la refrigeración en la cara de desprendimiento y, finalmente, el valor más bajo se obtiene para la refrigeración en ambas caras (Hong *et al.*, 2001).

Otra experimentación disponible estudia otras técnicas de aplicación de los refrigerantes criogénicos como la refrigeración indirecta. Así, ensayos realizados con nitrógeno líquido circulando en el interior de la herramienta en el mecanizado de diversos materiales difíciles de mecanizar, con diferentes herramientas, muestran mejoras en el desgaste del flanco y de la rugosidad superficial, en comparación con los mismos ensayos realizados sin refrigerante criogénico (Wang y Rajurkar, 2000).

Por otra parte, el estudio de la influencia del tratamiento criogénico en las herramientas de carburo de wolframio muestra cómo permite mejorar su vida, aunque para periodos de mecanizado largos los beneficios obtenidos se reducen notablemente. Además, la temperatura en la zona de contacto entre la herramienta y la viruta constituye un elemento clave en los resultados de las herramientas tratadas criogénicamente, mejorando cuando la temperatura en la zona de contacto es reducida (Yong *et al.*, 2007).

2.3.5 Refrigerantes/lubricantes sólidos.

La tribología moderna ha identificado diversos materiales de tipo sólido que aplicados adecuadamente durante el proceso de mecanizado pueden actuar como buenos lubricantes para un amplio rango de temperaturas (Shaji y Radhakrishnan, 2003). Por ello, resulta habitual referirse a estos materiales como lubricantes sólidos.

Los principales lubricantes sólidos son el grafito y el disulfuro de molibdeno. Aplicados en forma de polvo seco, estos sólidos demuestran buenas propiedades lubricantes debido a su estructura laminar. Además de estos lubricantes sólidos, se destacan otros como: nitruro de boro, politetrafluoretileno, talco, fluoruro de calcio, fluoruro de cerio y disulfuro de wolframio (Sharma *et al.*, 2009).

El tamaño de las partículas sólidas tiene importancia en la adecuación del lubricante sólido, siendo los tamaños finos apropiados para velocidades elevadas y superficies poco rugosas; mientras que los tamaños de partícula elevados son apropiados para velocidades reducidas y superficies rugosas (Sharma *et al.*, 2009).

Aunque todavía no existe un gran desarrollo en la investigación sobre los lubricantes sólidos, es posible encontrar estudios del comportamiento del disulfuro de molibdeno cuando se aplica en forma de film lubricante (Ye *et al.*, 2009) o del comportamiento del grafito y fluoruro de calcio en el rectificado (Shaji y Radhakrishnan, 2003). Asimismo, estudios en el rectificado de carburo de silicio (SiC) mediante disulfuro de molibdeno y grafito presentan buenos resultados en términos de rugosidad superficial (Agarwal y Rao, 2007).

La aplicación de lubricantes sólidos se puede realizar mediante un mecanismo que permita la difusión del material en un fluido dirigido hacia la zona de corte (Sharma *et al.*, 2009). En este sentido, la experimentación llevada a cabo con refrigerante convencional mezclado con lubricantes sólidos (ácido bórico y grafito), con tamaños de partícula que oscilan entre 50 y 200 μm , muestra cómo los resultados de desgaste del flanco obtenidos mejoran a los obtenidos mediante mecanizado en seco y refrigeración/lubricación convencional. En particular, se obtiene un menor desgaste utilizando ácido bórico (450 μm). Además, los resultados de rugosidad superficial obtenidos mediante la refrigeración/lubricación con sólidos mejoran notablemente los obtenidos con mecanizado en seco y refrigeración/lubricación convencional (Rao y Krishna, 2008).

Otra opción de aplicación consiste en utilizar sistemas alternativos al empleo de corrientes de aire, como, por ejemplo, sistemas basados en el uso de la carga electrostática para llevar el lubricante sólido a la zona de corte de modo continuo (Reddy *et al.*, 2010).

Finalmente, se destaca la posibilidad de emplear lubricantes sólidos en el diseño de las herramientas, creando herramientas autolubricadas que incorporan incrustaciones de lubricante sólido, como pueden ser el fluoruro de calcio (CaF_2) o el disulfuro de molibdeno (MoS_2) (Jianxin *et al.*, 2006, 2009). En esta línea, Jianxin *et al.* (2009) señalan que el empleo de lubricantes sólidos, concretamente disulfuro de molibdeno, tanto en la cara de incidencia como en la de desprendimiento, permite obtener mejores resultados de desgaste que los obtenidos con el mecanizado convencional. En particular, el mejor comportamiento se obtiene con el lubricante en la cara de incidencia.

2.3.6 Refrigerantes/lubricantes gaseosos.

Los refrigerantes de tipo gaseoso son otra de las alternativas a la refrigeración/lubricación convencional, aunque el nivel de investigación en este campo todavía es relativamente bajo. Entre estos refrigerantes se incluyen el aire, vapor de agua, y gases como el dióxido de carbono, oxígeno o nitrógeno. Las ventajas que poseen el aire y el vapor de agua, con relación a los fluidos de corte: reducido coste e impacto ambiental, los hacen especialmente idóneos para sustituirlos (Sharma *et al.*, 2009) (Çakir *et al.*, 2004).

Las propiedades de los refrigerantes gaseosos como enfriadores, lubricantes y eliminadores de viruta son inferiores a las ofrecidas por los aceites y emulsiones, considerándose que ofrecen baja capacidad de enfriamiento y de eliminación de viruta, así como, ninguna capacidad lubricante (Weinert *et al.*, 2004). Para mejorar las propiedades refrigerantes de los gases se puede recurrir a distintas estrategias, como la compresión, enfriamiento o licuefacción (Shokrani *et al.*, 2012).

Al evaluar la idoneidad de los sistemas de refrigeración/lubricación también se debe considerar la importancia de la capacidad de penetración en la zona de contacto entre la herramienta y la pieza. En este sentido, diversos compuestos orgánicos, en forma de vapor, como el etanol o el tetraclorometano, han demostrado su eficacia (Liew *et al.*, 1998).

El principal método de aplicación consiste en la aplicación del refrigerante gaseoso bajo presión directamente a la zona de mecanizado, reduciendo de este modo la fricción en la zona y la temperatura en la zona de contacto de la herramienta con el material (Sharma *et al.*, 2009).

Diversa experimentación compara los resultados obtenidos en el mecanizado con refrigerantes gaseosos con otros tipos de refrigeración/lubricación. Así, por ejemplo, ensayos en el mecanizado de acero, realizados con diferentes ambientes: aire comprimido y nitrógeno a temperatura ambiente, frío (-40°C) y líquido (-196°C), así como fluido convencional y mecanizado en seco, muestran mejores resultados de desgaste medio del flanco en el caso del nitrógeno líquido mientras que los peores se obtienen con el aire comprimido. Asimismo, el nitrógeno líquido también ofrece un buen comportamiento con relación al desgaste en forma de cráter. No obstante, el mejor resultado en cuanto a tamaño del cráter se obtiene en el caso del fluido convencional (Stanford *et al.*, 2009).

Por otra parte, en relación con la rugosidad superficial, el ensayo de refrigerantes gaseosos (CO_2 , N_2 , O_2) ofrece resultados similares a los obtenidos con refrigeración/lubricación convencional y mecanizado en seco. Al incrementar el avance la refrigeración gaseosa ofrece mejores resultados. En concreto, el CO_2 es el refrigerante que presenta los mejores resultados al incrementar el avance, mientras que a bajos avances es el mecanizado convencional el que ofrece los mejores (Çakır *et al.*, 2004).

2.4 El mecanizado de magnesio.

2.4.1 Generalidades.

La maquinabilidad, referida a la facilidad de mecanizar un material, generalmente, se suele definir a partir de las fuerzas de corte (potencia consumida) y la forma de las virutas (Elgallad *et al.*, 2010). En términos de maquinabilidad, el magnesio y sus aleaciones presentan las mejores propiedades frente a todos los demás materiales estructurales. Entre estas propiedades destacan: profundidad de corte, velocidad de corte, acabado superficial, vida de la herramienta, formación de viruta y fuerzas de corte (potencia consumida) (Shokrani *et al.*, 2012) (Polmear, 2005).

La siguiente tabla presenta una comparativa de la maquinabilidad de distintos materiales, a partir de distintas magnitudes del mecanizado:

Tabla 2.9 Comparación de maquinabilidad de diversos materiales (Polmear, 2005).

Metal	Potencia relativa requerida (Mg = 1)	Velocidad de corte (m/s) en torneado (Aproximadamente)	Velocidad de corte (m/s) en taladrado (taladro de 5-10 mm de diámetro)
Magnesio	1	Hasta 20	2,5 – 8,5
Aluminio	1,8	1,25 – 12,5	1 – 6,5
Hierro fundido	3,5	0,5 – 1,5	0,2 – 0,65
Acero templado	6,3	0,65 – 3,3	0,25 – 0,5
Acero inoxidable	10,0	0,3 – 1,5	0,1 – 0,35

El mecanizado de magnesio ofrece buenos resultados en relación con las tolerancias obtenidas, logrando valores de $\pm 0,1$ mm en operaciones estándar de corte. Del mismo modo, la rugosidad superficial obtenida puede llegar a alcanzar valores en torno a $0,1 \mu\text{m}$, empleando mecanizado en seco y refrigeración/lubricación convencional, tanto a alta como a baja velocidad de mecanizado (ASM, 1990).

Otro de los aspectos a considerar durante el mecanizado de magnesio es la generación de rebabas. Su aparición está influenciada por diversos factores como: material, geometría, trayectoria y desgaste de la herramienta, y parámetros del proceso: velocidad de corte, avance y

profundidad de corte. Por tanto, debe considerarse la influencia de los distintos factores y sus posibles interacciones. En el caso del fresado frontal de magnesio, se recomienda emplear velocidades de corte moderadas con el objetivo de obtener superficies de buena calidad y rebabas pequeñas (Aurich *et al.*, 2009).

Las aleaciones de magnesio, como por ejemplo la aleación AZ91HP, están prácticamente libres de elementos abrasivos, por lo que resulta difícil que se generen procesos de adhesión entre la pieza a mecanizar y la superficie de la herramienta. Como consecuencia se obtienen desgastes reducidos. Así, en general, la vida de la herramienta para el mecanizado en seco de magnesio es cinco veces superior a la obtenida en el mecanizado de aluminio refrigerando mediante fluidos de corte, para condiciones de mecanizado similares (Byrne *et al.*, 2003) (Grzesik, 2008).

La posibilidad de que se generen procesos de adhesión de material a la herramienta surge, principalmente, a velocidades de corte elevadas, pudiéndose producir incrementos en la rugosidad superficial de la pieza mecanizada. La adhesión, generalmente, se produce de tres formas diferentes: adhesión en el filo, adhesión en el flanco y adhesión en forma de capa, siendo la adhesión en el flanco el proceso predominante en el mecanizado de magnesio (Tomac y Tønnessen, 1991).

Para el caso de mecanizar compuestos de matriz metálica de base magnesio, el mecanizado tiene una mayor dificultad debido a la acción conjunta de los procesos de adhesión y la abrasión debida a los elementos de refuerzo del compuesto como la alúmina (Al_2O_3) o el carburo de silicio (SiC) en forma de fibras o partículas (Grzesik, 2008).

En relación con los parámetros del mecanizado, según el tipo de proceso de corte empleado se puede llegar a velocidades de corte de entre 4.000 y 6.000 m/min y avances por diente de 0,6 mm en fresado frontal; 1.000 m/min y 0,8 mm en taladrado; y en operaciones de acabado, como el escariado, velocidades de corte superiores a 1500 m/min (Byrne *et al.*, 2003)¹⁰.

La forma de las virutas en el mecanizado de magnesio depende de la composición, forma, templado y avance empleado. La velocidad de corte y el ángulo de incidencia tienen poca influencia en la forma de las virutas, al contrario de lo que sucede en el mecanizado de otros materiales (ASM, 1989). Sin embargo, la experimentación realizada en el proceso de torneado de

¹⁰ Usualmente es posible encontrar recomendaciones de operación para procesos de mecanizado concretos, en la literatura especializada o en la información de los fabricantes. En este sentido, el Apéndice A.2. presenta un conjunto de recomendaciones para el mecanizado de magnesio.

magnesio, con herramientas de carburo de wolframio, muestra cómo el avance, ángulo de inclinación y profundidad de corte influyen notablemente en la generación de una viruta estable de tipo helicoidal (Arai *et al.*, 1996).

Aunque no resulta habitual, es preciso considerar la posibilidad de producirse distorsiones durante el mecanizado de magnesio que, en general, son debidas al excesivo calor generado o a la inadecuada sujeción de las piezas (ASM, 1989).

2.4.2 Herramientas.

2.4.2.1 Materiales base.

La elección de las herramientas de corte constituye un factor clave dentro del mecanizado debido a su influencia en la productividad, siendo los requisitos básicos de las mismas la resistencia al desgaste, resistencia a la fractura y resistencia a la deformación plástica (Suh, 1980).

Los tipos de desgaste que se producen usualmente en las herramientas son debidos a los procesos de abrasión, adhesión y difusión (Klocke *et al.*, 1998) y se presentan en forma de desgaste en el flanco, formación de cráteres en la cara de desprendimiento y recrecido del filo (ASM, 1989). En la siguiente figura se pueden ver los tres tipos de desgaste destacados:

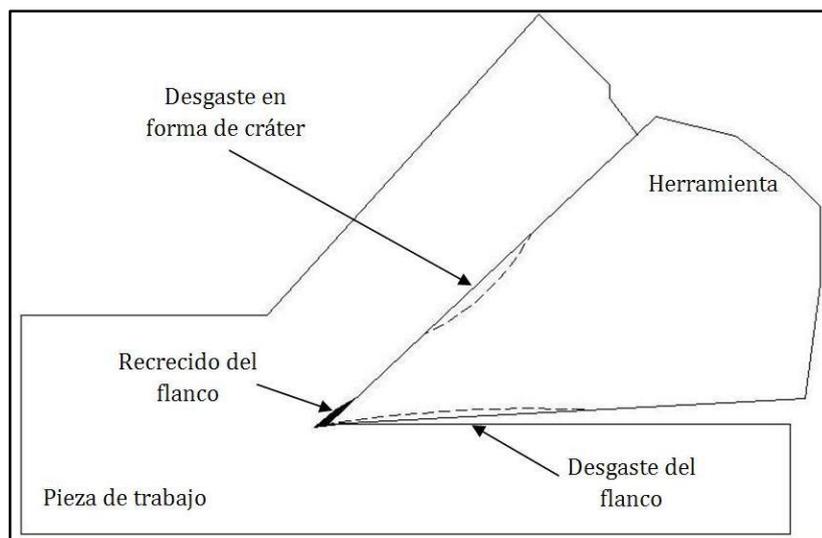


Figura 2.11 Zonas de desgaste de la herramienta de corte (Avallone y Baumeister, 1996).

En general, la selección de herramientas constituye una solución de compromiso entre la productividad obtenida y la vida de las mismas. Así, la utilización de herramientas de mayor resistencia y, por tanto, con menor desgaste, permiten trabajar a mayores velocidades de corte, incrementado la productividad de los procesos. No obstante, los incrementos en la velocidad de corte llevan a aumentos de temperatura que finalmente disminuyen la vida de la herramienta (ASM, 1990).

La necesidad de incrementar las velocidades de corte en los procesos de mecanizado produce un importante desarrollo en el campo de las herramientas, especialmente durante el siglo XX. La siguiente gráfica muestra la evolución de las herramientas, durante los últimos 200 años, según los materiales empleados y las velocidades de corte que permiten alcanzar:

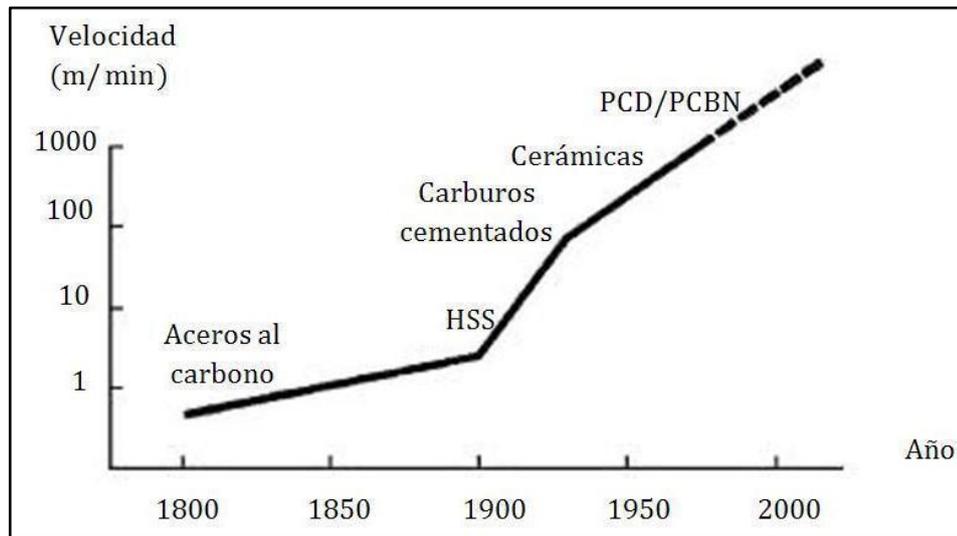


Figura 2.12 Evolución velocidad de corte de las herramientas (Heath, 2001).

Otro de los parámetros de importancia de las herramientas es la influencia que ejerce la temperatura en su dureza. En este sentido, la Figura 2.13 muestra la evolución de la dureza de distintas herramientas en función de la temperatura.

La elección de las herramientas de corte exige el conocimiento de las propiedades requeridas para el proceso de mecanizado. La Figura 2.14 identifica la idoneidad de diferentes herramientas en función de propiedades como la dureza y la resistencia a la abrasión a altas temperaturas, y la tenacidad y la resistencia al combado.

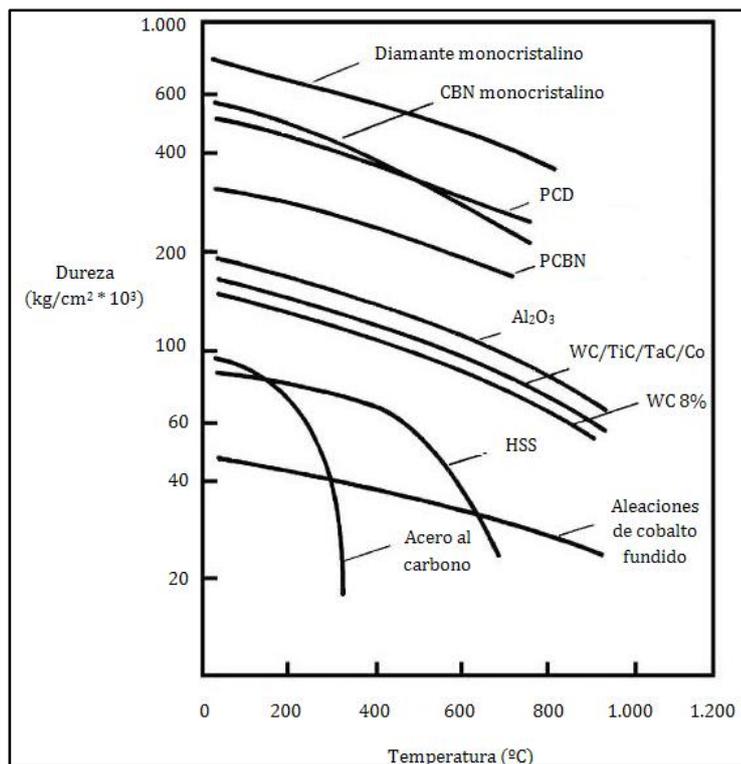


Figura 2.13 Dureza en función de la temperatura para distintas herramientas (Ezugwu *et al.*, 2003).

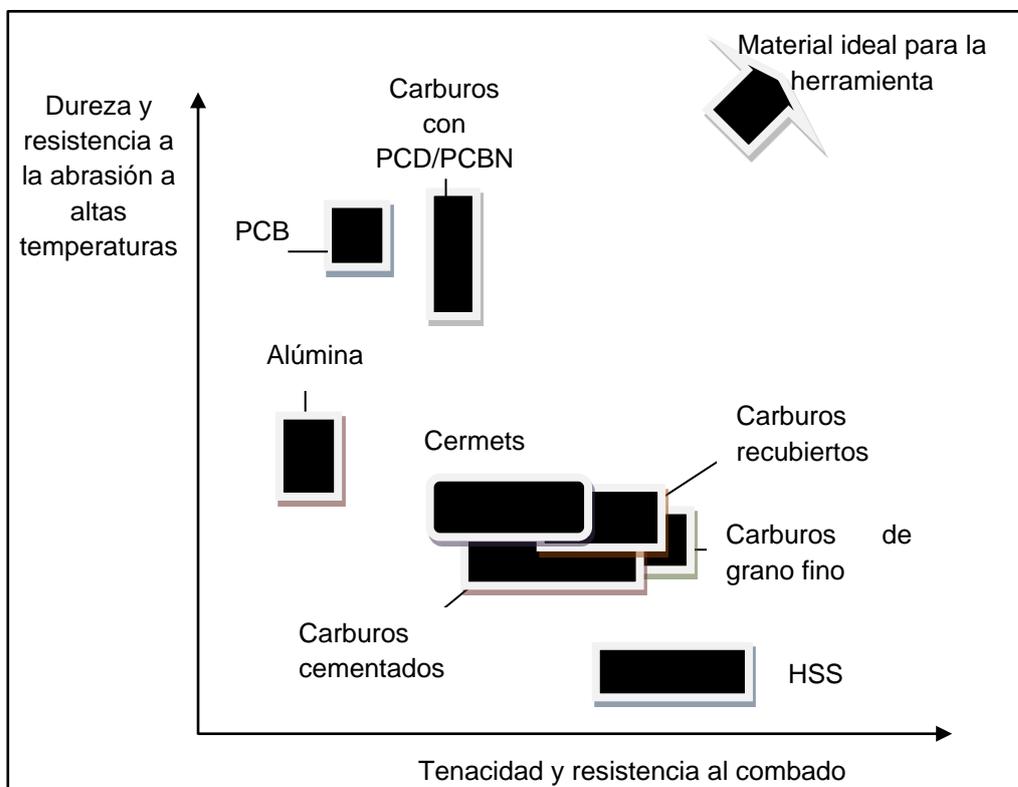


Figura 2.14 Dureza y resistencia a la abrasión a altas temperaturas, en relación con la tenacidad y resistencia al combado (Heath, 2001).

Los principales tipos de materiales empleados en las herramientas de corte son:

a) Aceros rápidos.

Los aceros rápidos, de alta velocidad o HSS (del inglés *High Speed Steel*) son materiales de base hierro. Pueden incluir elementos aleantes como: carbono, cromo, vanadio, molibdeno o wolframio y, en algunos casos, cobalto. Su denominación se debe a su adecuación para el mecanizado a alta velocidad. La relación de carbono y elementos aleantes debe ser correctamente definida para obtener una buena respuesta de la herramienta con relación a la dureza, resistencia al desgaste, resistencia al efecto del calor y tenacidad para un uso efectivo en operaciones de corte (ASM, 1989).

b) Aleaciones de cobalto fundido.

Buscan cubrir el hueco entre las herramientas de carburos y los aceros rápidos. Su método de producción es la fusión bajo atmósfera protectora por electricidad o inducción. El método más idóneo para realizar la fundición es el molde permanente de grafito. A temperatura ambiente su dureza es similar a la de los aceros rápidos, pero también logran mantener su dureza a temperaturas elevadas y pueden ser usadas a velocidades de corte mayores (en torno a un 20% superiores) (ASM, 1989).

c) Carburos cementados.

Son los materiales más empleados. El proceso de producción para su obtención es el sinterizado de un material metálico duro, con cobalto como aglutinante, a elevadas presiones y temperaturas. Las propiedades del carburo cementado se basan en el ratio carburo de wolframio - cobalto y el tamaño de grano del compuesto. En general, a menor tamaño de grano se necesita menos cantidad de cobalto, incrementándose la resistencia al desgaste (Weinert *et al.*, 2004).

La reducción del tamaño de los polvos del carburo de wolframio, a tamaño submicrométrico (entre 0,5 y 0,8 μm) o a tamaño ultrafino (entre 0,2 y 0,5 μm), permite trabajar en procesos como el mecanizado en seco de aceros altamente aleados o materiales de alta resistencia (Weinert *et al.*, 2004).

Las herramientas a base de carburos cementados resultan adecuadas para el mecanizado con avances elevados y en operaciones de mecanizado interrumpido, pero no son adecuadas para velocidades de corte altas (Choudhury y El-Baradie, 1998).

d) Cermets.

Poseen una estructura similar a la de los carburos cementados, pero incorporan elementos duros como carburos, nitruros de titanio o tántalo, que son añadidos a una matriz aglomerante de cobalto y níquel. Exhiben mejores resultados que los carburos cementados a elevadas temperaturas. Los cermets permiten alcanzar mayores velocidades de corte debido a su mayor dureza en caliente. Adicionalmente, debido a los componentes cerámicos, ofrecen una buena estabilidad química contra la oxidación y el desgaste tribológico, así como una reducida afinidad a la difusión (Weinert *et al.*, 2004).

Una de las mayores críticas a los cermets es su baja dureza, que puede hacer que se produzcan roturas repentinas. La mejora de la dureza de los cermets se puede conseguir incorporando nitrógeno al material (Weinert *et al.*, 2004).

e) Cerámicos.

Son empleados cuando se requiere trabajar a velocidades de corte elevadas o soportar elevadas temperaturas durante el mecanizado, garantizando una larga vida de la herramienta. Las herramientas cerámicas son adecuadas para el mecanizado de hierro de fundición gris y aceros endurecidos. Básicamente, suelen ser de alúmina (Al_2O_3) o nitruro de silicio (Si_3N_4). Debido a la alta dureza a elevadas temperaturas y la reducida resistencia frente a los choques térmicos, suelen emplearse sin utilizar refrigeración (Choudhury y El-Baradie, 1998) (Weinert *et al.*, 2004).

El desarrollo de herramientas cerámicas que emplean alúmina de elevada pureza (99,99%) y de tamaño submicrométrico ($0,22 \mu\text{m}$), prácticamente sin aglomerante, permiten realizar importantes desarrollos en el mecanizado en seco (Weinert *et al.*, 2004).

Una de las principales líneas de desarrollo de las herramientas cerámicas es la adición de una o varias fases de refuerzo en la matriz de alúmina. Alguno de los refuerzos más ampliamente extendidos son: carburo de titanio (TiC), nitruro de titanio (TiN), diboruro de titanio (TiB_2), carburo de wolframio carburo de titanio (W, Ti)C, carbonitruro de titanio (Ti(C,N)), dióxido de zirconio (ZrO_2) y carburos de silicio (SiC_p y SiC_w) (Xu *et al.*, 2001).

f) Nitruros de boro cúbico.

Los nitruros de boro cúbico o CBN (del inglés *Cubic Boron Nitride*) son similares a las cerámicas. El elemento base es el nitruro de boro cúbico que se combina con elementos

cerámicos, empleándose en ocasiones aglomerantes metálicos (Weinert *et al.*, 2004). Las características más importantes para definir una herramienta CBN son el tamaño de grano de las partículas, su contenido CBN y la naturaleza del aglomerante (Costes *et al.*, 2007).

Las propiedades del CBN resultan excelentes, proporcionando una elevada dureza y resistencia al desgaste químico hasta elevadas temperaturas. No obstante, estas herramientas sufren importantes desgastes al mecanizar compuestos de matriz metálica reforzados con materiales de elevada dureza como el carburo de silicio (Ciftci *et al.*, 2004).

g) Diamante.

El diamante es el material de corte más duro disponible, convirtiéndose en la lógica elección para el mecanizado de materiales de elevada dureza como, por ejemplo, el mecanizado de compuestos de matriz metálica. Sin embargo, a pesar de su elevado coste, el comportamiento del diamante frente al desgaste no es tan elevado como sería deseable (Weinert *et al.*, 2004) (Davim y Baptista, 2000) (Hooper *et al.*, 1999) (Teti, 2002).

El carbono es el material base del diamante y su estructura atómica mallada conforma un material con excelentes propiedades, como elevada resistencia, bajo coeficiente de fricción, reducida expansión térmica y alta resistencia a la corrosión química. Como desventaja se señalan los procesos de grafitización que se generan a temperaturas elevadas. Por ello, la utilización del diamante no es recomendada para temperaturas superiores a los 600°C (Weinert *et al.*, 2004).

En la literatura especializada es posible encontrar experimentación en la que se evalúa el comportamiento de los distintos materiales durante el mecanizado, destacándose los siguientes trabajos:

- a) El torneado de compuestos de matriz metálica, de material base aluminio con refuerzo de SiCp, mediante herramientas de carburo de wolframio genera un severo desgaste de la punta de la herramienta, tanto en la superficie como por debajo (Sadat, 2009).
- b) El estudio del mecanizado de un compuesto de matriz metálica, de base aluminio con un refuerzo del 20% de SiCp, mediante herramientas de carburo sin recubrir, identifica cómo la rugosidad superficial se reduce a velocidades de corte elevadas y avances reducidos (Seeman *et al.*, 2010).
- c) Durante el torneado de una superaleación de níquel, las herramientas de nitruro de boro cúbico y las cerámicas ofrecen mejores tasas de eliminación de material que

los carburos. Aunque en el caso de las de nitruro de boro cúbico es posible la generación de procesos de desportillado (Darwish y El-Tamini, 1997). Con relación a la rugosidad superficial, las herramientas cerámicas ofrecen mejores resultados que las de nitruro de boro cúbico (Darwish, 1997).

- d) La aplicación de herramientas de diamante policristalino o PCD (del inglés *Polycrystalline Diamond*) en el mecanizado de un compuesto de matriz metálica, de base aluminio reforzado con partículas de SiC, muestra su idoneidad para el mecanizado a altas velocidades de corte, justificándose este hecho en el elevado valor de “n” en la ecuación de Taylor¹¹ (Muthukrishnan *et al.*, 2008).

2.4.2.2 Recubrimientos.

Además del avance producido en los materiales base de las herramientas, el aumento de las exigencias requeridas a las mismas ha propiciado un fuerte impulso a la investigación y desarrollo de nuevos recubrimientos superficiales con los que poder soportar condiciones de mecanizado más exigentes o mejorar los resultados obtenidos durante el mecanizado.

Los recubrimientos tienen como objetivo principal aumentar la vida de la herramienta de corte. La utilización de recubrimientos puede proporcionar importantes beneficios como (Hogmark *et al.*, 2000):

- a) Mejorar la resistencia al desgaste de las herramientas permitiendo aumentar la velocidad de corte, incrementando así la productividad.
- b) Disminuir la fricción, lo cual a menudo representa una reducción del consumo energético. Así, en algunos casos se podría prescindir de la refrigeración/lubricación.
- c) Reducir la tendencia a la adhesión o desportillado de la superficie, lo cual resulta crucial para el funcionamiento de las herramientas de conformado y muchas aplicaciones basadas en el deslizamiento.
- d) Diseñar componentes de bajo peso mediante la aplicación de recubrimientos. Por ejemplo, componentes de vehículos, permitiendo reducir el consumo de combustible.

¹¹ La ecuación de Taylor relaciona la velocidad de corte (v) con la vida de la herramienta (T) según la siguiente expresión: $v * T^n = C$.

Los recubrimientos para herramientas de corte se suelen clasificar según el método empleado sea de deposición de vapor química o CVD (del inglés *Chemical Vapor Deposition*), o deposición de vapor física o PVD (del inglés *Physical Vapor Deposition*). No obstante, se destaca la existencia de otros tipos de recubrimientos como la deposición por spray térmico o TS (del inglés *Thermal Spraying*), deposición oxígeno-combustible a alta velocidad o HVOF (del inglés *High Velocity Oxygen Fuel*) o la deposición mediante spray de plasma o PSp (del inglés *Plasma Spraying*) (Weinert *et al.*, 2004) (Korinko, 1997).

La elección entre distintos tipos de recubrimiento depende del sustrato sobre el que se realice la deposición. Así, la resistencia al calor del sustrato puede limitar el número de aplicaciones y el método de deposición. Debido a que los recubrimientos de deposición de vapor química operan a mayores temperaturas que los de deposición de vapor física, poseen capas menos definidas debido a los procesos de interdifusión que se producen (Hogmark *et al.*, 2000) (Strafford y Subramanian, 1995).

La temperatura de proceso se sitúa entre la temperatura ambiente y los 600°C para el método de deposición de vapor física, mientras que para el método de deposición de vapor química la temperatura en el material de sustrato puede superar los 1000°C. Así, el sustrato condiciona el proceso de deposición a emplear. Por ejemplo, materiales resistentes al calor como los carburos cementados y las cerámicas pueden ser empleados en aplicaciones a elevadas temperaturas con los dos tipos de recubrimientos (CVD y PVD), mientras que las posibilidades para recubrir aceros poco aleados, aleaciones de base cobre y materiales ligeros, como el aluminio o el magnesio, son más reducidas (Hogmark *et al.*, 2000).

Otra posibilidad para clasificar a los recubrimientos se basa en su estructura. Concretamente, en el número de capas utilizadas, ya sea de un único tipo de material (mono) o de varios (multicapa). Los recubrimientos multicapa tienen como objetivo aprovechar las características de diferentes tipos de materiales constituyendo un recubrimiento de características mejoradas. La disposición de diversas capas finas de recubrimiento lleva a una distribución de tensiones más favorable, limitándose también el crecimiento de fisuras. El número de capas que pueden conformar un recubrimiento es prácticamente ilimitado. No obstante, el aumento de espesor lleva a incrementos en el radio del filo de corte, lo cual no resulta aconsejable en determinadas aplicaciones (Weinert *et al.*, 2004).

A partir del desarrollo de la tecnología de los recubrimientos se ha conseguido crear recubrimientos de dimensiones nanométricas, mejorándose los resultados obtenidos de modo

significativo. El espesor total de los recubrimientos nanométricos puede situarse entre 2 y 5 μm . De este modo, el recubrimiento está formado por cientos de capas de dimensiones nanométricas (Weinert *et al.*, 2004).

Entre los principales sistemas de recubrimiento se pueden señalar:

a) Autolubricantes.

Son recubrimientos que tratan de cubrir las funciones de los lubricantes por medio de la incorporación de elementos como el disulfuro de molibdeno (MoS_2) o el carburo de wolframio/carbono (WC/C). Este tipo de recubrimientos se deposita, generalmente, encima de recubrimientos duros como nitruros de aluminio o titanio. Los recubrimientos autolubricantes reducen la fricción entre la herramienta y el material a mecanizar. Así, se consiguen reducir las fuerzas de corte y el calor generado durante el proceso (Weinert *et al.*, 2004).

b) Recubrimientos de nitruro de boro cúbico.

Son recubrimientos que aprovechan las ventajas del nitruro de boro cúbico (CBN) para ser utilizados en el mecanizado de materiales férreos. Comparados con los recubrimientos de nitruro de boro cúbico policristalino, los nitruros de boro cúbico obtenidos por PVD sobre sustrato de carburo cementado poseen ventajas como flexibilidad geométrica, filos de corte afilados sin chaflanes ni ángulos de desprendimiento negativos, no presentan difusión del aglomerante y presentan buenos resultados con relación al coste (Weinert *et al.*, 2004).

La mejora de los recubrimientos CBN puede realizarse mediante la deposición de una capa intermedia de recubrimiento de nitruro de titanio al aluminio (TiAlN). El estudio comparativo de ambos para velocidades de corte moderadas (entre 50 y 60 m/min) muestra que el mecanizado mediante la herramienta con la capa intermedia de TiAlN mejora los resultados de desgaste del flanco de la herramienta CBN. Al seguir aumentando la velocidad de corte hasta 100 m/min se observa cómo el recubrimiento intermedio permite obtener un menor desgaste que el obtenido con la herramienta CBN para velocidades muy inferiores (Bewilogua *et al.*, 2009).

c) Diamantes obtenidos por deposición de vapor química.

Son constituidos por láminas de diamante producidas por deposición de vapor química. El recubrimiento de diamante CVD reduce el desgaste por abrasión debido a su dureza. Además de ofrecer propiedades sobresalientes, también ofrece flexibilidad geométrica con respecto a las herramientas a recubrir, en comparación con el diamante PCD (Weinert *et al.*, 2004).

El recubrimiento de diamante CVD constituye un material especialmente idóneo para el mecanizado de materiales duros, como los compuestos de matriz metálica, debido a la elevada dureza del recubrimiento (10.000 Vickers), muy superior a la dureza del diamante PCD (6.000 Vickers) (Teti, 2002). No obstante, la comparación entre los dos materiales durante el torneado de un compuesto de matriz metálica muestra cómo el desgaste del flanco de la herramienta es superior en el caso de la recubierta con diamante CVD (Andrewes *et al.*, 2000).

d) Nanocomposites.

La estructura de los nanocomposites de base nitruro de aluminio-titanio (TiAlN) depende de la deposición de materiales de diversos grupos como: el formado por Ti, Al, Cr, y el formado por Si. Estos grupos de elementos no se mezclan entre sí y forman dos fases diferenciadas. Los granos nanocristalinos de TiAlN o nitruro de aluminio cromo (AlCrN) son embebidos en la matriz de Si₃N₄. Las principales ventajas de los nanocomposites son su mayor dureza comparada con los recubrimientos convencionales y, especialmente, su elevada resistencia al calor (Bewilogua *et al.*, 2009).

e) Supernitruros.

Pertenecen al grupo de los nanocomposites. Estos recubrimientos combinan la alta estabilidad química de las capas de óxido con las propiedades mecánicas de los recubrimientos de los nitruros más resistentes. El método de producción de los supernitruros emplea plasma ionizado como tecnología base, permitiendo obtener recubrimientos de TiAlN conductores o aislantes con un alto contenido de aluminio (Weinert *et al.*, 2004).

El empleo de recubrimientos en el mecanizado es ampliamente investigado en la literatura especializada, destacándose algunos ejemplos como los siguientes:

- a) El análisis del mecanizado de aleaciones de Al-Si, mediante herramientas de Si₃N₄ recubiertas por deposición CVD de diamante, muestra la dificultad de prever la vida de la herramienta, por lo que es preferible recurrir a herramientas de nitruro de boro cúbico o diamante policristalino (Keipke *et al.*, 1998).
- b) Durante el mecanizado de una aleación de titanio, mediante herramientas de base carburo de wolframio (WC-Co) con recubrimientos nitruro de titanio de aluminio silicio (AlSiTiN) y carbonitruro de titanio (TiCN), los resultados obtenidos muestran la superioridad del recubrimiento multicapa AlSiTiN. En particular, en términos de vida de la herramienta (Settireni y Faga, 2008).

- c) La utilización de herramientas de carburo cementado recubiertas mediante recubrimientos PVD de nitruro de zirconio (ZrN) permite obtener menores desgastes del flanco que las herramientas de carburo cementado y las recubiertas con TiN durante el mecanizado de acero (Jianxin *et al.*, 2008).
- d) La utilización de recubrimientos PVD de TiN en el mecanizado de una aleación de níquel-cromo mejora los resultados obtenidos para la velocidad de corte de 50 m/min, mientras que las herramientas sin recubrir presentan un mejor comportamiento para la velocidad de corte de 25 m/min. No obstante, a avances y velocidades superiores, la vida de las herramientas recubiertas se reduce notablemente (Jawaid *et al.*, 2001).
- e) La comparación de los recubrimientos por deposición de vapor física de TiAlN y TiN/TiCN/TiN con el recubrimiento de TiN/TiCN/Al₂O₃ por deposición de vapor química muestra cómo los resultados de las herramientas con recubrimientos por deposición de vapor física mejoran los obtenidos con los recubrimientos por deposición de vapor química, en términos de vida de la herramienta. El mejor comportamiento se obtiene con el recubrimiento TiAlN (Kadirgama *et al.*, 2011).

La amplia variedad de materiales disponibles para emplear en los recubrimientos, y las diferentes estructuras y procesos de recubrimiento posibles convierten la elección del recubrimiento adecuado en una parte fundamental dentro del mecanizado (Klocke y Krieg, 1999).

2.4.2.3 *Recomendaciones para la selección de las herramientas a emplear en el mecanizado de magnesio y sus aleaciones.*

La elección de la herramienta a emplear para el mecanizado de magnesio dependerá fundamentalmente de la cantidad de material a mecanizar. Así, para bajos ratios de producción las herramientas convencionales como las de acero rápido muestran buenos resultados, mientras que para mayores ratios es preciso recurrir a herramientas a base de carburos debido a su larga duración y a su precisión (Avallone y Baumeister, 1996) (ASM, 1989).

Las herramientas aconsejadas para el mecanizado de magnesio y sus aleaciones cuando se requieren acabados superficiales muy precisos (entre 0,075 y 0,125 μm) emplean diamante policristalino, proporcionando también una larga vida de la herramienta (ASM, 1989) (Byrne *et*

al., 2003). No obstante, la aplicación del diamante policristalino se ve limitada por la temperatura de trabajo, debido a que a elevadas temperaturas el desgaste se incrementa notablemente (Holmberg y Matthews, 1994). Asimismo, a temperaturas superiores a 600°C se producen procesos de grafitado (Weinert *et al.*, 2004).

Para herramientas de formas complejas como fresas de espiga, brocas helicoidales o herramientas para roscar se emplean carburos cementados de grano fino (Byrne *et al.*, 2003).

El diseño de las herramientas de corte para acero o aluminio resulta también adecuado para el mecanizado de magnesio. Sin embargo, debido a la baja resistencia del magnesio frente al corte, se puede recurrir a diseños con caras más suaves, menores ángulos de incidencia, mayor espacio para las virutas, mayores ángulos de desprendimiento y menos filos (como en las herramientas de fresado). Especialmente importante es el diseño de los planos de desprendimiento para evitar una generación de calor excesiva (ASM, 1989).

Asimismo, es conveniente considerar la influencia que ejerce el ángulo de incidencia en la presión de corte, pudiendo incrementarse un 50% cuando se reduce el ángulo de incidencia desde 25° hasta 15° en un proceso de torneado (ASM, 1989).

2.4.3 Temperatura e ignición del magnesio.

La importancia de la temperatura alcanzada en la zona de corte es ampliamente reconocida, tanto en el mecanizado continuo como en el mecanizado discontinuo. Las elevadas temperaturas en la zona de contacto de la herramienta y el material aceleran los mecanismos de desgaste y promueven la deformación plástica en la superficie mecanizada (Le Coz *et al.*, 2012). Por ello, el estudio de la temperatura ocupa una parte importante en la literatura especializada, desde los trabajos experimentales de Taylor en 1907, en los que identificó cómo los incrementos en la velocidad de corte reducían la vida de la herramienta, hasta la actualidad (Lazoglu y Altintas, 2002).

La generación de calor durante el corte ortogonal se produce en tres zonas concretas como se puede observar en la figura siguiente, disipándose el calor generado a través de la herramienta, de la pieza de trabajo, de la viruta y, en caso de emplearlo, del refrigerante.

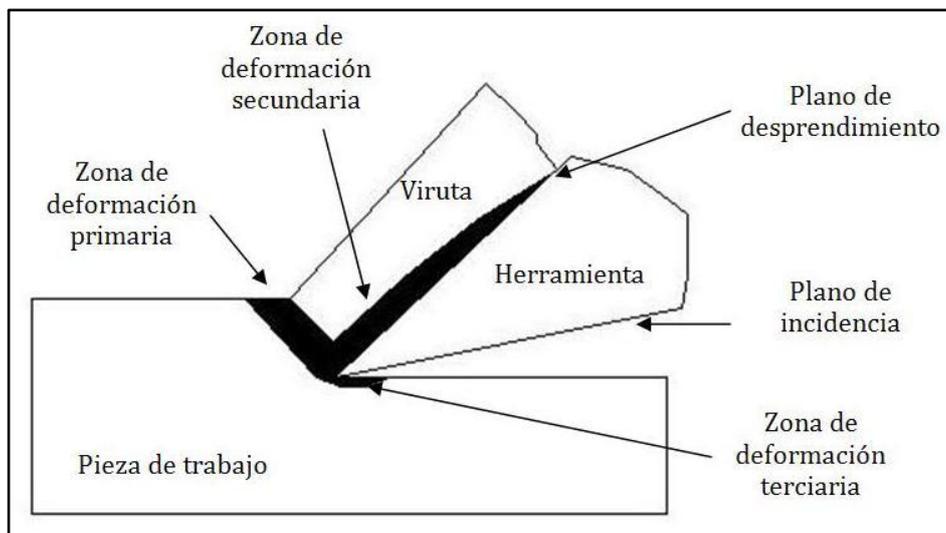


Figura 2.15 Zonas de generación de calor en el corte ortogonal (List *et al.*, 2005) (Yildiz y Nalbant, 2008).

La importancia de la predicción de la temperatura a alcanzar en la zona de corte se justifica en la influencia decisiva que tiene en el desgaste generado en la herramienta y en la productividad del proceso (Lazoglu y Altintas, 2002). La temperatura alcanzada durante el proceso de mecanizado genera tensiones residuales en la superficie, responsables de la integridad de las superficies mecanizadas. Así, la temperatura condiciona fuertemente la elección de

parámetros de mecanizado como la velocidad de corte y el avance, cuyos aumentos incrementan la temperatura generada. También es preciso considerar la influencia de otros parámetros como el radio de punta de la herramienta o el ángulo de incidencia (Kishawy, 2002).

Actualmente existen diferentes sistemas de medición de la temperatura. Entre ellos se destacan: uso de termopares, imágenes (fotografías y vídeos) en infrarrojo, pirómetros ópticos en infrarrojo, pinturas térmicas, materiales de temperatura de fusión conocida o producción de cambios en la microestructura debidos a la temperatura (Komanduri y Hou, 2001).

Las temperaturas generadas durante el mecanizado de magnesio son reducidas debido al elevado calor específico y a la elevada conductividad térmica del magnesio que logran que el calor se disipe rápidamente (ASM, 1989).

Aunque no resulta habitual, es preciso considerar la posibilidad de producirse distorsiones durante el mecanizado de magnesio debido al excesivo calor generado. Las posibles distorsiones debidas a la generación de calor se justifican en el elevado coeficiente de expansión térmica del magnesio. De este modo, las elevaciones de calor provocan dilataciones en el material, en particular, en aquellos procesos que requieren eliminar grandes cantidades de material a elevadas velocidades de corte y grandes avances (ASM, 1989).

El mecanizado de magnesio presenta un riesgo importante de ignición cuando la temperatura del proceso supera los 450°C, pudiendo producirse fuego en las virutas o el polvo de magnesio que puede llegar a alcanzar los 3.000°C. Adicionalmente, las partículas de tamaño inferior a 500 µm pueden presentar riesgo de explosión (Weinert *et al.*, 2004). La ignición del magnesio está condicionada por diversos aspectos del proceso como el ambiente en el que se lleva a cabo el mecanizado, la composición del material, la geometría de la herramienta o los parámetros de corte (Zhao *et al.*, 2011).

La utilización de aleaciones de magnesio puede permitir alcanzar puntos de ignición diferentes en función de los elementos aleantes empleados. La modificación de la temperatura de ignición se debe en gran medida a los procesos de oxidación. Así, en el caso de la aleación AZ91 la temperatura de ignición se reduce debido a la presencia del aluminio, mientras que otros elementos como el calcio, berilio o itrio permiten aumentar la temperatura de ignición debido a la generación de una capa de óxido superficial (Mebarki *et al.*, 2005). En este sentido, la investigación realizada por Rao y Li (2010) muestra cómo es posible incrementar 169°C la temperatura de ignición de una aleación de Mg-Al incorporando un porcentaje del 0,1% de

tierras raras (lantano y cerio) en su composición. De igual modo, se identifica la influencia del itrio como causante de la no ignición de la aleación WE43, en comparación con el magnesio puro y la aleación AZ91 (Kumar *et al.*, 2003).

Debido al riesgo de ignición, la elección del sistema de refrigeración en el mecanizado de magnesio es un elemento crítico del proceso. Adicionalmente, debe considerarse la peligrosidad asociada a la utilización de fluidos de base acuosa debido a la reactividad del agua con el magnesio para formar hidrógeno, inflamable y potencialmente explosivo, según lo mostrado en la siguiente reacción química (Kulekci, 2008):



Debido a la reactividad del magnesio con el agua se recomienda el mecanizado en seco o mediante aceites de base mineral (ASM, 1989) (Machado y Wallbank, 1997). No obstante, debe destacarse la existencia de investigadores que señalan que mediante la selección adecuada de los parámetros del proceso se podrían emplear lubricantes de base acuosa (Gariboldi, 2003). En este sentido, diversos ensayos muestran la idoneidad de los fluidos de base acuosa, emulsión con 5% de aceite de base mineral (SAFETY COOL 390 Chem-Trend), en relación con la generación de adhesión en el flanco de la herramienta, aunque se generan problemas como un mayor desgaste y la necesidad de mayores fuerzas de corte a velocidades de corte bajas y medias (Tomac y Tønnessen, 1991). En general, para velocidades de corte inferiores a 300 m/min y avances superiores a 0,02 mm/rev la posibilidad de que se produzca fuego es reducida (ASM, 1990).

Aunque la aplicación del mecanizado en seco es ventajosa por motivos económicos y medioambientales, en determinados casos no resulta la solución más adecuada para el mecanizado de magnesio. De este modo, para velocidades de corte elevadas, el mecanizado en seco genera problemas como el recrecido del flanco y un empeoramiento en la rugosidad superficial de la pieza mecanizada, así como un incremento de las fuerzas de corte (Tomac y Tønnessen, 1991).

El riesgo de ignición asociado al mecanizado de magnesio exige tomar medidas encaminadas a disminuir la probabilidad de generación de incendios. Así, se debe reducir la cantidad de virutas existentes en el área de trabajo, disminuyendo de este modo la temperatura. La evacuación de las virutas y el polvo generados durante el mecanizado puede afrontarse mediante el uso de fluidos de corte o, en el caso de mecanizar en seco, mediante sistemas de

evacuación de virutas como, por ejemplo, los basados en los separadores ciclónicos. También resulta adecuado considerar la opción de colocar contenedores cerrados para virutas con el fin de disminuir la posibilidad de ignición de las mismas (Weinert *et al.*, 2004).

Adicionalmente, para garantizar la seguridad de los operarios y proteger las máquinas, se deben establecer otras medidas de seguridad cuando se mecaniza magnesio. Así, deberá disponerse de un sistema de protección contra explosiones e incendios, como puede ser un armazón capaz de soportar la presión generada en una explosión. Del mismo modo, se recomienda la instalación de sistemas de alarma que indiquen el comienzo del fuego y un sistema de extinción guiado por sensores térmicos y ópticos que permitan iniciar el proceso de extinción de modo adecuado (Weinert *et al.*, 2004).

Para la extinción de los posibles incendios también será preciso colocar extintores adecuados en el área de trabajo. Concretamente, extintores de la clase D. Además, es recomendable disponer de contenedores con arena seca (Campbell, 2006) (Avallone y Baumeister, 1996) (Rubio *et al.*, 2012a).

2.4.4 Aplicaciones de los sistemas de refrigeración en el mecanizado del magnesio.

La literatura especializada recoge un número limitado de referencias relacionadas con el mecanizado de magnesio y sus aleaciones. A continuación se presentan algunas de las principales investigaciones con relación a los principales procesos de mecanizado:

a) Torneado.

Los procesos de torneado de la aleación AZ91 han sido investigados por Tönshoff y Winkler (1997). La investigación se centra en el efecto de los recubrimientos, identificando cómo las herramientas recubiertas de PCD ofrecen mejores resultados que las no recubiertas y las recubiertas con TiN, incluso para velocidades de corte elevadas (superiores a 900 m/min). Los procesos de adhesión se reducen con el empleo de herramientas recubiertas con PCD. Asimismo, también ayudan a disminuir la temperatura de las virutas, y por tanto, disminuir el riesgo de ignición.

La experimentación de Tomac y Tønnessen (1991) en el torneado de aleaciones de magnesio AZ91 muestra cómo la aplicación de fluidos de base acuosa puede generar efectos negativos en la vida de la herramienta para velocidades de corte reducidas o medias, así como incrementos en la rugosidad superficial. Adicionalmente, la utilización de refrigerantes elimina la generación de procesos de recroquisado del flanco de la herramienta.

Por su parte, Pu *et al.* (2012) investigan el torneado de la aleación AZ31B comparando los resultados obtenidos mediante mecanizado en seco y refrigeración criogénica, mostrando cómo la utilización de nitrógeno líquido permite obtener rugosidades superficiales más pequeñas que las obtenidas mediante el mecanizado en seco (aproximadamente un 20% menores). Adicionalmente, empleando refrigeración criogénica, la máxima temperatura obtenida en la superficie se consigue reducir notablemente.

Otra investigación de interés es la presentada por Arai *et al.* (1996). En ella analizan el torneado de una aleación de magnesio mediante mecanizado en seco, en particular, la generación de viruta durante el torneado. Los principales resultados muestran cómo es posible obtener una viruta estable de tipo helicoidal cuando se incrementa el ángulo de inclinación o el avance, o cuando se reduce la profundidad de corte.

b) Taladrado.

Resulta de interés mencionar el estudio de Wang *et al.* (2008) en el que evalúan el desgaste de la herramienta durante el taladrado de la aleación de magnesio AZ91 mediante mecanizado en seco, identificándose un mapa de desgaste formado por cinco zonas de desgaste. Los principales mecanismos de desgaste identificados son la abrasión, la adhesión y la difusión. De este modo, a partir del mapa de desgaste es posible seleccionar los parámetros de corte de un modo adecuado para que el desgaste de la herramienta sea mínimo.

Otras investigaciones, como las realizadas por Gariboldi (2003) y Bhowmick *et al.* (2010), identifican la adhesión en el filo de la herramienta como mecanismo de desgaste durante el mecanizado de las aleaciones AM60B y AM60, respectivamente. Asimismo, Gariboldi (2003) identifica un rango de avance que garantiza una buena vida de la herramienta y reducida rugosidad superficial. Por su parte, Bhowmick *et al.* (2010) muestran cómo mediante la utilización del sistema MQL los resultados obtenidos mejoran a los obtenidos mediante el mecanizado en seco. Además, la temperatura durante el proceso no supera la generada durante el mecanizado con refrigeración/lubricación convencional.

La investigación realizada por Bhowmick y Alpas (2011) para el taladrado de la aleación de magnesio AZ91 evalúa el mecanizado en seco, refrigeración/convencional convencional y sistema MQL. La experimentación muestra cómo el sistema MQL, en combinación con el uso de recubrimientos de carbono tipo diamante, ofrece resultados comparables a los de los aceros rápidos mecanizando con aceite mineral. Por su parte, la vida de la herramienta obtenida durante el mecanizado en seco resulta notablemente inferior a la obtenida mediante refrigeración/lubricación convencional y sistema MQL.

Por otra parte, la investigación en el taladrado de la aleación AZ91E mediante mecanizado en seco y preenfriamiento criogénico realizada por Balout *et al.* (2007) muestra cómo la generación de polvo de viruta durante el mecanizado depende en gran medida de la temperatura de la pieza. En particular, el preenfriamiento de la pieza reduce considerablemente la cantidad de polvo de viruta generada.

Finalmente, Weinert y Lange (2001) estudian el taladrado y escariado de compuestos de matriz metálica de magnesio mediante distintos tipos de herramientas: carburos cementados, recubiertas con diamante y TiAlN, observándose un comportamiento diferente en función del compuesto mecanizado. Así, durante el mecanizado de una aleación AZ91, reforzada con un

20% de $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$, se obtiene un menor desgaste del flanco con el recubrimiento TiAlN y mayor con la herramienta de carburo cementado, mientras que para el mecanizado de una aleación ZC63, reforzada con un 12% de SiC, de mayor dureza, los mejores resultados se obtienen con el recubrimiento de diamante. Del mismo modo, cuando se emplean compuestos con refuerzos mixtos 5% de $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ y 15% de SiC, las herramientas recubiertas de diamante exhiben el mejor comportamiento.

c) Fresado.

Fang *et al.* (2005) estudiaron la evolución de la temperatura durante el fresado de la aleación de magnesio AZ91, identificando cómo la temperatura se incrementa cuando se aumenta la velocidad de corte y, más acusadamente, cuando el espesor de viruta sin deformar se reduce. La temperatura media obtenida en el flanco puede resultar un buen indicador para prevenir la generación de fuego.

Por otra parte, Salahshoor y Guo (2011) investigan el fresado de una aleación de aplicación en el campo de la biomedicina, la aleación MgCa 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.

2.5 Mecanizado discontinuo.

2.5.1 Generalidades.

Tradicionalmente, el mecanizado se ha evaluado empleando procesos de mecanizado continuos, en particular, torneado continuo según la norma ISO 3685:1993 (ISO 3685, 1993). No obstante, este tipo de estudios son poco representativos de los procesos de mecanizado modernos, en los que resulta habitual realizar operaciones que se componen de ciclos en los que se suceden periodos de mecanizado y periodos sin operaciones de mecanizado (Chandrasekaran y Thoors, 1994).

Además, debe considerarse que las piezas a mecanizar pueden presentar discontinuidades en sus superficies, como agujeros, canales de lubricación, molduras y ranuras, antes del torneado final (Diniz *et al.*, 2005) (Oliveira *et al.*, 2009).

Las diferencias existentes entre el mecanizado continuo y discontinuo hacen que los resultados obtenidos en las investigaciones realizadas mediante mecanizado continuo no puedan ser transferidos directamente al mecanizado interrumpido (Tönshoff *et al.*, 1990).

Entre los procesos de mecanizado es posible establecer una clara distinción entre aquellos en los que la herramienta de corte mecaniza la superficie de la pieza sin ninguna interrupción y aquellos en los que el corte no es continuo, distinguiéndose corte continuo y discontinuo, respectivamente.

Adicionalmente, es posible identificar dos tipos de mecanizado discontinuo: interrumpido e intermitente. En el mecanizado interrumpido existen periodos de tiempo en los que la herramienta no corta el material. Estas interrupciones dependen del producto o de la serie de productos a fabricar. En el mecanizado intermitente, existe al menos una interrupción o ranura en cada vuelta, por lo que en cada vuelta se produce una interrupción en el mecanizado. Así, en el mecanizado intermitente la herramienta se expone en cada vuelta a choques mecánicos debido a los movimientos de entrada y salida de la herramienta de la pieza (Beswick, 2002).

La figura siguiente muestra los tres tipos de mecanizado identificados, pudiendo apreciarse la geometría de las piezas y los movimientos que efectúa la herramienta:

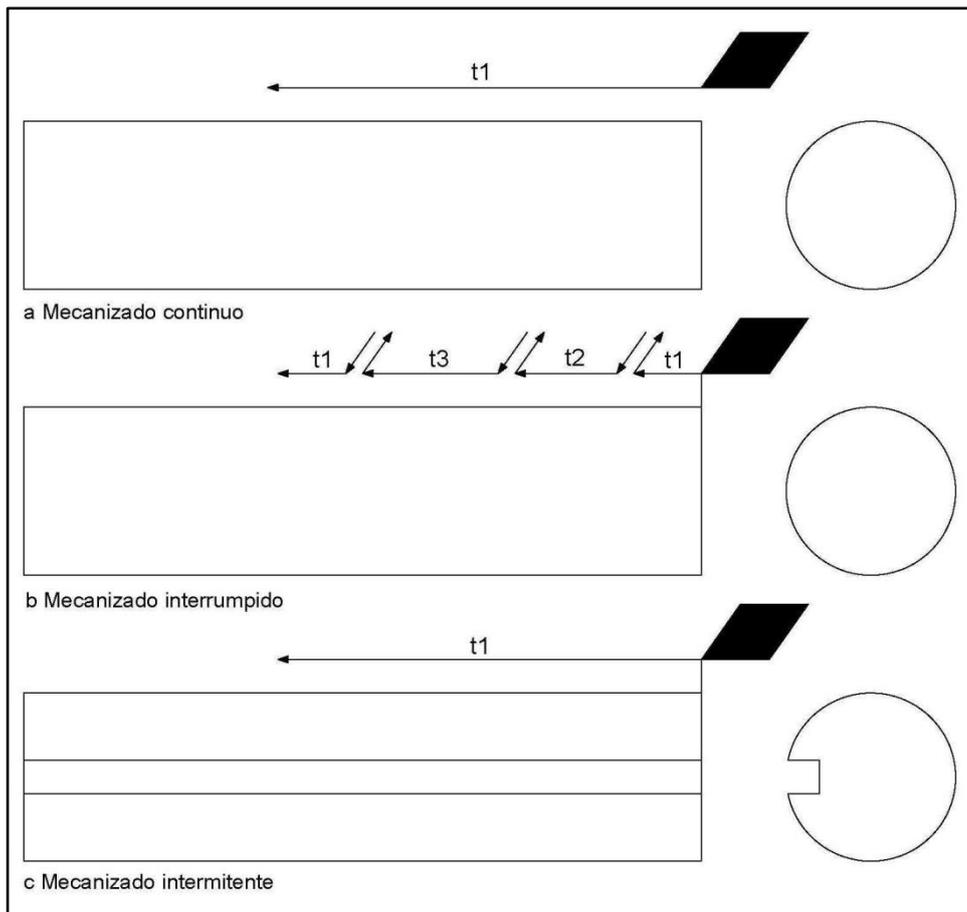


Figura 2.16 Tipos de mecanizado. Basada en Beswick (2002).

Uno de los temas de mayor interés en el análisis del mecanizado discontinuo es la evaluación de la calidad superficial obtenida. La evolución de la rugosidad superficial presenta diferencias según el tipo de corte realizado, así en el mecanizado continuo la rugosidad aumenta a medida que aumenta el desgaste de la herramienta, mientras que para el mecanizado interrumpido sucede lo contrario (Pavel *et al.*, 2005).

Las especiales características del mecanizado discontinuo: constante golpeo de la herramienta con el material, en el mecanizado intermitente, y cambios de temperatura debido a la existencia de periodos de operación alternados con periodos en los que no se realizan operaciones, en ambos procesos, hacen más probable la ocurrencia de fallos catastróficos en la herramienta que fallos debidos al desgaste (aunque puedan presentarse ambos). Así, las investigaciones sobre mecanizado discontinuo se centran en el estudio del fallo catastrófico, siendo las principales líneas de investigación los materiales a emplear en las herramientas y los mecanismos de fallo que se producen durante el mecanizado discontinuo.

La búsqueda de modelos matemáticos con los que predecir la temperatura alcanzada en la zona de corte ha sido afrontada por diversos investigadores. Así, por ejemplo, Lazoglu y Altintas (2002) plantean un modelo para predecir la temperatura en la zona de corte en el mecanizado continuo e interrumpido. Mediante el modelo matemático se pueden elegir los parámetros de mecanizado adecuados para evitar alcanzar temperaturas próximas a las temperaturas de difusión y acoplamiento de los materiales empleados en la herramienta. En el mecanizado interrumpido las temperaturas son cíclicas, incrementándose durante el mecanizado y disminuyendo durante los tiempos en los que no se realizan operaciones (Da Silva y Wallbank, 1999).

Según Armedia *et al.* (2010) y Kountanya (2008) en el corte interrumpido, debido a los periodos de refrigeración que se producen cuando no se mecaniza la pieza, las temperaturas alcanzadas durante el mecanizado interrumpido son menores que las alcanzadas durante el mecanizado continuo. Asimismo, se observa cómo a medida que se incrementan los periodos de refrigeración, las temperaturas máximas alcanzadas en el mecanizado disminuyen, aunque se generan ciclos térmicos de hasta 250°C de amplitud (Armedia *et al.*, 2010).

2.5.2 Principales trabajos sobre mecanizado discontinuo.

2.5.2.1 Materiales para las herramientas.

La elección de los materiales de las herramientas en el mecanizado discontinuo es ampliamente recogida en la literatura especializada. A continuación se presentan algunos de los principales trabajos agrupados por tipo de herramientas:

a) Aceros rápidos.

Una de las primeras recomendaciones resulta de la comparación entre las herramientas de acero rápido (HSS) y las de carburo cementado. Así, para el mecanizado interrumpido de titanio y superaleaciones (níquel, hierro - níquel y cobalto) se recomienda el empleo de herramientas HSS, a pesar de su inferior resistencia al desgaste, debido a los problemas de desportillado y rotura que se generan en las herramientas de carburo cementado (Campbell, 2006).

b) Carburos cementados.

En contraste con lo anterior, Ezugwu *et al.* (1999) indican que las herramientas de carburo cementado pueden ser adecuadas para el mecanizado interrumpido a bajas velocidades de aleaciones de base níquel.

Por su parte, las investigaciones de Wang *et al.* (2009) en el torneado interrumpido de aleaciones de titanio muestran cómo al incrementar el número de interrupciones, de dos a cuatro ranuras, los insertos de carburo sin recubrir sufren un mayor desgaste, incrementándose las fuerzas de corte.

Por otra parte, los estudios de Sayit *et al.* (2009) muestran cómo el desgaste en el mecanizado continuo, mediante herramientas de carburo cementado, es inferior al obtenido en el mecanizado interrumpido. Asimismo, se observan diferencias en los resultados del mecanizado interrumpido debido a la velocidad o avance empleados.

c) Cerámicas.

La experimentación llevada a cabo en el fresado frontal, mediante herramientas a base de carburos y cerámicas, muestra cómo las herramientas de tipo cerámico (nitruro de silicio) presentan mejores resultados con relación a la vida de la herramienta (Diniz y Ferrer, 2008). El

empleo de herramientas cerámicas también ha sido investigado por Xu *et al.* (2007), mostrando buena resistencia al desgaste y a la fractura tanto en el mecanizado continuo como en el intermitente. En el caso del mecanizado intermitente, la resistencia a la fractura varía notablemente entre las distintas herramientas ensayadas, ofreciendo los mejores resultados las herramientas: $\text{Al}_2\text{O}_3/45\% \text{Ti}(\text{C},\text{N})/\text{TR}$ y $\text{Al}_2\text{O}_3/45\% (\text{W},\text{Ti})\text{C}/\text{TR}$.

d) Nitruro de boro cúbico.

Investigaciones realizadas en el mecanizado de acero, mediante herramientas de nitruro de boro cúbico (CBN), permiten observar una importante influencia de la velocidad de corte y los periodos de parada del mecanizado en la vida de la herramienta. La influencia del material también resulta evidente, observándose cómo para las herramientas de mayor contenido en CBN la vida de la herramienta decrece a medida que se incrementa la velocidad de corte, mientras que para las de menor contenido se alcanza el máximo a velocidades medias (Chou y Evans, 1999).

En relación con la frecuencia de interrupción, durante el mecanizado de acero se observa cómo para las herramientas de mayor contenido de nitruro de boro cúbico no existe influencia, mientras que las de menor contenido ven disminuida su vida a medida que se incrementa la frecuencia de interrupción. El comportamiento frente al desgaste resulta mejor en el caso de herramientas con mayor contenido de CBN debido a su mayor dureza y resistencia a la fractura, aunque a altas velocidades se acelera el proceso de desgaste debido a la afinidad del aglutinante (cobalto y aluminio) con el material de trabajo (Chou y Evans, 1999).

Otros estudios en el torneado continuo y semiinterrumpido, mediante herramientas CBN, muestran cómo las herramientas de menor contenido de CBN ofrecen mejores resultados de vida de la herramienta que las de mayor contenido, aunque estas últimas ofrecen, ligeramente, mejores resultados en el mecanizado interrumpido (Diniz *et al.*, 2005). Por su parte, Diniz y Oliveira (2008) identifican mayores vidas de la herramienta en el corte interrumpido al emplear herramientas de bajo contenido de CBN.

Con relación a la influencia de la superficie interrumpida, otra investigación indica que para las herramientas de menor contenido de CBN la vida de la herramienta disminuye a medida que se incrementa la superficie interrumpida, mientras que para las de mayor contenido los resultados son mejores para el caso interrumpido que para los casos de mecanizado continuo, e incluso, para una de las velocidades ensayadas durante el mecanizado semiinterrumpido. En relación con los mecanismos de desgaste, se observa fundamentalmente desgaste del flanco y

creación de cráteres, para las de alto contenido en nitruro de boro cúbico, y debido a la adhesión de virutas al filo de la herramienta o rotura, en las de bajo contenido (Diniz *et al.*, 2005).

El estudio del mecanizado continuo e interrumpido de acero, mediante dos tipos de herramientas de nitruro de boro cúbico (con bajo contenido en CBN con una fase cerámica) y otros dos tipos de herramientas cerámicas (de base alúmina: Al_2O_3+TiN y reforzadas con carburo de silicio), muestra mejores resultados de desgaste de la herramienta y de rugosidad superficial de la pieza al emplear herramientas CBN, para todas las condiciones ensayadas (Godoy y Diniz, 2011).

El empleo de herramientas de nitruro de boro cúbico policristalino (PCBN) también ofrece buenas propiedades para el mecanizado interrumpido, entre las que se destaca su alta dureza, elevada resistencia al desgaste y estabilidad térmica. La experimentación de Oliveira *et al.* (2009) evalúa el comportamiento de las herramientas de PCBN (contenido 60%) con fase cerámica durante el mecanizado interrumpido de acero, comparándolo con el de una herramienta cerámica con base de alúmina y reforzada con carburo de silicio (Al_2O_3+SiC). Los resultados obtenidos mediante el corte continuo muestran vidas de la herramienta tres veces superiores para las herramientas PCBN, mientras que para el corte interrumpido los resultados son similares. El mecanismo de desgaste principal de la herramienta PCBN con fase cerámica es únicamente desgaste del flanco por abrasión, mientras que en la cerámica es desgaste por difusión, afectando la abrasión sólo al filo secundario. Los valores de rugosidad superficial obtenidos con las herramientas PCBN, durante el corte interrumpido, son considerablemente más bajos que los logrados con las cerámicas debido a los mecanismos de desgaste predominantes para cada tipo de herramienta.

e) Diamante policristalino.

La comparación de las prestaciones del carburo cementado con las herramientas de diamante policristalino (PCD), durante el torneado, muestra cómo los mejores resultados los ofrecen las herramientas PCD (König y Erinski, 1983).

Los desarrollos producidos en el campo de los recubrimientos pueden hacer considerar como alternativa el empleo de herramientas recubiertas en contraposición a la utilización de herramientas PCD. Así, por ejemplo, se ha estudiado el comportamiento de recubrimientos nanoestructurados de diamante sobre herramientas de carburo de wolframio en el mecanizado en seco a alta velocidad, tanto continuo como interrumpido, obteniéndose resultados similares de

desgaste y rugosidad superficial durante el mecanizado continuo. De igual modo, se observan resultados similares durante el mecanizado interrumpido. No obstante, en el mecanizado interrumpido se observan diferencias con relación al desgaste de la herramienta, obteniéndose mejores resultados al emplear herramientas PCD (Liang *et al.*, 2008).

2.5.2.2 Mecanismos de fallo.

Los mecanismos por los que se produce el fallo de las herramientas en el corte discontinuo han sido estudiados por diversos investigadores que han identificado los siguientes mecanismos principales de fallo:

a) Rotura térmica.

La influencia de los efectos térmicos en la rotura térmica de las herramientas es ampliamente aceptada en la literatura especializada. Así, Boston y Gilbert (1947) fueron los primeros en identificar que debido a los efectos térmicos se producen roturas en la cara de desprendimiento de las herramientas de carburos durante el fresado (Stanford *et al.*, 2007). La generación de roturas de tipo térmico también ha sido identificada por Okushima y Hoshi (1962, 1963). Por su parte, Chakraverti *et al.* (1984) analizan la evolución de la temperatura y las tensiones de tipo térmico durante el mecanizado, pudiéndose utilizar como indicador para prever la rotura térmica. Bhatia *et al.* (1978) y Chandrasekaran (1985) señalan que la rotura térmica es la principal causa de fallo a alta velocidad debido a las altas temperaturas generadas y los grandes rangos de variación de la temperatura. Tönshoff *et al.* (1994) también identifican los ciclos térmicos y las tensiones mecánicas como una fuente de microroturas, desportillado y, en ocasiones, fallo catastrófico del filo durante el fresado.

Adicionalmente, los estudios de Zorev (1963) y Zorev y Sawiaskin (1970) han mostrado que las tensiones de tracción inducidas en el cuerpo de la herramienta durante los periodos en los que no se produce corte son el principal causante de las fisuras térmicas. Citando a Braiden y Dugdale (1970), las roturas son debidas a la refrigeración por el comportamiento inelástico de la herramienta durante los procesos de calentamiento. Por otra parte, Yellowley y Barrow (1976) señalan la importancia que tienen los rangos y el número de ciclos de tensión térmica.

b) Impactos mecánicos.

Kronenberg (1963) investiga las condiciones de entrada en la pieza en el fresado frontal, observando una clara influencia en la vida de la herramienta. Así, cuando el ángulo de entrada es superior a 25° la vida de la herramienta se reduce significativamente. Los estudios de J.H.L. (1977) también identifican la influencia de las condiciones de entrada en la generación de roturas. Por su parte, Rotberg *et al.* (1987) analizan el efecto de las condiciones de entrada y salida por medio de una señal de la vibración, identificando una señal más desfavorable en el caso de la entrada. Investigaciones posteriores de Diniz y Filho (1999) otorgan una mayor importancia a la influencia de las condiciones de entrada que a las condiciones de salida.

Por otra parte, Hoshi y Okushima (1965) indican que las condiciones de salida de la herramienta son más importantes que las de entrada. La influencia de las condiciones de salida es estudiada en diversos trabajos de Pekelharing (1978; 1980; 1984) y Van Luttervelt y Willemse (1984).

La influencia que ejerce la entrada y la salida de la herramienta en la pieza según Andreev (1969; 1974a), Kuljanič (1974) y Zorev (1963) no es significativa en la producción del fallo de la herramienta. Sin embargo, posteriormente Zorev y Sawiaskin (1970) sí que admiten la influencia de los impactos mecánicos en la propagación de las fisuras generadas por los efectos térmicos. Finalmente, Tornachi y Dugdale (1977) y Bhatia *et al.* (1979) han indicado que los impactos mecánicos por sí solos pueden generar fallos en las herramientas de carburo.

Según Shintani *et al.* (1989) el mecanismo de impacto entre la herramienta y el material a mecanizar ejerce una importante influencia en el modo de fallo de la herramienta durante el mecanizado interrumpido. En particular, se observa cómo la geometría de la herramienta puede condicionar favorablemente el modo de fallo si se adapta al tipo de impacto mecánico a soportar durante el mecanizado.

c) Mecanismos de adhesión.

Otros de los mecanismos que puede llevar al fallo durante el mecanizado discontinuo son los procesos de adhesión. Andreev (1974b) y Kabaldin (1973) han indicado que la generación de procesos de adhesión en la cara de la herramienta durante el mecanizado de acero con herramientas de carburo puede llevar al fallo de la herramienta. Yellowley y Barrow (1978) también indican la posibilidad de aparición de fallo en la herramienta debido a los mecanismos de adhesión de la viruta.

d) Ángulo de corte negativo.

Pekelharing (1978) indica que la posibilidad de desportillado de la herramienta se produce en el movimiento de salida de la herramienta debido a la formación de un ángulo de desviación negativo, generando una peligrosa distribución de tensiones en la herramienta. Este fenómeno se conoce como formación del pie (del inglés *foot forming*).

Por otra parte, la experimentación mediante fresado y torneado interrumpido muestra cómo el material empleado en el mecanizado influye de manera importante en los efectos de las condiciones de salida en los resultados obtenidos. Así, por ejemplo, en el caso del mecanizado de fundiciones grises las condiciones de salida no ejercen influencia en la vida de la herramienta, mientras que en el mecanizado de aceros inoxidables el fallo prematuro puede ocurrir sin que se generen procesos de formación del pie (Ghani y Barrow, 1985).

En relación con la generación de tensiones durante la salida del corte intermitente, la experimentación llevada a cabo con herramientas achaflanadas muestra cómo la relación entre el espesor del chaflán y la profundidad de corte ejercen una importante influencia en la generación de tensiones que lleven a la herramienta al fallo. En particular, se observa cómo para profundidades de corte iguales al espesor del chaflán se reduce la posibilidad de fallo de la herramienta (Dokainish *et al.*, 1989).

En la línea anterior, Astakhov (2006) indica que la inferior vida de la herramienta que se observa en el mecanizado interrumpido es debida a que durante los procesos de corte se generan tensiones cortantes, un 30% superiores, a las que se generan durante el mecanizado continuo. La concentración de tensiones en el filo de corte también es identificada por Ezugwu y Tang (1992) como una fuente de deformación del filo de corte, generando procesos de desportillado.

e) Incipiente deformación de las virutas.

Por otra parte, J.H.L. (1977) señala la importancia de la incipiente deformación de las virutas a partir del primer contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo.

f) Una combinación de las anteriores.

La combinación de los mecanismos de fallo anteriores fue identificada por Zorev y Sawiaskin (1970), como se indicó anteriormente, admitiendo la combinación de impactos mecánicos y efectos térmicos. Por otra parte, Xu *et al.* (2007) observaron cómo los impactos

mecánicos y los choques térmicos pueden afectar conjuntamente a las herramientas cerámicas durante el torneado intermitente del acero.

2.5.2.3 Otros estudios.

Además del estudio de los materiales de las herramientas y de los mecanismos de fallo, otros trabajos investigan otro tipo de características de los procesos de mecanizado discontinuo, entre los que se destacan:

- a) Itoigawa *et al.* (2007) investigan la aplicación del sistema de mínima cantidad de lubricante (MQL) durante el torneado intermitente de aluminio, mediante herramientas de carburo. En particular, estudian la influencia del tipo de lubricante empleado: aceite mineral de tipo parafínico y aceite vegetal. El comportamiento de los lubricantes ofrece resultados diferentes con relación a la fuerza de fricción. Así, los aceites vegetales pueden reducir significativamente la fuerza de fricción si la temperatura de la superficie de la herramienta se sitúa por debajo de un nivel crítico.
- b) La investigación de Junior *et al.* (2009) evalúa la influencia de distintos sistemas de refrigeración/lubricación en el fresado interrumpido de un acero inoxidable. Los resultados obtenidos permiten observar la influencia del sistema empleado en términos de vida de la herramienta. Así, se obtiene un mejor resultado al emplear aceite vegetal, seguidamente el mejor comportamiento se obtiene para el sistema MQL con aceite vegetal, el mecanizado en seco y, finalmente, para la refrigeración/lubricación convencional mediante una emulsión de aceite vegetal; concluyendo que existe una mayor influencia de la capacidad lubricante que de la capacidad refrigerante.
- c) Ugarte *et al.* (2012) evalúan la maquinabilidad de dos aleaciones de titanio: Ti-6Al-4V y Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr durante el mecanizado interrumpido, mediante herramientas de carburo cementado recubiertas de TiAlN-TiN. Las principales conclusiones de la investigación muestran un mayor desgaste del flanco, mayores fuerzas de corte y mayores temperaturas en el flanco durante el mecanizado de la aleación Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr.

2.6 Resumen.

La aparición de las aleaciones ligeras en el siglo XX posibilita el desarrollo de un amplio campo de aplicaciones para el magnesio y sus aleaciones debido, principalmente, a su reducida densidad. El magnesio resulta un material competitivo en comparación con otros materiales estructurales como el acero, aluminio o titanio, encontrando así aplicaciones en diversos sectores como el de la aeronáutica o el de la automoción.

El magnesio también posee inconvenientes que impulsan el desarrollo de sus aleaciones. Así, surgen líneas de desarrollo de las aleaciones de magnesio que buscan mejorar la resistencia específica, la ductilidad o la resistencia a fluencia. Adicionalmente, se desarrollan los compuestos de matriz metálica de base magnesio, que persiguen otros objetivos como puede ser la reducción del desgaste o la mejora del módulo elástico.

El uso de fluidos de corte en el mecanizado es un punto crítico del proceso debido a los inconvenientes que lleva asociados como el coste, el impacto medioambiental y la peligrosidad que su uso presenta para los operarios. En este contexto, en los últimos años han surgido diversas alternativas a la refrigeración/lubricación convencional mediante fluidos de corte, ampliamente recogidas en la literatura especializada. Entre estas alternativas se destacan: el mecanizado en seco, el sistema de mínima cantidad de lubricación, la refrigeración criogénica, los refrigerantes gaseosos y los lubricantes sólidos.

Las alternativas a la refrigeración/lubricación convencional encuentran un interesante campo de aplicación en el mecanizado de magnesio, puesto que a pesar de que éste presenta una buena maquinabilidad, su mecanizado presenta importantes inconvenientes como el riesgo de ignición y la peligrosidad asociada al uso de fluidos de base acuosa debido a la formación de atmósferas de hidrógeno altamente explosivas.

Diversos estudios sobre el mecanizado de magnesio evalúan la aplicación de estas alternativas en procesos como el torneado, el taladrado o el fresado, mostrando su nivel de viabilidad en función de los resultados obtenidos en cada caso.

Adicionalmente, el avance que se ha producido en el campo de las herramientas de corte y de los recubrimientos permite un gran desarrollo de los procesos de mecanizado, ampliando los rangos operativos de los distintos parámetros de los procesos y facilitando la disminución o

supresión de los fluidos de corte del mecanizado, al conseguir suplir algunas de las ventajas que ofrecen los fluidos de corte.

Tradicionalmente, el mecanizado de los materiales se ha evaluado mediante procesos de corte continuo. No obstante, en los procesos de mecanizado modernos resulta habitual la existencia de discontinuidades en las superficies de las piezas. Las especiales características del mecanizado discontinuo, caracterizado por periodos de corte y periodos en los que no se realiza ningún tipo de operaciones, hacen preciso el estudio de los materiales más adecuados para emplear en las herramientas de corte y de los mecanismos de fallo de la herramienta para los procesos de mecanizado discontinuo.

La elección del material de la herramienta es una decisión que puede llevar a obtener mejores resultados en el mecanizado discontinuo. En este sentido, en el presente capítulo se recogen diversos estudios que evalúan la idoneidad de materiales como los aceros rápidos, los carburos cementados, las cerámicas, el nitruro de boro cúbico y el diamante.

Finalmente, se indica la importancia de los mecanismos de fallo en el mecanizado discontinuo, indicando la posibilidad de aparición debido a la rotura térmica, a los impactos mecánicos, a los mecanismos de adhesión, al ángulo de corte negativo, a la incipiente deformación de las virutas o a una combinación de los anteriores mecanismos.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1 Introducción.

El desarrollo del pensamiento científico encuentra sus fundamentos en el pensamiento filosófico. En este sentido, a lo largo de los siglos se ha producido una importante evolución en los métodos de toma de decisiones, desde métodos basados en las creencias y supersticiones, buscando respuestas a través de interpretaciones de elementos como el I Ching (China) o el Oráculo de Delfos (Grecia), a otros en los que prima la búsqueda de la verdad de los hechos (Buchanan y O'Connell, 2006).

Durante siglos se han producido importantes progresos en el ámbito de la filosofía. El desarrollo de las metodologías de investigación científica corre un rumbo paralelo al progreso de la filosofía. En particular, a la evolución de las corrientes filosóficas del empirismo (con Bacon, Locke y Hume como máximos exponentes) y el racionalismo (ideado por Descartes), que se fundamentaban en la experiencia y en la razón, respectivamente (Buchanan y O'Connell, 2006) (Ueda *et al.*, 2009).

Un poderoso instrumento para el conocimiento de la verdad es la experimentación, elemento base para la comprobación de las teorías (Wackermann, 2006). A través de la experimentación es posible adoptar estrategias que permitan el desarrollo de hipótesis y/o la comprobación de las mismas. Los experimentos permiten conocer con mayor detalle el funcionamiento de todo tipo de procesos o sistemas. En particular, la experimentación resulta idónea para abordar complejos problemas ingenieriles, como el planteado en la presente Tesis Doctoral.

La experimentación consiste en un ensayo o una serie de ensayos en los que se realizan cambios sobre una serie de variables del proceso o sistema de modo que a partir de la observación se puedan identificar las razones por las que se producen determinados cambios en los resultados obtenidos.

La utilización de modelos resulta una estrategia ampliamente extendida en el campo de la física y la ingeniería. Los modelos buscan representar una realidad concreta, siendo diferentes de la realidad de estudio, pero que se ajustan a ella lo suficientemente bien como para ser funcionales (Wackermann, 2006).

En general, se puede modelizar todo proceso o sistema según el esquema de la Figura 3.1. El modelo mostrado representa un proceso que recibe una serie de entradas y proporciona una

determinada salida. El resultado del proceso depende de las entradas, pero también de dos grupos de factores: los controlables y los no controlables. No obstante, las variables no controlables pueden llegar a controlarse en función del proceso de estudio (Montgomery, 2005).

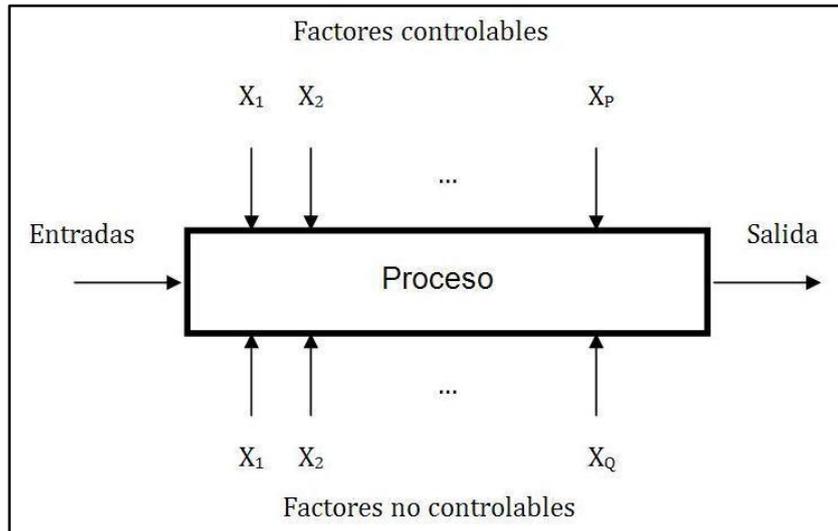


Figura 3.1 Modelo general para un proceso o sistema (Montgomery, 2005).

Los objetivos perseguidos con la experimentación son (Montgomery, 2005):

- a) Determinar la influencia de las variables en los resultados del experimento.
Determinar el mejor valor de las variables que influyen en el resultado, de modo que:
- b) El resultado tenga un valor próximo al deseado.
- c) La variabilidad del resultado tenga un valor pequeño.
- d) Se minimicen los efectos de las variables incontrolables.

La amplia gama de factores que influyen durante el mecanizado y la importancia creciente que actualmente tiene la calidad de las piezas mecanizadas, especialmente en sectores industriales como el aeronáutico, hacen necesario el desarrollo de técnicas para la predicción de la calidad de las piezas. Concretamente, para la medición de la rugosidad superficial, que se ha convertido en un indicador ampliamente utilizado por investigadores y empresas.

El desarrollo de técnicas de predicción de la rugosidad superficial requiere un conocimiento preciso del proceso de mecanizado que permita la elaboración de un modelo

matemático concreto. En general, este tipo de modelos se desarrollan mediante métodos de tipo mecánico o empírico, estando más desarrollados los empíricos. Entre los métodos de tipo empírico se señalan las técnicas de regresión estadística, red neuronal artificial o las basadas en la teoría de la difusión (Mukherjee y Ray, 2006) (Rubio *et al.*, 2012b).

En las últimas décadas se produce un importante desarrollo en metodologías que permiten determinar las condiciones óptimas o próximas al óptimo de los parámetros de los procesos de mecanizado. El amplio conjunto de técnicas existentes se pueden clasificar en: convencionales, que buscan determinar una solución local óptima, y no convencionales, que buscan determinar condiciones operativas próximas al óptimo. Adicionalmente, las técnicas de optimización se pueden subdividir en nuevos grupos. Así, las convencionales incorporan técnicas basadas en el Diseño de Experimentos y en la búsqueda mediante iteración matemática, y las no convencionales se dividen en técnicas de búsqueda meta-heurística y búsqueda heurística específica (Mukherjee y Ray, 2006) (Rubio *et al.*, 2012b).

En la presente investigación se empleará el método de análisis denominado Diseño Estadístico de Experimentos, Diseño de Experimentos o DOE (del inglés *Design Of Experiments*), basado en el diseño factorial, mediante el cual se puede obtener información sobre el proceso o sistema, que posteriormente se puede analizar mediante métodos estadísticos con los que obtener conclusiones válidas y objetivas (Montgomery, 2005) (Taguchi, 1987). Los procesos de mecanizado, en los que los parámetros del proceso pueden condicionar en gran medida los resultados obtenidos, son especialmente adecuados para ser estudiados mediante el Diseño Estadístico de Experimentos.

Los orígenes del Diseño Estadístico de Experimentos se sitúan en los años 20 y comienzo de los 30. En este periodo, Ronald A. Fisher introdujo el pensamiento estadístico en el diseño de experimentos, incorporando conceptos como el diseño factorial y el Análisis de la Varianza (Montgomery, 2005).

El trabajo de Fisher, ligado al campo de la agricultura, dejaba un amplio recorrido para el diseño estadístico en el campo industrial, comenzando así una segunda etapa en el diseño estadístico. Así, en 1951, Box y Wilson desarrollaron la Metodología de la Superficie de Respuesta, basándose en las características de los procesos industriales: inmediatez, la variable de respuesta de los procesos industriales puede observarse rápidamente; y secuencialidad, el investigador puede aprender de un pequeño grupo de experimentos y aplicar el aprendizaje en los siguientes experimentos (Montgomery, 2005).

En la década de los años 70 el interés por la mejora de la calidad genera nuevos desarrollos en el diseño de experimentos, iniciándose una nueva era para el diseño estadístico. Así, Genichi Taguchi plantea el Diseño Robusto de Parámetros. El trabajo de Taguchi apuesta por la utilización de diseños fraccionarios factoriales y arreglos ortogonales para resolver los problemas planteados. Aunque los conceptos y objetivos propuestos resultaron bien formulados, según las revisiones de los expertos en los años 80, tanto en las estrategias como en los métodos de análisis propuestos, se encontraron problemas. No obstante, el importante auge del diseño de experimentos permitía el comienzo de una nueva era, en la que aumentaba el número de técnicas aplicadas y los sectores de actividad: automoción, aeroespacial, electrónica o semiconductores, que empleaban el diseño estadístico (Montgomery, 2005).

La realización de un experimento científico precisa de la elaboración de un plan de trabajo por escrito que recoja en detalle todos los aspectos de importancia que puedan ser relevantes durante el experimento. La importancia de la planificación radica en que previene la incursión en errores, y ayuda a comprender con mayor precisión el problema de estudio y las causas que influyen en el mismo (Kuehl, 2001).

El plan de trabajo para la realización de la experimentación desglosa cada una de las etapas del proceso en una serie de actividades a desarrollar según lo expuesto a continuación, de acuerdo con las guías mostradas por Montgomery (2005):

- a) Planificación pre-experimental.
 - 1) Reconocimiento y definición del problema objeto de estudio.
 - 2) Selección de los factores, niveles y rangos.
 - 3) Selección de la variable de respuesta.
- b) Elección del diseño experimental.
- c) Ejecución del experimento.
- d) Análisis estadístico.
- e) Conclusiones.

3.2 Planificación pre-experimental.

3.2.1 Reconocimiento y definición del problema objeto de estudio.

El comienzo de la planificación de la experimentación pasa por reconocer el problema de estudio de modo claro, presentando los aspectos clave a través de un breve resumen. En este sentido, el problema de estudio se centra en el proceso de mecanizado de magnesio a bajas velocidades. En particular, el torneado intermitente de magnesio y la evaluación de la influencia que ejerce el sistema de refrigeración/lubricación en los resultados de rugosidad superficial de las piezas mecanizadas.

La principal problemática asociada al mecanizado de magnesio es el riesgo de ignición cuando la temperatura de proceso supera los 450°C, produciéndose fuego en las virutas o polvo de magnesio que puede llegar a alcanzar los 3.000°C. Adicionalmente, las partículas de magnesio de tamaño inferior a 500 µm pueden presentar riesgo de explosión (Weinert *et al.*, 2004).

Además, debe considerarse la peligrosidad asociada a la utilización de fluidos de base acuosa debido a la reactividad del agua con el magnesio para formar atmósferas de hidrógeno, inflamables y potencialmente explosivas (Kulekci, 2008).

3.2.2 Selección de los factores, niveles y rangos.

El conocimiento de los factores que influyen en los resultados del proceso permite seleccionar los factores de diseño de la experimentación. Los factores que pueden influir en los procesos se pueden clasificar como: controlables, si el investigador es capaz de definir los niveles del factor; incontrolables, cuando el investigador no puede definir los niveles aunque es posible medirlos; y factores de ruido, cuando son factores incontrolables por el investigador pero que por medio de la configuración de los factores controlables puede acotar la variabilidad de su respuesta (Montgomery, 2005).

Entre los factores que pueden afectar al proceso de mecanizado, en particular, a la rugosidad superficial se identifican los siguientes (Benardos y Vosniakos, 2003):

- a) Propiedades de la herramienta de corte: material, forma, errores de excentricidad y radio de la punta.
- b) Parámetros de corte: cinemática del proceso, sistema de refrigeración/lubricación, profundidad de corte, avance, velocidad de corte y ángulo de la herramienta.
- c) Propiedades del material: diámetro, discontinuidades, longitud y dureza.
- d) Fenómenos del proceso de corte: aceleración, formación de viruta, vibraciones, fricción en la zona de corte y variación de la fuerza de corte.

El elevado número de factores que intervienen en la rugosidad superficial hace necesario, por motivos prácticos y económicos, seleccionar un número reducido de factores controlables para el desarrollo de la investigación, entre los que se consideran más influyentes. Los demás factores se deben considerar como incontrolables. Así, tomando como referencia los factores anteriores, se escogen los siguientes: avance (a), velocidad de giro del husillo (n), tipo de herramienta (h), profundidad de corte (p), tipo de interrupción (i) y caudal MQL (c). Adicionalmente, se considerará el punto de medición de la rugosidad superficial, en función de la longitud (l) y la generatriz (g).

La definición de los niveles y rango de variación de los factores se realizará, teniendo en cuenta la necesidad de evitar generar un diseño de experimentos con un número elevado de combinaciones que pudiera ser excesivamente costoso, a partir de las siguientes consideraciones:

- a) Debido al objeto de estudio, procesos de reparación y mantenimiento, la profundidad de corte se debe fijar en valores reducidos para evitar problemas de tolerancias dimensionales. Por ello, se fija un único nivel para esta variable, siendo un rango razonable para fijar el valor de la profundidad entre 0 y 0,5 mm.
- b) La elección del sistema de refrigeración/lubricación es uno de los objetivos del presente estudio y, por ello, debe ser considerado como un elemento crítico. No obstante, es preciso señalar las limitaciones existentes en los equipos del laboratorio que imposibilitan la evaluación de determinados sistemas de refrigeración/lubricación como pudiera ser, por ejemplo, la refrigeración criogénica. De este modo, se optará por evaluar la influencia del mecanizado en seco y el sistema MQL.

Adicionalmente, tomando como referencia los estudios realizados por Bhowmick *et al.* (2010) y Bhowmick y Alpas (2011) es razonable prever que la elección del sistema de refrigeración/lubricación, en particular mecanizado en seco o sistema MQL, pueda ejercer una importante influencia en los resultados obtenidos durante el mecanizado de magnesio. Por ello, se fijarán tres niveles para el factor caudal MQL, tomando como rango adecuado el de los equipos disponibles.

- c) El análisis del corte intermitente también es uno de los objetivos del presente estudio. Por ello, se considerará como un elemento crítico, asignándosele tres niveles. El rango de variación de los niveles deberá establecerse a partir de las dimensiones de las piezas a mecanizar.

Los estudios de Pavel *et al.* (2005) muestran como la evolución de la rugosidad superficial presenta diferencias según el mecanizado sea continuo o discontinuo.

- d) La elección de la herramienta y su recubrimiento también ejerce influencia en los resultados de rugosidad superficial como indican, por ejemplo, los estudios de Gariboldi (2003), y Tönshoff y Winkler (1997). Por ello, parece razonable seleccionar al menos dos tipos diferentes de herramientas para evaluar su influencia. Así, se escogerá una especialmente adecuada para magnesio y otras aleaciones no férricas, y otra para otros tipos de materiales.
- e) La influencia de la velocidad de giro del husillo y del avance es ampliamente identificada en la literatura especializada, pudiendo citarse como ejemplos las

investigaciones de Tomac y Tønnessen (1991) o Gaitonde *et al.* (2008) en las que se identifica al avance como el factor que ejerce mayor influencia en los resultados de rugosidad superficial y fuerza de corte, en comparación con la velocidad de corte y el caudal de refrigeración/lubricación MQL.

De acuerdo con lo anterior, se establecerán dos niveles para evaluar la influencia de los 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. 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.

- f) Finalmente, estudios previos indican que la rugosidad superficial puede variar en función de la longitud de la pieza sobre la que se haga la medición (Rubio *et al.*, 2005). Por ello, la longitud de evaluación se considera como un factor de diseño. Adicionalmente, se considerará la posible influencia de la generatriz de la pieza escogida para realizar la medición de la rugosidad superficial.

De acuerdo con lo anterior, a continuación se muestra el conjunto de variables identificadas, junto a sus niveles y designaciones:

Tabla 3.1 Variables, niveles y designaciones.

Variable	Niveles	Designación
Profundidad de corte, p	1	$p1$
Avance, a	2	$a1, a2$
Tipo de herramienta, h	2	$h1, h2$
Velocidad de giro del husillo, n	2	$n1, n2$
Caudal MQL, c	3	$c1, c2, c3$
Tipo de interrupción, i	3	$i1, i2, i3$
Longitud, l	3	$l1, l2, l3$
Generatriz, g	3	$g1, g2, g3$

3.2.3 Selección de la variable de respuesta.

La característica a medir debe ser una variable que a través de sus resultados permita conocer información relevante sobre el proceso de estudio. En este sentido, la variable de respuesta escogida será la rugosidad superficial (medida en μm)¹².

La rugosidad superficial se refiere a una desviación de la superficie nominal entre el tercer y sexto orden, estando el orden de desviación definido por estándares internacionales como la norma DIN 4760 (DIN 4760, 1982). Así, el primer y segundo orden se refieren a la forma, el tercero y cuarto a las muescas periódicas y el quinto y sexto orden a la estructura del material (Benardos y Vosniakos, 2003).

Considerando como un posible factor de variación en los resultados el punto de medición, las medidas de rugosidad se realizarán en diferentes puntos, definidos en función de una determinada generatriz de la pieza y longitud sobre la generatriz.

La rugosidad superficial es la característica más comúnmente utilizada para definir la calidad de las piezas mecanizadas, incluso suele ser un requerimiento técnico para los productos mecánicos, y también puede ser utilizada como referencia para evaluar la estabilidad de un determinado proceso de producción. La importancia de la rugosidad superficial se puede apreciar en la gran cantidad de atributos de los productos que dependen, al menos parcialmente, de la calidad superficial. Entre estos atributos se puede citar 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 (Benardos y Vosniakos, 2003) (Çolak *et al.*, 2007) (Kıvak *et al.*, 2012).

A pesar de las ventajas de obtener reducidas rugosidades superficiales para determinados procesos, es preciso considerar que no es posible producir superficies perfectamente lisas, ya que siempre existirán irregularidades en forma de picos y valles en las superficies (El-Axir *et al.*, 2008). Adicionalmente, también se debe tener en cuenta el coste asociado a las operaciones de acabado, que puede hacer no recomendable la mejora de una determinada superficie (Rubio *et al.*, 2012b).

¹² Los valores de rugosidad superficial suelen expresarse en unidades derivadas del m (μm) debido a su magnitud. La conversión al S.I. se realiza mediante la siguiente equivalencia: $1\text{ m} = 10^6\ \mu\text{m}$.

Las técnicas de medición de la rugosidad superficial han evolucionado notablemente en las últimas décadas, pasando desde métodos subjetivos como la inspección visual o chequeos con las uñas de la mano, hasta métodos objetivos como capacitancia, neumática, ultrasonidos o inductancia; desde los métodos de contacto mecánico mediante agujas hasta los métodos sin contacto basados en la óptica; y desde los microscopios ópticos de baja potencia hasta los más revolucionarios microscopios de efecto túnel o STM (del inglés *Scanning Tunneling Microscopy*) y los microscopios de fuerza atómica o AFM (del inglés *Atomic Force Microscopy*) (Zhao y Gao, 2009).

Por su parte, Jawahir *et al.* (2011) recogen los principales avances en la evaluación experimental de la integridad de las superficies, destacando: métodos basados en la difracción, métodos micromagnéticos, espectroscopia Raman, métodos acústicos (emisiones acústicas, microscopios de escaneado acústico y ultrasonidos láser) y métodos de evaluación de la tensión plástica (técnica de recristalización y métodos de microrejillas).

En general, las técnicas de medición de la rugosidad superficial se pueden clasificar en los siguientes métodos: mecánicos, ópticos, neumáticos, ultrasónicos, eléctricos y basados en la detección de temperatura (Quinsat y Tournier, 2012).

También es preciso destacar la creciente importancia que están tomando el desarrollo de técnicas para la evaluación aérea de las texturas superficiales en tres dimensiones (3-D), una vez ya se dispone de la instrumentación y estándares de calibración para la evaluación en dos dimensiones (2-D) (Uchidate *et al.*, 2011).

La medición de la rugosidad superficial, en una determinada zona de evaluación del perfil de rugosidad (la Figura 3.2 muestra un perfil genérico de rugosidad), puede ser realizada empleando un amplio grupo de indicadores.

Las expresiones de cálculo de los indicadores de rugosidad aparecen recogidas en la norma UNE-EN ISO 4287:1999 (UNE-EN 4287:1999, 1999). A continuación, se muestran dos de los indicadores más empleados (Goch *et al.*, 1999):

- a) Desviación media aritmética del perfil evaluado (R_a). Se define como la media aritmética de los valores absolutos de las ordenadas $Z(x)$ comprendidas en una longitud de muestreo. Ofrece una medida de la rugosidad como media de las distintas rugosidades a lo largo de una determinada longitud de evaluación.

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l Z(x) dx \quad (3.1)$$

- b) Desviación media cuadrática del perfil evaluado (Rq). Se define como la media cuadrática de los valores de las ordenadas $Z(x)$ comprendidas en una longitud de muestreo. Proporciona una medida de la rugosidad a partir de la evaluación de los cuadrados de la diferencia entre la línea media y el punto de perfil considerado, a lo largo de una determinada longitud de evaluación.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx} \quad (3.2)$$

Donde l representa la longitud de muestreo y $Z(x)$ el valor de la ordenada.

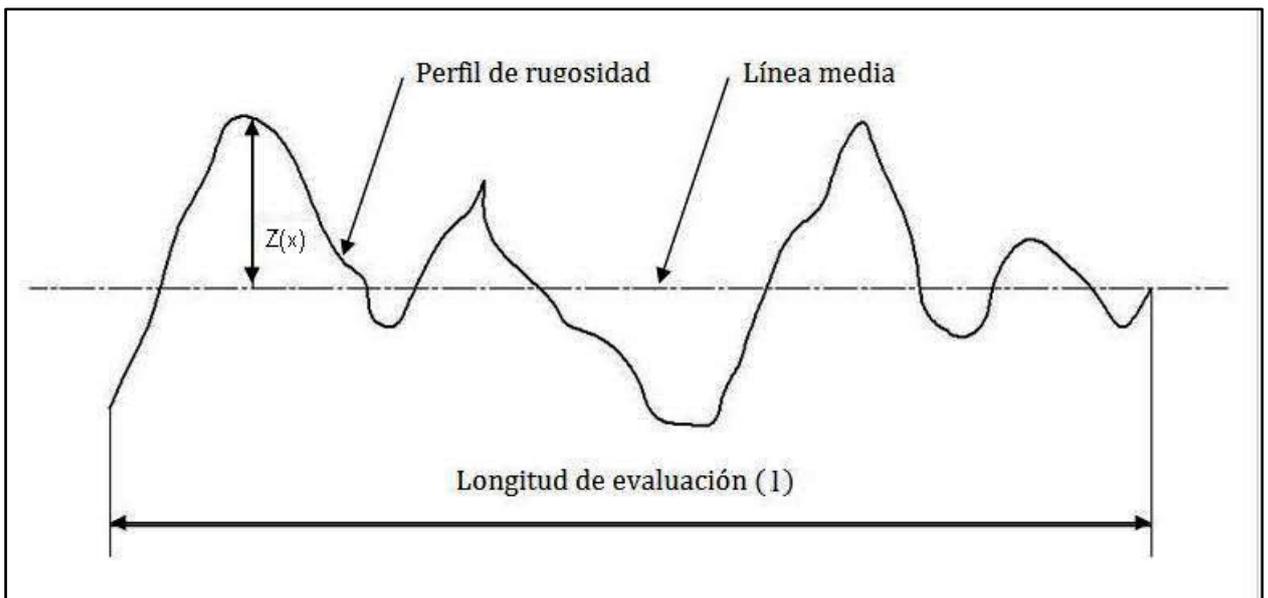


Figura 3.2 Perfil genérico de rugosidad.

La relación entre los dos indicadores anteriores depende del proceso productivo. Usualmente, la desviación media cuadrática del perfil evaluado (Rq) se encuentra entre $1,1 Ra$ y $1,4 Ra$ (Persson, 2006). En este sentido, la siguiente tabla muestra los rangos habituales de los ratios para los principales procesos de mecanizado:

Tabla 3.2 Ratios Rq/Ra para los principales procesos de mecanizado (ASM, 1989).

Proceso productivo	Ratio $Rq : Ra$
Fresado	1,16 – 1,40
Rectificado superficial	1,22 – 1,27
Torneado	1,17 – 1,26

La dependencia de la rugosidad superficial del proceso de producción permite definir rangos para la desviación media aritmética del perfil evaluado, o simplemente, desviación media aritmética, en función del proceso como los mostrados en la tabla siguiente:

Tabla 3.3 Rangos de Ra para los principales procesos de mecanizado (ASM, 1989).

Proceso productivo	Rango habitual de Ra (μm)	Rango menos frecuente de Ra (μm)
Fresado	0,8 – 6,3	0,2 – 25
Rectificado	0,1 – 1,6	0,025 – 6,3
Taladrado	1,6 – 6,3	0,8 – 12,5
Torneado, mandrinado	0,4 – 6,3	0,025 – 25

La rugosidad superficial y la tolerancia dimensional están fuertemente ligadas. Así, una ajustada tolerancia dimensional requiere un fino acabado, pudiendo necesitarse de diversas operaciones de acabado.

La siguiente tabla muestra una clasificación de distintos tipos de acabado en función de la desviación media aritmética y la tolerancia dimensional. Asimismo, se identifican los métodos típicos de producción y los costes relativos aproximados para su obtención, fijando como referencia el coste del acabado superficial de mayor tolerancia.

Tabla 3.4 Clasificación de superficies según Ra y tolerancia (ASM, 1989).

Clase	Ra (μm)	Tolerancia adecuada (mm)	Método típico de producción	Coste relativo aproximado para producirla
Superacabada	0,1	0,0125	Rectificado, microafilado, lapeado	40
Pulida	0,2	0,0125	Rectificado, afilado, lapeado	35
Rectificada	0,4	0,025	Rectificado, lapeado	25
Lisa	0,8	0,050	Rectificado, Fresado	18
Fina	1,6	0,075	Fresado, rectificado, esmerilado, brochado	13
Semifina	3,2	0,100	Rectificado, brochado, fresado, torneado	9
Media	6,3	0,175	Conformado, fresado, torneado	6
Semidesigual	12,5	0,330	Fresado, torneado	4
Desigual	25	0,635	Torneado	2
Limpia	50	1,25	Torneado	1

3.3 Elección del diseño experimental.

La elección del diseño tiene como objetivo establecer el plan de experimentos para llevar a cabo el estudio. Para ello, la información definida en las anteriores etapas resulta clave, ya que en función de los objetivos definidos para la investigación y el conocimiento del proceso se podrá definir un conjunto de experimentos que ofrezca resultados adecuados para extraer conclusiones sobre los objetivos planteados.

El plan de experimentos definirá el número y la secuencia de los ensayos, el número de repeticiones a realizar y la necesidad de crear bloques o de aleatorizar resultados.

En función de las características del proceso de estudio se escogerá, de entre la variedad de diseños existentes, el diseño que mejor se adapte. Así, por ejemplo, se pueden encontrar diversos diseños como los diseños de primer orden: factoriales completos, factoriales fraccionados y diseño Plackett–Burman, y los diseños de orden elevado: diseño central compuesto, diseño Box–Behnken y matriz Doehlert (Tarley *et al.*, 2009).

La etapa de planificación de la experimentación lleva al establecimiento de la hipótesis de investigación que establece un conjunto de circunstancias y sus consecuencias. A partir de la hipótesis se procede al diseño de tratamientos que son el conjunto de circunstancias creado para el experimento. Así, el objetivo es realizar un estudio comparativo que permita observar la influencia que ejercen los tratamientos sobre los resultados del experimento (Kuehl, 2001).

El establecimiento de una hipótesis se plantea mediante la identificación de una hipótesis nula sobre los parámetros de una cierta distribución de probabilidad, o los parámetros de un modelo. Para verificar o rechazar la hipótesis nula se extraerá una muestra aleatoria sobre la que se realizará un test estadístico que permita corroborar la coherencia de la hipótesis nula. De este modo, se podrá aceptar la hipótesis nula, o rechazarla aceptando una hipótesis alternativa que se verifica si y solo si no se verifica la hipótesis nula (Montgomery, 2005).

Para verificar la hipótesis establecida se diseñará un experimento adecuado que permita conocer la influencia que ejercen determinados parámetros en los resultados esperados de las magnitudes estudiadas.

La complejidad asociada a la influencia que ejercen una serie de factores en una determinada variable de estudio, y las relaciones que ejercen unos factores sobre otros, requiere

de un método específico de estudio que permita conocer con un alto grado de detalle el problema planteado. Un método adecuado para estudiar este tipo de problemas es el denominado diseño factorial (Montgomery, 2005) (Kuehl, 2001).

Los diseños factoriales proporcionan información sobre cada uno de los factores en todas las observaciones, siendo factible observar la respuesta de un factor en niveles diferentes de un mismo experimento (Kuehl, 2001).

La definición de los factores de estudio (A, B, C,...) y de los niveles de tratamiento (a, b, c,...) de cada una de ellos constituye la base del diseño factorial. A medida que se incrementa el número de variables el diseño del experimento crece en complejidad debido al incremento del número de posibles combinaciones de los factores. Así, un experimento en el que se analicen dos factores deberá considerar las relaciones de primer orden o doble (AB); uno que analice tres factores agrega a las anteriores dos nuevas relaciones de primer orden (AC y BC) y una interacción de tercer orden o triple (ABC); y así, sucesivamente. En general, serán precisas un número de $a * b * c * \dots * m$ observaciones, siendo m el número de repeticiones (Montgomery, 2005).

Las interacciones esperadas se calculan a partir de las fórmulas de la combinatoria, considerando que cada interacción representa la selección de r elementos, sin repetición y sin importar el orden, tomados de un conjunto de q elementos. Así, la fórmula empleada es:

$$C(q, r) = \binom{q}{r} = \frac{q!}{r!(q-r)!} \tag{3.3}$$

De acuerdo con la ecuación anterior, en la tabla siguiente, se identifican los efectos esperados para un diseño de 7 factores:

Tabla 3.5 Efectos principales e interacciones para el diseño de 7 factores.

Número de factores	Interacciones					
	1er orden (q=7 ; r=2)	2º orden (q=7 ; r=3)	3er orden q=7 ; r=4	4º orden (q=7 ; r=5)	5º orden (q=7 ; r=6)	6º orden (q=7 ; r=7)
7	21	35	35	21	7	1

Una vez identificados los factores y sus niveles, se procederá a la elaboración del plan de experimentos a realizar. Así, inicialmente, el diseño de la experimentación deberá incluir todas las combinaciones de ensayos que permitan identificar la influencia de cada uno de los factores y sus interacciones en los resultados del mecanizado. De este modo, para el conjunto de factores y niveles seleccionados para la investigación, se necesitará de $2^3 * 3^4 = 648$ experimentos para realizar un diseño factorial completo, sin considerar repeticiones.

El elevado número de experimentos exige, debido a limitaciones económicas y prácticas, un ajuste del plan para poder llevar a cabo la investigación con un número de experimentos más reducido.

La reducción del plan de experimentos se realizará empleando un diseño combinado $L_{4 \times 3^2}$ para 5 factores y 3 replicaciones en las que se anidan 2 factores más. El diseño para 5 factores representa una combinación de un diseño fraccionario para 3 factores y un diseño factorial completo para los otros 2 factores, que permite estimar las interacciones de segundo orden donde aparecen el tipo de interrupción o el caudal MQL, con el mínimo número de experimentos y sin confusión con los factores principales u otras interacciones de segundo orden (Montgomery, 2005) (Taguchi, 1987).

El diseño combinado planteado se puede estudiar por partes independientes. A continuación se evalúa la influencia de la composición de las dos partes, su combinación y las replicaciones:

- a) Diseño factorial fraccionario de fracción 1/2 (Montgomery, 2005).

Esta metodología es ampliamente empleada en el diseño de procesos y productos, y es adecuada cuando se consideran despreciables las interacciones entre los factores del diseño de orden elevado. Así, el diseño factorial fraccionario considera como relevantes los efectos principales y las interacciones entre los factores de orden bajo.

La utilización de los diseños factoriales fraccionarios lleva a la pérdida de información. Por ello, el diseño de los experimentos mediante esta metodología exige un conocimiento preciso del proceso a analizar y de los factores e interacciones que se quieren estudiar.

En el estudio planteado se han considerado siete factores, 3 de dos niveles y 4 de tres niveles. En particular, el interés de la investigación se centra en conocer la influencia de los factores de tres niveles: caudal MQL y tipo de interrupción, y las interacciones que estos factores

tienen con otros factores. Así, se identifican como objetivos para el diseño del plan de experimentos la influencia de los factores: c e i ; así como las interacciones entre estas dos variables y las demás. Asimismo, se considerarán despreciables las interacciones de segundo orden y órdenes superiores.

Según lo expuesto, el diseño del plan de experimentos recurrirá a un diseño factorial fraccionario (1/2) para los tres factores de dos niveles. Este tipo de diseño parte de un diseño completo de tres factores y dos niveles que requeriría de 2^3 ensayos, pero en el que el número de ensayos se desea reducir a la mitad. El diseño factorial fraccionario de fracción 1/2, usualmente, se denota como $2^{3-1} = 4$.

Empleando las combinaciones convencionales (a, b, c,...) y la de signos positivos y negativos, la Tabla 3.6 muestra las distintas combinaciones para el diseño 2^3 .

Según la tabla, el diseño factorial fraccionario permite considerar dos opciones: la representada por la fracción principal, en ella el generador ABC es positivo; y la representada por la fracción alternativa, en ella el generador ABC es negativo.

Tabla 3.6 Combinaciones para el diseño factorial 2^3 .

Combinación	Efecto factorial							
	I	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
a	+	+	-	-	-	-	+	+
b	+	-	+	-	-	+	-	+
c	+	-	-	+	+	-	-	+
abc	+	+	+	+	+	+	+	+
ab	+	+	+	-	+	-	-	-
ac	+	+	-	+	-	+	-	-
bc	+	-	+	+	-	-	+	-
(1)	+	-	-	-	+	+	+	-

Si consideramos la fracción principal se dispone de tres grados de libertad que permiten estimar los efectos principales a través de las siguientes combinaciones lineales:

$$l_A = \frac{1}{2} * (a - b - c + abc) \tag{3.4}$$

$$l_B = \frac{1}{2} * (b - a - c + abc) \quad (3.5)$$

$$l_C = \frac{1}{2} * (c - a - b + abc) \quad (3.6)$$

Del mismo modo se pueden estimar las interacciones de primer orden del siguiente modo:

$$l_{BC} = \frac{1}{2} * (a - b - c + abc) \quad (3.7)$$

$$l_{AC} = \frac{1}{2} * (b - a - c + abc) \quad (3.8)$$

$$l_{AB} = \frac{1}{2} * (c - a - b + abc) \quad (3.9)$$

Debido a la elección del diseño, los efectos de los factores principales se confunden con los efectos de primer orden. Así, cuando se pretende estimar el efecto de A, realmente se estima el efecto de A + BC; y de igual modo en lugar de estimar B y C, se estiman B + AC, y C + AB, respectivamente. De forma similar, en el caso de emplear la fracción alternativa cuando se pretende estimar el efecto de A, realmente se estima el efecto de A - BC; y de igual modo en lugar de estimar B y C, se estiman B - AC, y C - AB, respectivamente.

b) Diseño factorial completo (Montgomery, 2005).

Para el estudio de los dos factores de tres niveles: caudal MQL y tipo de interrupción, se recurre a un diseño factorial completo. Mediante este diseño se deberán realizar $3^2 = 9$ experimentos.

A través de los experimentos realizados será posible estimar el efecto de los factores principales, así como la interacción entre ambos.

c) Combinación del diseño factorial fraccionario y el diseño completo.

La combinación de las dos partes del diseño permite estimar las seis interacciones de primer orden que no quedan estimadas mediante las dos partes del diseño planteado, considerándose los efectos de las interacciones de segundo orden y superiores despreciables. En particular, la combinación de las dos partes del diseño, permitirá estimar las interacciones: AD, BD, CD, AE, BE y CE.

La combinación del diseño factorial fraccionario, de 4 experimentos, y del diseño completo, de 9 experimentos, da como resultado un diseño experimental de $4 * 9 = 36$ experimentos.

d) Replicaciones con 2 factores anidados.

El número de replicaciones que se realizará de cada uno de los experimentos será 3, de modo que el número resultante de experimentos a realizar será $36 * 3 = 108$. Estas replicaciones se fijan anidando en el diseño, de modo aleatorizado, las dos variables que todavía no han sido consideradas: longitud y generatriz de la medición.

El diseño anidado es debido a las propias características del experimento considerado. En particular, la elección del conjunto de probetas con distintos tipos de interrupción hace que los niveles de los factores longitud y generatriz de cada uno de los tipos probetas, aunque similares, no sean idénticos. Así, los niveles de los factores longitud y generatriz para cada uno de los tipos de probeta podrían ser renombrados tomando valores distintos como se muestra a continuación (Montgomery, 2005).

Tabla 3.7 Designación niveles longitud y generatriz.

Tipo de interrupción	Niveles originales (<i>l/g</i>)	Posible nueva designación de los niveles (<i>l/g</i>)
<i>i1</i>	1	1
	2	2
	3	3
<i>i2</i>	1	4
	2	5
	3	6
<i>i3</i>	1	7
	2	8
	3	9

El diseño planteado permitirá poder evaluar sin confusión los factores principales representados por el cruce entre los factores iguales de las columnas y filas, y las interacciones entre factores diferentes, siendo indiferente el orden escogido, indicadas en la siguiente tabla:

Tabla 3.8 Conjunto de factores e interacciones estimables.

	<i>a</i>	<i>n</i>	<i>h</i>	<i>c</i>	<i>i</i>	<i>l</i>	<i>g</i>
<i>a</i>	X			X	X	X	X
<i>n</i>		X		X	X	X	X
<i>h</i>			X	X	X	X	X
<i>c</i>				X	X	X	X
<i>i</i>					X	X	X
<i>l</i>						X	
<i>g</i>							X

A continuación se muestra el plan de experimentos diseñado:

Tabla 3.9 Plan de experimentos.

N°	a	h	n	c	i	Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3	
						l	g	l	g	l	g
1	2	1	2	1	3	2	1	1	3	3	2
2	2	2	1	2	2	1	2	2	3	3	1
3	2	1	2	2	2	3	1	1	2	2	3
4	1	2	2	2	3	2	1	1	3	3	2
5	1	2	2	3	3	1	3	2	1	3	2
6	2	2	1	3	2	2	3	1	2	3	1
7	2	1	2	1	1	2	2	3	1	1	3
8	1	1	1	3	3	3	2	1	3	2	1
9	2	1	2	2	1	1	1	2	2	3	3
10	1	1	1	1	2	2	3	3	1	1	2
11	2	2	1	1	2	1	2	2	3	3	1
12	2	2	1	1	1	2	2	3	3	1	1
13	1	1	1	1	1	3	3	2	2	1	1
14	2	2	1	2	1	2	2	1	1	3	3
15	1	2	2	3	1	1	1	3	3	2	2
16	1	2	2	1	3	1	3	3	2	2	1
17	2	1	2	2	3	3	2	1	3	2	1
18	2	1	2	3	2	2	3	1	2	3	1
19	1	1	1	3	2	1	2	3	1	2	3
20	2	2	1	1	3	1	3	2	1	3	2
21	2	2	1	2	3	2	1	3	2	1	3
22	1	2	2	1	1	1	1	2	2	3	3
23	2	1	2	1	2	2	3	1	2	3	1
24	1	1	1	2	2	3	1	1	2	2	3
25	1	1	1	2	3	1	3	3	2	2	1
26	1	2	2	1	2	3	1	1	2	2	3
27	2	2	1	3	1	2	2	1	1	3	3
28	1	2	2	2	1	1	1	3	3	2	2
29	2	1	2	3	3	1	3	2	1	3	2
30	1	1	1	3	1	1	1	3	3	2	2
31	2	2	1	3	3	2	1	3	2	1	3
32	2	1	2	3	1	2	2	1	1	3	3
33	1	2	2	2	2	1	2	2	3	3	1
34	1	2	2	3	2	3	1	1	2	2	3
35	1	1	1	1	3	3	2	2	1	1	3
36	1	1	1	2	1	1	1	2	2	3	3

3.4 Ejecución del experimento.

La experimentación a llevar a cabo, de acuerdo con la planificación previa, consiste en la realización de ensayos de mecanizado con el objetivo de conocer la influencia de determinados parámetros del proceso en los resultados.

Debido a la no existencia de un estándar adecuado para la realización de los ensayos de mecanizado discontinuo, será preciso diseñar un procedimiento para el desarrollo de los ensayos con el objetivo de, *a posteriori*, poder analizar los resultados obtenidos, atendiendo a las variables que han podido ejercer algún tipo de influencia.

La ejecución del experimento se divide en tres etapas: actividades previas al mecanizado, realización de los ensayos de torneado y medición de la rugosidad superficial. A continuación, se detalla la metodología seguida en cada una de estas etapas.

a) Actividades previas al mecanizado:

Primeramente, antes de la realización de los ensayos se deberán elaborar las probetas a mecanizar de acuerdo con el diseño establecido, de modo que permitan evaluar la influencia de la intermitencia durante el mecanizado. Así, una vez realizado el diseño, la fabricación de las probetas se descompone en dos etapas. En la primera, se realizará un proceso de torneado en torno horizontal para obtener las probetas de tipo cilíndrico, en las que se les marcarán dos puntos centrales en las bases y, en la segunda, se procederá a mecanizar la ranura de las probetas, que pasarán a ser de sección interrumpida, mediante una fresadora universal.

Una vez elaboradas las probetas para los ensayos se debe comprobar la disposición de los distintos elementos necesarios para llevar a cabo el experimento y comprobar el uso de los equipos. En particular, comprobar que es posible garantizar el funcionamiento del equipo según los distintos parámetros de mecanizado necesarios. Asimismo, debe garantizarse que los distintos elementos se encuentran ubicados de modo que faciliten la realización del ensayo.

Especial cuidado debe otorgarse a las herramientas de corte. Para evitar errores en su selección se escribirá la numeración correspondiente a cada herramienta sobre una de las caras de la plaquita y en la caja de plaquitas con un rotulador permanente. De este modo, se garantizará que en cada uno de los ensayos se emplea la herramienta correcta por la cara de corte establecida en la planificación, garantizándose que las empleadas en cada ensayo son

completamente nuevas. Así, se evitará que el desgaste producido en las mismas pueda condicionar los resultados, y que estén disponibles y perfectamente identificadas para posibles análisis posteriores de las mismas.

Para la realización de la medición de la rugosidad, una vez verificado que se dispone de los elementos auxiliares necesarios: mármol, base magnética y bloques con forma de “V”, también será preciso realizar una serie de preparativos, consistentes en: fijar una regla graduada sobre el bloque en “V” de posicionamiento de las probetas, que permita identificar la longitud sobre la que se toma la medida; rotular tres radios sobre la base de las probetas, separados según un ángulo de $2 * \pi / 3$ rad, que permitan posicionar el punto de medición correctamente sobre las distintas generatrices; configurar el software del rugosímetro para que elabore los informes de las medidas de acuerdo con lo requerido; y realizar la calibración del equipo.

Adicionalmente, se deberá preparar una hoja de control de experimentos en la que se identifiquen las condiciones de mecanizado de cada uno de los experimentos, las piezas a mecanizar y las herramientas empleadas. Esta hoja permite tanto la correcta ejecución del experimento según lo previsto como el control de los experimentos.

b) Realización de los ensayos de torneado.

El procedimiento seguido para la realización de los experimentos de mecanizado quedará definido según los pasos siguientes:

- 1) Posicionar en el torno la probeta a mecanizar.
 - 2) Colocar en el portaherramientas la herramienta requerida para el ensayo.
 - 3) Seleccionar los parámetros de corte del ensayo: velocidad de giro del husillo, avance, profundidad de corte y caudal MQL.
 - 4) Comprobar que la herramienta, pieza y parámetros de corte del ensayo seleccionados se corresponden con los establecidos en la hoja de control.
 - 5) Realizar la operación de torneado (cilindrado) mecanizando una longitud ligeramente superior al tramo definido para evaluar la rugosidad superficial.
 - 6) Retirar la herramienta empleada del portaherramientas, fotografiarla, y guardarla en la caja en la posición destinada a ella.
 - 7) Retirar la probeta mecanizada.
- c) Medición de la desviación media aritmética.

La medida de la desviación media aritmética se realizará mediante un rugosímetro. El procedimiento para realizar la medición seguirá los pasos identificados a continuación:

- 1) Colocar la probeta encima del bloque en “V”.
- 2) Ajustar el posicionamiento de la probeta sobre la regla graduada.
- 3) Aproximar y posicionar el rugosímetro a la zona a medir.
- 4) Realizar la medida de la desviación media aritmética a lo largo de la longitud y generatriz de la probeta.
- 5) Generar un informe de la medición y guardarlo convenientemente identificado.
- 6) Retirar el rugosímetro.
- 7) Retirar la probeta del bloque en “V”.

Los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos se recogen en una hoja de registro para su posterior análisis. Cada medición se anotará debajo de la indicación de la longitud y generatriz. A continuación se muestra la hoja de toma de datos:

Tabla 3.10 Documento de registro de las mediciones de la experimentación.

Nº	R_{a1}	R_{a2}	R_{a3}	Nº	R_{a1}	R_{a2}	R_{a3}
1	l2 g1	l1 g3	l3 g2	19	l1 g2	l3 g1	l2 g3
2	l1 g2	l2 g3	l3 g1	20	l1 g3	l2 g1	l3 g2
3	l3 g1	l1 g2	l2 g3	21	l2 g1	l3 g2	l1 g3
4	l2 g1	l1 g3	l3 g2	22	l1 g1	l2 g2	l3 g3
5	l1 g3	l2 g1	l3 g2	23	l2 g3	l1 g2	l3 g1
6	l2 g3	l1 g2	l3 g1	24	l3 g1	l1 g2	l2 g3
7	l2 g2	l3 g1	l1 g1	25	l1 g3	l3 g2	l2 g1
8	l3 g2	l1 g3	l2 g1	26	l3 g1	l1 g2	l2 g3
9	l1 g1	l2 g2	l3 g3	27	l2 g2	l1 g1	l3 g3
10	l2 g3	l3 g1	l1 g2	28	l1 g1	l3 g3	l2 g2
11	l1 g2	l2 g3	l3 g1	29	l1 g3	l2 g1	l3 g2
12	l2 g2	l3 g3	l1 g1	30	l1 g1	l3 g3	l2 g2
13	l3 g3	l2 g2	l1 g1	31	l2 g1	l3 g2	l1 g3
14	l2 g2	l1 g1	l3 g3	32	l2 g2	l1 g1	l3 g3
15	l1 g1	l3 g3	l2 g2	33	l1 g2	l2 g3	l3 g2
16	l1 g3	l3 g2	l2 g1	34	l3 g1	l1 g2	l2 g3
17	l3 g2	l1 g3	l2 g1	35	l3 g2	l2 g1	l1 g3
18	l2 g3	l1 g2	l3 g1	36	l1 g1	l2 g2	l3 g3

3.5 Control del experimento.

Todas las actividades a desarrollar previstas en la planificación del diseño de experimentos deben ser controladas convenientemente durante su ejecución. En particular, se debe garantizar que cada uno de los ensayos se desarrolla de acuerdo con la planificación establecida. Adicionalmente, será preciso registrar cualquier tipo de perturbación observada, así como la variación en las condiciones de contorno que se puedan producir entre los diferentes ensayos.

En cada ensayo realizado se obtendrán documentos gráficos que permitan un análisis *a posteriori* de los procesos. Así, en cada uno de los ensayos se realizará una grabación en vídeo del torneado y se tomarán fotografías de las virutas obtenidas y de la herramienta empleada, mediante una cámara de alta resolución.

Las virutas obtenidas serán guardadas, correctamente identificadas con el número de ensayo, junto a las herramientas tal y como quedaron tras los ensayos de torneado.

3.6 Análisis estadístico.

La realización del plan de ensayos establecido proporciona un conjunto de datos de la variable de respuesta para las diferentes condiciones de ensayo definidas. El análisis del conjunto de datos obtenido se realizará mediante métodos estadísticos, obteniendo, de este modo, resultados objetivos que permitirán extraer conclusiones sobre los experimentos. El análisis permitirá evaluar la hipótesis acerca del comportamiento de las distintas variables estudiadas sobre la variable respuesta, con un determinado nivel de confianza.

Para la realización del análisis estadístico existen diversos programas informáticos adecuados. En el presente estudio se empleará el software SAS.

Adicionalmente, debido a las ventajas que proporcionan los métodos gráficos, para el análisis e interpretación de datos, se representarán gráficamente los resultados obtenidos en función de las variables y sus interacciones.

El estudio de los datos se llevará a cabo a partir del diseño combinado $L_4 \times 3^2$ de 5 factores y 3 replicaciones con 2 factores anidados, que permitirá analizar los factores principales y las interacciones estimables de acuerdo con el diseño seleccionado.

El análisis se realizará mediante el Análisis de la varianza (ANOVA) según los siguientes pasos:

- a) Cálculo de la suma de cuadrados de cada uno de los factores principales y de las interacciones estimables.
- b) Cálculo de la suma de cuadrados del error y de la suma de cuadrados del total.
- c) Cálculo de los grados de libertad de los factores principales e interacciones.
- d) Cálculo de los cuadrados medios de los factores principales, interacciones y error.
- e) Evaluación del estimador F para todos los factores principales e interacciones, a partir de los cuadrados medios de los factores y error.
- f) 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.

- g) 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 es superior al estimador F o el valor p es superior a α .

Finalmente, se muestra un cuadro resumen del análisis ANOVA para el experimento diseñado:

Tabla 3.11 Cuadro resumen del análisis ANOVA.

Fuente de variación	Suma de cuadrados (SC)	Grados de libertad (GL)	Cuadrados medios (CM)	Estimador F	F_α
A	SC_A	GL_A	SC_A/ GL_A	CM_A/ CM_{Error}	$F_\alpha (GL_A, GL_{Error})$
B	SC_B	GL_B	SC_B/ GL_B	CM_B/ CM_{Error}	$F_\alpha (GL_B, GL_{Error})$
C	SC_C	GL_C	SC_C/ GL_C	CM_C/ CM_{Error}	$F_\alpha (GL_C, GL_{Error})$
D	SC_D	GL_D	SC_D/ GL_D	CM_D/ CM_{Error}	$F_\alpha (GL_D, GL_{Error})$
E	SC_E	GL_E	SC_E/ GL_E	CM_E/ CM_{Error}	$F_\alpha (GL_E, GL_{Error})$
F	SC_F	GL_F	SC_F/ GL_F	CM_F/ CM_{Error}	$F_\alpha (GL_F, GL_{Error})$
G	SC_G	GL_G	SC_G/ GL_G	CM_G/ CM_{Error}	$F_\alpha (GL_G, GL_{Error})$
AD	SC_{AD}	GL_{AD}	SC_{AD}/ GL_{AD}	CM_{AD}/ CM_{Error}	$F_\alpha (GL_{AD}, GL_{Error})$
AE	SC_{AE}	GL_{AE}	SC_{AE}/ GL_{AE}	CM_{AE}/ CM_{Error}	$F_\alpha (GL_{AE}, GL_{Error})$
AF	SC_{AF}	GL_{AF}	SC_{AF}/ GL_{AF}	CM_{AF}/ CM_{Error}	$F_\alpha (GL_{AF}, GL_{Error})$
AG	SC_{AG}	GL_{AG}	SC_{AG}/ GL_{AG}	CM_{AG}/ CM_{Error}	$F_\alpha (GL_{AG}, GL_{Error})$
BD	SC_{BD}	GL_{BD}	SC_{BD}/ GL_{BD}	CM_{BD}/ CM_{Error}	$F_\alpha (GL_{BD}, GL_{Error})$
BE	SC_{BE}	GL_{BE}	SC_{BE}/ GL_{BE}	CM_{BE}/ CM_{Error}	$F_\alpha (GL_{BE}, GL_{Error})$
BF	SC_{BF}	GL_{BF}	SC_{BF}/ GL_{BF}	CM_{BF}/ CM_{Error}	$F_\alpha (GL_{BF}, GL_{Error})$
BG	SC_{BG}	GL_{BG}	SC_{BG}/ GL_{BG}	CM_{BG}/ CM_{Error}	$F_\alpha (GL_{BG}, GL_{Error})$
CD	SC_{CD}	GL_{CD}	SC_{CD}/ GL_{CD}	CM_{CD}/ CM_{Error}	$F_\alpha (GL_{CD}, GL_{Error})$
CE	SC_{CE}	GL_{CE}	SC_{CE}/ GL_{CE}	CM_{CE}/ CM_{Error}	$F_\alpha (GL_{CE}, GL_{Error})$
CF	SC_{CF}	GL_{CF}	SC_{CF}/ GL_{CF}	CM_{CF}/ CM_{Error}	$F_\alpha (GL_{CF}, GL_{Error})$
CG	SC_{CG}	GL_{CG}	SC_{CG}/ GL_{CG}	CM_{CG}/ CM_{Error}	$F_\alpha (GL_{CG}, GL_{Error})$
DE	SC_{DE}	GL_{DE}	SC_{DE}/ GL_{DE}	CM_{DE}/ CM_{Error}	$F_\alpha (GL_{DE}, GL_{Error})$
DF	SC_{DF}	GL_{DF}	SC_{DF}/ GL_{DF}	CM_{DF}/ CM_{Error}	$F_\alpha (GL_{DF}, GL_{Error})$
DG	SC_{DG}	GL_{DG}	SC_{DG}/ GL_{DG}	CM_{DG}/ CM_{Error}	$F_\alpha (GL_{DG}, GL_{Error})$
EF	SC_{EF}	GL_{EF}	SC_{EF}/ GL_{EF}	CM_{EF}/ CM_{Error}	$F_\alpha (GL_{EF}, GL_{Error})$
EG	SC_{EG}	GL_{EG}	SC_{EG}/ GL_{EG}	CM_{EG}/ CM_{Error}	$F_\alpha (GL_{EG}, GL_{Error})$
Error	SC_{Error}	GL_{Error}	SC_E/ GL_{Error}		
Total	SC_T	GL_T			

3.7 Conclusiones.

El análisis estadístico de datos debe llevar a un mayor y más preciso conocimiento del proceso o sistema de estudio, que facilite la extracción de conclusiones de carácter práctico que permitan mejorar los resultados del proceso de estudio en posteriores ensayos.

Entre los diversos tipos de recomendaciones que se podrían realizar después del análisis estadístico de datos, se citan: indicaciones sobre la influencia de las variables de estudio en los resultados, importancia de las interacciones entre variables o rangos recomendables para las variables en función de los resultados deseados.

3.8 Resumen.

En el presente capítulo se ha desarrollado 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 las últimas décadas se ha producido un 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 mecánico y empírico. Asimismo, se han venido desarrollando técnicas de optimización de procesos, de tipo convencional y no convencional, que permiten determinar condiciones operativas óptimas o próximas al óptimo.

La metodología establecida se fundamenta en una de las técnicas de optimización de procesos convencional más empleadas, el Diseño Estadístico de Experimentos (DOE). Así, el objetivo principal será la obtención de un modelo basado en el esquema general propuesto por Montgomery (2005) que permita identificar los factores que influyen en mayor medida en la variable a controlar: la rugosidad superficial.

El DOE permite definir un conjunto de etapas: planificación pre-experimental, elección del diseño experimental, ejecución del experimento, análisis estadístico y conclusiones, como base para el desarrollo de la experimentación.

La aplicación de las etapas planteadas a la presente investigación permite obtener una mayor comprensión del problema y definir una estrategia adecuada para afrontar su análisis. En este sentido, se identifica un conjunto de variables que pueden influir en los resultados del mecanizado, a saber: avance (a), velocidad de giro del husillo (n), tipo de herramienta (h), profundidad de corte (p), tipo de interrupción (i), caudal MQL (c), longitud (l) y generatriz (g).

La influencia que ejercen los anteriores factores y sus interacciones en el mecanizado intermitente será evaluada a través de la variable de respuesta definida. Para ello, se selecciona un diseño experimental ajustado a la disponibilidad de medios y tiempo para llevar a cabo la investigación, que permita estimar sin confusión las interacciones de segundo orden de los factores tipo de interrupción y caudal MQL. Así, el diseño empleado será un diseño combinado $L_4 \times 3^2$ para 5 factores y 3 replicaciones en las que se anidan otros 2 factores. El diseño permite realizar la investigación con un conjunto de 108 experimentos.

Para la realización práctica de los experimentos se definen las actividades previas al mecanizado, el procedimiento de realización de los ensayos y medición de resultados, así como las actividades de control de los experimentos.

Los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos se deberán analizar con el objetivo de poder extraer conclusiones de los mismos. Para ello se define un procedimiento de análisis estadístico, mediante el Análisis de la varianza (ANOVA), con el que poder evaluar la influencia de los distintos factores y sus interacciones en la variable de respuesta.

CAPÍTULO 4: APLICACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

4.1 Introducción.

La aplicación de las metodologías experimentales permite obtener un conjunto de observaciones que tras ser analizadas deben permitir corroborar o rechazar la hipótesis establecida como base de la experimentación.

Como ya se había señalado en el desarrollo de la metodología experimental, el método más adecuado para el análisis de los resultados es el análisis estadístico. Entre las ventajas que ofrece el análisis estadístico se destaca la objetividad que introduce en el análisis.

Los resultados obtenidos en la experimentación se analizarán por medio del Análisis de la varianza (ANOVA). El ANOVA es un método estadístico mediante el que se descompone la variabilidad de una determinada variable de respuesta en diferentes componentes. Cada componente de la variabilidad ofrece la dispersión debida a otros factores o variables. Se utiliza para comprobar si los valores obtenidos en un experimento específico son diferentes de los valores obtenidos en otros (Villete *et al.*, 2011). Así, a través del análisis ANOVA será posible evaluar la influencia de las distintas fuentes de variación y sus interacciones sobre la variable de estudio de la investigación.

Actualmente, el estado del arte de los procesos de mecanizado permite conocer la influencia que ejercen sobre los resultados obtenidos en el mecanizado una amplia variedad de factores, entre los que se pueden destacar las características del material a mecanizar, el material y la geometría de la herramienta, y las condiciones operativas del mecanizado (avance, velocidad de corte, profundidad de corte o sistema de refrigeración/lubricación). Adicionalmente, también se deberá considerar la influencia de otros factores como, por ejemplo, el factor humano en la realización de los ensayos o las vibraciones generadas durante el mecanizado.

El desarrollo de técnicas de optimización, introducidas en el Capítulo 3: Metodología, permite avanzar en la optimización de los procesos de mecanizado, aunque se considera prácticamente imposible el desarrollo de un modelo universal de aplicación para todos los procesos de mecanizado debido a la elevada complejidad existente (Rubio *et al.*, 2012b).

El método de optimización a emplear se basa en una de las técnicas convencionales de optimización. Concretamente, el Diseño de Experimentos basado en el diseño factorial. El diseño factorial es una técnica ampliamente utilizada en el campo del mecanizado. Específicamente, para la optimización de los procesos en función de la rugosidad superficial. En este sentido, es

posible destacar diferentes trabajos en la literatura especializada como el de El-Sinawi y Kashani (2005) que emplea un diseño factorial de 2^4 experimentos, el de Thomas y Beauchamp (2003) basado en un diseño factorial completo de $2^3 * 3^2 * 4^1$ experimentos o el de Kumar y Choudhury (2008) que utiliza un diseño central compuesto de $2^3 + (2 * 3) + 6$ experimentos.

A lo largo del tiempo, el diseño factorial se ha ido desarrollando en busca de lograr una mayor adaptación a los problemas concretos de los procesos de estudio, y de las limitaciones de tiempo y materiales para el desarrollo de las investigaciones. Así, en ocasiones es preciso optar por soluciones de compromiso que permitan lograr conocer con el mayor grado de detalle posible el funcionamiento de un proceso determinado, pero con un coste ajustado.

Debido a las limitaciones para el desarrollo del presente estudio la investigación se basará en un diseño factorial combinado L_{4x3^2} para 5 factores y 3 replicaciones en las que se anidan 2 factores más que permitirá conocer la influencia de las distintas fuentes de variación y las interacciones estimables del proceso mediante un conjunto de 108 experimentos. Este análisis permitirá la obtención de las condiciones de operación óptimas del proceso.

4.2 Aplicaciones.

4.2.1 Equipos.

El equipo principal requerido para la realización de los experimentos se compone de: material (piezas de aleación de magnesio) para la elaboración de las probetas, una máquina – herramienta, sistema de refrigeración/lubricación, fluido de corte, herramientas de corte y equipo de medición para la rugosidad.

Las probetas empleadas para la realización de los ensayos se construirán con una aleación de magnesio de amplio uso en los procesos de fabricación, denominada AZ91D-F, de densidad 1.810 kg/m³.

La composición de la aleación es la siguiente:

Tabla 4.1 Composición de la aleación AZ91D-F (% en masa) (MATWEB, 2012).

Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Zn
8,3 - 9,7	≤ 0,030	≤ 0,0050	90,0	≥ 0,13	≤ 0,0020	≤ 0,10	0,35 - 1,00

Las principales propiedades mecánicas de la aleación empleada se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 4.2 Principales propiedades mecánicas de la aleación AZ91D-F (MATWEB, 2012).

Propiedad	Valor
Dureza Brinell (500 kg y 10 mm)	63
Resistencia a tracción (MPa)	230
Límite Elástico (MPa)	150
Elongación (%)	3
Módulo de elasticidad (GPa)	44,8
Resistencia impacto Charpy (J)	2,7
Resistencia a fatiga (MPa)	97,0

Las probetas empleadas en los ensayos de mecanizado se diseñan en forma de barras cilíndricas de diámetro 53 mm y con una longitud de 125 mm (105 mm útiles). Las interrupciones se definen a través de una ranura, de tipo rectangular caracterizada por su ancho, siendo: $i1 = 0$ mm, $i2 = 15$ mm y $i3 = 30$ mm. La interrupción $i1$ se corresponde con una pieza sin interrupción, empleada para poder realizar comparaciones con el mecanizado continuo.

La figura siguiente muestra el diseño de la probeta continua:

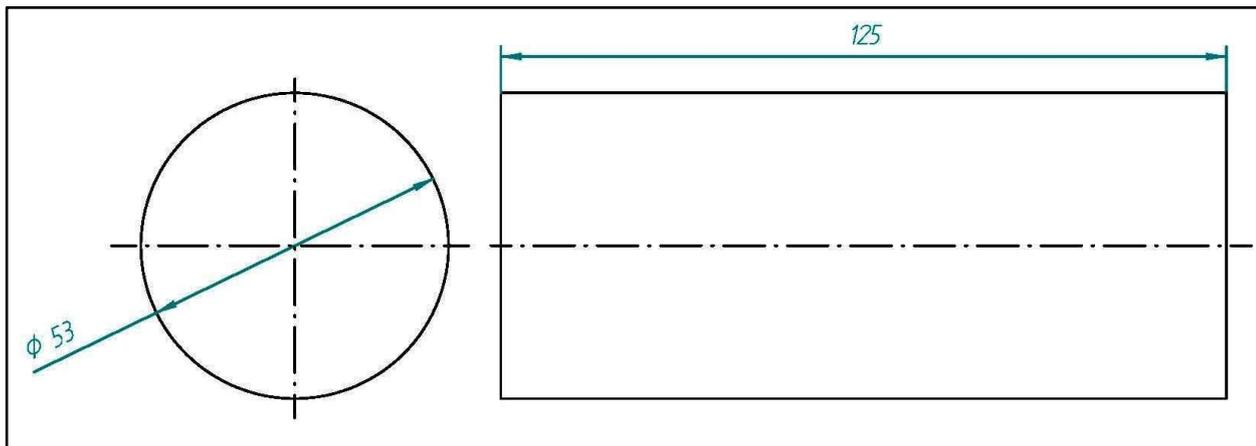


Figura 4.1 Diseño de la probeta continua.

Partiendo de la probeta empleada en el mecanizado continuo se crearán dos nuevas probetas, que permitan evaluar la influencia de la intermitencia durante el mecanizado. El diseño de estas nuevas probetas se realizará a partir de la probeta cilíndrica, incorporando a la probeta una ranura de tipo rectangular, realizada mediante un proceso de fresado en un centro de mecanizado.

Para evaluar la influencia de la intermitencia en los resultados del mecanizado se diseñarán las dos probetas de forma similar pero con un tamaño distinto de ranura. De este modo, se podrá evaluar tanto la influencia de la intermitencia en el mecanizado, comparando los resultados obtenidos con las probetas continuas con los obtenidos con las probetas con ranuras, como la influencia del tamaño de la intermitencia, comparando entre sí las probetas con ranuras. Los anchos de ranura elegidos para las probetas son 15 y 30 mm.

En las siguientes figuras se muestran los diseños de las dos probetas ranuradas. En concreto, la Figura 4.2 muestra el diseño de la probeta con la ranura de 15 mm y la Figura 4.3 muestra el diseño de la probeta con la ranura de 30 mm.

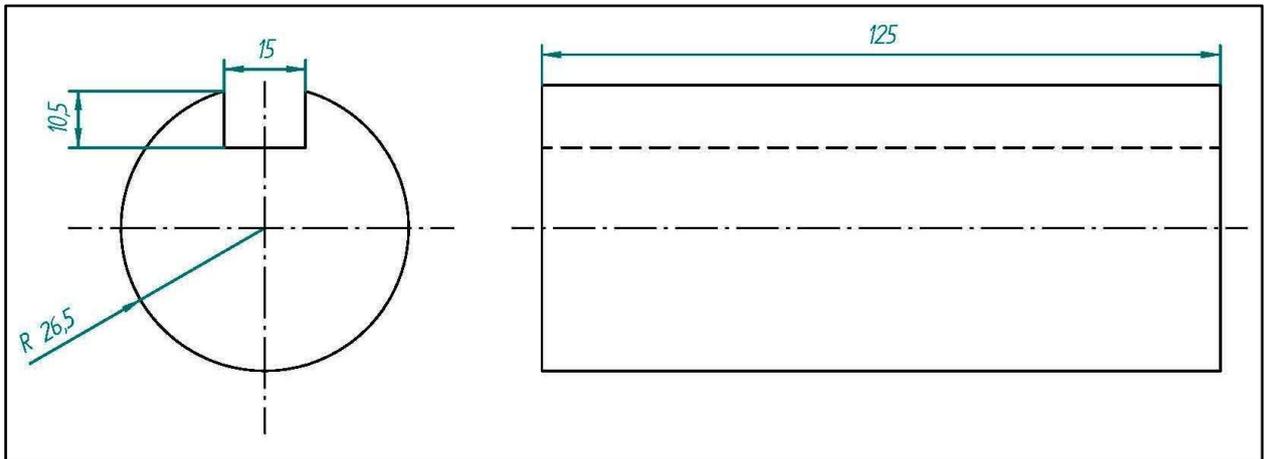


Figura 4.2 Diseño de la probeta discontinua de ranura 15 mm.

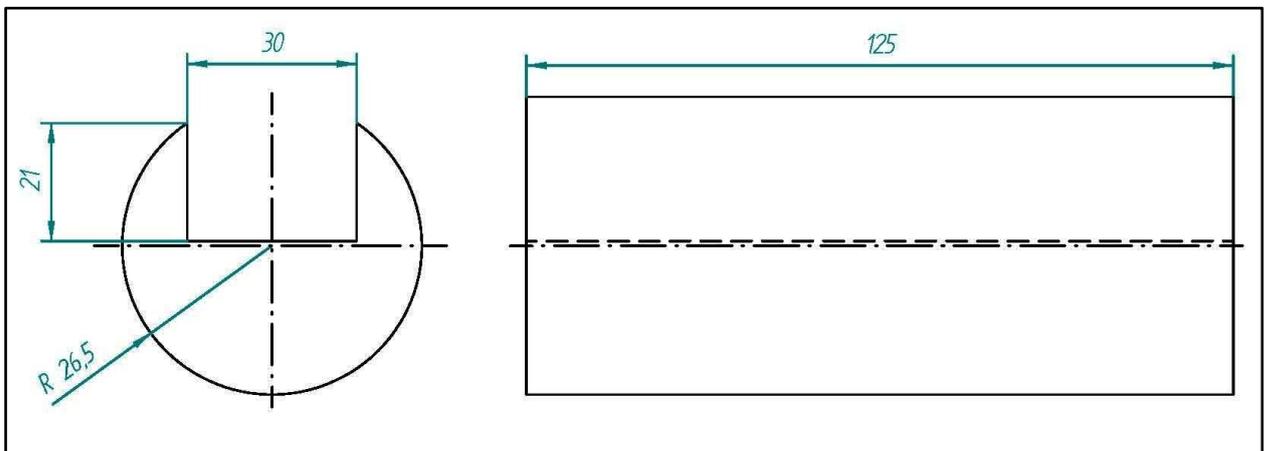


Figura 4.3 Diseño de la probeta discontinua de ranura 30 mm.

Por otra parte, la Figura 4.4 muestra una imagen del conjunto de los tres tipos de probetas empleadas.



Figura 4.4 Conjunto de probetas.

La máquina-herramienta empleada es un torno paralelo PINACHO Modelo L-1/200, con una distancia entre puntos de 1 m, mostrado en la Figura 4.5. Las características del torno incluyen: rango de velocidades de 32 a 1800 rpm¹³, y un rango de avances desde 0,018 a 0,44 mm/rev¹⁴ para las operaciones de refrentado, y desde 0,044 a 1,04 mm/rev para las operaciones de cilindrado.



Figura 4.5 Conjunto torno con probeta i2.

¹³ Resulta habitual emplear como unidad para la velocidad de giro del husillo las rpm. La conversión al S.I. se realiza mediante la siguiente equivalencia: $1 \text{ rpm} = (2 * \pi / 60) \text{ rad/s}$.

¹⁴ Resulta habitual emplear como unidad para el avance el mm/rev. La conversión al S.I. se realiza mediante la siguiente equivalencia: $1 \text{ mm/rev} = (1 / 2 * \pi * 10^3) \text{ m/rad}$.

Como sistema de refrigeración/lubricación se empleará un aplicador MQL denominado ACCU-LUBE Microlubrication System, mostrado en la Figura 4.6. El sistema empleado permite suministrar una mezcla de aire y refrigerante a la zona de corte, permitiendo regular la cantidad de aire y refrigerante. Asimismo, el equipo dispone de un generador de frecuencia que permite ajustar el intervalo en el que se envían los impulsos de aire a la bomba.



Figura 4.6 Sistema de mínima cantidad de lubricante.

La elección del refrigerante para emplear en el sistema MQL debe considerar las particularidades del material a mecanizar. Principalmente, el riesgo de ignición. Por ello, de entre los refrigerantes disponibles en el mercado se selecciona el refrigerante r.rhenus Nor SSL, del fabricante r.rhenus, especialmente recomendado para el mecanizado de magnesio. El refrigerante se basa en ésteres ácidos grasos naturales, y está exento de aceite mineral y cloro.

Las herramientas de corte empleadas son del fabricante SECO. Se recurrirá a una sin recubrir (HX), adecuada para el mecanizado de hierro fundido y aceros templados, así como, para el mecanizado de aluminio y materiales no féreos; y otra recubierta de $Ti(C,N)+Al_2O_3$ DURATOMIC (TP2500), especialmente adecuada para el torneado, tanto de aceros como de aceros inoxidable, así como para fundiciones (SECO, 2012).

La denominación de las herramientas empleadas según la norma ISO 1832:2012 (ISO 1832:2012, 2012) es DCMT11T308-F2 seguida por la denominación del recubrimiento empleado: HX o TP2500. Donde D representa la forma de la plaqueta de corte (tipo rombo con

ángulo de 55°); C representa el ángulo de incidencia de la plaquita (7°); M representa las tolerancias en función del diámetro del agujero y el espesor de la plaquita ($\pm 0,13$ mm en el espesor y $\pm 0,05$ mm en el diámetro); T representa el tipo de plaquita (tipo T); 11 representa la longitud del filo de corte (11,60 mm); T3 representa el espesor de la plaquita (3,97 mm); 08 representa el radio de la punta de la herramienta (0,8 mm); y F2 representa la designación del rompevirutas (tipo F2).

En la figura siguiente se puede observar un esquema básico de las plaquitas empleadas:

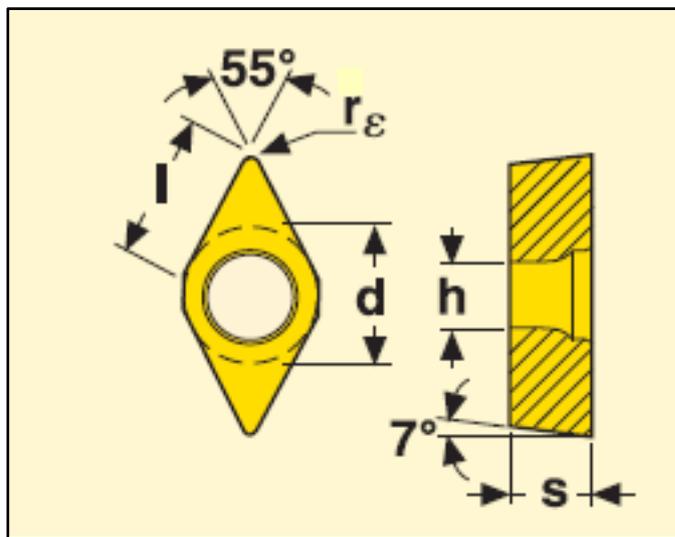


Figura 4.7 Dimensiones geométricas de la plaquita (SECO, 2012).

Para la realización de las mediciones de rugosidad superficial se dispone de un rugosímetro, denominado Mitutoyo Surftest SJ 401, mostrado en la Figura 4.8, capaz de ofrecer 36 tipos de rugosidades superficiales según los estándares ISO, DIN y ANSI. Entre ellos, la desviación media aritmética (Ra).

Las principales características que ofrece el rugosímetro empleado son: para el detector, un rango de medición de $800 \mu\text{m}$ (según z) y una resolución de $1,25 * 10^{-4} \mu\text{m}$ (por cada $8 \mu\text{m}$ de rango); y para la unidad, una rectitud de $0,3 \mu\text{m}$ y un rango 25 mm (según x).

La medida de rugosidad superficial a evaluar será la desviación media aritmética (Ra), definida como la media aritmética de los valores absolutos de las ordenadas $Z(x)$ comprendidas en una longitud de muestreo, calculada según la ecuación 3.1.



Figura 4.8 Rugosímetro de superficies Mitutoyo SurfTest SJ 401.

Adicionalmente, se toman vídeos del proceso, y fotografías de la viruta resultante y de las herramientas empleadas mediante una cámara digital de alta resolución, modelo Sony CyberShot DSC-P100.

Debido a que el magnesio presenta riesgo de ignición durante el mecanizado, y como no debe ser extinguido mediante agua debido a la formación de atmósferas explosivas de hidrógeno, se prepararán los medios adecuados para sofocar las posibles incidencias. Entre estos medios se identifican un extintor para fuego de tipo D y un contenedor con arena seca.

4.2.2 Definición de los experimentos.

A partir de lo establecido en la metodología con relación a los factores, niveles y rangos, y considerando las posibilidades de los equipos disponibles, a continuación, se procederá a fijar los valores concretos de los niveles de los distintos factores. La elección de los niveles se realiza considerando lo siguiente:

- a) La profundidad de corte se fijará en 0,25 mm, dentro del rango establecido de 0-0,5 mm.
- b) De los posibles caudales proporcionados por el sistema MQL se han tomado los tres siguientes: 9ml/h, 4,5 ml/h y 0 ml/h; siendo este último el que reproduce las condiciones de mecanizado en seco.
- c) Se emplearán tres probetas cilíndricas, una continua y dos con ranuras de 15 mm y 30 mm de ancho, que permiten evaluar la influencia del incremento de la interrupción, y la propia existencia de interrupción al escoger también una probeta sin ningún tipo de interrupción.
- d) Se emplearán dos herramientas de corte con la misma geometría pero distinto recubrimiento. En concreto, una sin recubrir (HX) y otra recubierta (TP2500).
- e) La elección de las velocidades de giro del husillo y los avances se realizan buscando, en primer término, obtener velocidades de avance menores de 100 mm/min (adecuadas para los procesos de mantenimiento y reparación) y, en segundo término, minimizar los ajustes necesarios en el torno, para reducir la probabilidad de incurrir en errores de operación. Así, se escogerán como velocidades de giro del husillo: 500 y 800 rpm, y como avances: 0,051 y 0,1 mm/rev.
- f) Los puntos de medida de la rugosidad superficial se definen mediante tres longitudes de 35 mm y tres generatrices separadas entre sí un ángulo de $2 * \pi / 3$ rad, como muestra la Figura 4.9.

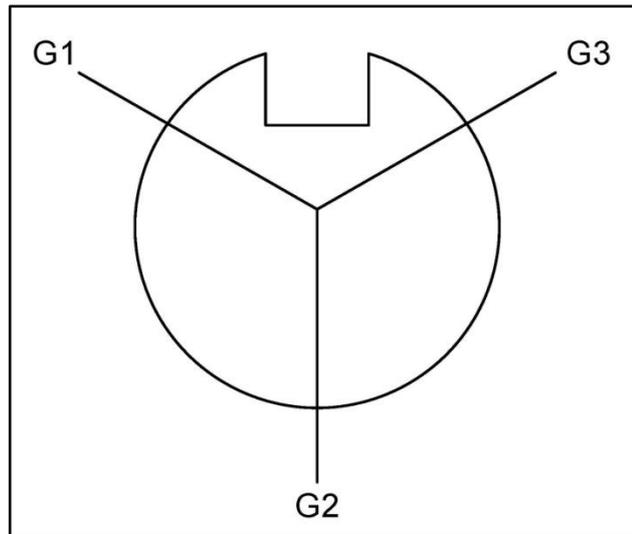


Figura 4.9 Posición de las generatrices sobre la base de la probeta.

La siguiente tabla muestra el conjunto de factores y niveles definidos para la realización de la investigación:

Tabla 4.3 Variables y niveles de estudio.

		Niveles		
Variables	<i>p</i> (mm)	0,25		
	<i>i</i> (mm)	0	15	30
	<i>n</i> (rpm)	500	800	
	<i>a</i> (mm/rev)	0,051	0,1	
	<i>c</i> (ml/h)	0	4,5	9
	<i>h</i>	HX	TP 2500	
	<i>l</i> (mm)	0-35	35-70	70-105
	<i>g</i> (°)	0	120	240

Una vez definidos los niveles de las distintas variables es posible definir el plan de experimentos definitivo a llevar a cabo, generando una hoja de seguimiento de los ensayos, mostrada en la Tabla 4.4, que permita su correcta realización, incluyendo la duración prevista¹⁵ de cada uno de los ensayos, calculada mediante las siguientes expresiones:

¹⁵ Por motivos prácticos para la realización de la experimentación en el laboratorio se emplea como unidad de duración el min. La conversión al SI se realiza mediante la siguiente equivalencia: 1 min = 60 s.

$$A = a * n \quad (4.1)$$

$$\text{Duración (min)} = \frac{Lm}{A} \quad (4.2)$$

Donde A representa la velocidad de avance (mm/min), a representa el avance (mm/rev), n representa la velocidad de giro del husillo (rev/min) y Lm representa la longitud de mecanizado (mm).

Tabla 4.4 Hoja de seguimiento de ensayos.

Test N°	Duración (min)	a (mm/rev)	h	n (rpm)	c (ml/h)	i (mm)
1	1,31	0,1	HX_1_TP	800	0	30
2	2,10	0,1	TP2500_1_TP	500	4,5	15
3	1,31	0,1	HX_1_00	800	4,5	15
4	2,57	0,051	TP2500_1_00	800	4,5	30
5	2,57	0,051	TP2500_2_TP	800	9	30
6	2,10	0,1	TP2500_2_00	500	9	15
7	1,31	0,1	HX_2_TP	800	0	0
8	4,12	0,051	HX_2_00	500	9	30
9	1,31	0,1	HX_3_TP	800	4,5	0
10	4,12	0,051	HX_3_00	500	0	15
11	2,10	0,1	TP2500_3_TP	500	0	15
12	2,10	0,1	TP2500_3_00	500	0	0
13	4,12	0,051	HX_4_TP	500	0	0
14	2,10	0,1	TP2500_4_TP	500	4,5	0
15	2,57	0,051	TP2500_4_00	800	9	0
16	2,57	0,051	TP2500_5_TP	800	0	30
17	1,31	0,1	HX_4_00	800	4,5	30
18	1,31	0,1	HX_5_TP	800	9	15

Test N°	Duración (min)	a (mm/rev)	h	n (rpm)	c (ml/h)	i (mm)
19	4,12	0,051	HX_5_00	500	9	15
20	2,10	0,1	TP2500_5_00	500	0	30
21	2,10	0,1	TP2500_6_TP	500	4,5	30
22	2,57	0,051	TP2500_6_00	800	0	0
23	1,31	0,1	HX_6_TP	800	0	15
24	4,12	0,051	HX_6_00	500	4,5	15
25	4,12	0,051	HX_7_TP	500	4,5	30
26	2,57	0,051	TP2500_7_TP	800	0	15
27	2,10	0,1	TP2500_7_00	500	9	0
28	2,57	0,051	TP2500_8_TP	800	4,5	0
29	1,31	0,1	HX_7_00	800	9	30
30	4,12	0,051	HX_8_TP	500	9	0
31	2,10	0,1	TP2500_8_00	500	9	30
32	1,31	0,1	HX_8_00	800	9	0
33	2,57	0,051	TP2500_9_TP	800	4,5	15
34	2,57	0,051	TP2500_9_00	800	9	15
35	4,12	0,051	HX_9_TP	500	0	30
36	4,12	0,051	HX_9_00	500	4,5	0

4.3 Análisis de resultados.

4.3.1 Resultados.

Para cada uno de los ensayos de mecanizado, el equipo de medición de la rugosidad superficial proporciona un certificado de medición como el mostrado en la figura siguiente:

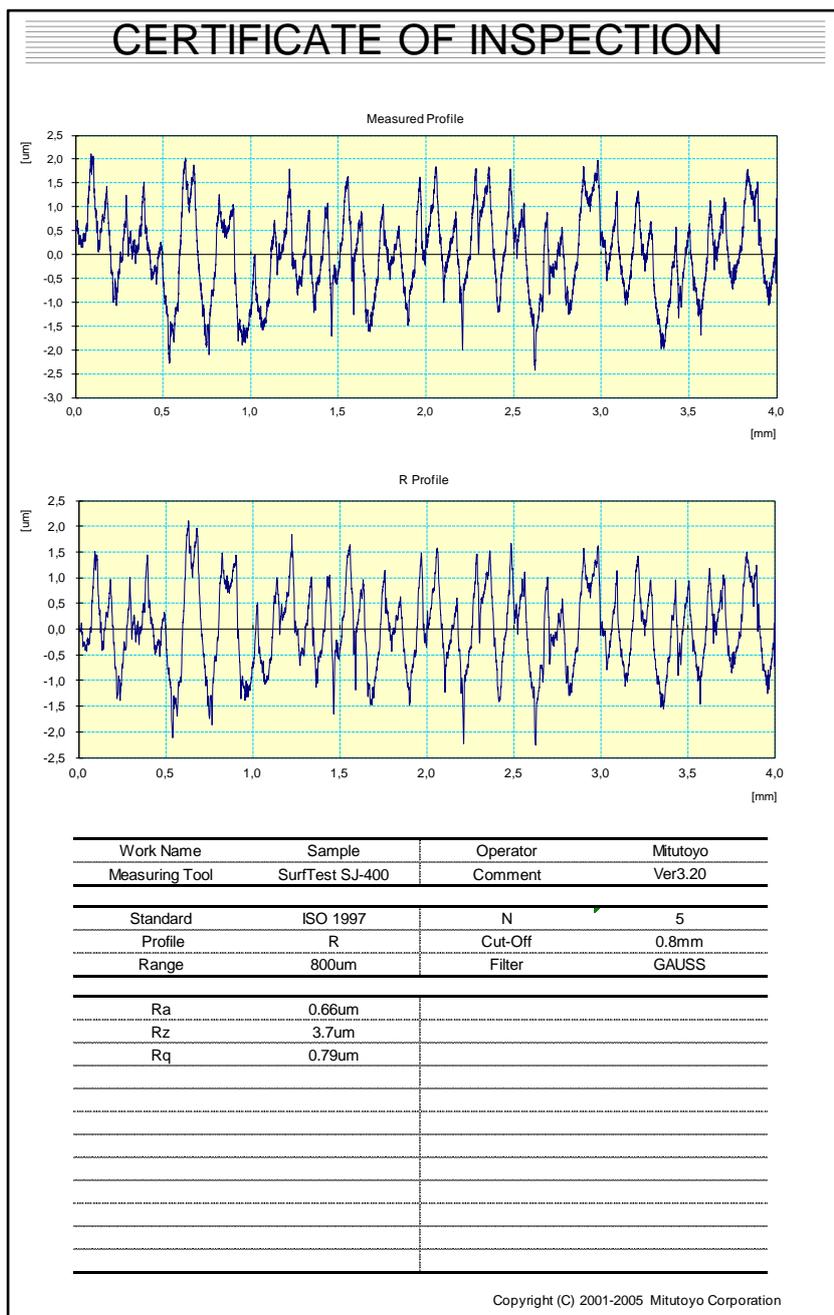


Figura 4.10 Certificado de medición de Ra para el primer punto de medición del primer.

A continuación, se muestra el conjunto de resultados de desviación media aritmética obtenidos a través de los certificados de medición de cada uno de los ensayos realizados durante la experimentación:

Tabla 4.5 Resultados de *Ra* obtenidos tras los ensayos de torneado intermitente.

Nº	<i>Ra1</i>	<i>Ra2</i>	<i>Ra3</i>	Nº	<i>Ra1</i>	<i>Ra2</i>	<i>Ra3</i>
1	0,66	0,66	0,75	19	0,28	0,33	0,34
2	0,76	0,63	0,67	20	0,60	0,63	0,56
3	0,58	0,68	0,59	21	0,59	0,76	0,78
4	0,40	0,41	0,36	22	0,42	0,36	0,34
5	0,44	0,59	0,44	23	0,55	0,46	0,60
6	0,80	0,80	0,80	24	0,42	0,30	0,36
7	0,50	0,62	0,56	25	0,53	0,41	0,40
8	0,51	0,49	0,51	26	0,53	0,46	0,54
9	0,49	0,48	0,44	27	0,64	0,58	0,59
10	0,36	0,33	0,35	28	0,39	0,42	0,41
11	0,56	0,56	0,48	29	0,67	0,67	0,60
12	0,67	0,66	0,66	30	0,39	0,33	0,34
13	0,35	0,39	0,36	31	0,87	0,79	0,92
14	0,56	0,58	0,60	32	0,66	0,74	0,68
15	0,36	0,41	0,35	33	0,30	0,38	0,35
16	0,48	0,37	0,41	34	0,37	0,34	0,40
17	0,65	0,57	0,69	35	0,54	0,42	0,56
18	0,57	0,52	0,54	36	0,38	0,36	0,36

4.3.2 Análisis de la varianza.

Una vez obtenidos los resultados de desviación media aritmética (Ra) para cada uno de los ensayos se procederá a analizar mediante un análisis estadístico. Para ello, se empleará el programa estadístico SAS, mediante el que se realizará un Análisis de la varianza (ANOVA) con los datos del conjunto de experimentos establecido en la investigación.

El análisis estadístico se realizará en dos etapas. Una primera, en la que se hace un análisis ANOVA, denominado ANOVA inicial, con el que se pueda conocer el nivel de influencia de los distintos factores e interacciones a analizar, y una segunda, en la que se lleva a cabo un nuevo análisis ANOVA, denominado ANOVA final, realizado tomando en consideración el conjunto de factores y/o interacciones que ofrecen una mayor influencia en la variabilidad de la Ra .

El ANOVA inicial proporciona los resultados que se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 4.6 Resultados globales del ANOVA inicial.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Estimador F	Pr > F
Modelo	55	1,98354722	0,03606449	5,82	<0,0001
Error	52	0,32234444	0,00619893		
Total corregido	107	2,30589167			

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

Desviación media aritmética	R-cuadrado	Coefficiente de variación	Raíz cuadrada del error cuadrático medio
0,518611	0,860208	15,18157	0,078733

Tabla 4.8 Resultados detallados del ANOVA inicial.

Fuente de variación	Suma de cuadrados Tipo III	Grados de libertad	Cuadrados medios	Estimador F	Pr > F
<i>a</i>	1,45835648	1	1,45835648	235,26	<0,0001
<i>h</i>	0,04687500	1	0,04687500	7,56	0,0082
<i>n</i>	0,02340833	1	0,02340833	3,78	0,0574
<i>c</i>	0,04185000	2	0,02092500	3,38	0,0418
<i>i</i>	0,17295556	2	0,08647778	13,95	<0,0001
<i>l</i>	0,00120556	2	0,00060278	0,10	0,9075
<i>g</i>	0,00686667	2	0,00343333	0,55	0,5781
<i>a*c</i>	0,05839074	2	0,02919537	4,71	0,0132
<i>a*i</i>	0,00249630	2	0,00124815	0,20	0,8183
<i>a*l</i>	0,00171296	2	0,00085648	0,14	0,8713
<i>a*g</i>	0,00536296	2	0,00268148	0,43	0,6512
<i>h*c</i>	0,01565000	2	0,00782500	1,26	0,2915
<i>h*i</i>	0,03095556	2	0,01547778	2,50	0,0922
<i>h*l</i>	0,00361667	2	0,00180833	0,29	0,7482
<i>h*g</i>	0,00275556	2	0,00137778	0,22	0,8015
<i>n*c</i>	0,02420556	2	0,01210278	1,95	0,1522
<i>n*i</i>	0,01182222	2	0,00591111	0,95	0,3920
<i>n*l</i>	0,00733889	2	0,00366944	0,59	0,5569
<i>n*g</i>	0,01260000	2	0,00630000	1,02	0,3690
<i>c*i</i>	0,02419444	4	0,00604861	0,98	0,4288
<i>c*l</i>	0,00859444	4	0,00214861	0,35	0,8452
<i>c*g</i>	0,00705000	4	0,00176250	0,28	0,8868
<i>i*l</i>	0,00962222	4	0,00240556	0,39	0,8162
<i>i*c</i>	0,00566111	4	0,00141528	0,23	0,9213
Error	0,32234444	52	0,00619893		
Total	2,30589167	107			

El ANOVA inicial permite extraer las siguientes conclusiones sobre el modelo planteado:

- a) Se destaca el hecho de que el modelo planteado es significativo, al obtenerse un *p* valor inferior a 0,0001 (Tabla 4.6).
- b) 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).

- c) El análisis detallado de los distintos factores e interacciones muestra cómo el grado de significación varía ampliamente, obteniéndose un rango de p valores que varía entre $<0,0001$ y $0,9213$ (Tabla 4.8).

El amplio rango existente entre los p valores de los distintos factores e interacciones se analizará a partir de la siguiente gráfica, que presenta las fuentes de variación ordenadas por el p valor que tienen asociado.

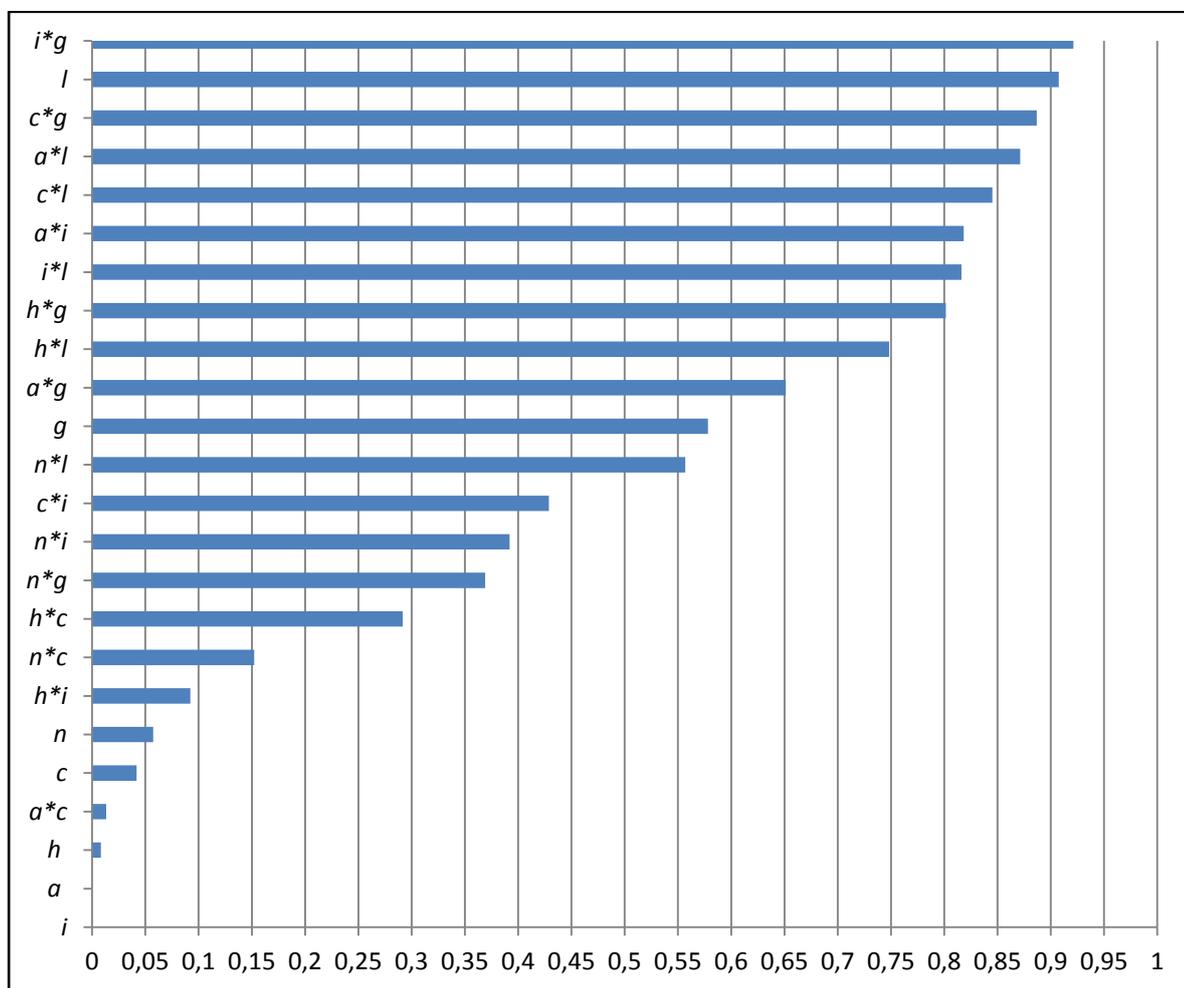


Figura 4.11 p valores asociados a las fuentes de variación.

La anterior gráfica, permite apreciar claramente cuáles son las fuentes de variación más influyentes dentro del modelo estudiado. Concretamente, se observa como los factores: avance, tipo de interrupción, tipo de herramienta, caudal MQL y velocidad del husillo, y las interacciones: avance-caudal MQL y tipo de herramienta-tipo de interrupción, con p valores inferiores a 0,1 son las fuentes de variación más influyentes.

Adicionalmente, a partir de la gráfica, se puede concluir que los factores longitud y generatriz, con p valores de 0,9075 y 0,5781, respectivamente, son poco significativos. Lo mismo sucede con las interacciones de los factores longitud y generatriz con los restantes factores, obteniéndose el menor p valor para la interacción $n * g$, con un valor de 0,369.

A partir del análisis ANOVA inicial, considerando solo aquellas fuentes de variación para las que $p < 0,1$, es posible desarrollar un nuevo Análisis de la varianza considerando las fuentes de variación más influyentes.

Los resultados del ANOVA final, con siete fuentes de variación, se muestran en las tablas siguientes:

Tabla 4.9 Resultados globales del ANOVA final.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Estimador F	Pr > F
Modelo	11	1,83279167	0,16661742	33,81	<0,0001
Error	96	0,47310000	0,00492812		
Total corregido	107	2,30589167			

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

Desviación media aritmética	R-cuadrado	Coefficiente de variación	Raíz cuadrada del error cuadrático medio
0,518611	0,794830	1353627	0,070201

Tabla 4.11 Resultados detallados del ANOVA final.

Fuente de variación	Suma de cuadrados Tipo III	Grados de libertad	Cuadrados medios	Estimador F	Pr > F
<i>h</i>	1	0,04687500	0,04687500	9,51	0,0027
<i>i</i>	2	0,17295556	0,08647778	17,55	<0,0001
<i>a</i>	1	1,45835648	1,45835648	295,93	<0,0001
<i>c</i>	2	0,04185000	0,02092500	4,25	0,0171
<i>n</i>	1	0,02340833	0,02340833	4,75	0,0317
<i>a*c</i>	2	0,05839074	0,02919537	5,92	0,0037
<i>h*i</i>	2	0,03095556	0,01547778	3,14	0,0477
Error	96	0,47310000	0,00492812		
Total corregido	107	2,30589167			

El ANOVA final permite extraer las siguientes conclusiones sobre el modelo planteado:

- a) El modelo final planteado vuelve a ser significativo, al obtenerse un p valor inferior a 0,0001 (Tabla 4.9).
- b) De acuerdo con los parámetros de dispersión el modelo posee un buen ajuste: R-cuadrado próximo a la unidad, aunque se reduce ligeramente en comparación con el ANOVA inicial, y raíz cuadrada del error cuadrático medio reducida, también ligeramente inferior que en el caso del ANOVA inicial. Adicionalmente, el coeficiente de variación también se ve reducido (Tabla 4.10).
- c) El análisis detallado de los distintos factores e interacciones muestra cómo el grado de significación se encuentra limitado en un rango más reducido, entre <0,0001 y 0,05 (Tabla 4.11).

A partir del ANOVA final es posible analizar la contribución, expresada en porcentaje (%), de cada una de las fuentes de variación ($SC_{\text{fuente de variación}}$) con relación a la variabilidad explicada por el modelo (SC_{modelo}) y por el total ($SC_{\text{modelo}}+SC_{\text{error}}$), a partir de las siguientes expresiones:

$$\rho_1 = \frac{SC_{\text{fuente de variación}}}{SC_{\text{modelo}}} * 100 \quad (4.3)$$

$$\rho_2 = \frac{SC_{\text{fuente de variación}}}{SC_{\text{modelo}}+SC_{\text{error}}} * 100 \quad (4.4)$$

A partir de las anteriores ecuaciones se desarrolla la tabla siguiente con la contribución de cada una de las fuentes de variación a la variabilidad:

Tabla 4.12 Porcentajes de variabilidad explicada por cada efecto significativo.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	ρ_1 (%)	ρ_2 (%)
<i>a</i>	1	1,45836	79,57	63,24
<i>i</i>	2	0,17296	9,44	7,50
<i>a*c</i>	2	0,05839	3,19	2,53
<i>h</i>	1	0,04688	2,56	2,03
<i>c</i>	2	0,04185	2,28	1,81
<i>h*i</i>	2	0,03096	1,69	1,34
<i>n</i>	1	0,02341	1,28	1,02
Total	11	1,83279	100,00	79,48

Analizando la contribución de cada una de las fuentes de variación a la variabilidad de la desviación media aritmética es posible señalar las siguientes conclusiones:

- a) La contribución del avance a la variabilidad destaca por encima de las demás fuentes de variación, explicando el 79,57% de la variabilidad del modelo y el 63,24% de la variabilidad total. Además, su interacción con el caudal MQL explica un 3,19% de la variabilidad del modelo y el 2,53% de la variabilidad total.
- b) Aunque su influencia es notablemente inferior a la del avance, el tipo de interrupción se sitúa como la segunda fuente de variación más influyente en la variabilidad, explicando el 9,44% de la variabilidad del modelo y el 7,50% de la variabilidad total. Adicionalmente, el tipo de interrupción también explica una parte de la variabilidad por medio de la interacción con el tipo de herramienta, explicando el 1,69% de la variabilidad del modelo y el 1,34% de la variabilidad total.
- c) Las demás fuentes de variación ejercen una influencia moderada en la variabilidad de la *Ra*, explicando en conjunto el 6,12% de la variabilidad del modelo y el 4,86% de la variabilidad total. En particular, la velocidad de giro del husillo es el factor que muestra una menor influencia en la *Ra* obtenida.

4.3.3 Modelo para la varianza.

Los resultados obtenidos mediante el ANOVA final permiten desarrollar un modelo estadístico para la varianza, empleando las siete fuentes de variación más influyentes y que en el ANOVA final obtenían un p valor inferior a 0,05. Así, es posible plantear el siguiente modelo de la varianza:

$$y_{ijkmp} = \mu + a_i + i_j + h_k + c_m + n_p + (ac)_{im} + (hi)_{kj} + \varepsilon_{ijkmp} \quad (4.5)$$

Donde μ representa la media; a_i , i_j , h_k , c_m y n_p representan el efecto de los niveles del avance, tipo de interrupción, tipo de herramienta, caudal MQL y velocidad de giro del husillo, respectivamente; y $(ac)_{im}$ y $(hi)_{kj}$ representan las interacciones avance-caudal MQL y tipo de herramienta-tipo de interrupción, respectivamente; y, ε_{ijkmp} representa el error del modelo.

En general, los modelos estadísticos, en particular ANOVA, asumen que los errores del modelo siguen una distribución normal, siendo una hipótesis básica en muchos modelos estadísticos para garantizar su validez. Por ello, será preciso comprobar que se cumple la condición de normalidad en el modelo planteado. Para comprobar la normalidad de los errores del modelo, usualmente se recurre al análisis de la normalidad de los residuales, que será el método que se utilizará a continuación (Mason *et al.*, 2003).

Los residuales del modelo son el resultado de calcular la diferencia entre los valores previstos y los valores obtenidos, según la siguiente expresión:

$$Residual = Valor_{previsto} - Valor_{obtenido} \quad (4.6)$$

A partir del modelo establecido, definido por la ecuación 4.5, se procederá a calcular los estimadores de cada uno de los parámetros, mostrados en la tabla siguiente:

Tabla 4.13 Estimadores para cada efecto del modelo.

Parámetro	Estimador	Error estándar	Valor t	Pr > t
Intersección	0,7355555556	0,02340020	31,43	<0,0001
<i>h1</i>	-0,0061111111	0,02340020	-0,26	0,7945
<i>h2</i>	0,0000000000	.	.	.
<i>i1</i>	-0,0777777778	0,02340020	-3,32	0,0013
<i>i2</i>	-0,0372222222	0,02340020	-1,59	0,1150
<i>i3</i>	0,0000000000	.	.	.
<i>a1</i>	-0,2900000000	0,02340020	-12,39	<0,0001
<i>a2</i>	0,0000000000	.	.	.
<i>c1</i>	-0,0944444444	0,02340020	-4,04	0,0001
<i>c2</i>	-0,0744444444	0,02340020	-3,18	0,0020
<i>c3</i>	0,0000000000	.	.	.
<i>n1</i>	0,0294444444	0,01351011	2,18	0,0317
<i>n2</i>	0,0000000000	.	.	.
<i>a1*c1</i>	0,1138888889	0,03309288	3,44	0,0009
<i>a1*c2</i>	0,0588888889	0,03309288	1,78	0,0783
<i>a1*c3</i>	0,0000000000	.	.	.
<i>a2*c1</i>	0,0000000000	.	.	.
<i>a2*c2</i>	0,0000000000	.	.	.
<i>a2*c3</i>	0,0000000000	.	.	.
<i>h1*i1</i>	-0,0255555556	0,03309288	-0,77	0,4419
<i>h1*i2</i>	-0,0811111111	0,03309288	-2,45	0,0161
<i>h1*i3</i>	0,0000000000	.	.	.
<i>h2*i1</i>	0,0000000000	.	.	.
<i>h2*i2</i>	0,0000000000	.	.	.
<i>h2*i3</i>	0,0000000000	.	.	.

Los valores de los residuales obtenidos a partir del modelo, según la ecuación 4.6, se representan gráficamente frente a los valores estimados de desviación media aritmética (*Rae*) y frente al orden de los ensayos, en la Figura 4.12 y en la Figura 4.13, respectivamente:

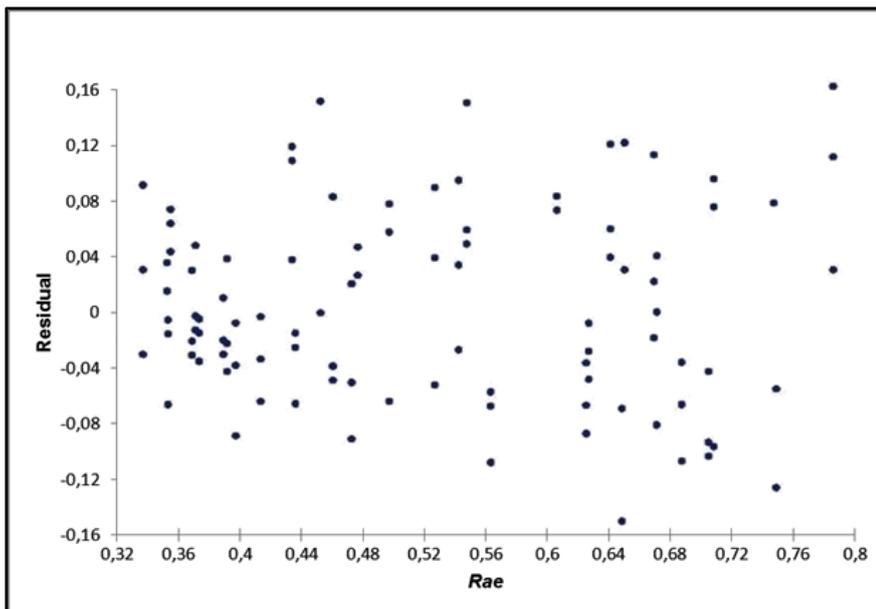


Figura 4.12 Residuales del modelo frente a los valores estimados de R_a .

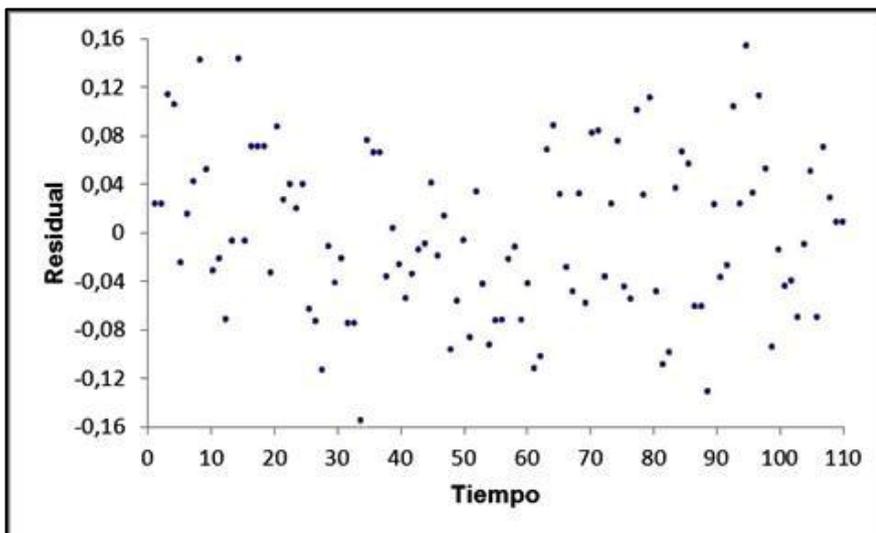


Figura 4.13 Residuales del modelo frente al orden de los ensayos.

Las anteriores gráficas permiten apreciar cómo la distribución de los residuales posee un alto grado de uniformidad, no existiendo evidencias claras de existencia de ningún patrón o heterocedasticidad.

Aunque indicativo, el carácter subjetivo del análisis gráfico hace precisa la comprobación de la normalidad de los residuales mediante otros métodos. En este sentido, se recurrirá a los test

de normalidad Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Cramer-von Mises y Anderson-Darling. Los resultados de los distintos tests se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 4.14 Test de normalidad para los residuales del modelo.

Test	Estadístico		p Valor	
	Shapiro-Wilk	W	0,986822	p < W
Kolmogorov-Smirnov	D	0,067007	p > D	>0,1500
Cramer-von Mises	W-Sq	0,087861	p > W-Sq	0,1661
Anderson-Darling	A-Sq	0,484665	p > A-Sq	0,2301

De acuerdo con los tests de normalidad no existe evidencia de ausencia de normalidad.

Adicionalmente, la gráfica siguiente muestra cómo la distribución de los residuales del modelo se ajusta a una distribución normal $N(\mu;\sigma) = N(0; 0,0665)$.

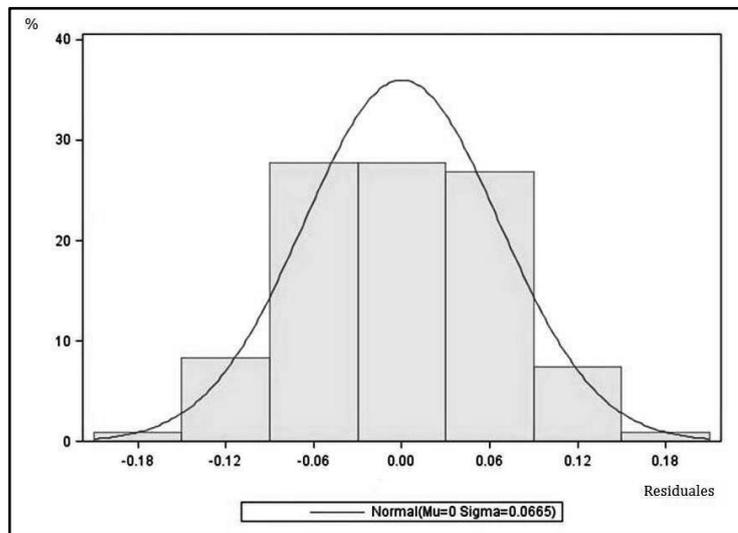


Figura 4.14 Distribución de los residuales y distribución $N(0; 0,0665)$.

4.3.4 Optimización.

A partir del modelo descrito por la ecuación 4.5 y el conjunto de estimadores calculados con anterioridad es posible estimar los valores esperados de desviación media aritmética para las distintas condiciones de ensayo¹⁶. Así, en la siguiente tabla se muestra el conjunto de valores esperados, dispuestos en orden creciente:

Tabla 4.15 Valores de la *Ra* esperados por el modelo.

Orden	<i>a</i> (mm/rev)	<i>h</i>	<i>n</i> (rpm)	<i>c</i> (ml/h)	<i>i</i> (mm)	<i>Rae</i> (µm)
1	0,051	HX	800	4,5	15	0,31556
2	0,051	HX	800	4,5	0	0,32056
3	0,051	HX	800	9	15	0,32111
4	0,051	HX	500	4,5	15	0,33500
5	0,051	HX	800	9	0	0,33611
6	0,051	HX	800	0	15	0,34056
7	0,051	HX	500	4,5	0	0,35000
8	0,051	HX	500	9	15	0,35056
9	0,051	TP	800	4,5	0	0,35222
10	0,051	HX	800	0	0	0,35556
11	0,051	HX	500	9	0	0,36556
12	0,051	TP	800	9	0	0,36778
13	0,051	HX	500	0	15	0,37000
14	0,051	TP	500	4,5	0	0,38167
15	0,051	HX	500	0	0	0,38500
16	0,051	TP	800	0	0	0,38722
17	0,051	TP	800	4,5	15	0,39278
18	0,051	TP	500	9	0	0,39722
19	0,051	TP	800	9	15	0,40833
20	0,051	TP	500	0	0	0,41667
21	0,051	TP	500	4,5	15	0,42222
22	0,051	HX	800	4,5	30	0,42389

¹⁶ Se emplean cinco 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 medida. En el caso del equipo Mitutoyo Surftest SJ 401, sería suficiente emplear dos cifras significativas.

Orden	<i>a</i> (mm/rev)	<i>h</i>	<i>n</i> (rpm)	<i>c</i> (ml/h)	<i>i</i> (mm)	<i>Rae</i> (μm)
23	0,051	TP	800	0	15	0,42778
24	0,051	TP	800	4,5	30	0,43000
25	0,051	TP	500	9	15	0,43778
26	0,051	HX	800	9	30	0,43944
27	0,051	TP	800	9	30	0,44556
28	0,051	HX	500	4,5	30	0,45333
29	0,051	TP	500	0	15	0,45722
30	0,051	HX	800	0	30	0,45889
31	0,051	TP	500	4,5	30	0,45944
32	0,051	TP	800	0	30	0,46500
33	0,051	HX	500	9	30	0,46889
34	0,051	TP	500	9	30	0,47500
35	0,051	HX	500	0	30	0,48833
36	0,051	TP	500	0	30	0,49444
37	0,1	HX	800	0	15	0,51667
38	0,1	HX	800	0	0	0,53167
39	0,1	HX	800	4,5	15	0,53667
40	0,1	HX	500	0	15	0,54611
41	0,1	HX	800	4,5	0	0,55167
42	0,1	HX	500	0	0	0,56111
43	0,1	TP	800	0	0	0,56333
44	0,1	HX	500	4,5	15	0,56611
45	0,1	HX	500	4,5	0	0,58111
46	0,1	TP	800	4,5	0	0,58333
47	0,1	TP	500	0	0	0,59278
48	0,1	TP	800	0	15	0,60389
49	0,1	HX	800	9	15	0,61111
50	0,1	TP	500	4,5	0	0,61278
51	0,1	TP	800	4,5	15	0,62389
52	0,1	HX	800	9	0	0,62611
53	0,1	TP	500	0	15	0,63333
54	0,1	HX	800	0	30	0,63500
55	0,1	HX	500	9	15	0,64056
56	0,1	TP	800	0	30	0,64111

Orden	<i>a</i> (mm/rev)	<i>h</i>	<i>n</i> (rpm)	<i>c</i> (ml/h)	<i>i</i> (mm)	<i>Rae</i> (μm)
57	0,1	TP	500	4,5	15	0,65333
58	0,1	HX	800	4,5	30	0,65500
59	0,1	HX	500	9	0	0,65556
60	0,1	TP	800	9	0	0,65778
61	0,1	TP	800	4,5	30	0,66111
62	0,1	HX	500	0	30	0,66444
63	0,1	TP	500	0	30	0,67056
64	0,1	HX	500	4,5	30	0,68444
65	0,1	TP	500	9	0	0,68722
66	0,1	TP	500	4,5	30	0,69056
67	0,1	TP	800	9	15	0,69833
68	0,1	TP	500	9	15	0,72778
69	0,1	HX	800	9	30	0,72944
70	0,1	TP	800	9	30	0,73556
71	0,1	HX	500	9	30	0,75889
72	0,1	TP	500	9	30	0,76500

4.3.5 Análisis de factores e interacciones.

4.3.5.1 Avance.

Según el modelo para la varianza definido, el avance es el factor que ejerce una mayor influencia en la variabilidad de los resultados de desviación media aritmética, representado prácticamente el 80% de la variabilidad total, en términos de $\rho_2(\%)$, frente al 20% que explican el resto de las fuentes de variación, como se puede apreciar en la siguiente gráfica:

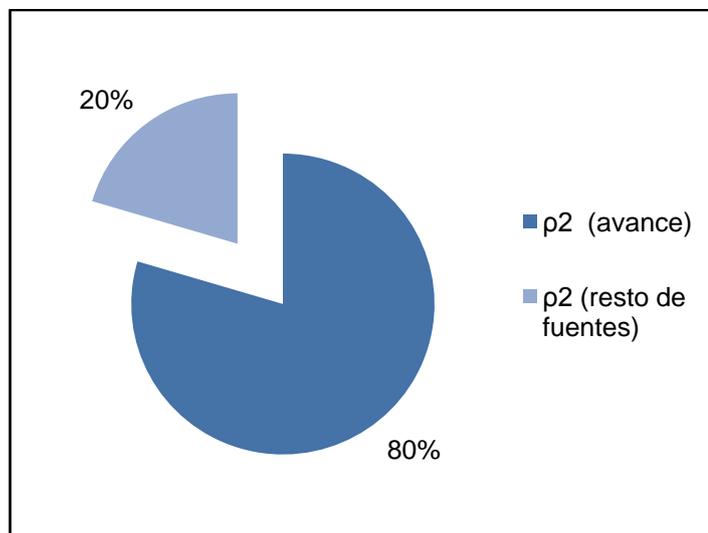


Figura 4.15 Contribución del avance en la variabilidad total de la Ra .

La Figura 4.16 muestra una representación gráfica de los valores obtenidos mediante el proceso de optimización según una gráfica de cajas y bigotes, en función de los dos niveles definidos para el avance.

La representación de la desviación media aritmética estimada (Rae) frente al avance muestra, claramente, cómo el avance es un factor que ejerce una notable influencia en la Rae . En particular, se observa cómo un incremento del 96,1% en el avance genera un incremento de la mediana de la Rae del 58,3%.

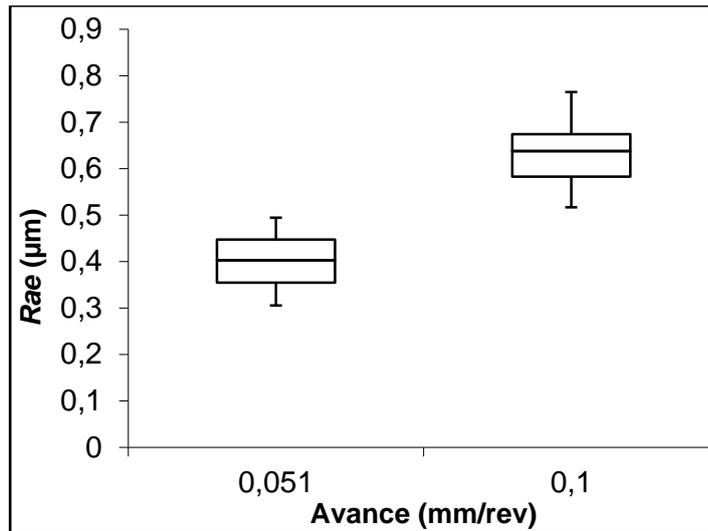


Figura 4.16 Ra estimada frente avance.

El incremento de la Rae al incrementar el avance es consistente con lo previsto por la ecuación de cálculo de la rugosidad superficial media ideal en el torneado (Rai), según la cual la rugosidad superficial depende del avance y del radio de la punta de la herramienta, como se puede apreciar en la siguiente expresión (Boothroyd, 1978):

$$Rai = 0,0321 * \frac{a^2}{Rh} \quad (4.7)$$

Donde a representa el avance y Rh el radio de la punta de la herramienta.

Adicionalmente, Ståhl *et al.* (2011) desarrollan una expresión analítica para el cálculo de la rugosidad superficial (Ras), recomendada por el fabricante de las herramientas SECO (SECO, 2012). Esta expresión es la siguiente:

$$Ras \approx 0,77 * Rh * \left(1 - \frac{a/2 * Rh}{\sin^{-1}(a/2 * Rh)} \right) \quad (4.8)$$

Debiendo verificarse la siguiente ecuación para ser de aplicación:

$$a \leq 2 * \sqrt{p * (2 * Rh - p)} \leq 2 * Rh \quad (4.9)$$

De acuerdo con los datos de los parámetros del proceso y las características de las herramientas empleadas, a continuación se muestran los valores de la rugosidad superficial media ideal en las distintas condiciones de ensayo y los valores previstos por la ecuación de Ståhl *et al.* (2011):

Tabla 4.16 Valores de la rugosidad superficial media ideal.

<i>a</i> (mm/rev)	<i>Rh</i> (mm)	<i>Rai</i> (µm)	<i>Ras</i>
0,051	0,8	0,1044	0,0427
0,1	0,8	0,4013	0,1643

Los valores de rugosidad superficial mostrados en la anterior tabla son notablemente inferiores a los estimados por el modelo estadístico desarrollado en la investigación. Así, la siguiente gráfica permite comparar los valores de *Rae* y los valores previstos por las expresiones de tipo teórico:

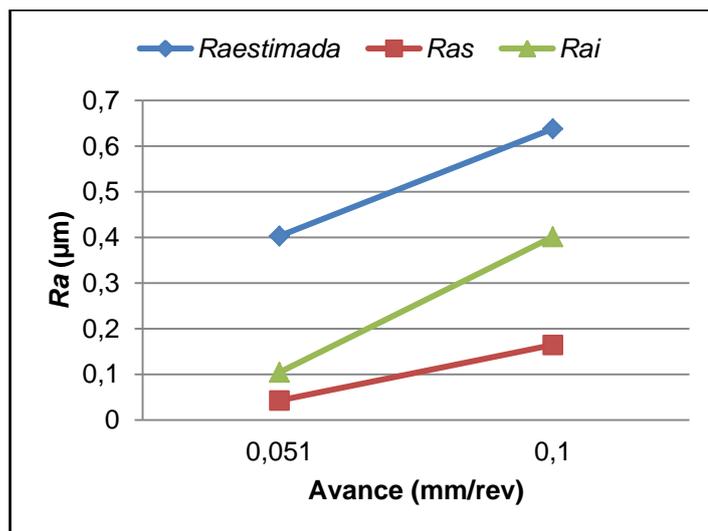


Figura 4.17 *Ra* estimada, *Rae*, *Ra* Ståhl, *Ras*, y *Ra* ideal, *Rai* frente al avance.

La gráfica anterior permite apreciar cómo el ajuste del modelo con relación a los valores ideales se aproxima más para el valor más elevado de avance. No obstante, la diferencia entre ambos valores resulta elevada, situándose los valores ideales por debajo de los estimados en casi $0,3 \mu\text{m}$ y $0,24 \mu\text{m}$, para $0,051 \text{ mm/rev}$ y $0,10 \text{ mm/rev}$, respectivamente. Por otra parte, el ajuste obtenido con los valores resultantes de la ecuación de Ståhl *et al.* (2011) es incluso peor que el ajuste de la ecuación de rugosidad superficial media ideal.

El trabajo de Ståhl *et al.* (2011) también proporciona una expresión de cálculo para evaluar la máxima rugosidad superficial teórica ($R_{\text{máx}}$) durante el mecanizado. Esta expresión es la siguiente:

$$R_{\text{máx}} \approx Rh - \sqrt{Rh^2 - \frac{a^2}{4}} \approx \frac{a^2}{8*Rh} \quad (4.10)$$

Aplicando la anterior ecuación a los datos de la experimentación se obtienen los valores de $R_{\text{máx}}$ de $0,4064 \mu\text{m}$, para el avance de $0,051 \text{ mm/rev}$, y de $1,5625 \mu\text{m}$, para el avance de $0,10 \text{ mm/rev}$. Para el caso del avance de $0,051 \text{ mm/rev}$, no todos los valores de Ra estimados se encuentran por debajo del máximo previsto, mientras que en el caso del avance $0,10 \text{ mm/rev}$, el valor máximo resulta estar por encima de todos los valores estimados por el modelo.

La diferencia entre los valores ideales y los valores obtenidos en los procesos de torneado también fueron identificadas por Ståhl *et al.* (2011) que señalaban la influencia del espesor mínimo de viruta, el recrecido del filo de la herramienta, las vibraciones y los daños ocasionados en el filo de corte como principales causas de estas diferencias. Por su parte, Hocheng y Hsieh (2004) justifican las diferencias en la influencia que el filo de corte y las vibraciones de la máquina y del ambiente pueden ejercer sobre la superficie de la pieza. En esta línea, Seguy *et al.* (2008) identifican la influencia de las vibraciones como posible causa de la producción de pobres acabados superficiales durante el mecanizado a elevadas velocidades. El estudio experimental de Stoic *et al.* (2009) indica que la inestabilidad del proceso de mecanizado puede generar variaciones del avance con el que se produce el mecanizado con relación al avance definido inicialmente de hasta un 60%. Como consecuencia de estas alteraciones se produce un exceso de rugosidad superficial. No obstante, es preciso señalar que para los ensayos de mecanizado del presente estudio se han utilizado velocidades de avance reducidas ($<100 \text{ mm/min}$).

4.3.5.2 Tipo de interrupción.

El tipo de interrupción de la pieza es el segundo factor más influyente en la desviación media aritmética de acuerdo con los resultados obtenidos mediante el modelo de la varianza. En este sentido, la siguiente gráfica permite apreciar el porcentaje de contribución del tipo de interrupción a la variabilidad total:

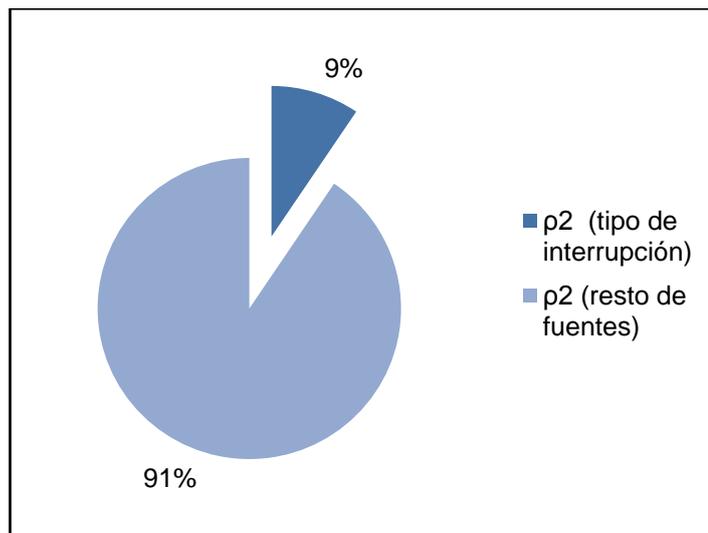


Figura 4.18 Contribución del tipo de interrupción en la variabilidad total de la desviación media aritmética.

La influencia del tipo de interrupción en los resultados estimados de desviación media aritmética (*Rae*) se puede observar en la Figura 4.19. En el caso del tipo de interrupción, se observa un comportamiento lineal en los resultados de la *Rae*, incrementándose al aumentar el ancho de la interrupción de la probeta.

El efecto en la desviación media aritmética del ancho de la interrupción puede justificarse en función del comportamiento de la temperatura en la zona de corte. Para ello sería preciso realizar estudios experimentales adicionales, pero, *a priori* resulta razonable considerar que el incremento del ancho de la interrupción permite una mayor refrigeración en la zona de corte, generándose un mayor rango de temperaturas entre los periodos de corte y de ausencia de mecanizado, en concordancia con lo expuesto por Armendia *et al.* (2010). Estos ciclos térmicos podrían ser causantes de un mayor deterioro de la herramienta que llevara a un incremento de la rugosidad superficial, en línea con lo expuesto en el apartado 2.5.2.2. Mecanismos de fallo.

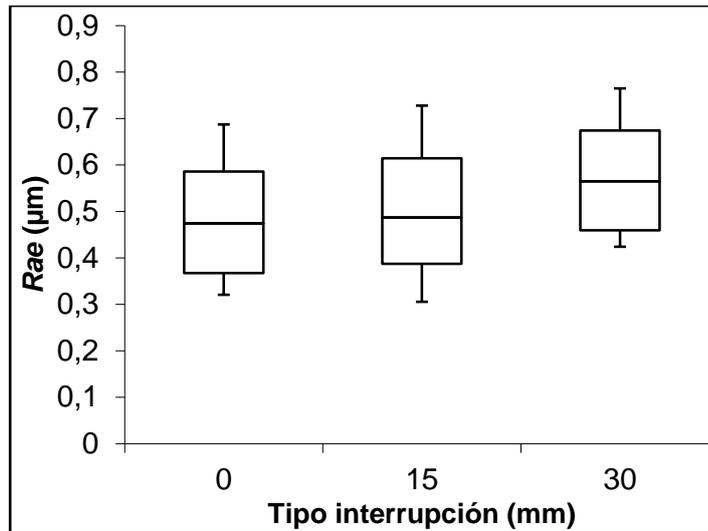


Figura 4.19 Ra estimada frente al tipo de interrupción.

4.3.5.3 Tipo de herramienta.

La influencia del tipo de herramienta en la variabilidad de la desviación media aritmética resulta inferior a la de los factores avance y tipo de interrupción. En la Figura 4.20 se puede apreciar su influencia en la variabilidad total.

Los resultados de desviación media aritmética para cada una de las dos herramientas, HX y TP2500, empleadas en la presente investigación se muestran en la Figura 4.21.

El análisis de la influencia del tipo de herramienta muestra cómo los peores resultados de *Rae* se obtienen al emplear la herramienta TP2500. No obstante, la diferencia existente es reducida. Los resultados obtenidos resultan coherentes con las recomendaciones del fabricante (SECO), que considera la herramienta sin recubrir (HX) especialmente adecuada para el mecanizado de materiales no férreos (SECO, 2012).

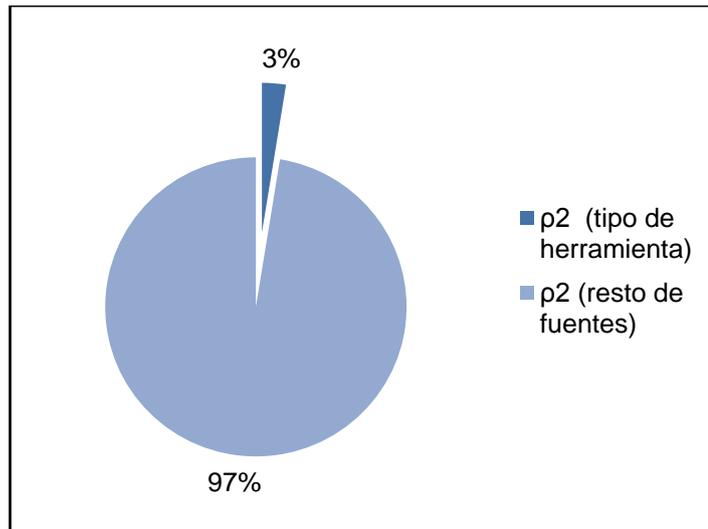


Figura 4.20 Contribución del tipo de herramienta en la variabilidad total de la desviación media aritmética.

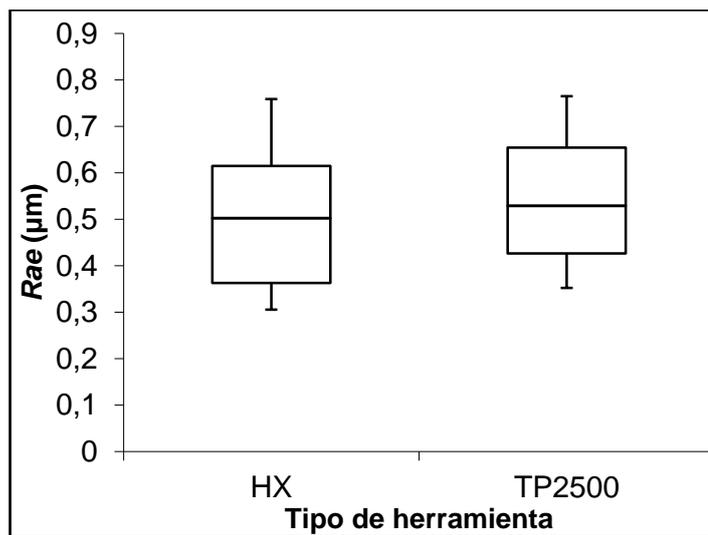


Figura 4.21 Ra estimada frente al tipo de herramienta.

4.3.5.4 Caudal de mínima cantidad de lubricante.

El caudal de mínima cantidad de lubricante representa la quinta fuente de variación en términos de importancia de cara a explicar la variabilidad de la desviación media aritmética. La siguiente gráfica muestra el porcentaje de contribución del caudal de mínima cantidad de lubricante en comparación con el resto de fuentes de variación del modelo:

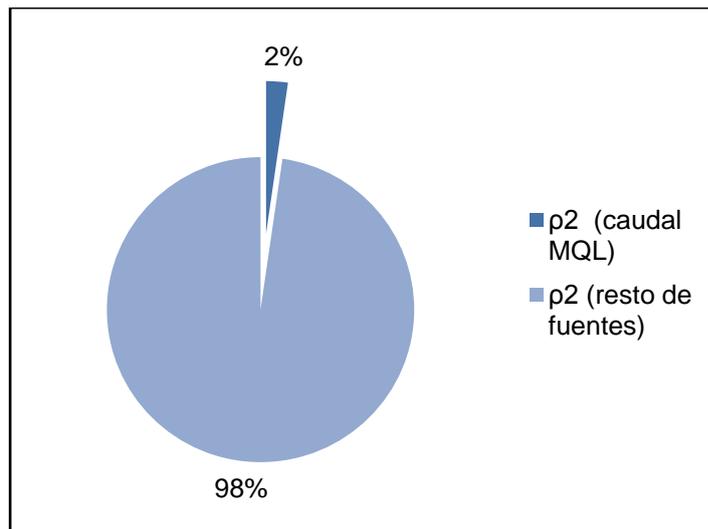


Figura 4.22 Contribución del caudal MQL en la variabilidad total de la desviación media aritmética.

La influencia del caudal del sistema MQL en los resultados de desviación media aritmética se puede analizar a través de la Figura 4.23.

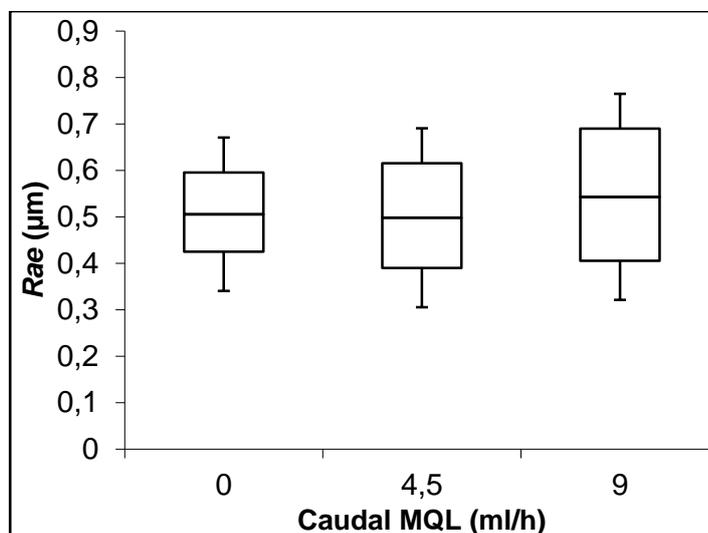


Figura 4.23 R_a estimada frente al caudal de mínima cantidad de lubricante.

En relación con el caudal MQL empleado en el ensayo se observa un comportamiento de los resultados estimados de desviación media aritmética no lineal. Concretamente, la R_{ae} más reducida se obtiene en el caso de aplicar el caudal MQL intermedio (4,5 ml/h), mientras que el valor más elevado se obtiene en el caso de emplear el nivel de caudal MQL más alto (9 ml/h).

Esta tendencia es similar a la que presenta la investigación de Kamata y Obikawa (2007) durante el torneado a alta velocidad de piezas de Inconel 718. Así, al incrementar la presión del aire empleado en el sistema MQL, desde 0,4 hasta 0,6 MPa, el flujo de aire se eleva desde 66,8 hasta 92,1 NI/min¹⁷, provocando un ligero incremento en la rugosidad superficial obtenida.

4.3.5.5 Velocidad de giro del husillo.

La velocidad de giro del husillo es la fuente de variación con una menor influencia en los resultados de desviación media aritmética de los incluidos en el modelo de la varianza, explicando un porcentaje próximo al 1% de la variabilidad total, como se puede apreciar en la gráfica siguiente:

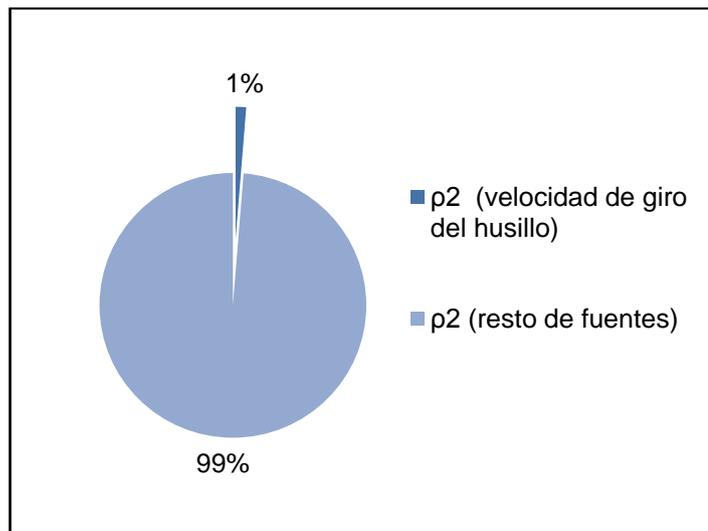


Figura 4.24 Contribución de la velocidad de giro del husillo en la variabilidad total de la desviación media aritmética.

La Figura 4.25 presenta los resultados de desviación media aritmética estimada por el modelo de la varianza en función de la velocidad de giro del husillo. A partir de la gráfica es posible apreciar que la velocidad de giro del husillo ejerce una influencia moderada en la *Rae*.

¹⁷ Caudal medido a unos determinadas condiciones y convertido a condiciones estándar de temperatura (273,15 K) y presión (10⁵ Pa).

Así, la *Rae* disminuye ligeramente al incrementar la velocidad de giro del husillo desde 500 hasta 800 rpm.

La experimentación de Kumar y Choudhury (2008) sobre el torneado, empleando refrigeración criogénica y mecanizado en seco, presenta resultados diferentes a los obtenidos, identificando la influencia de la velocidad de giro del husillo como un parámetro que ejerce una importante influencia en el desgaste del flanco de la herramienta. La relación entre la rugosidad superficial y el desgaste de la herramienta es también indicada por Penalva *et al.* (2002), quienes consideran que la rugosidad superficial puede emplearse como indicador del desgaste de la herramienta.

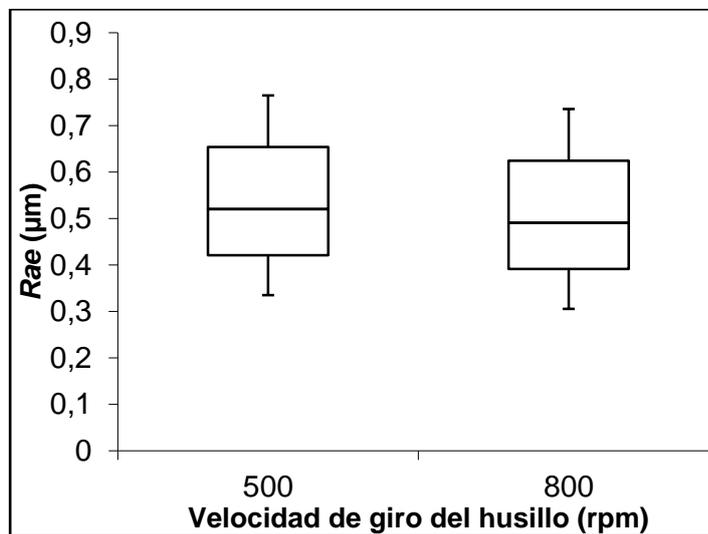


Figura 4.25 *Ra* estimada frente a la velocidad de giro del husillo.

Tomando como referencia la investigación de Dhar *et al.* (2006) el incremento del desgaste del flanco lleva a la obtención de mayores rugosidades superficiales, durante el mecanizado en seco, con sistema MQL o con refrigeración/lubricación convencional. Este hecho haría razonable prever que se produjera un efecto mayor en la rugosidad superficial con el incremento de la velocidad de giro del husillo. No obstante, es preciso destacar las diferencias en los parámetros de corte empleados en ambas investigaciones. Así, en la presente investigación se emplea un rango de avances entre 0,051 y 0,10 mm/rev, mientras que en la investigación referenciada el rango se sitúa entre 0,1 y 0,225 mm/rev. De igual modo, la profundidad de 0,25 mm empleada en la presente investigación se encuentra por debajo del rango entre 0,4 y 0,7 mm

utilizado en la investigación de Kumar y Choudhury (2007). Estas diferencias hacen que el desgaste de la herramienta y la rugosidad superficial previstas sean inferiores en el presente estudio, lo que puede justificar que no se aprecie una mayor influencia de la velocidad de giro del husillo en la rugosidad superficial.

4.3.5.6 *Interacción avance*caudal de mínima cantidad de lubricante.*

La interacción avance*caudal de mínima cantidad de lubricante es una de las fuentes de variación con una mayor influencia en la desviación media aritmética, por detrás del avance y el tipo de interrupción. La gráfica siguiente muestra su contribución a la variabilidad total de la desviación media aritmética:

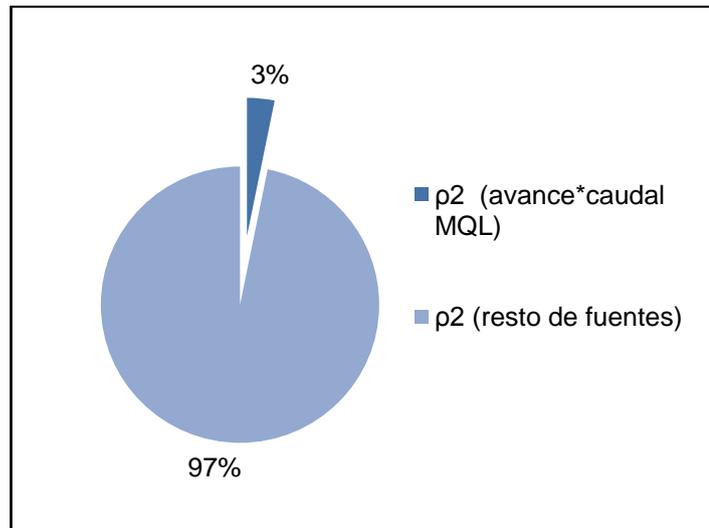


Figura 4.26 Contribución de la interacción avance*caudal de mínima cantidad de lubricante en la variabilidad total de la desviación media aritmética.

La influencia de la interacción avance*caudal MQL se realizará por medio de la representación gráfica de los valores estimados de desviación media aritmética en función de los avances y el caudal del sistema de refrigeración MQL, como se muestra en la Figura 4.27.

Al analizar la interacción avance*caudal MQL se observa claramente como el avance ejerce una importante influencia en los valores de la *Rae*. Así, los valores obtenidos para el avance de 0,1 mm/rev son notablemente superiores a los obtenidos para 0,051 mm/rev, en concordancia con lo observado en el análisis del factor avance de manera aislada.

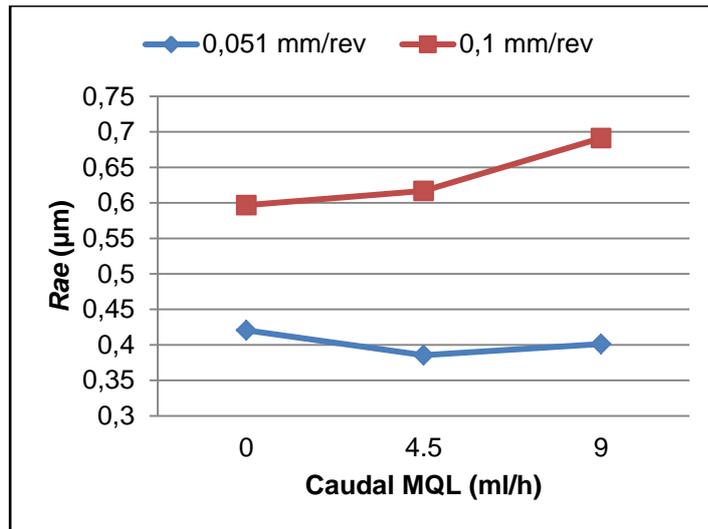


Figura 4.27 Ra estimada para la interacción avance*caudal de mínima cantidad de lubricante.

En cuanto a la tendencia de los valores de *Rae* se observa cómo para el avance mayor la *Rae* se incrementa a medida que se incrementa el caudal MQL, según lo visto al analizar, de modo aislado, la influencia del caudal MQL. Esta tendencia es coherente con los resultados presentados por Zhong *et al.* (2010b) quienes identifican un incremento en la señal de vibración para incrementos del avance empleado y del caudal del sistema de mínima cantidad de lubricación. Sin embargo, en el caso del avance más bajo, la *Rae* disminuye ligeramente, alcanzando su mínimo para el caudal MQL medio (4,5 ml/h). De este modo, la refrigeración/lubricación mediante el sistema MQL genera efectos negativos en la desviación media aritmética en el avance mayor. Sin embargo, para el menor de los avances ensayados, el empleo de pequeñas cantidades de lubricante mejora la *Rae* en relación con los valores obtenidos para el caso de mecanizado en seco; siendo mayor la mejoría cuando se emplea un caudal MQL de 4,5 ml/h.

4.3.5.7 Interacción tipo de herramienta*tipo de interrupción.

La influencia de la interacción tipo de herramienta*tipo de interrupción es la fuente de variación con menor influencia en la varianza junto a la velocidad de giro del husillo, aunque ligeramente más influyente que ésta. La gráfica siguiente muestra la contribución a la variabilidad de la interacción tipo de herramienta*tipo de interrupción:

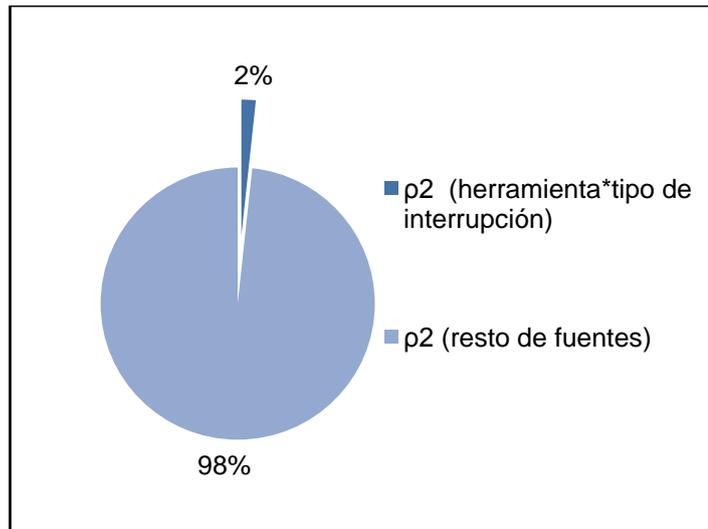


Figura 4.28 Contribución de la interacción tipo de herramienta*tipo de interrupción en la variabilidad total de la desviación media aritmética.

El análisis de la interacción tipo de herramienta*tipo de interrupción se realizará a través de la Figura 4.29.

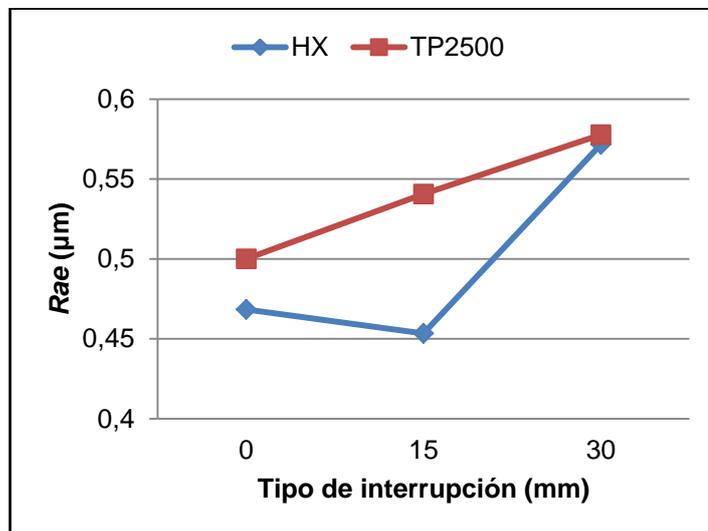


Figura 4.29 Ra estimada para la interacción tipo de interrupción*tipo de herramienta.

La anterior gráfica muestra cómo la evolución de la *Rae* en función del tipo de interrupción está condicionada por el tipo de herramienta empleada. Así, en primer lugar las herramientas HX presentan mejores resultados de *Rae* para todos los anchos de interrupción. En

segundo lugar, se puede observar cómo la evolución de la *Rae* es diferente para las dos herramientas; así, mientras aumenta para incrementos del ancho de la interrupción, en el caso de la herramienta TP 2500, para la HX encuentra su mínimo cuando se mecaniza la pieza de interrupción media para, posteriormente, encontrar su máximo para la interrupción máxima. Este resultado es similar al ofrecido por la investigación de Sayit *et al.* (2009) en la que se indica que la rugosidad superficial para piezas interrumpidas con una ranura también está influenciada por las condiciones de mecanizado empleadas.

4.4 Resumen.

A partir de la metodología elaborada en el Capítulo 3: Metodología, en el presente capítulo se ha procedido a presentar su desarrollo, los resultados obtenidos y su análisis.

Resumidamente, los experimentos se han llevado a cabo a partir de tres tipos de probetas cilíndricas construidas con una aleación de magnesio (AZ91D-F): una continua y otras dos con ranuras rectangulares de ancho 15 y 30 mm. El cilindrado de las probetas se ha realizado en un torno paralelo PINACHO L-1/200 que ha permitido evaluar diferentes parámetros de mecanizado, concretamente: avance (0,051 y 0,1 mm/rev) y velocidad de giro del husillo (500 y 800 rpm), para una profundidad de corte fija de 0,25 mm. Para el mecanizado se han empleado dos tipos diferentes de herramientas: HX y TP2500, así como un sistema de refrigeración/lubricación mediante el sistema de mínima cantidad de lubricante (MQL) (ACCU-LUBE Microlubrication System). El sistema MQL permite contrastar los resultados del mecanizado en seco (caudal MQL igual a 0 ml/h) con los del propio sistema MQL (caudales MQL de 4,5 ml/h y 9 ml/h), empleando como fluido de corte el refrigerante r.rhenus Nor SSL. Finalmente, como resultados del proceso se han tomado los valores de desviación media aritmética (Ra) en función de diversos puntos de medición (según las variables longitud y generatriz), empleando como equipo de medición un rugosímetro de superficies (Mitutoyo SurfTest SJ 401).

Los resultados de desviación media aritmética obtenidos se han analizado mediante el Análisis de la Varianza, en dos etapas, que han permitido obtener un modelo con los factores e interacciones más influyentes. Concretamente: avance, velocidad de giro del husillo, tipo de herramienta, caudal MQL y tipo de interrupción; y las interacciones avance*caudal MQL y tipo de interrupción*tipo de herramienta. Además, el ANOVA inicial ha permitido identificar a los factores longitud y generatriz, así como, a sus interacciones con los restantes factores como no significativos.

El ANOVA final ha permitido identificar al avance como la fuente de variación más influyente, siendo la influencia de las demás fuentes de variación notablemente inferior.

El modelo para la varianza ha facilitado el conocimiento con mayor detalle del proceso de torneado intermitente de magnesio en función de las distintas condiciones operativas. En particular, ha permitido prever que el incremento del avance conducirá a obtener mayores

desviaciones medias aritméticas, mientras que el incremento de la velocidad de giro del husillo lleva a reducciones de la desviación media aritmética. El comportamiento de las herramientas de corte también puede ser previsto, esperándose un mejor comportamiento de la herramienta HX. Con relación al sistema de refrigeración/lubricación los mejores resultados se obtienen con el mecanizado en seco para el avance mayor y con el caudal MQL medio para el avance menor. Finalmente, la interrupción en la pieza lleva a la obtención de mayores desviaciones medias aritméticas.

Las condiciones óptimas de corte, obtenidas a partir del modelo para el mecanizado intermitente de magnesio, son las siguientes: $a = 0.051$ mm/rev, $n = 800$ rpm, $h = \text{HX}$ y $c = 4,5$ ml/h. Estas condiciones operativas son las óptimas para cualquiera de las probetas consideradas.

Finalmente, el análisis realizado ha permitido comparar los valores estimados de desviación media aritmética con los valores de otras expresiones tipo teórico, situándose los valores teóricos muy por debajo de los estimados según el modelo creado.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS.

5.1 Conclusiones.

El magnesio y sus aleaciones se han constituido en una alternativa a los materiales tradicionales en sectores industriales como el aeronáutico, el de la automoción, el de la electrónica, el médico o el deportivo, debido, principalmente, a su reducida densidad.

El creciente uso del magnesio y sus aleaciones en el mecanizado demandan un mayor conocimiento de los procesos de mecanizado, especialmente del mecanizado discontinuo, que consideren las especiales características del magnesio. Particularmente, la refrigeración/lubricación empleada en el mecanizado representa un aspecto crítico del proceso.

El presente trabajo muestra un estudio experimental del torneado intermitente de la aleación de magnesio AZ91D-F, mediante sistemas de refrigeración sostenibles tales como el mecanizado en seco y el sistema de mínima cantidad de lubricante o sistema MQL. En el análisis, diferentes aspectos como velocidad de giro del husillo, avance, tipo de herramienta, tipo de interrupción, caudal MQL y punto de medición (longitud y generatriz) se han tomado en consideración.

A partir del trabajo desarrollado en los capítulos precedentes es posible establecer un conjunto de conclusiones de carácter general y particular. Las conclusiones de tipo general se derivan del estudio realizado en el Capítulo 2: Estado del arte y en el Capítulo 3: Metodología, mientras que las conclusiones de tipo particular se derivan de los resultados obtenidos en el Capítulo 4: Aplicaciones y análisis de resultados.

5.1.1 Conclusiones de tipo general.

Las conclusiones de tipo general se desarrollan a partir de lo expuesto en los Capítulos 2 y 3 de la presente Tesis Doctoral, y buscan dar respuesta a los objetivos de tipo particular fundamental definidos en el apartado de objetivos del Capítulo 1: Introducción.

A continuación se recogen las principales conclusiones de tipo general identificadas:

- a) Las buenas propiedades del magnesio y sus aleaciones, especialmente su baja densidad, lo están convirtiendo en un material con amplias posibilidades de empleo en diferentes sectores, como el de la automoción, el de la aeronáutica o el de la medicina.
- b) Existe un gran avance en el campo de las aleaciones del magnesio que permite desarrollar soluciones específicas para aplicaciones exigentes.
- c) El empleo de fluidos de corte en el mecanizado representa una importante oportunidad de mejora, en términos económicos, medioambientales y de seguridad para los operarios.
- d) En los últimos años han surgido una serie de sistemas de refrigeración/lubricación alternativos a la refrigeración/lubricación convencional que en determinadas aplicaciones permiten mejorar los resultados obtenidos. Entre estas alternativas se destacan: el mecanizado en seco, el sistema MQL, la refrigeración criogénica, los refrigerantes gaseosos y los lubricantes sólidos.
- e) El mecanizado de magnesio y sus aleaciones presenta importantes inconvenientes como el riesgo de ignición y la reactividad con el agua para formar hidrógeno, inflamable y potencialmente explosivo. Por ello, la elección del sistema de refrigeración/lubricación representa un elemento clave en el mecanizado de magnesio.
- f) El magnesio y sus aleaciones presentan una buena maquinabilidad, en términos de fuerza de corte (potencia consumida) y formación de viruta.
- g) A lo largo del siglo XX se produjo un gran avance en el campo de las herramientas de corte y recubrimientos que hacen posible la mejora de los resultados obtenidos en el mecanizado. En particular, que facilitan el empleo del mecanizado en seco en los procesos de mecanizado.

- h) En los procesos de mecanizado modernos, la complejidad de las piezas es cada vez mayor, siendo habitual realizar mecanizados sobre piezas que presentan discontinuidades en sus superficies como: agujeros, canales de lubricación, molduras y ranuras. Por ello, el mecanizado de tipo discontinuo requiere una mayor atención por parte de los investigadores y la industria del mecanizado.
- i) El mecanizado discontinuo presenta particularidades que lo hacen diferente al mecanizado continuo. Concretamente, uno de los aspectos fundamentales es el análisis de los mecanismos de fallo durante el mecanizado discontinuo.
- j) Otra de las líneas de estudio en el mecanizado discontinuo es el campo de los materiales para las herramientas, buscando aquellos que permitan un mecanizado óptimo.
- k) Las principales técnicas de predicción de la rugosidad superficial se pueden agrupar en dos grupos: métodos de tipo mecánico y empírico.
- l) En las últimas décadas se ha producido un importante avance en el campo de las técnicas de optimización de los procesos, pudiendo agruparlas en convencionales y no convencionales.
- m) Una de las técnicas más empleadas en el campo de la investigación en diversos sectores industriales es el Diseño Estadístico de Experimentos, introducido por Ronald A. Fisher.

5.1.2 Conclusiones de tipo particular.

Las conclusiones de tipo particular se establecen en función de los resultados obtenidos en el Capítulo 4, y buscan dar respuesta al objetivo de tipo general y a los objetivos de tipo particular complementario definidos en el apartado de objetivos del Capítulo 1: Introducción.

- a) A partir de la aplicación del Diseño de Experimentos Estadístico se consigue evaluar la influencia que ejerce la elección del sistema de refrigeración/lubricación en los resultados de desviación media aritmética (Ra) obtenidos durante el torneado intermitente a baja velocidad de piezas de magnesio, junto a otras fuentes de variación, a través de la medida de la Ra . La influencia del sistema de refrigeración/lubricación resulta significativa de acuerdo con el Análisis de la varianza.
- b) El sistema de refrigeración/lubricación también genera una fuente de variación significativa en su interacción con el avance.
- c) El avance es la fuente de variación que ejerce una mayor influencia en la variabilidad obtenida por medio del análisis ANOVA inicial.
- d) La influencia de las demás fuentes de variación es notablemente inferior a la del avance.
- e) Los factores longitud y generatriz, así como sus interacciones con los demás factores, resultan no significativos estadísticamente. Este hecho puede permitir reducir el número de factores a considerar en posteriores investigaciones.
- f) El análisis ANOVA inicial permite definir un modelo para la varianza que incluye a las fuentes de variación más influyentes: avance, velocidad de giro del husillo, tipo de herramienta, caudal MQL y tipo de interrupción; y las interacciones avance*caudal MQL y tipo de interrupción*tipo de herramienta.
- g) Mediante el modelo para la varianza es posible realizar una estimación de los resultados de desviación media aritmética estimada para las distintas condiciones operativas.
- h) El análisis de los valores estimados por el modelo permite identificar las siguientes tendencias: la Ra se incrementa al aumentar el avance; en general, al incrementar la velocidad de giro del husillo se reduce la Ra ; la Ra decrece ligeramente para la herramienta HX (frente a la TP2500); en general, cuando no

hay lubricante se produce una menor Ra ; y, en general, cuando no hay interrupción se reduce la Ra .

- i) El análisis de la interacción tipo de herramienta*tipo de interrupción permite apreciar el mejor comportamiento de la herramienta HX. En particular, para la interrupción intermedia.
- j) El análisis de la interacción avance*caudal MQL muestra cómo para el caso del avance mayor, los incrementos del caudal MQL generan un incremento en la Ra , mientras que en el caso del avance menor el mejor resultado de Ra se obtiene para el caudal MQL intermedio. Estos resultados sugieren que el mecanizado en seco puede ser empleado, obteniendo resultados mejores o similares a los obtenidos mediante el sistema MQL.
- k) El modelo planteado permite identificar las condiciones óptimas de corte para el proceso. Concretamente, para cualquier tipo de interrupción, los valores óptimos del resto de parámetros, según la desviación media aritmética estimada por el modelo, son: $a = 0.051$ mm/rev, $n = 800$ rpm, $h = HX$ y $c = 4,5$ ml/h.
- l) El estudio realizado permite observar cómo la Ra obtenida en los ensayos y la estimada por el modelo desarrollado se encuentran muy alejadas de los valores previstos por otras expresiones de cálculo de la rugosidad superficial de tipo teórico.

5.2 Desarrollos futuros.

El estudio presentado en la presente Tesis Doctoral abarca un campo del conocimiento notablemente amplio y complejo. Es preciso destacar los notables avances que se han producido en el sector del mecanizado durante un largo periodo de tiempo gracias a los investigadores y al sector del mecanizado. No obstante, a partir de los resultados obtenidos en el modelo para el proceso de torneado intermitente desarrollado, se considera oportuno señalar algunas líneas que pudieran facilitar el desarrollo futuro de los temas expuestos. En este sentido, se señalan las siguientes:

- a) Las poco exigentes condiciones operativas empleadas en la presente investigación, relativas a los procesos de reparación y mantenimiento dificultan la posibilidad de ignición del magnesio, facilitando la aplicación de sistemas de refrigeración/lubricación sostenibles como el mecanizado en seco y el sistema de mínima cantidad de lubricante durante el mecanizado intermitente. No obstante, existe un amplio campo de estudio de los distintos sistemas de refrigeración/lubricación evaluados en el presente estudio y, especialmente, de los no incorporados en la experimentación, como pueden ser la refrigeración criogénica, con los distintos métodos de aplicación disponibles y otros métodos como la refrigeración mediante gases o mediante lubricantes sólidos.

Estas alternativas a la refrigeración/lubricación convencional precisan ser evaluadas en los procesos de reparación y mantenimiento pero, además, resultaría conveniente analizar su validez para procesos de producción en serie de piezas nuevas. En este sentido, se recomienda el estudio de los rangos operativos de los distintos métodos de refrigeración/lubricación que permitan realizar el mecanizado intermitente de magnesio evitando la generación de procesos de ignición.

- b) La metodología experimental desarrollada para el estudio del mecanizado intermitente de magnesio y los resultados obtenidos pueden ser empleados como base de posteriores trabajos de tipo docente o investigador, en los que se profundice en la influencia de los distintos factores e interacciones en el mecanizado intermitente, bien sea en la variable de respuesta seleccionada en el presente estudio (Ra) o en otras variables, como podrían ser, por ejemplo, la vida de la herramienta o la potencia consumida en el proceso de mecanizado.

Investigaciones adicionales podrían permitir analizar la influencia de diversos tipos de herramientas o diseños de las interrupciones de las piezas, o evaluar el mecanizado intermitente sobre otros tipos de materiales como, por ejemplo, las aleaciones de aluminio, las aleaciones de titanio o los compuestos de matriz metálica.

- c) Finalmente, aunque debido a las características del presente estudio no se ha realizado el análisis de los mecanismos de desgaste y fallo de las herramientas durante el mecanizado intermitente de magnesio, su estudio resultaría recomendable con el objetivo de poder aumentar el conocimiento sobre las causas de desgaste de las herramientas. En particular, identificar el mecanismo o mecanismos predominantes entre los presentados en el apartado 2.5.2.2.: Mecanismos de fallo.

CAPÍTULO 6: REFERENCIAS

6.1 Introducción.

Seguidamente se presenta el conjunto de fuentes de información consultado para la elaboración de la presente Tesis Doctoral. El capítulo se compone de dos apartados: referencias y otras fuentes documentales.

En el primero, referencias, se incluye el conjunto de artículos científicos publicados en actas de congresos y revistas, libros, normas y otro tipo de información consultada.

En el segundo, otras fuentes documentales, se incluye otro tipo de fuentes de información empleadas disponibles en Internet como referencias a catálogos de fabricantes y páginas web de las que se extraen datos, imágenes o informes.

6.2 Referencias.

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.

Agarwal, S., Rao, P.V. (2007). Performance improvement of SiC grinding using solid lubricants. *Machining Science and Technology*, 11(1), 61-79.

Aggarwal, A., Singh, H., Kumar, P., Singh, M. (2008). Optimization of multiple quality characteristics for CNC turning under cryogenic cutting environment using desirability function. *Journal of Materials Processing Technology*, 205(1-3), 42-50.

Andreev, G.S. (1969). Contact stresses in intermittent cutting process. *Journal of Russian Engineering*, 49(3), 70-74.

Andreev, G.S. (1974a). Efficiency of cutting tools in intermittent cutting conditions. *Journal of Russian Engineering*, 54(1), 54.

Andreev, G.S. (1974b). Effect of thermal and adhesion phenomena on tool life in interrupted machining. *Journal of Russian Engineering*, 54(10), 70-73.

Andrewes, C.J.E., Feng, H-Y, Lau, W.M. (2000). Machining of an aluminium/SiC composite using diamond inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, 102(1-3), 25-29.

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.

Armendia, M., Garay, A., Villar, A., Davies, M.A., Arrazola, P.J. (2010). High bandwidth temperature measurement in interrupted cutting of difficult to cut materials. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 59(1), 97-100.

Ashby, M., Johnson, K. (2010). Material profiles. En *Materials and design* (second ed., págs. 194-249). Oxford: Butterworth-Heinemann.

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

ASM. (1990). *ASM Handbook - Properties and selection: nonferrous alloys and special purpose materials* (Vol. 2). ASM International.

- ASM. (1992). *ASM Handbook - Friction, lubrication, and wear* (Vol. 18). ASM International.
- Astakhov, V.P. (2006). Tribology of the tool-chip and tool-workpiece interfaces. Tribology of metal cutting. *Tribology and Interface Engineering Series*, 52, 124-219.
- ASTM. (2005). *B275. Standard practice for codification of certain nonferrous metals and alloys, cast and wrought*. Philadelphia: ASTM.
- Aurich, J.C., Dornfeld, D., Arrazola, P.J., Franke, V., Leitz, L., Min, S. (2009). Burrs-Analysis, control and removal. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(2), 519–542.
- Avallone, E., & Baumeister, T. (Edits.). (1996). *Marks' standard handbook for mechanical engineers* (tenth ed.). New York: McGraw Hill.
- 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.
- Benardos, P.G., Vosniakos, G.C. (2003). Predicting surface roughness in machining: a review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43(8), 833-844.
- Beswick, J. (Ed.). (2002). *Bearing steel technology - STP 1419*. Philadelphia: ASTM International.
- Bewilogua, K., Bräuer, G., Dietz, A., Gäbler, J., Goch, G., Karpuschewski, B., Szyszka, B. (2009). Surface technology for automotive engineering. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(2), 608–627.
- Bhatia, S.M., Pandey, P.C., Shan, H.S. (1978). Thermal cracking of carbide tools during intermittent cutting. *Wear*, 51(2), 201-211.
- Bhatia, S.M., Pandey, P.C., Shan, H.S. (1979). Failure of cemented carbide tools in intermittent cutting. *Precision Engineering*, 1(3), 148-152.
- Bhowmick, S., Alpas, A.T. (2008). Minimum quantity lubrication drilling of aluminium–silicon alloys in water using diamond-like carbon coated drills. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48(12-13), 1429-1443.

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.

Boothroyd, G. (1978). *Fundamentos del corte de metales de las máquinas-herramienta*. McGraw-Hill Latinoamericana, S.A.

Boston, O.W., Gilbert, W.W. (1947). Influence on tool life and power of nose radius, chamfer and peripheral cutting edge angle when face milling a 40000 psi cast iron. *Transactions of the ASME*, 69, 117-124.

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.

Braiden, P.M., Dugdale, D.S. (1970). Failure of carbide tools in intermittent cutting. In *Materials for metal cutting. Proceedings of the Conference on Materials for Metal Cutting* (págs. 30-34). Scarborough, London: Iron and Steel Institute.

Byrne, G., Dornfeld, D., Denkena, B. (2003). Advancing cutting technology. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52(2), 483-507.

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

Castellacci, F. (2006). Innovation, diffusion and catching up in the fifth long wave. *Futures*, 38(7), 841-863.

Castrillejo, Y., Martínez, A.M., Pardo, R., Haarberg, G.M. (1997). Electrochemical behaviour of magnesium ions in the equimolar CaCl₂-NaCl mixture at 550°C. *Electrochimica Acta*, 42(12), 1869-1879.

Chakraverti, G., Pandey, P.C., Mehta, N.K. (1984). Analysis of tool temperature fluctuation in interrupted cutting. *Precision Engineering*, 6(2), 99-105.

- Chandrasekaran, H. (1985). Thermal fatigue in tool carbides and its relevance to milling cutters. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 34(1), 125–128.
- Chandrasekaran, H., Thoors, H. (1994). Tribology in interrupted machining: role of interruption cycle and work material. *Wear*, 179(1-2), 83-88.
- Chang, J.I., Lin, J.J., Huang, J.S., Chang, Y.M. (2006). Recycling oil and steel from grinding swarf. *Resources, Conservation and Recycling*, 49(2), 191-201.
- Charles, J.A., Crane, F.A.A., Furness, J.A.G. (1997). Materials for airframes. En *Selection and Use of Engineering Materials* (third ed., págs. 227-255). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Cheah, L., Heywood, J. (2011). Meeting U.S. passenger vehicle fuel economy standards in 2016 and beyond. *Energy Policy*, 39(1), 454-466.
- Chen, M.H. (2010). Understanding world metals prices>Returns, volatility and diversification. *Resources Policy*, 35(3), 127-140.
- 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.
- Chou, Y. K., Evans, C.J. (1999). Cubic boron nitride tool wear in interrupted hard cutting. *Wear*, 225-229(1), 234-245.
- Choudhury, I.A., El-Baradie, M.A. (1998). Machinability of nickel-base super alloys: a general review. *Journal of Materials Processing Technology*, 77(1-3), 278-284.
- Ciftci, I., Turker, M., Seker, U. (2004). CBN cutting tool wear during machining of particulate reinforced MMCs. *Wear*, 257(9-10), 1041-1046.
- Çolak, O., Kurbanoglu, C., Kayacan, M.C. (2007). Milling surface roughness prediction using evolutionary programming methods. *Materials and Design*, 28(2), 657–666.
- Cole, G.S., Sherman, A.M. (1995). Lightweight materials for automotive applications. *Materials Characterization*, 35(1), 3-9.
- Cookson, J.O. (1977). An introduction to cutting fluids. *Tribology International*, 10(1), 5-11.

Costes, J.P., Guillet, Y., Poulachon, G., Dessoly, M. (2007). Tool-life and wear mechanism of CBN tools in machining of Inconel 718. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47(7-8), 1081-1087.

Courbon, C., Kramar, D., Krajnik, P., Pusavec, F., Rech, J., Kopac, J. (2009). Investigation of machining performance in high-pressure jet assisted turning of Inconel 718: An experimental study International. *Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49(14), 1114–1125.

Da Silva, M.B., Wallbank, J. (1999). Cutting temperature: prediction and measurement methods – a review. *Journal of Materials Processing Technology*, 88(1-3), 195-202.

Da Silva, R.B., Vieira, J.M., Cardoso, R.N., Carvalho, H.C., Costa, E.S., Machado, A.R., De Ávila, R.F. (2011). Tool wear analysis in milling of medium carbon steel with coated cemented carbide inserts using different machining lubrication/cooling systems. *Wear*, 271(9-10), 2459-2465.

Darwish, S.M. (1997). The impact of tool material and cutting parameters on surface roughness of a nickel-base superalloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 12(6), 1017-1035.

Darwish, S.M., El-Tamitni, A.M. (1997). Formulation of surface roughness models for machining nickel super alloy with different tools. *Materials and Manufacturing Processes*, 12(3), 395-408.

Davies, G. (2003). Future trends in automotive body materials. En *Materials for Automobile Bodies* (págs. 252-269). Oxford: Butterworth-Heinemann.

Davim, J.P., Baptista, A.M. (2000). Relationships between cutting force and PCD cutting tool wear in machining silicon carbide reinforced aluminium. *Journal of Materials Processing Technology*, 103(3), 417-423.

De Chiffre, L., Belluco, W. (2000). Comparison of methods for cutting fluid performance testing. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 49(1), 57-60.

Deetz, J. (2005). The use of wrought magnesium in bicycles. *JOM*, 57(5), 50-53.

Devillez, A., Schneider, F., Dominiak, S., Dudzinski, D., Larrouquere, D. (2007). Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools. *Wear*, 262(7-8), 931-942.

- Dhar, N.R., Kamruzzaman, M. (2007). Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47(5), 754-759.
- Dhar, N.R., Kamruzzaman, M., Ahmed, M. (2006). Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 172(2), 299-304.
- 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 e.V.
- Diniz, A.E., Ferreira, J.R., Filho, F.T. (2003). Influence of refrigeration/lubrication condition on SAE 52100 hardened steel turning at several cutting speeds. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43(3), 317–326.
- Diniz, A.E., Ferrer, J.A.G. (2008). A comparison between silicon nitride-based ceramic and coated carbide tools in the face milling of irregular surfaces. *Journal of Materials Processing Technology*, 206(1-3), 294-304.
- 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(1), 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(2), 240-248.
- Diniz, A.E., Micaroni, R. (2002). Cutting conditions for finish turning process aiming: the use of dry cutting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42(8), 899- 904.
- Diniz, A.E., Micaroni, R., Hassui, A. (2010). Evaluating the effect of coolant pressure and flow rate on tool wear and tool life in the steel turning operation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50(9-12), 1125–1133.
- Diniz, A.E., Oliveira, A.J. (2004). Optimizing the use of dry cutting in rough turning steel operations. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44(10), 1061-1067.

- Diniz, A.E., Oliveira, A.J. (2008). Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 195(1-3), 275-281.
- Dokainish, M.A., Elbestawi, M.A., Polat, U., Tole, B. (1989). Analysis of stresses during exit in interrupted cutting with chamfered tools. *International Journal of Machines Tools and Manufacturing*, 29(4), 519-534.
- 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.
- Duflou, J.R., Sutherland, J.W., Dornfeld, D., Herrmann, C., Jeswiet, J., Kara, S., Hauschild, M., Kellens, K. (2012). Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(2), 587-609.
- Ehrlich, P.R., Wolff, G., Daily, G.C., Hughes, J.B., Daily, S., Dalton, M., Goulder, L. (1999). Knowledge and the environment. *Ecological Economics*, 30(2), 267–284.
- El Baradie, M.A. (1996). Cutting fluids: Part I. Characterisation. *Journal of Materials Processing Technology*, 56(1-4), 786-797.
- El-Axir, M.H., Othman, O.M., Abodiena, A.M. (2008). Study on the inner surface finishing of aluminum alloy 2014 by ball burnishing process. *Journal of Materials Processing Technology*, 202(1-3), 435–442.
- Elgallad, E.M., Samuel, F.H., Samuel, A.M., Doty, H.W. (2010). Machinability aspects of new Al–Cu alloys intended for automotive castings. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(13), 1754–1766.
- Eliezer, D., Aghion, E., Froes, F.H. (1998). Magnesium science, technology and applications. *Advanced Performance Materials*, 5(3), 201–212.
- 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(1), 54–61.
- Evangelista, R., Lucchese, M., Meliciani, V. (2012). Business services, innovation and sectoral growth (Available online 23 February 2012). *Structural Change and Economic Dynamics*.

- Ezugwu, E.O. (2005). Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45(12-13), 1353-1367.
- Ezugwu, E.O., Bonney, J., Yamane, Y. (2003). An overview of the machinability of aeroengine alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 134(2), 233-253.
- Ezugwu, E.O., Tang, S.H. (1992). Surface abuse when machining cast iron and nickel base superalloy (inconel 718) with ceramic tools. En D. Browne (Ed.), *Proceedings of 9th Conference of the Irish Manufacturing Committee*, (págs. 436-450). Dublin.
- Ezugwu, E.O., Wang, Z.M., Machado, A.R. (1999). The machinability of nickel-based alloys: a review. *Journal of Materials Processing Technology*, 86(1-3), 1-16.
- 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.
- Filipovic, A., Stephenson, D.A. (2006). Minimum Quantity Lubrication (MQL) applications in automotive power-train machining. *Machining Science and Technology*, 10(1), 3-22.
- Froes, F.H., Eliezer, D., Aghion, E. (1998). The science, technology, and applications of magnesium. *JOM*, 50(9), 30-34.
- Funatani, K. (2000). Emerging technology in surface modification of light metals. *Surface and Coatings Technology*, 133-134, 264-272.
- Gaitonde, V.N., Karnik, S.R., Davim, J.P. (2008). Selection of optimal MQL and cutting conditions for enhancing machinability in turning of brass. *Journal of Materials Processing Technology*, 204(1-3), 459-464.
- Gariboldi, E. (2003). Drilling a magnesium alloy using PVD coated twist drills. *Journal of Materials Processing Technology*, 134(3), 287-295.
- Ghani, A.K., Barrow, G. (1985). Tool failure at exit during interrupted cutting. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 34(1), 71-74.
- Goch, G., Peters, J., Lehmann, P., Liu, H. (1999). Requirements for the application of speckle correlation techniques to on-line inspection of surface roughness. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 48(1), 467-470.

- Godoy, V.A.A., Diniz, A.E. (2011). Turning of interrupted and continuous hardened steel surfaces using ceramic and CBN cutting tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(6), 1014-1025.
- Gray, J.E., Luan, B. (2002). Protective coatings on magnesium and its alloys - a critical review. *Journal of Alloys and Compounds*, 336(1-2), 88-113.
- Grzesik, W. (2008). Machinability of engineering materials. En *Advanced machining processes of metallic materials* (págs. 183-197). Amsterdam: Elsevier.
- Heath, P.J. (2001). Developments in applications of PCD tooling. *Journal of Materials Processing Technology*, 116(1), 31-38.
- Heng, L.H., Othman, N.F.M., Rasli, A.M., Iqbald, M.J. (2012). Fourth pillar in the transformation of production economy to knowledge economy. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 40, 530–536.
- Hocheng, H., Hsieh, M.L. (2004). Signal analysis of surface roughness in diamond turning of lens molds. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44(15), 1607–1618.
- Hogmark, S., Jacobson, S., Larsson, M. (2000). Design and evaluation of tribological coatings. *Wear*, 246(1-2), 20-33.
- Holywell, G.C. (2005). Magnesium: the first quarter millennium. *JOM*, 57(7), 26-33.
- Hong, S.Y. (2006). Lubrication mechanisms of LN2 in ecological cryogenic machining. *Machining Science and Technology*, 10(1), 133–155.
- Hong, S.Y., Ding, Y., Jeong, W. (2001). Friction and cutting forces in cryogenic machining of Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 41(15), 2271-2285.
- Hooper, R.M., Henshall, J.L., Klopfer, A. (1999). The wear of polycrystalline diamond tools used in the cutting of metal matrix composites. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 17(1-3), 103-109.
- Hoshi, T., Okushima, K. (1965). Optimum diameter and positions of fly cutter for milling steel at light cuts. *ASME Journal of Engineering for Industry*, 87(4), 442-446.

- Hufenbach, W., Andrich, M., Langkamp, A., Czulak, A. (2006). Fabrication technology and material characterization of carbon fibre reinforced magnesium. *Journal of Materials Processing Technology*, 175(1-3), 218-224.
- Ingarao, G., Lorenzo, R., Micari, F. (2011). Sustainability issues in sheet metal forming processes: an overview. *Journal of Cleaner Production*, 19(4), 337-347.
- Ion, J. (2005). *Laser processing of engineering materials*. Oxford: Elsevier.
- ISO 1832:2012. (2012). *Indexable inserts for cutting tools - Designation*. ISO.
- ISO 3685. (1993). *Tool life testing with single point turning tools*. ISO.
- Itoigawa, F., Takeuchi, D., Nakamura, T., Childs, T.H.C. (2007). Experimental study on lubrication mechanism in MQL intermittent cutting process. *Machining Science and Technology*, 11(3), 355–365.
- J.H.L., The. (1977). High-speed films of the incipient cutting process in machining at conventional speeds. *Transactions of the ASME. Journal of Engineering for Industry*, 99, 263-268.
- Jain, V.K., Shukla, D.S. (1997). The role of fatty materials and water soluble inorganic solids in synthetic metal working fluid. *Wear*, 208(1-2), 11-16.
- Jawahir, I.S., Brinksmeier, E., M'Saoubi, R., Aspinwall, D.K., Outeiro, J.C., Meyer, D., Umbrello, D., Jayal, A.D. (2011). Surface integrity in material removal processes: Recent advances. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60(2), 603-626.
- Jawahir, I.S., Li, P.X., Gosh, R., Exner, E.L. (1995). A new parametric approach for the assessment of comprehensive tool wear in coated grooved tools. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 44(1), 49–54.
- Jawaid, A., Koksai, S., Sharif, S. (2001). Cutting performance and wear characteristics of PVD coated and uncoated carbide tools in face milling Inconel 718 aerospace alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 116(1), 2-9.
- Jerold, B.D., Kumar, M.P. (2011). Experimental investigation of turning AISI 1045 steel using cryogenic carbon dioxide as the cutting fluid. *Journal of Manufacturing Processes*, 13(2), 113–119.

Jianxin, D., Jianhua, L., Jinlong, Z., Wenlong, S. (2008). Wear mechanisms of PVD ZrN coated tools in machining. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 26(3), 164–172.

Jianxin, D., Tongkun, C., Xuefeng, Y., Jianhua, L. (2006). Self-lubrication of sintered ceramic tools with CaF₂ additions in dry cutting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46(9), 957–963.

Jianxin, D., Wenlong, S., Hui, Z. (2009). Design, fabrication and properties of a self lubricated tool in dry cutting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49(1), 66-72.

Junior, A.B., Diniz, A.E., Filho, F.T. (2009). Tool wear and tool life in end milling of 15–5 PH stainless steel under different cooling and lubrication conditions. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43(7-8), 756–764.

Kabaldin, Y.G. (1973). Chip-tool adhesion in intermittent cutting. *Machines and Tooling*, 44(4), 56-58.

Kadirgama, K., Abou-El-Hossein, K.A., Noor, M.M., Sharma, K.V., Mohammad, B. (2011). Tool life and wear mechanism when machining Hastelloy C-22HS. *Wear*, 270(3-4), 258–268.

Kamata, Y., Obikawa, T. (2007). High speed MQL finish-turning of Inconel 718 with different coated tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 192–193, 281–286.

Kang, M.C., Kim, K.H., Shin, S.H., Jang, S.H., Park, J.H., Kim, C. (2008). Effect of the minimum quantity lubrication in high-speed end-milling of AISI D2 cold-worked die steel (62 HRC) by coated carbide tools. *Surface & Coatings Technology*, 202(22-23), 5621-5624.

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.

Kelly, J.F., Cotterell, M.G. (2002). Minimal lubrication machining of aluminium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 120(1-3), 327-334.

Kılıçkap, E., Çakır, O., Aksoy, M., İnan, A. (2005). Study of tool wear and surface roughness in machining of homogenised SiC-p reinforced aluminium metal matrix composite. *Journal of Materials Processing Technology*, 164-165, 862-867.

- Kipouros, G.J., Sadoway, D.R. (2001). A thermochemical analysis of the production of anhydrous MgCl₂. *Journal of Light Metals*, 1(2), 111-117.
- Kishawy, H.A. (2002). An experimental evaluation of cutting temperatures during high speed machining of hardened D2 tool steel. *Machining Science and Technology*, 6(1), 67-79.
- Kishawy, H.A., Dumitrescu, M., Ng, E.G., Elbestawi, M.A. (2005). Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45(2), 219-227.
- Kıvak, T., Samtaş, G., Çiçek, A. (2012). Taguchi method based optimisation of drilling parameters in drilling of AISI 316 steel with PVD monolayer and multilayer coated HSS drills. *Measurement*, 45(6), 1547-1557.
- 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.
- Klocke, F., Krieg, T. (1999). Coated tools for metal cutting – features and applications. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 48(2), 515-525.
- Klocke, F., Krieg, T., Gerschwiler, K., Fritsch, R., Zinkann, V., Pöhls, M., Eisenblätter, G. (1998). Improved cutting processes with adapted coating systems. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 47(1), 65-68.
- Komanduri, R., Hou, Z.B. (2001). A review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology. *Tribology international*, 34(10), 653-682.
- König, W., Erinski, D. (1983). Machining and machinability of aluminium cast alloys. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 33(2), 535-540.
- Korinko, P.S. (1997). Materials. En *Rules of thumb for mechanical engineers. A manual of quick, accurate solutions to everyday mechanical engineering problems* (págs. 259-293). Burlington: Gulf Professional Publishing.

- Kountanya, R. (2008). Cutting tool temperatures in interrupted cutting – The effect of feed-direction modulation. *Journal of Manufacturing Processes*, 10(2), 47-55.
- Kronenberg, M. (1963). *Grundzüge der zerspannungstehre* (Vol. 2). Berlín: Springer Verlag.
- Kruth, J.P., Leu, M.C., Nakagawa, T. (1998). Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 47(2), 525-540.
- Kuehl, R.O. (2001). *Diseño de experimentos. Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación*. (segunda ed.). México: Thomson Editores.
- Kulekci, M.K. (2008). Magnesium and its alloys applications in automotive industry. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(9-10), 851-865.
- Kuljanič, E. (1974). An investigation of wear in single-tooth and multi-tooth milling. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 14(1), 95-109.
- Kumar, K.V.B.S.K., Choudhury, S.K. (2008). Investigation of tool wear and cutting force in cryogenic machining using design of experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, 203(1-3), 95–101.
- Kumar, N.V.R., Blandin, J.J., Suéry, M., Grosjean, E. (2003). Effect of alloying elements on the ignition resistance of magnesium alloys. *Scripta Materialia*, 49(3), 225–230.
- Kundrák, J., Mamalis, A.G., Gyány, K., Markopoulos, A. (2006). Environmentally friendly precision machining. *Materials and Manufacturing Processes*, 21(1), 29–37.
- Lazoglu, I., Altintas, Y. (2002). Prediction of tool and chip temperature in continuous and interrupted machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42(9), 1011-1022.
- Le Coz, G., Marinescu, M., Devillez, A., Dudzinski, D., Velnom, L. (2012). Measuring temperature of rotating cutting tools: Application to MQL drilling and dry milling of aerospace alloys. *Applied Thermal Engineering*, 36, 434-441.
- Li, P., Stein, D., Gosh, R., Jawahir, I. (1997). Engaged cutting edge effects on tool-wear and tool-life in turning operations using grooved cutting tools. *Manufacturing Science and Technology, ASME*, 2, 277–284.

- Liang, Q., Vohra, Y.K., Thompson, R. (2008). High speed continuous and interrupted dry turning of A390 aluminium/silicon alloy using nanostructured diamond coated WC-6 wt.% cobalt tool inserts by MPCVD. *Diamond & Related Materials*, 17(12), 2041-2047.
- Liao, Y.S., Lin, H.M. (2007). Mechanism of minimum quantity lubrication in high-speed milling of hardened steel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47(11), 1660-1666.
- Liew, W.Y.H., Hutchings, I.M., Williams, J.A. (1998). Friction and lubrication effects in the machining of aluminium alloys. *Tribology Letters*, 5, 117-122.
- List, G., Nouari, M., Géhin, D., Gomez, S., Manaud, J.P., Le Petitcorps, Y., Girod, F. (2005). Wear behaviour of cemented carbide tools in dry machining of aluminium alloy. *Wear*, 259(7-12), 1177-1789.
- López de Lacalle, L.N., Angulo, C., Lamikiz, A., Sánchez, J.A. (2006). Experimental and numerical investigation of the effect of spray cutting fluids in high speed milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 172(1), 11-15.
- Machado, A.R., Wallbank, J. (1997). The effect of extremely low lubricant volumes in machining. *Wear*, 210(1-2), 76-82.
- Marksberry, P.W., Jawahir, I.S. (2008). A comprehensive tool-wear/tool-life performance model in the evaluation of NDM (near dry machining) for sustainable manufacturing. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48(7-8), 878-886.
- Maroto-Sánchez, A., Cuadrado-Roura, J.R. (2009). Is growth of services an obstacle to productivity growth? A comparative analysis. *Structural Change and Economic Dynamics*, 20(4), 254-265.
- Mason, R.L., Gunst, R.F., Hess, J.L. (2003). *Statistical design and analysis of experiments*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- May, C. (2000). Information society, task mobility and the end of work. *Futures*, 32(5), 399-416.
- McDonough, W.F. (2001). The composition of the earth. *International Geophysics*, 76, 3-23.
- Meadows, D., Randers, J., Meadows, D. (2004). *Limits to growth. The 30-year update*. Vermont: Chelsea Green Publishing Company,.

Mebarki, N., Kumar, N.V.R., Blandin, J.J., Suery, M., Pelloux, F., Khelifati, G. (2005). Correlations between ignition and oxidation behaviours of AZ91 magnesium alloys. *Material Science and Technology*, 21(10), 1145-1151.

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

Mokyr, J. (2005). Long-term economic growth and the history of technology. En P. Aghion, & S. Durlauf (Edits.), *Handbook of Economic Growth* (Vol. 1(B)), págs. 1113-1180). Elsevier.

Montgomery, D.C. (2005). *Design and analysis of experiments*. (fifth ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc.

Mordike, B.L., Ebert, T. (2001). Magnesium. Properties – applications – potential. *Materials Science and Engineering: A*, 302(1), 37-45.

Moriwaki, T. (2008). Multi-functional machine tool. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(2), 736-749.

Mukherjee, I., Ray, P.K. (2006). A review of optimization techniques in metal cutting processes. *Computers & Industrial Engineering*, 50(1-2), 15–34.

Muthukrishnan, N., Murugan, M., Rao, K.P. (2008). Machinability issues in turning of Al-SiC (10p) metal matrix composites. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(3-4), 211–218.

Nouari, M., List, G., Girot, F., Coupard, D. (2003). Experimental analysis and optimisation of tool wear in dry machining of aluminium alloys. *Wear*, 255(7-12), 1359–1368.

O'Brien, C. (1999). Sustainable production - a new paradigm for a new millennium. *International Journal of Production Economics*, 60-61, 1-7.

Obikawa, T., Kamata, Y., Asano, Y., Nakayama, K., Otieno, A.W. (2008). Micro-liter lubrication machining of Inconel 718. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48(15), 1605-1612.

Okushima, K., Hoshi, T. (1962). Thermal crack in the carbide face-milling cutter 1st report, Results obtained from the fundamental cutting experiments. *Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 5(17), 151-160.

- Okushima, K., Hoshi, T. (1963). Thermal crack in the carbide face-milling cutter 2nd report, Results obtained from the fundamental cutting experiments. *Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 6(22), 317-326.
- 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 Materials Processing Technology*, 209(12-13), 5762-5270.
- Oulton, N. (2012). Long term implications of the ICT revolution: Applying the lessons of growth theory and growth accounting. *Economic Modelling*, 29(5), 1722-1736.
- Pahutová, M., Březina, J., Kuchařova, K., Sklenička, V., Langdon, T.G. (1999). Metallographic investigation of reinforcement damage in creep of an AZ91 matrix composite. *Materials Letters*, 39(3), 179-183.
- Paul, S., Chattopadhyay, A.B. (2006). Environmentally conscious machining and grinding with cryogenic cooling. *Machining Science and Technology*, 10(1), 87-131.
- Paul, S., Dhar, N.R., Chattopadhyay, A.B. (2001). Beneficial effects of cryogenic cooling over dry and wet machining on tool wear and surface finish in turning AISI 1060 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 116(1), 44-48.
- Pavel, R., Marinescu, I., Deis, M., Pillar, J. (2005). Effect of tool wear on finish for a case of continuous and interrupted hard turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 170(1-2), 341-349.
- Pekelharing, A.J. (1978). The exit failure in interrupted cutting. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 27(1), 5–10.
- Pekelharing, A.J. (1980). Cutting tool damage in interrupted cutting. *Wear*, 62(1), 37-48.
- Pekelharing, A.J. (1984). The exit failure of cemented carbide face-milling cutters: Part I. Fundamentals and phenomena. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 33(1), 47–50.
- Penalva, M.L., Arizmendi, M., Díaz, F., Fernández, J. (2002). Effect of Tool Wear on Roughness in Hard Turning. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 51(1), 57- 60.
- Persson, U. (2006). Surface roughness measurement on machined surfaces using angular speckle correlation. *Journal of Materials Processing Technology*, 180(1-3), 233–238.

Pfeifer, M. (2009). Material properties and materials science. En *Materials enabled designs* (págs. 59-114). Boston: Butterworth-Heinemann.

Polmear, I.J. (2005). Magnesium alloys. En *Light Alloys* (fourth ed., págs. 237-297). Oxford: Butterworth-Heinemann.

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.

Quinsat, Y., Tournier, C. (2012). In situ non-contact measurements of surface roughness. *Precision Engineering*, 36(1), 97-103.

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.

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.

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.

Rao, J., Li, H. (2010). Oxidation and ignition behavior of a magnesium alloy containing rare earths elements. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51(1-4), 225-231.

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.

Rotberg, J., Lenz, E., Braun, S. (1987). Mechanical signature analysis in interrupted cutting. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 36(1), 249-252.

Routio, M., Säynätjoki, M. (1995). Tool wear and failure in the drilling of stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 52(1), 35-43.

- Rubio, E.M., Camacho, A.M., Sánchez-Sola, J.M., Marcos, M. (2005). Surface roughness of AA7050 alloy turned bars. Analysis of the influence of the length of machining. *Journal of Material Processing Technology*, 162-163C, 682-689.
- Rubio, E.M., Valencia, J.L., Carou, D., Saá, A. (2012a). Inserts selection for intermittent turning of magnesium pieces. *Applied Mechanics and Materials*, 217-219, 1581-1591.
- 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.
- Sadat, A.B. (2009). On the quality of machined surface region when turning Al/SiC metal matrix composites. *Machining Science and Technology*, 13(3), 338–355.
- Salahshoor, M., Guo, Y.B. (2011). Cutting mechanics in high speed dry machining of biomedical magnesium–calcium alloy using internal state variable plasticity model. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 51(7-8), 579–590.
- Sánchez, J.A.; Pombo, I., Alberdi, R., Izquierdo, B., Ortega, N., Plaza, S., Martinez-Toledano, J. (2010). Machining evaluation of a hybrid MQL-CO₂ grinding technology. *Journal of Cleaner Production*, 18(18), 1840-1849.
- Sayit, E., Aslantas, K., Çiçek, A. (2009). Tool wear mechanism in interrupted cutting conditions. *Materials and Manufacturing Processes*, 24(4), 476-483.
- Seeman, M., Ganesan, G., Karthikeyan, R., Velayudham, A. (2010). Study on tool wear and surface roughness in machining of particulate aluminum metal matrix composite-response surface methodology approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 48(5-8), 613–624.
- Seguy, S., Desein, G., Arnaud, L. (2008). Surface roughness variation of thin wall milling, related to modal Interactions. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48(3-4), 261–274.
- 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.

Shintani, K., Ueki, M., Fujimura, Y. (1989). Optimum cutting tool geometry when interrupted cutting carburized steel by CBN tool. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 29(3), 415-423.

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.

Sloman, E. (2003). Lubrication. En *Plant Engineer's Reference Book* (second ed., págs. 1-46). Oxford: Butterworth-Heinemann.

Smith, P. (2005). Materials. En *Piping materials guide* (págs. 37-130). Burlington: Gulf Professional Publishing.

Sreejith, P.S. (2008). Machining of 6061 aluminium alloy with MQL, dry and flooded lubricant conditions. *Materials Letters*, 62(2), 276-278.

Stachowiak, G.W.; Batchelor, A.W. (2005). Lubricants and their composition. En *Engineering tribology* (third ed., págs. 51-101). Burlington: Butterworth-Heinemann.

Ståhl, J-E., Schultheiss, F., Hägglund, S. (2011). Analytical and experimental determination of the Ra surface roughness during turning. *Procedia Engineering*, 19, 349–356.

Stanford, M., Lister, P.M., Kibble, K.A. (2007). Investigation into the effect of cutting environment on tool life during the milling of a BS970-080A15 (En32b) low carbon steel. *Wear*, 262(11-12), 1496–1503.

Stanford, M., Lister, P.M., Morgan, C., Kibble, K.A. (2009). Investigation into the use of gaseous and liquid nitrogen as a cutting fluid when turning BS 970-80A15 (En32b) plain carbon steel using WC–Co uncoated tooling. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2), 961–972.

- Štěpina, V., Veselý, V. (1992). The Classification and Applications of Liquid Lubricants. *Tribology Series*, 23, 408-663.
- Stoic, A., Pusavec, F., Kopac, J. (2009). Cutting disturbances influenced by variations in contact surface geometry. *Machining Science and Technology*, 13(4), 516–528.
- Strafford, K.N., Subramanian, C. (1995). Surface engineering: an enabling technology for manufacturing industry. *Journal of Materials Processing Technology*, 53(1-2), 393-403.
- Suh, N.P. (1980). New theories of wear and their implications for tools materials. *Wear*, 62(1), 1-20.
- Taguchi, G. (1987). *System of experimental design* (Vol. 2). New York: American Supplier Institute.
- Tan, X.C., Liu, F., Cao, H.J., Zhang, H. (2002). A decision making framework model of cutting fluid selection for green manufacturing and a case study. *Journal of Materials Processing Technology*, 129(1-3), 467-470.
- Tarley, C.R.T., Silveira, G., Dos Santos, W.N.L., Matos, G.D., Da Silva, E.G.P., Bezerra, M.A., Miró, M., Ferreira, S.L.C. (2009). Chemometric tools in electroanalytical chemistry: Methods for optimization based on factorial design and response surface methodology. *Microchemical Journal*, 92(1), 58–67.
- 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.
- Teti, R. (2002). Machining of composite materials. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 51(2), 611-634.
- Tharumarajah, A., Koltun, P. (2007). Is there an environmental of using magnesium of using components for light-weighting cars? *Journal of Cleaner Production*, 15(11-12), 1007-1013.
- Tharumarajah, A., Koltun, P. (2010). Improving environmental performance of magnesium instrument panels. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(12), 1189-1195.
- Thomas, M., Beauchamp, Y. (2003). Statistical investigation of modal parameters of cutting tools in dry turning. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43(11), 1093–1106.

Tomac, N., Tønnessen, K. (1991). Formation of flank build-up in cutting magnesium alloys. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 40(1), 79-82.

Tönshoff, H.K., Kaestner, W., Schnadt, R. (1990). Machinability of forged steels in interrupted cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 21(2), 219-236.

Tönshoff, H.K., Winkler, J. (1997). The influence of tool coatings in machining of magnesium. *Surface and Coatings Technology*, 94-95, 610-616.

Tönshoff, H.K., Wobker, H.G., Cassel, C. (1994). Wear characteristics of cermet cutting tools. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 43(1), 89-92.

Tornachi, M.J.K.A., Dugdale, O.S. (1977). Fracture of cemented carbide tools in face milling. En S. A. Tobias, & F. Koenigsberger (Ed.), *Advances in Machine Tool Design and Research, Proceedings of the 18th International Machine Tool Design and Research Conference* (págs. 523-528). London: Macmillan.

Totemeier, T.C. (2004). Related designations. En *Smithells metals reference book* (eighth ed., págs. 1-14). Oxford: Butterworth-Heinemann.

Trojanová, Z., Gärtnerová, V., Jäger, A., Námešný, A., Chalupová, M., Palček, P., Lukáč, P. (2009). Mechanical and fracture properties of an AZ91 Magnesium alloy reinforced by Si and SiC particles. *Composites Science and Technology*, 69(13), 2256-2264.

Uchidate, M., Yanagi, K., Yoshida, I., Shimizu, T., Iwabuchi, A. (2011). Generation of 3D random topography datasets with periodic boundaries for surface metrology algorithms and measurement standards. *Wear*, 271(3-4), 565-570.

Ueda, K., Takenaka, T., Váncza, J., Monostori, L. (2009). Value creation and decision-making in sustainable society. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(2), 681–700.

Ugarte, A., M'Saoubi, R., Garay, A., Arrazola, P.J. (2012). Machining behaviour of Ti-6Al-4V and Ti-5553 alloys in interrupted cutting with PVD coated cemented carbide. *Procedia CIRP*, 1, 202-207.

UNE-EN ISO 4287:1999. (1997). *Especificación geométrica de productos (GPS) - Calidad superficial: Método del perfil, Términos, definiciones y parámetros del estado superficial* surface roughness parameters. Madrid: AENOR.

- Van Luttervelt, C.A., Willemse, H.R. (1984). The exit failure of cemented carbide face milling cutters Part II - Testing of commercial cutters. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 33(1), 51-54.
- Venugopal, K.A., Paul, S., Chattopadhyay, A.B. (2007). Growth of tool wear in turning of Ti-6Al-4V alloy under cryogenic cooling. *Wear*, 262(9-10), 1071-1078.
- Villeta, M., de Agustina, B., Sáenz de Pipaón, J.M., Rubio, E.M. (2011). Principal methods of experimental design and statistical analysis used in experimental studies of machining processes. *Advanced Materials Research*, 264-265, 919-924.
- Vormann, J. (2003). Magnesium: nutrition and metabolism. *Molecular Aspects of Medicine*, 24(1-3), 27-37.
- Wackermann, J. (2006). Rationality, universality, and individuality in a functional conception of theory. *International Journal of Psychophysiology*, 62(3), 411–426.
- 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, Z.G., Rahman, M., Wong, Y.S., Neo, K.S., Sun, J., Tan, C.H., Onozuka, H. (2009). Study on orthogonal turning of titanium alloys with different cooling strategies. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 42(7-8), 621-632.
- 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. En *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. (págs. 4746-4753). Oxford: Elsevier.
- Witik, R.A., Payet, J., Michaud, V., Ludwig, C., Månson, J-A.E. (2011). Assessing the life cycle costs and environmental performance of lightweight materials in automobile applications. *Composites: Part A*, 42(11), 1694-1709.

Witte, F. (2010). The history of biodegradable magnesium implants: A review. *Acta Biomaterialia*, 6(5), 1680-1692.

Xu, C., Ai, X., Huang, C. (2001). Fabrication and performance of an advanced ceramic tool material. *Wear*, 249(5-6), 503-508.

Xu, C., Huang, C., Ai, X. (2007). Cutting behavior and related cracks in wear and fracture of ceramic tool materials. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32(11-12), 1083-1089.

Ye, H.Z., Liu, X.Y. (2004). Review of recent studies in magnesium matrix composites. *Journal of Materials Science*, 39(20), 6153–6171.

Ye, Y., Chen, J., Zhou, H. (2009). An investigation of friction and wear performances of bonded molybdenum disulfide solid film lubricants in fretting conditions. *Wear*, 266(7-8), 859–864.

Yellishetty, M., Mudd, G.M., Ranjith, P.G. (2011). The steel industry, abiotic resource depletion and life cycle assessment: a real or perceived issue? *Journal of Cleaner Production*, 19(1), 78-90.

Yellowley, I., Barrow G. (1978). The assessment of tool life in peripheral milling. *Advances in Machine Tool Design and Research, Proceedings of the 19th International Machine Tool Design and Research Conference*, (págs. 443-452). London: Macmillan.

Yellowley, I., Barrow, G. (1976). The influence of thermal cycling on tool life in peripheral milling. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 16(1), 1-12.

Yildiz, Y., Nalbant, M. (2008). A review of cryogenic cooling in machining processes. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48(9), 947-964.

Yong, A.Y.L., Seah, K.H.W., Rahman, M. (2007). Performance of cryogenically treated tungsten carbide tools in milling operations. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32(7-8), 638-643.

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.

- Zaccai, E. (2012). Over two decades in pursuit of sustainable development: Influence, transformations, limits. *Environmental Development*, 1(1), 79–90.
- 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)*, (págs. 1102-1105). Inner Mongolia.
- Zhao, X., Gao, Z. (2009). Surface roughness measurement using spatial-average analysis of objective speckle pattern in specular direction. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(11), 1307-1316.
- Zhong, W., Zhao, D., Wang, X., Yu, H. (2010a). Effects of little quantity lubrication on high speed machining. *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, (págs. 75-78). Nanjing.
- Zhong, W., Zhao, Z., Wang, X. (2010b). A comparative study on dry milling and little quantity lubricant milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 50(12), 1057–1064.
- Zorev, N.N. (1963). Machining steel with a carbide tipped tool in intermittent heavy cutting conditions. *Journal of Russian Engineering*, 43(2), 43-47.
- Zorev, N.N., Sawiaskin, K.A. (1969). Carbide tool life at interrupted cut with continuous cycles. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 18(3), 555-562.

6.3 Otras fuentes documentales.

BBC. (2012). BBC. Obtenido de:

<http://www.bbc.co.uk>.

European Union. (2011). Europe in figures. Eurostat yearbook 2011. Obtenido de:

<http://epp.eurostat.ec.europa.eu>.

Fuchs. (2012). Annual Report 2011. Partnership creates value. Obtenido de:

<http://www.fuchs-oil.com>.

IOE. (2012). Images of elements. Obtenido de:

<http://www.images-of-elements.com>.

Kramer, D.A. (2012). Magnesium. 2011 minerals yearbook. Obtenido de:

<http://minerals.usgs.gov>.

MATWEB. (2012). Matweb. Obtenido de:

<http://www.matweb.com>.

SECO. (2012). Machining Navigator. MN2011:1 Update metric. Obtenido de:

<http://www.secotools.com>.

UOF. (2012). University of Glasgow. Obtenido de:

<http://www.universitystory.gla.ac.uk>.

Apéndices

A.1 Composición y propiedades de algunas aleaciones de magnesio.

Las siguientes tablas recogen la composición y propiedades de algunas de las principales aleaciones de magnesio:

Tabla A.1.1 Composición y propiedades de algunas aleaciones de magnesio forjadas (barras y formas extruidas) (ASM, 1990).

Aleación	Composición (%)	Resistencia a tracción (MPa)	Límite elástico (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Dureza (HRB)
AZ10A-F	1,2Al-0,2Mn-0,4Zn	240	145	10	ND ¹⁸
AZ21X1-F	1,8Al-0,02Mn-1,2Zn	ND	ND	ND	ND
AZ31B y C-F	3Al-1Zn	260	200	15	49
AZ61A-F	6,5Al-1Zn	310	230	16	60
AZ80A-T5	8,5Al-0,5Zn	380	275	7	82
HM31A-F	1,2Mn-3Th	290	230	10	ND
M1A-F	1,2Mn	255	180	12	44
ZC71-F	0,5-1Mn-6,5Zn-1,2Cu	360	240	5	70-80
ZK21A-F	2,3Zn-0,45Zr	260	195	4	ND
ZK40A-T5	4Zn-0,45Zr	276	255	4	ND
ZK60A-T5	6,6Zn-0,45Zr	365	305	11	88

¹⁸ ND: No disponible.

Tabla A.1.2 Composición y propiedades de algunas aleaciones de magnesio forjadas (chapas y placas) (ASM, 1990).

Aleación	Composición (%)	Resistencia a tracción (MPa)	Límite elástico (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Dureza (HRB)
AZ31B-H24	3Al-1Zn	290	220	15	73
HK31A-H24	3Th-0,6Zr	255	200	9	68
HM21A-T8	0,6Mn-2Th	230	170	11	ND

Tabla A.1.3 Composición y propiedades de algunas aleaciones de magnesio de fundición a alta presión (ASM, 1990).

Aleación	Composición (%)	Resistencia a tracción (MPa)	Límite elástico (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Dureza (HRB)
AM60A y B-F	6Al-0,13Mn	205	30	6	ND
AZ91D	9Al-0,13Mn-0,7Zn	240	35	9	ND
AS21X1	1,7Al-0,4Mn-1,1Si	220	32	4	ND
AS41XB	4,3Al-0,35Mn-1Si	230	33	3	63

Tabla A.1.4 Composición y propiedades de algunas aleaciones de magnesio de fundición en moldes de arena y permanentes (ASM, 1990).

Aleación	Composición (%)	Resistencia a tracción (MPa)	Límite elástico (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Dureza (HRB)
AM100A	10Al-0,1Mn	275	150	1	69
AZ63-T6	6Al-0,15Mn-3Zn	275	130	5	73
AZ81A-T4	7,6Al-0,13Mn-0,7Zn	275	83	15	55
AZ91C Y E-T6	8,7Al-0,13Mn-0,7Zn	275	145	6	66

A.2 Recomendaciones operativas para el mecanizado de magnesio.

A continuación, se presentan parámetros de corte comúnmente empleados en las principales operaciones de mecanizado con aleaciones de magnesio.

Tabla A.2.1 Parámetros de corte en el torneado y mandrinado para las aleaciones de magnesio (ASM, 1989).

	Velocidad de corte (m/min)	Avance (mm/rev)	Máxima profundidad de corte (mm)
Desbaste	90 – 185	0,75 - 2,5	12,7
	185 - 305	0,51 - 2,0	10,2
	305 - 460	0,25 - 1,5	7,62
	460 - 610	0,25 - 1,0	5,08
	610 - 1.525	0,25 - 0,76	3,81
Acabado	90 - 185	0,13 - 0,64	2,54
	185 - 305	0,13 - 0,51	2,03
	305 - 1.525	0,076 - 0,38	1,27

Tabla A.2.2 Parámetros de corte en el taladrado y en otras operaciones para las aleaciones de magnesio (ASM, 1989).

	Velocidad de corte (m/min)	Avance (mm/rev) para el diámetro:							
		1,6 mm	3,2 mm	6,4 mm	13 mm	19 mm	25 mm	38 mm	51 mm
Taladrado	43-100	0,025	0,076	0,18	0,3	0,41	0,51	0,64	0,76
Taladrado con refrigeración	198	0,025	0,025	0,076	0,13	0,2	0,25	0,25	0,25
Escariado	120	ND	0,13	0,20	0,3	ND	0,41	0,51	0,76
Avellado con HSS	195	ND	ND	0,13	0,15	0,18	0,22	0,28	0,33
Avellanado con carburo	490	ND	ND	0,15	0,18	0,20	0,25	0,30	0,36

Tabla A.2.3 Parámetros de corte en el fresado frontal y fresado periférico para las aleaciones de magnesio (ASM, 1989).

	Desbaste 6,35 mm de profundidad		Acabado 0,64 mm de profundidad	
	Velocidad de corte (m/min)	Avance (mm/diente)	Velocidad de corte (m/min)	Avance (mm/diente)
Fresado frontal HSS	275	0,56	460	0,36
Fresado frontal con carburo	Máxima	0,64	Máxima	0,30
Fresado periférico HSS	275	0,46	395	0,41

Tabla A.2.4 Parámetros de corte en el fresado para las aleaciones de magnesio (ASM, 1989).

	Velocidad de corte (m/min)	Avance (mm/rev) para diámetros de herramienta de:		
		6,4 mm	19 mm	25-50 mm
Desbaste HSS	245	0,1	0,23	0,28
Acabado HSS	305	0,08	0,13	0,20
Acabado con carburo	Máx	0,1	0,25	0,30
Desbaste con carburo	Máx	0,08	0,13	0,23

